

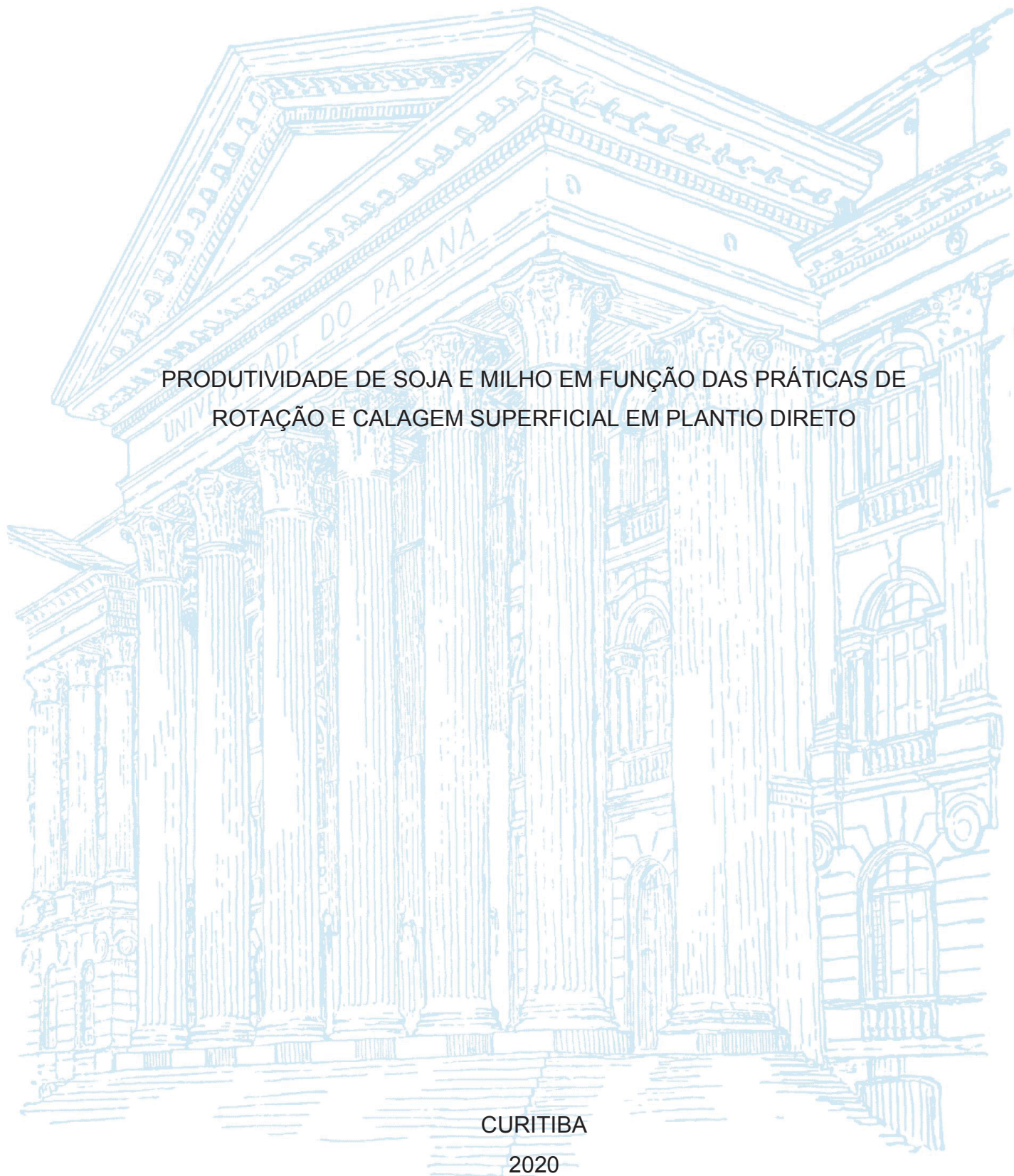
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALBERT MATHEUS MELINSKI

PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DAS PRÁTICAS DE
ROTAÇÃO E CALAGEM SUPERFICIAL EM PLANTIO DIRETO

CURITIBA

2020



ALBERT MATHEUS MELINSKI

PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DAS PRÁTICAS DE
ROTAÇÃO E CALAGEM SUPERFICIAL EM PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Coorientadora: M.e Sandra Mara Vieira Fontoura

CURITIBA

2020

Melinski, Albert Matheus

Produtividade de soja e milho em função das práticas de rotação e calagem superficial em plantio direto. / Albert Matheus Melinski. - Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.
Orientador: Volnei Pauletti.

Coorientadores: Antônio Carlos Vargas Motta; Sandra Mara Vieira Fontoura.

1. Soja. 2. Milho. 3. Agricultura - Produtividade. I. Pauletti, Volnei. II. Motta, Antônio Carlos Vargas. III. Fontoura, Sandra Mara Vieira. IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ALBERT MATHEUS MELINSKI** intitulada: **PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DAS PRÁTICAS DE ROTAÇÃO E CALAGEM SUPERFICIAL EM PLANTIO DIRETO**, sob orientação do Prof. Dr. VOLNEI PAULETTI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica

15/06/2020 10:29:35.0

VOLNEI PAULETTI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/06/2020 10:19:46.0

JOÃO AUGUSTO LOPES PASCOALINO

Avaliador Externo (COMITê ESTRATêGICO SOJA BRASIL)

Assinatura Eletrônica

13/06/2020 09:11:20.0

ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Com todo o meu amor e com imensa gratidão às mulheres da minha vida, minha avó Ariana e minha mãe Claudinéia, por todo o suporte, confiança, orações e ensinamentos, esta dissertação dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concebido o dom da vida e por me fazer exatamente do jeito que sou. Agradeço por nunca ter me abandonado, por manter a chama da esperança acesa dentro do meu coração e me dar oportunidades diárias de ser uma pessoa melhor.

A minha família, pelo amor, orações, conselhos e ensinamentos, em especial a minha avó Ariana e a minha mãe Claudinéia, as verdadeiras responsáveis por eu ter chego até aqui, agradeço imensamente pela confiança e principalmente pela liberdade que vocês sempre me deram para trilhar meu caminho.

Aos meus mestres, Volnei Pauletti e Antônio Carlos Vargas Motta, por me contagiarem todos os dias com o amor e entusiasmo em exercer a profissão, em especial à nossa área de fertilidade de solo e nutrição de plantas. Agradeço pela amizade, pelos ensinamentos e por serem verdadeiros exemplos de profissionais e seres humanos.

A minha namorada Julia Maria, que chegou no finalzinho dessa caminhada e me deu todo o suporte, amor e carinho necessários para manter a tranquilidade e a serenidade, e com isso, me dedicar e dar o melhor de mim nessa reta final. Obrigado por acreditar em mim.

Aos amigos que se tornaram meus irmãos durante esse período, membros do Termino, A.V.C, rep. Marlboro e ao Thales, só vocês sabem de tudo o que passamos nesses anos e sem dúvidas, não teria alcançado essa conquista sem o suporte e o apoio de vocês.

Agradeço também aos demais amigos, pela companhia, parceria e cooperação nas aulas, atividades, procedimentos e festas de confraternização, em especial ao Jorge, à Launa, Lenir, Carla e Fabiana pela paciência, cooperação e por compartilharem seus conhecimentos e experiências comigo.

À magnífica Universidade Federal do Paraná - UFPR, instituição que tenho muito orgulho, admiração e carinho, através da qual tive a honra e o privilégio de conhecer inúmeras pessoas e que me proporcionou vivenciar experiências únicas em minha vida.

Ao Setor de Ciências Agrárias - SCA, que foi minha segunda casa nesses últimos anos, ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola – DSEA e o Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo - PPGCS, agradeço a todos os

professores, técnicos e funcionários, em especial ao Seu Antônio, porteiro do setor, e à Denise, secretária do PPGCS.

À Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA e sua equipe técnica, pela condução do experimento, coletas das amostras, realização das análises e fornecimento dos dados de fertilidade do solo e produtividade das culturas. Agradecimento em especial às pessoas de Sandra Mara Vieira Fontoura e Renato Paulo de Moraes, por estarem sempre à disposição e nos atender sempre com muita atenção e carinho.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior Geral, pela concessão parcial da bolsa de mestrado.

A todas as pessoas envolvidas, que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse alcançar mais esta conquista em minha vida.

“O sucesso chega mais rápido para quem possui paixão pelo seu trabalho”

Jacob Petry

RESUMO

Culturas utilizadas em rotação com soja e milho podem influenciar na necessidade de reaplicação de calcário no plantio direto (PD) e nos seus efeitos em profundidade. Deste modo, o objetivo desse trabalho consistiu em determinar a contribuição de diferentes espécies de culturas de inverno e aplicações de calcário na correção do solo em profundidade e na produtividade de soja e milho no sistema plantio direto. O presente estudo foi conduzido em experimento de longo prazo, instalado no ano de 2004, na estação experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), no município de Guarapuava – PR. O solo da área é classificado como Latossolo Bruno Alumínico. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com 4 repetições. Nas parcelas principais foram adotados três sistemas de rotação de culturas diferenciando-se pelas espécies cultivadas no inverno. Nas subparcelas, foram aplicadas quatro doses de calcário 0, 3,5, 5,7 e 11,1 t ha⁻¹. A aplicação do calcário foi realizada na superfície do solo, utilizando calcário dolomítico. Foram determinadas as produtividades de grãos de milho e soja por safra, e calculado as produtividades acumuladas. Análises de rotina foram realizadas em amostras de solo coletadas nas camadas 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 0 a 20 cm nos anos de condução do experimento. Em área manejada sob PD há mais de 20 anos, o cultivo de diferentes espécies de plantas destinadas à produção de grãos ou biomassa no inverno não difere na contribuição para produtividade de grãos de milho e soja, tampouco altera a necessidade de calagem para estas culturas ou beneficia os efeitos da calagem em profundidade. Níveis de calagem superficiais que proporcionaram a manutenção do pH_{CaCl2} acima de 4,9 e da V% acima de 55 foram suficientes para manutenção da produtividade de soja e milho por várias safras. A calagem realizada em superfície, aumentou o pH_{CaCl2}, Ca²⁺, Mg²⁺, SB e a V%, reduziu o (H + Al) e manteve baixos teores de Al³⁺. A migração dos efeitos em profundidade é mais rápida quando são empregadas doses elevadas de corretivo.

Palavras-chave: Pré-culturas. Frente de alcalinização. Produtividade de grãos. Calagem de manutenção.

ABSTRACT

Crops used in rotation with soybean and corn can influence the need of reapplying lime in no-tillage (NT) and its effects in depth. Thus, the objective of this work was to determine the contribution of different species winter crops and applications of limestone in the correction of soil in depth and in the productivity of soybean and corn in the no-tillage system. The present study was conducted in a long-term experiment, installed in 2004, at the experimental station of the Agrarian Foundation of Agricultural Research (FAPA), in the municipality of Guarapuava – Paraná State. The area's soil is classified as Oxisol. The experimental design adopted was randomized blocks in subdivided plots, with 4 replications. In the main plots three crop rotation systems were adopted, differing according to the species grown in winter. In the subplots, four doses of limestone 0, 3,5, 5,7 and 11,1 t ha⁻¹ were applied. The application of the limestone was carried out on the soil surface, using dolomitic limestone. The productivity of corn and soybean grains per harvest was determined, and the accumulated productivity was calculated. Routine analyzes were performed on soil samples collected in layers 0 to 10, 10 to 20, 20 to 40, 40 to 60 and 0 to 20 cm in the years of the experiment. In an area managed under NT for more than 20 years, the cultivation of different grain or biomass species in the winter does not differ in the contribution to the productivity of corn and soybeans, nor does it alter the need for liming for these crops or benefit the effects of liming in depth. Surface levels of liming that maintained pH_{CaCl2} above 4.9 and V% above 55 were sufficient to maintenance of soybean and corn productivity for several harvests. Liming carried out on the surface increased pH_{CaCl2}, Ca²⁺, Mg²⁺, SB and V%, reduced (H + Al) and maintained low levels of Al³⁺. The migration of effects in depth is faster when high doses of lime are used.

Keywords: Pre-crops. Alkalinization front. Grain productivity. Maintenance liming

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VISÃO GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL	22
FIGURA 2 – AMOSTRAGEM DE SOLO UTILIZANDO TRADO DO TIPO CALADOR.	26

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURAS MÍNIMA (▲), MÉDIA (■) E MÁXIMA (◆) ANUAIS NO PERÍODO DE 2004 A 2014 NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA ENTRE RIOS - PR.....	23
GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NO pH_{CaCl_2} (A), NOS TEORES DE Al^{3+} (B), Ca^{2+} (C), Mg^{2+} (D) E NA SATURAÇÃO POR BASES (F) NA CAMADA 0 A 20 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	33
GRÁFICO 3 – INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NO pH_{CaCl_2} (A), NOS TEORES DE Al^{3+} (B) E DE $H+Al$ (C) NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	43
GRÁFICO 4 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS VALORES DE MATÉRIA ORGÂNICA (A), E SATURAÇÃO POR BASES (B) E POR Al^{3+} (C) NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	44
GRÁFICO 5 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS VALORES DE $CTC_{pH7,0}$ NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	45
GRÁFICO 6 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS TEORES DE Ca^{2+} (A), Mg^{2+} (B) E NA SOMA DE BASES (C) NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	46
GRÁFICO 7 – CORRELAÇÕES ENTRE OS VALORES DE pH_{CaCl_2} DAS CAMADAS A1 (0 A 10 CM E 10 A 20 CM), A2 (10 A 20 CM E 20 A 40 CM), A3 (20 A 40 CM E 40 A 60 CM) E A4 (0 A 10 CM E 20 A 40 CM).	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VARIÁVEIS QUÍMICAS DA CAMADA DE 0 a 20 CM DO SOLO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO (11/05/04).....	23
TABELA 2. SEQUÊNCIA DE CULTURAS UTILIZADAS EM CADA ROTAÇÃO DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO E RESPECTIVAS CULTIVARES..	24
TABELA 3 – DATAS DE SEMEADURA E COLHEITA POR SAFRA E ADUBAÇÃO DE SEMEADURA, COBERTURA E QUANTIDADE DE N TOTAL APLICADA.....	25
TABELA 4 – INFLUÊNCIA DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS POR SAFRA E NA PRODUTIVIDADE ACUMULADA POR CULTURA E TOTAL DE MILHO E SOJA, E PRODUTIVIDADE RELATIVA EM RELAÇÃO À ROTAÇÃO DE CULTURAS COM PRODUÇÃO DE GRÃOS NO INVERNO, NO PERÍODO DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	28
TABELA 5 – PRODUTIVIDADE, PRODUTIVIDADE RELATIVA EM RELAÇÃO A MAIOR DOSE DE CALCÁRIO APLICADA, PRODUTIVIDADE ACUMULADA E PRODUTIVIDADE ACUMULADA TOTAL DE GRÃOS DE SOJA E MILHO NO PERÍODO DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO, EM FUNÇÃO DOS NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS NA SUPERFÍCIE DO SOLO NO INÍCIO DO EXPERIMENTO.	30
TABELA 6 – VÁRIAVEIS QUÍMICAS DAS CAMADAS DE 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM DO SOLO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO. (11/05/04).....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2 CAPÍTULO I: CALAGEM DE MANUTENÇÃO PARA SOJA E MILHO SOB DIFERENTES ROTAÇÕES DE CULTURAS EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	19
2.1 RESUMO.....	19
2.2 ABSTRACT	20
2.3 INTRODUÇÃO	21
2.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.4.1 CARACTERIZAÇÃO E CONDUÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	22
2.4.2 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS	25
2.4.3 COLETA E ANÁLISE DE SOLO.....	26
2.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	27
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
2.5.1 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS	27
2.5.2 FERTILIDADE DO SOLO.....	31
2.6 CONCLUSÕES	35
2.7 REFERÊNCIAS.....	35
3 CAPÍTULO II: PRÁTICAS DE CALAGEM E ROTAÇÃO DE CULTURAS NAS VARIÁVEIS QUÍMICAS DO SOLO EM SUBSUPERFÍCIE EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO.....	38
3.1 RESUMO.....	38
3.2 ABSTRACT	39
3.3 INTRODUÇÃO	40
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL.....	41
3.4.2 ANÁLISE DE SOLO	42
3.4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
3.5 RESULTADOS	42
3.5.1 CAMADA 0 a 10 cm	42
3.5.2 CAMADA 10 a 20 cm	44
3.5.3 CAMADA 20 a 40 cm	46
3.5.4 CAMADA 40 a 60 cm	47
3.6 DISCUSSÃO	48

3.7 CONCLUSÕES	54
3.8 REFERÊNCIAS	54
CONCLUSÃO GERAL.....	58
4 REFERÊNCIAS.....	59
5 APÊNDICES	64

1 INTRODUÇÃO GERAL

A elevada acidez é um problema comum para grande parte dos solos, principalmente nas regiões tropicais úmidas do planeta. Os solos destas regiões são caracterizados também pela baixa saturação por bases, baixos teores de fósforo disponível, elevados teores de alumínio e/ou manganês trocáveis e alta acidez potencial (H+Al) (LICHT; PLAWIAK, 2005; NEPAR, 2019). Nestes solos, o uso de corretivos de acidez, principalmente do calcário, em doses adequadas tem sido fundamental para se atingir o potencial produtivo das culturas (MIRANDA et al., 2005; PAULETTI et al., 2014; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015).

A aplicação de calcário aumenta os níveis de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), a saturação por bases (V%) e o pH do solo, além de neutralizar o Al^{3+} que é tóxico para as plantas (PAULETTI et al., 2014; BORTOLINI et al., 2016). Em longo prazo, seu uso pode favorecer acréscimos nos teores de carbono orgânico e de nitrogênio total do solo (BRIEDIS et al., 2012; WIJANARKO; TAUFIQ, 2016; COSTA et al., 2018).

O principal método de recomendação da calagem é baseado na elevação da saturação por bases (NEPAR, 2019), que tem como princípio a relação existente entre o pH e a V% do solo (SILVA et al., 2008). Valores adequados dessas variáveis para diferentes culturas, principalmente em plantio direto, são fundamentais para manter bons índices de produtividade, pois as plantas possuem distintas tolerâncias e sensibilidades a essas variáveis (PALHANO et al., 1984; VIEIRA et al., 2012). A amostragem para orientar a recomendação de calcário geralmente é realizada na camada de 0 a 20 cm, tanto no sistema convencional, quanto no plantio direto (AGUIAR et al., 2014; NEPAR, 2019), ou camada de 0 a 10 cm no plantio direto e 0 a 20 cm no preparo convencional (PC) (CQFS RS/SC, 2016).

O sistema de plantio direto (PD) é um sistema conservacionista adotado em vários países tropicais, sub-tropicais e de clima temperado (DERPSCH et al., 2010) que abrange uma área de aproximadamente 32 milhões de hectares (ha) no Brasil (EMATER-PR, 2014). Na implantação desse sistema é recomendada a aplicação e a incorporação do calcário até 20 cm de profundidade, enquanto a calagem de manutenção é realizada na superfície do solo, sem incorporação (NEPAR, 2019).

A calagem realizada em superfície forma uma frente de alcalinização que avança em profundidade de acordo com a dose do corretivo e o tempo após a

aplicação, formando um gradiente de acidez a partir da superfície do solo (SANTOS et al., 2000; CAIRES et al., 2015). No PD a migração dos efeitos da calagem em subsuperfície é lento e pode ser beneficiado por plantas de cobertura (FRANCHINI et al., 1999; ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999).

Assim, este estudo foi conduzido em experimento de longo prazo, com o objetivo de verificar a necessidade de reaplicação de calcário em área de PD sob diferentes rotações de culturas, a fim de manter altas produtividades de grãos. Além disso, indicar as mudanças nas variáveis químicas em diferentes camadas do solo em decorrência das práticas de calagem superficial e rotação de culturas.

2 CAPÍTULO I: CALAGEM DE MANUTENÇÃO PARA SOJA E MILHO SOB DIFERENTES ROTAÇÕES DE CULTURAS EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

2.1 RESUMO

Espécies de plantas de inverno utilizadas em rotação com soja e milho, destinadas à produção de grãos ou de biomassa, podem influenciar os processos de acidificação do solo e conseqüentemente, a frequência e dose de reaplicação do calcário no PD a longo prazo. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de diferentes espécies de inverno destinadas à produção de grãos e biomassa, na produtividade de soja e milho, bem como nos efeitos e necessidade de reaplicação de calcário em plantio direto. Um experimento de longo prazo, instalado no ano de 2004, foi conduzido em área manejada sob plantio direto há mais de 20 anos, na estação experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), no município de Guarapuava – PR. O solo da área é classificado como Latossolo Bruno Alumínico. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com 4 repetições. Nas parcelas principais foram adotados três sistemas de rotação de culturas diferenciando-se pelas espécies cultivadas no inverno e seu objetivo (grãos ou biomassa para cobertura do solo). Nas subparcelas foram aplicadas quatro doses de calcário 0, 3,5, 5,7 e 11,1 t ha⁻¹. A aplicação do calcário foi realizada na superfície do solo, sem incorporação, utilizando calcário dolomítico. Os cultivos de inverno destinados à produção de grãos ou biomassa não influenciaram a produtividade acumulada de grãos de soja e milho, tampouco alteraram os efeitos da calagem ao longo de 10 safras. Após aplicação, os efeitos da calagem na camada 0 a 20 cm foram proporcionais à dose aplicada, ocorrendo a partir de 5 e 35 meses para o pH_{CaCl2} e para os teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e V% respectivamente, além de manter os níveis de Al³⁺ próximos à neutralidade durante 107 meses. A aplicação de uma única dose de calcário que proporcione a manutenção do pH_{CaCl2} acima de 4,9 e da V% acima de 55 na camada de 0-20 cm do solo, é suficiente para manutenção da produtividade de soja e milho durante o período de 10 anos. Nas condições de estudo, esta dose foi aquela calculada para elevação da saturação por bases para 65%.

Palavras-chave: Pré-culturas. Acidez do solo. Frente de alcalinização. Produtividade de grãos.

2.2 ABSTRACT

Winter plant species used in rotation with soybeans and corn, intended plantio dire for the production of grains or biomass, can influence the processes of acidification of the soil and, consequently, the frequency and dose of limestone reapplication in the NT system in the long term. The objective of the present work was to evaluate the influence of different winter species destined for the production of grains and biomass, on the productivity of soybeans and corn, as well as on the effects and the need to reapply lime in no-tillage. A long-term experiment, installed in 2004, was carried out in an area managed under no-tillage for over 20 years, at the experimental station of the Agricultural Research Foundation (FAPA), in the municipality of Guarapuava – Paraná State. The area's soil is classified as Oxisol. The experimental design adopted was randomized blocks in subdivided plots, with 4 replications. In the main plots, three crop rotation systems were adopted, differing according to the species grown in winter and their objective (grains or biomass for soil cover). In the subplots, four doses of limestone 0, 3,5, 5,7 and 11,1 t ha⁻¹ were applied. The application of the limestone was carried out on the soil surface, without incorporation, using dolomitic limestone. Winter crops for grains or biomass production did not influence the accumulated productivity of soybeans and corn, nor did it alter the effects of liming over 10 harvests. After application, the effects of liming in layer 0 to 20 cm were proportional to the applied dose, occurring from 5 and 35 months for pH_{CaCl2} and for the levels of Ca²⁺, Mg²⁺ and V% respectively, in addition to maintaining the levels of Al³⁺ close to neutrality for 107 months. The application of a single dose of lime that maintains pH_{CaCl2} above 4.9 and V% above 55 in the 0 to 20 cm layer of soil, is sufficient to maintain soybean and corn productivity during the 10-year period. Under the study conditions, this dose was the one calculated to increase base saturation to 65%.

Keywords: Pre-crops. Soil acidity. Alkalinization front. Grain productivity

2.3 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca mundialmente como um dos maiores produtores de grãos, sendo a soja e o milho os principais cultivos. Segundo o IBGE (2018), o volume anual de produção de grãos de soja e milho (1ª e 2ª safra) no país é de aproximadamente 200 milhões de toneladas. Atualmente, com o PD amplamente difundido no país, abrangendo uma área de mais de 32 milhões de ha, cerca de 86% desta produção ocorre em lavouras sob PD (EMATER-PR, 2014). Nesse sistema, a calagem de manutenção é realizada superficialmente e tem sido fundamental para atingir o potencial produtivo destas culturas (MIRANDA et al., 2005; PAULETTI et al., 2014; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015).

No estado do Paraná, pioneiro no PD, a recomendação da calagem para soja e milho é baseada na elevação da V% para 60 e 70, respectivamente, o que remete a uma maior sensibilidade/exigência da gramínea (NEPAR, 2019). Porém, maior sensibilidade à acidez da leguminosa foi reportada por diferentes autores (VIEIRA et al., 2012; FONTOURA et al., 2019).

A obtenção de altas produtividades mesmo em condições de pH baixo é frequentemente relatada no PD. Um dos motivos é que cerca de 80-90% do Al^{3+} presente na solução do solo está na forma orgânica e, portanto, apresenta baixa toxicidade (VIEIRA et al., 2009; ALLEONI et al., 2010; INDA et al., 2010). Porém, baixos valores de pH podem diminuir a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio implicando em menores produtividades de leguminosas (GRAHAM, 1992; BALA et al., 2003; VIEIRA et al., 2012; FONTOURA et al., 2019).

Mesmo após a correção do solo, os processos de acidificação continuam ocorrendo, sendo que no PD os principais fatores relacionados a esse processo são a reação dos adubos nitrogenados e a exportação de bases pelos grãos na colheita (CAIRES et al., 2015; HAO et al., 2018). Ainda assim, a acidificação é lenta no PD (SANTOS et al., 2018; LI et al., 2019; VARGAS et al., 2019).

Diante disso, o propósito de cultivo (grãos ou biomassa) das espécies de inverno utilizadas em rotação com a soja e o milho, poderiam estar influenciando nos processos de acidificação do solo e conseqüentemente, na dose e frequência de reaplicação do calcário no PD a longo prazo. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência do cultivo e uso de diferentes espécies de inverno na

produtividade de soja e milho, bem como nos efeitos e frequência de reaplicação de calcário em plantio direto.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 CARACTERIZAÇÃO E CONDUÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi conduzido em experimento de longo prazo instalado no ano de 2004, em área manejada sob plantio direto há mais de 20 anos, na estação experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), no município de Guarapuava – PR (FIGURA 1). As coordenadas geográficas do local são 25°32'31" S 51°30'12" O e 1103 m de altitude.

FIGURA 1 – VISÃO GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL

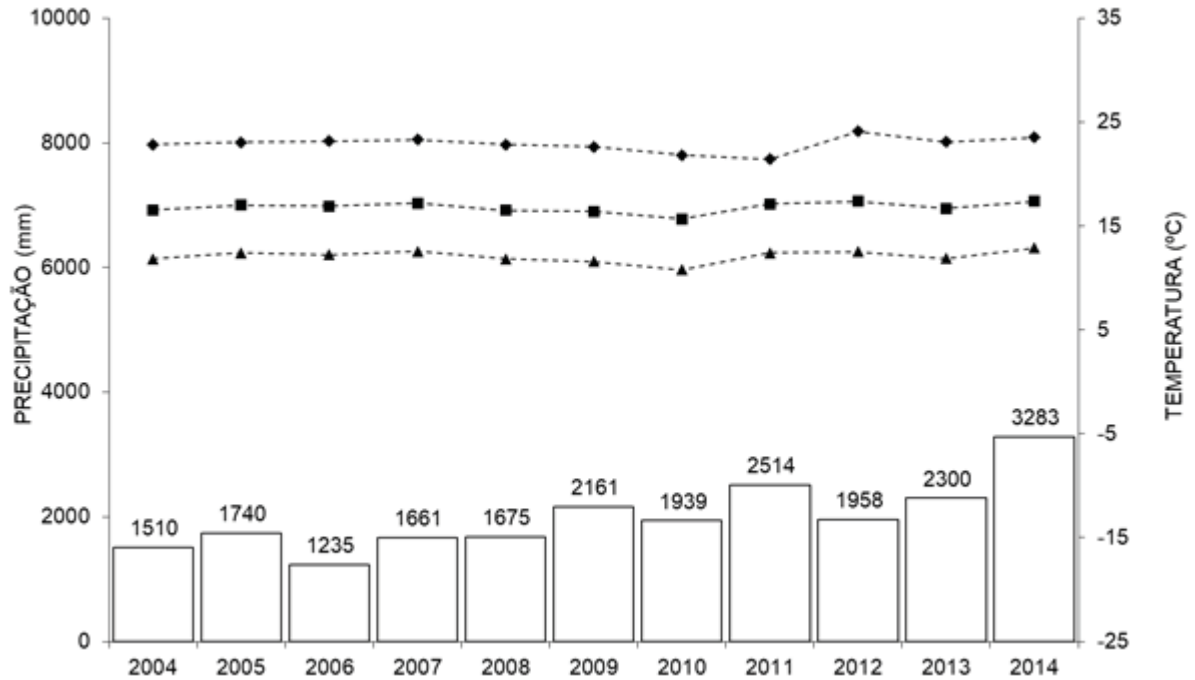


FONTE: O autor (2019).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfb (ALVARES et al., 2014), clima temperado. Durante os 10 anos de condução do

experimento a precipitação média anual foi de 1998 mm e a temperatura média anual de 17° C (GRÁFICO 1).

GRÁFICO 1 - PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURAS MÍNIMA (▲), MÉDIA (■) E MÁXIMA (◆) ANUAIS NO PERÍODO DE 2004 A 2014 NA ESTAÇÃO METEREOLÓGICA ENTRE RIOS - PR.



FONTE: O autor (2020).

O solo da área é classificado como Latossolo Bruno Alumínico (EMBRAPA, 2018), que corresponde ao Oxisol (STAFF, 1999), de textura argilosa, profundo e bem drenado. As variáveis químicas do solo na camada de 0 a 20 cm anterior à instalação do experimento constam na TABELA 1.

TABELA 1. VARIÁVEIS QUÍMICAS DA CAMADA DE 0 a 20 CM DO SOLO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO (11/05/04).

MO	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC _{pH7,0}	P	V	m
%	CaCl ₂	-----			cmol _c dm ⁻³	-----		mg dm ⁻³	---	%
4,7	4,8	0,05	8,36	5,5	2,0	0,41	16,3	21,4	49	0,6

MO – Matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio

FONTE: O autor (2020).

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com 4 repetições. Nas parcelas principais (12,8 x 20 m), foram adotados três sistemas de rotação de culturas (rotações 1 e 2 destinadas a produção de biomassa e rotação 3 destinada a produção de grãos), diferenciando-se pelas espécies cultivadas no inverno. Os esquemas de rotação durante os anos de condução do experimento constam na TABELA 2. Nas subparcelas (6,4 x 10,0 m), foram aplicadas quatro doses de calcário 0, 3,5, 5,7 e 11,1 t ha⁻¹ (sem aplicação e aplicação para elevar a V% para 65, 75 e 100) e foram denominadas controle e níveis baixo, médio e alto de calagem, respectivamente. A aplicação do calcário foi realizada em dose única no dia 17/06/2004 utilizando calcário dolomítico, com 29% de CaO, 19% de MgO e PRNT de 75,6%, aplicado na superfície do solo, sem incorporação.

TABELA 2. SEQUÊNCIA DE CULTURAS UTILIZADAS EM CADA ROTAÇÃO DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO E RESPECTIVAS CULTIVARES.

Safr	Cultura*			Variedade		
	Rotação			Rotação		
	1	2	3	1	2	3
2004	Aveia	Nabo	Cevada	UFRGS 15	Forageiro	BRS 225
2004/05	Soja	Soja	Soja	BRS MACOTA	BRS MACOTA	BRS MACOTA
2005	Nabo	Aveia	Aveia G	Forageiro	UFRGS 15	URS 22 – Londrina
2005/06	Milho	Milho	Milho	P 30P34	P 30P34	P 30P34
2006	Aveia	Nabo	Trigo	FAPA – 5	Forageiro	BRS Umbú
2006/07	Soja	Soja	Soja	CD 215	CD 215	CD 215
2007	Nabo	Aveia	Cevada	Forageiro	FAPA 6	BRS 195
2007/08	Soja	Soja	Soja	CD 215	CD 215	CD 215
2008	Aveia	Nabo	Aveia G	FAPA – 4	Forageiro	FAPA 4 – Louise
2008/09	Soja	Soja	Soja	CD 215	CD 215	CD 215
2009	Nabo	Nabo	Nabo	Forageiro	Forageiro	Forageiro
2009/10	Milho	Milho	Milho	P 30R50 H	P 30R50 H	P 30R50 H
2010	Nabo	Aveia	Trigo	Forageiro	FAPA 4 – Louise	BRS Guamirim
2010/11	Soja	Soja	Soja	FPS Urano	FPS Urano	FPS Urano
2011	Aveia	Nabo	Cevada	FAPA 4 – Louise	Forageiro	BRS CAUÊ
2011/12	Soja	Soja	Soja	FPS Urano	FPS Urano	FPS Urano
2012	Nabo	Aveia	Aveia G	Forageiro	FAPA 4 – Louise	FAPA 4 – Louise
2012/13	Soja	Soja	Soja	ROOS Camino	ROOS Camino	ROOS Camino
2013	Aveia	Nabo	Nabo	URS Taura	Forageiro	Forageiro
2013/14	Milho	Milho	Milho	P 30F53 YH	P 30F53 YH	P 30F53 YH
2014	Nabo	Aveia	Trigo	Forageiro	URS Taura	BRS Campeiro
2014/15	Soja	Soja	Soja	TMG 7262	TMG 7262	TMG 7262

*Aveia = aveia branca para produção de biomassa; Aveia G = aveia branca para produção de grãos; Nabo = nabo forrageiro para produção de biomassa.

FONTE: O autor (2020).

Em todas as safras, o espaçamento entre linhas das culturas utilizadas no inverno foi 0,17 m, para soja 0,4 m e para milho 0,8 m. A adubação realizada em cada cultivo consta na TABELA 3 e os tratos culturais foram realizados conforme a recomendação regional.

TABELA 3 – DATAS DE SEMEADURA E COLHEITA POR SAFRA E ADUBAÇÃO DE SEMEADURA, COBERTURA E QUANTIDADE DE N TOTAL APLICADA.

Data		Adubação kg ha ⁻¹				Total
Semeadura	Colheita	Semeadura			Cobertura*	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	N
18/06/2004	08/11/2004	0	0	0	30	30
25/11/2004	04/05/2005	0	37,5	37,5	0	0
24/06/2005	05/11/2005	0	0	0	30	30
11/11/2005	24/04/2006	40	80	80	150	190
23/06/2006	22/11/2006	0	0	0	40	40
24/11/2006	10/04/2007	0	47,5	47,5	0	0
25/06/2007	17/11/2007	0	0	0	60	60
21/11/2007	24/04/2008	0	50	50	0	0
24/06/2008	12/11/2008	0	0	0	30	30
27/11/2008	17/04/2009	0	60	60	0	0
08/06/2009	-	0	0	0	0	0
27/09/2009	13/03/2010	28	105	70	150	178
24/06/2010	14/11/2010	0	0	0	50	50
23/11/2010	18/04/2011	0	50	50	0	0
15/06/2011	09/11/2011	0	0	0	40	40
12/11/2011	10/04/2012	0	50	50	0	0
15/06/2012	30/10/2012	0	0	0	36	36
17/11/2012	07/04/2013	0	50	50	0	0
20/05/2013	-	0	0	0	0	0
27/09/2013	18/03/2014	35	91	87,5	180	215
21/06/2014	10/11/2014	0	0	0	36	36
13/11/2014	28/03/2015	0	50	50	0	0

*Adubação de cobertura no inverno só foi realizada na rotação de culturas 3.

FONTE: O autor (2020)

2.4.2 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

As produtividades de grãos de milho e soja foram obtidas na área útil da parcela, colhendo-se 3,2 x 4 m (8 linhas de 4 metros na soja e 4 linhas de 4 metros no milho). Após a colheita e trilha, os grãos foram pesados e posteriormente foi determinada a umidade, com cálculo da produtividade em kg ha^{-1} a 130 g kg^{-1} de umidade.

2.4.3 COLETA E ANÁLISE DE SOLO

As amostras de solo foram coletadas na camada 0 a 20 cm em novembro de 2004, maio de 2005, maio de 2006, maio de 2007, maio de 2009, maio de 2010, abril de 2011, maio de 2012, maio de 2013 e maio de 2014 na entrelinha da cultura anterior com auxílio de trado do tipo calador (FIGURA 2). Cada amostra foi composta por seis subamostras. As amostras foram secas, peneiradas utilizando peneira de malha 2 mm e realizou-se análise de rotina.

FIGURA 2 – AMOSTRAGEM DE SOLO UTILIZANDO TRADO DO TIPO CALADOR.



FONTE: O autor (2019).

A medição do $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ foi realizada em uma suspensão de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (1:2,5 v/v solo solução). A acidez potencial (H+Al) foi estimada após leitura do pH com adição de solução tamponada SMP às amostras de solo, utilizando-se a correlação com o índice SMP (RAIJ; QUAGGIO, 1983). O Ca^{2+} , Mg^{2+} e o Al^{3+} foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , após essa etapa foram determinados o Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrometria de absorção atômica e por titulação com $\text{Na}(\text{OH})$ foi determinado o Al^{3+} . O K^+ e o P foram extraídos com Mehlich 1 e determinados por fotometria de chama e método colorimétrico, respectivamente (PAVAN et al., 1992). A MO foi obtida pela transformação do carbono orgânico determinado pelo método colorimétrico (QUAGGIO; RAIJ, 1979). A V% foi calculada através da fórmula:

$$V\% = \text{SB} \cdot 100 / \text{CTC}_{\text{pH } 7,0} \quad \text{onde, SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ \text{ e}$$

$$\text{CTC}_{\text{pH } 7,0} = \text{SB} + (\text{H}+\text{Al})$$

Eventuais análises de pH do solo que foram realizadas em água, foram transformadas para pH em CaCl_2 pela subtração de 0,6 unidades de pH, conforme a relação obtida entre pH do solo em água e em CaCl_2 , verificada previamente em estudos desenvolvidos na região pela Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA).

2.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises foram realizadas com auxílio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

Quase 10 anos após a aplicação de calcário, as produtividades de soja e milho (TABELAS 4 E 5) obtidas estão acima da média estadual de 3508 kg ha^{-1} e

8748 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2018). Tal fato está associado à condição de manejo do solo e ao PD estabilizado e corrigido (TABELA 1). O clima da região com precipitação e ausência de período seco e grande amplitude entre temperatura diurna e noturna (GRÁFICO 1), também favorecem especialmente a cultura do milho.

Na produtividade acumulada das oito safras de soja e três de milho, não foi observado efeito da pré-cultura (grãos ou biomassa). Ao longo do tempo as diferenças observadas por safra foram anuladas e a produtividade acumulada de soja, milho e total foram iguais para as três rotações avaliadas (TABELA 4). Portanto, o cultivo de grãos no inverno não compromete a produção de verão e resulta em acréscimo na produção de 30000 kg ha⁻¹ de grãos na mesma área, em nove safras (dados não apresentados), atribuindo maior eficiência do uso do solo e dos recursos disponíveis em relação às rotações destinadas à produção de biomassa no inverno.

No presente trabalho, além do solo corrigido e com alta fertilidade, foram aplicadas altas quantidades de adubo no decorrer do experimento (TABELA 1 e TABELA 3), o que diminui a probabilidade do efeito das pré-culturas utilizadas. Michelin et al. (2019), por exemplo, constataram maior produtividade de grãos de milho não adubado com nitrogênio quando o cultivo foi realizado após nabo forrageiro em relação ao milho após pousio ou aveia preta, em duas das três safras avaliadas.

TABELA 4 – INFLUÊNCIA DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS POR SAFRA E NA PRODUTIVIDADE ACUMULADA POR CULTURA E TOTAL DE MILHO E SOJA, E PRODUTIVIDADE RELATIVA EM RELAÇÃO À ROTAÇÃO DE CULTURAS COM PRODUÇÃO DE GRÃOS NO INVERNO, NO PERÍODO DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.

Safr	Cultura	Rotação de culturas ¹					
		1	2	3	1	2	3
		Grãos (kg ha ⁻¹)			Produtividade Relativa (%)		
2004/05	Soja	2835ab*	2731b	2886a	98	95	100
2005/06	Milho	9266b	10109a	9485b	98	107	100

2006/07	Soja	3680b	3802ab	3982a	92	96	100
2007/08	Soja	3151a	3228a	3087a	102	105	100
2008/09	Soja	3149a	2751b	2744b	115	100	100
2009/10	Milho	14847ab	14708b	14885a	100	99	100
2010/11	Soja	3478c	4088a	3870b	90	106	100
2011/12	Soja	4075*	3932*	3745*	109	105	100
2012/13	Soja	4633a	4562a	4493a	103	102	100
2013/14	Milho	15061a	15362a	14986a	101	103	100
2014/15	Soja	4469a	4560a	4610a	97	99	100
Prod. Acumulada Milho		39474a	39802a	39430a	100	101	100
Prod. Acumulada Soja		29470**	29653**	29416**	100	101	100
Prod. Acumulada Total		68944a	69455a	68845a	100	101	100

*Valores seguidos pela mesma letra na linha não diferem entre si - Tukey (p <0,05).

**Interação entre níveis de calagem e rotações de cultura (Tukey, p <0,05).

¹Rotação de culturas: 1 e 2 – pré-culturas utilizadas no inverno destinadas à produção de biomassa e 3 – pré-culturas utilizadas no inverno destinadas à produção de grãos.

FONTE: O autor (2020)

A aplicação do corretivo influenciou a produtividade acumulada das 11 safras de verão, mas com acréscimo observado de apenas 3%, sugerindo que nas condições do ensaio, os componentes da acidez do solo não foram limitantes a produção (TABELA 5). Além disso, o uso de apenas 2,67 Mg ha⁻¹ de calcário, foi suficiente para manter a produtividade por mais de uma década. Salienta-se que a aplicação de dose elevada não resultou em decréscimo na produtividade, situação comum a uma supercalagem realizada no PC, uma vez que nesta condição ocorre desbalanço nutricional, especialmente com micronutrientes catiônicos, pela elevação demasiada do pH na camada 0 a 20 cm (CFSEMG, 1999). A calagem superficial no PD reduz os teores de Zn e Mn no solo e no tecido foliar, mas não necessariamente

implica em deficiência destes nutrientes (RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015; MOREIRA et al., 2017;).

Verificou-se diferença de resposta ao uso de corretivo entre as duas culturas avaliadas (TABELA 5), com ausência de resposta na produtividade do milho nas 3 safras avaliadas, e acréscimo na produtividade acumulada da soja. Contudo, o aumento na produtividade da soja com a calagem, ocorreu em apenas duas das oito safras avaliadas, 2007/08 e 2012/13. Tal fato aponta para variação temporal associada a influência de outros fatores abióticos na resposta à calagem. A produtividade relativa nos seis outros anos, indicam uma pequena queda no tratamento sem calagem, variando entre 1 e 6% em relação a maior dose aplicada. Essas menores produtividades relativas de soja ao longo do experimento refletiram na menor produtividade acumulada da soja cultivada sem calagem em relação aos demais tratamentos.

TABELA 5 – PRODUTIVIDADE, PRODUTIVIDADE RELATIVA EM RELAÇÃO A MAIOR DOSE DE CALCÁRIO APLICADA, PRODUTIVIDADE ACUMULADA E PRODUTIVIDADE ACUMULADA TOTAL DE GRÃOS DE SOJA E MILHO NO PERÍODO DE CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO, EM FUNÇÃO DOS NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS NA SUPERFÍCIE DO SOLO NO INÍCIO DO EXPERIMENTO.

Safr	Cultura	Níveis de calagem ¹							
		0	Baixo	Médio	Alto	0	Baixo	Médio	Alto
		Grãos (kg ha ⁻¹)				Produtividade Relativa (%)			
2004/05	Soja	2751a*	2877a	2814a	2827a	97	102	100	100
2005/06	Milho	9451a	9630a	9722a	9676a	98	100	100	100
2006/07	Soja	3625a	3859a	3923a	3879a	93	99	101	100
2007/08	Soja	2919b	3221a	3266a	3214a	91	100	102	100
2008/09	Soja	2727a	2936a	2951a	2911a	94	101	101	100
2009/10	Milho	14796a	14810a	14742a	14905a	99	99	99	100
2010/11	Soja	3798ab	3871a	3722b	3857ab	98	100	96	100
2011/12	Soja	3941**	3940**	3932**	3856**	99	97	104	100
2012/13	Soja	4310b	4597ab	4695a	4658a	93	99	101	100
2013/14	Milho	15098a	14874a	15211a	15360a	98	97	99	100

2014/15	Soja	4357a	4574a	4619a	4636a	94	99	100	100
	Prod. Acumulada Milho	39345a	39314a	39675a	39941a	99	98	99	100
	Prod. Acumulada Soja	28429*	29616*	29922*	29838*	95	99	100	100
	Prod. Acumulada total	67774b	69188a	69596a	69779a	97	99	100	100

*Valores seguidos pela mesma letra na linha não diferem entre si - Tukey (p <0,05).

**Interação entre níveis de calagem e rotações de cultura (Tukey, p <0,05).

¹ Níveis de calagem: 0- controle, Baixo – 2,67 t ha⁻¹, Médio – 4,29 t ha⁻¹ e Alto – 8,36 t ha⁻¹ de calcário dolomítico.

FONTE: O autor (2020).

A maior sensibilidade à acidez da soja comparativamente ao milho também foi reportada por diferentes autores (VIEIRA et al., 2012; FONTOURA et al., 2019). Embora pequeno, o incremento na produtividade em relação ao tratamento controle deve estar relacionado com a limitação da nodulação e da fixação biológica de nitrogênio que ocorre em pH_{H2O} <5,5 (pH_{CaCl2} ~4,9) (GRAHAM, 1992; BALA et al., 2003).

Assim, os resultados obtidos contrariam a recomendação regional para calagem (NEPAR, 2019), que orienta para manutenção de maior valor de V% e pH para a cultura do milho em relação a soja.

Considerando que a produtividade da soja obtida com uso de 2,67 Mg ha⁻¹ de calcário em 11 anos foi igual as demais doses e não ocorreu resposta para a cultura do milho, esta deve ser a dose recomendada, na rotação de cultura, para sistema de plantio direto estabilizado. Ou seja, o equivalente a 250 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de corretivo seria o suficiente para manter a produtividade das culturas.

2.5.2 FERTILIDADE DO SOLO

Os resultados das análises para pH_{CaCl2}, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e V% constam no GRÁFICO 2 e indicam mudança destas variáveis ao longo do tempo.

Três comportamentos distintos do pH podem ser observados (GRÁFICO 2A): 1) Nos dois maiores níveis de calagem constatou-se elevação do pH até 2010, 71 meses após a aplicação, seguido de estabilização em valores maiores aos

iniciais; 2) No nível baixo aplicado ocorreu pequena elevação do pH até 2010, e após pequeno decréscimo, e estabilização em valores semelhantes aos do início do experimento ; 3) No tratamento controle ocorreu manutenção do $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ próximo a 4,9 em cinco das seis primeiras avaliações e houve decréscimo a partir de então. O valor de estabilização do pH para cada tratamento foi diretamente relacionado aos níveis de calagem, próximo de 5,5, 5,2 e 4,9 para os níveis alto, médio e baixo, respectivamente.

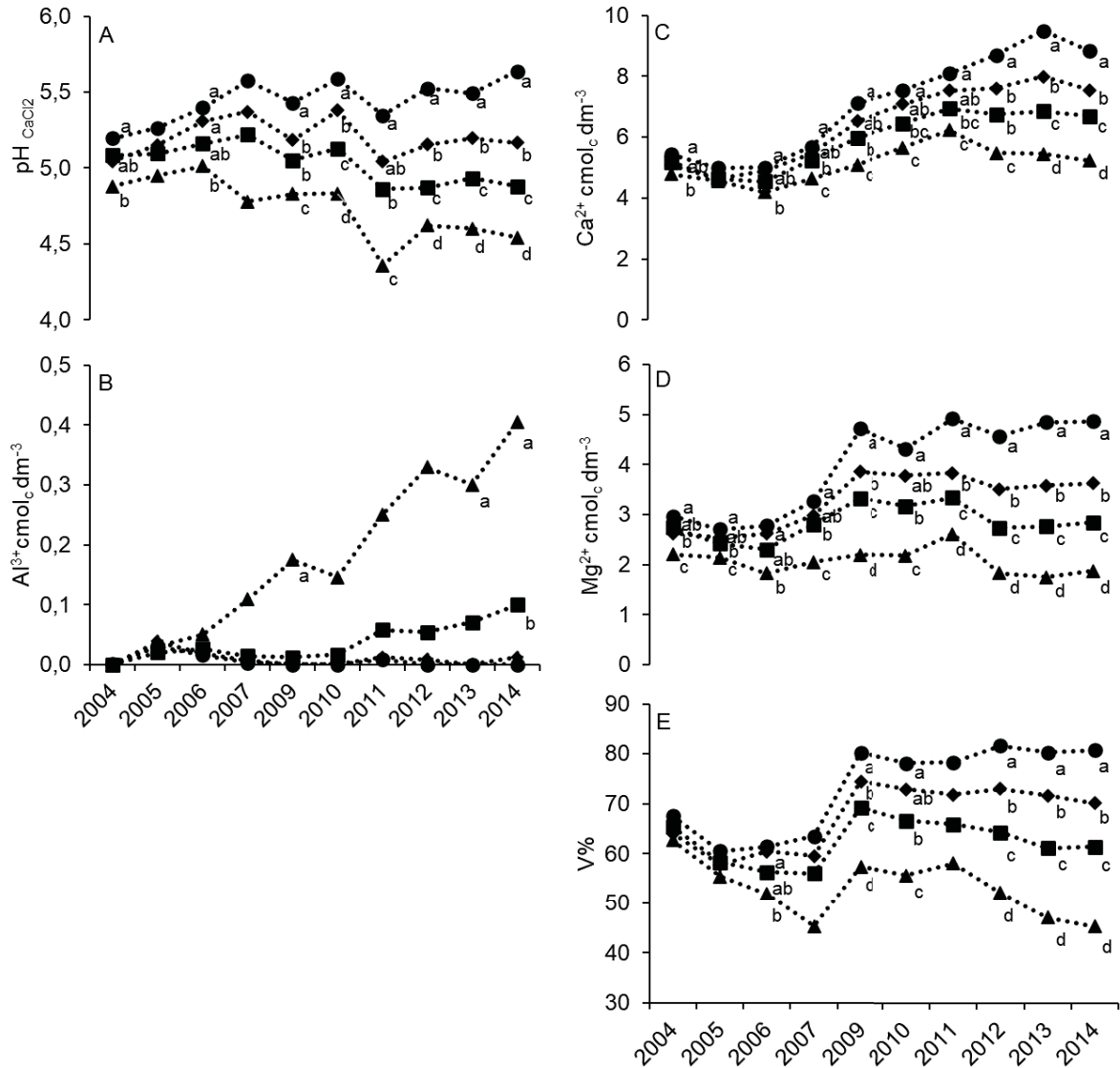
Tal resultado indica lenta reação e longo efeito residual da aplicação superficial do corretivo em PD. Os resultados apontam que uma dose de 250 kg ha^{-1} ano de corretivo com as características do utilizado no presente estudo é suficiente para a manutenção do pH do solo, similar ao que foi reportado neste estudo para produtividade.

Por outro lado, a produtividade obtida foi elevada no tratamento controle, mesmo com a redução do pH durante os anos de avaliação a valores abaixo do nível crítico, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4,9, sugerido para Latossolos da região Centro-Sul do Paraná em plantio direto (VIEIRA et al., 2012). Provavelmente isso ocorreu pelos baixos teores de Al^{3+} presentes no solo, uma vez que neste tratamento o teor inicial, zero, passou para $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em dez anos de condução do experimento (GRÁFICO 2B). Em PD, mesmo em condições de acidez elevada, é possível a obtenção de altas produtividades devido à complexação do Al^{3+} da solução do solo aos resíduos orgânicos, e consequente diminuição da sua toxidez (VIEIRA et al., 2009; ALLEONI et al., 2010; INDA et al., 2010).

Para o Ca^{2+} , a elevação dos teores para os tratamentos, médio, baixo e até mesmo o controle, ocorreram até 2011, seguido de estabilização para os tratamentos com aplicação de calcário e tendência de decréscimo para o tratamento sem aplicação. Para o nível alto de calagem os acréscimos nos teores de Ca^{2+} ocorreram até 2013 (GRÁFICO 2C).

Os teores de Mg^{2+} trocável no tratamento sem aplicação do calcário se mantiveram próximos aos iniciais até o final do experimento. Nos tratamentos com a aplicação de calcário, inicialmente houve aumento dos teores até o ano de 2009, seguido de estabilização em valores maiores que os iniciais. O nível alto de calagem manteve estes maiores teores até o final do experimento, enquanto nos níveis baixo e médio até 2011, quando a partir desta data ocorreu um decréscimo seguido de estabilização a partir de 2012 (GRÁFICO 2D).

GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NO $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ (A), NOS TEORES DE Al^{3+} (B), Ca^{2+} (C), Mg^{2+} (D) E NA SATURAÇÃO POR BASES (E) NA CAMADA 0 A 20 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.



(Tukey, $p < 0,05$)

FONTE: O autor (2020).

De maneira similar ao pH, tanto para Ca^{2+} quanto para Mg^{2+} , as diferenças entre os tratamentos ampliaram com a dose e o tempo de avaliação, além de permanecerem até o final das avaliações (GRÁFICO 2).

O aumento do teor de Ca^{2+} no tratamento controle pode ser atribuído ao residual de uma calagem realizada anteriormente à implantação do experimento ou à adubação realizada, pois fontes como o superfosfato triplo, superfosfato simples e até mesmo calcário granulado, são comumente utilizadas nas formulações de adubo

e contém Ca^{2+} . O maior incremento de Ca^{2+} em superfície em relação ao Mg^{2+} é devido à série liotrópica, pois o Ca^{2+} possui maior energia de ligação às cargas negativas do que o Mg^{2+} , portanto, é mais fortemente retido pelos coloides do solo (BLOSS, 1971), deslocando menos em profundidade.

Os teores das bases trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} observados no tratamento controle mesmo no final do experimento permaneceram altos (GRÁFICO 2C, D). A mobilidade destes nutrientes no solo e a baixa exportação pelas colheitas, respectivamente de Ca^{2+} e Mg^{2+} , 2,3 e 1,8 kg t^{-1} para soja e 0,3 e 1,1 kg t^{-1} para o milho (NEPAR, 2019), justificam estes resultados. No presente experimento, levando em consideração as produções acumuladas, cerca de 78,4 kg de Ca^{2+} e 95,1 kg de Mg^{2+} foram exportados ao longo de 10 anos em um hectare. Considerando que 1 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0 a 20 cm representa 400 kg ha^{-1} de Ca^{2+} e 240 kg ha^{-1} Mg^{2+} , seriam necessários 50 e 25 safras respectivamente para diminuir 1 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ do teor destes nutrientes no solo. Tal fato indica que é pouco provável que a maior produtividade observada com uso de corretivo em um solo a muito tempo manejado sob PD e níveis altos de Ca^{2+} e Mg^{2+} , seja devido ao aumento da disponibilidade destas bases no solo, uma vez que os teores se mantêm adequados às plantas por um longo período.

A elevação da V% na camada de 0 a 20 cm ocorreu a partir de 2007, 35 meses após a aplicação do corretivo, para todos os tratamentos, e estabilizou em valores próximos a 80 para o nível alto de calagem, enquanto nos níveis baixo e médio houve tendência decrescente e permaneceram acima de 60 e 70, respectivamente, até o fim do experimento. No tratamento controle o decréscimo foi mais acentuado (GRÁFICO 2E). Isso se deve à frente de alcalinização que é gerada pela aplicação superficial do calcário, que desloca seu efeito lentamente no perfil do solo. Este efeito também foi observado nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} (GRÁFICO 2C, D). Segundo Allen e Hossner (1991), quando o $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ do solo está abaixo de 5,5, pouco ou nenhum calcário residual é encontrado no solo, porém em $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ acima de 6,0 a quantidade residual aumenta rapidamente, mostrando que acima deste pH a reação do calcário diminui drasticamente e o corretivo tende a se acumular em superfície. O movimento do calcário no solo é lento e o avanço da frente alcalina é maior quanto maior a dose e o tempo após a aplicação, sendo favorecido no plantio direto principalmente pelos bioporos e canais preferenciais do solo (CONYERS et al., 2003; OLIVEIRA; PAVAN, 1996; SANTOS et al., 2000).

A frequência de amostragem de solo para recomendação de calcário é a cada três anos e na camada de 0 a 20 cm (NEPAR, 2019). Esse período, considerando os dados deste experimento, seria insuficiente para detectar o efeito da calagem nesta camada. Mas, a observação de longo efeito residual, de aumento gradativo de pH e de Ca e Mg trocáveis na camada de 0 a 20 cm, que indica efeito em profundidade do calcário aplicado na superfície, e de ausência de efeito negativo de altas doses de calcário, sugerem ser uma estratégia adequada para a recomendação de corretivos no sistema plantio direto.

2.6 CONCLUSÕES

A produção de grãos ou biomassa nos cultivos de inverno não influenciou a produtividade de grãos de milho e soja ou mesmo alterou a necessidade de calagem para estas culturas.

A aplicação única de doses de calcário que proporcionaram a manutenção do $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ acima de 4,9 e da V% acima de 55 foram suficientes para manutenção da produtividade de soja e milho durante 10 anos.

2.7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, E. R.; HOSSNER, L. R. Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures. **Soil Science**, v. 151, n. 3, p. 240–248, 1991.
- ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, p. 1010–1017, 2010.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- BALA, A. et al. Nodulation of tree legumes and the ecology of their native rhizobial populations in tropical soils. **Applied Soil Ecology**, v. 22, p. 211–223, 2003.
- BLOSS, F. D. **Crystallography and crystal chemistry: An introduction**. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1971.
- CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.

- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: 1999.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira - grãos, Safra 2018-2019**. Brasília: 2018.
- CONYERS, M. K. et al. Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 72, p. 85–94, 2003.
- EMATER-PR - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Evolução do Sistema Plantio Direto no Paraná. Levantamento da Realidade Municipal - Perfil da Realidade Agrícola**. Paraná: 2014.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2018.
- FONTOURA, S. M. V. et al. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27–41, 2019.
- GRAHAM, P. H. Stress tolerance in Rhizobium and Bradyrhizobium, and nodulation under adverse soil conditions. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 38, p. 475–484, 1992.
- HAO, T. et al. Quantification of the contribution of nitrogen fertilization and crop harvesting to soil acidification in a wheat-maize double cropping system. **Plant and Soil**, 2018.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588#resultado>>. Acesso em: 3 fev. 2020.
- INDA, A. V. et al. Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 33–41, 2010.
- LI, G. D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma**, v. 338, p. 236–246, 2019.
- MIRANDA, L. N. de et al. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563–572, 2005.
- MOREIRA, S. G. et al. Efeito da calagem na disponibilidade de micronutrientes para soja, cultivada em solo sob diferentes tempos de cultivo em plantio direto. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89–97, 2017.

NEPAR - Núcleo Estadual do Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, p. 47–57, 1996.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1992.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. VAN. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 184–187, 1979.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de Fertilidade**. Campinas: Instituto agrônômico, 1983.

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

SANTOS, D. R. dos et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. v. 24, p. 797–805, 2000.

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

SILVA, V. da et al. Variáveis de acidez em função da mineralogia do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 551–559, 2008.

STAFF, S. S. **Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. USDA, 1999.

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

VIEIRA, F. C. B. et al. Organic matter kept Al toxicity low in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilisation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 707–714, 2009.

VIEIRA, R. C. B. et al. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 188–198, 2012.

3 CAPÍTULO II: PRÁTICAS DE CALAGEM E ROTAÇÃO DE CULTURAS NAS VARIÁVEIS QUÍMICAS DO SOLO EM SUBSUPERFÍCIE EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO

3.1 RESUMO

A calagem superficial no PD aumenta o pH e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e diminui o Al^{3+} em subsuperfície, e o avanço desses efeitos em profundidade depende da dose de corretivo e do tempo, podendo ser beneficiado pelas plantas de inverno utilizadas em rotação com soja e milho. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é avaliar a velocidade e persistência dos efeitos em profundidade da calagem realizada em superfície em área de plantio direto, considerando níveis de calagem e diferentes culturas de inverno em rotação com soja e milho. O presente estudo foi conduzido em experimento de longo prazo, instalado no ano de 2004, em área manejada sob plantio direto há mais de 20 anos, na estação experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), no município de Guarapuava – PR. O solo da área é classificado como Latossolo Bruno Alumínico. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com 4 repetições. Nas parcelas principais foram adotados três sistemas de rotação de culturas diferenciando-se pelas espécies cultivadas no inverno. Nas subparcelas foram aplicadas quatro doses de calcário dolomítico 0, 3,5, 5,7 e 11,1 t ha⁻¹, em superfície, sem incorporação. As espécies cultivadas no inverno não diferiram quanto a contribuição dos efeitos da calagem em profundidade. A aplicação do calcário na superfície do solo, sem incorporação, aumentou o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB e a V% e reduziu o (H + Al) na camada de 0 a 10 cm logo nos primeiros 5 meses após a aplicação. Abaixo dessa camada, a velocidade e a profundidade atingida pela calagem dependem da variável analisada, do tempo e da dose do corretivo. Na camada de 40 a 60 cm os efeitos ocorreram principalmente a partir do terceiro ano de aplicação do corretivo em superfície e foram maiores quanto maior a dose do corretivo. O aumento do pH nas camadas subsuperficiais só ocorre quando o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ na camada imediatamente acima atinge valores próximos ou maiores que 5,0.

Palavras-chave: Pré-culturas. Acidez do solo. Frente de alcalinização. Calagem superficial.

3.2 ABSTRACT

The superficial liming in the no-till system increases the pH and the contents of exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} and decreases the Al^{3+} in subsurface, and the advance of these effects in depth depends on the dose of corrective and the time, being able to be benefited by the winter plants used in rotation with soy and corn. In view of this, the objective of the present study is to evaluate the speed and persistence of the effects of depth of liming carried out on surface in no-till area, considering liming levels and different winter crops in rotation with soybeans and corn. The present study was carried out in a long-term experiment, installed in 2004, in an area managed under no-tillage for over 20 years, at the experimental station of the Agrarian Foundation of Agricultural Research (FAPA), in the municipality of Guarapuava – Paraná State. The used soil is classified as Oxisol. The experimental design adopted was randomized blocks in subdivided plots, with 4 replications. In the main plots, three crop rotation systems were adopted, differing according to the species grown in winter. In the subplots, four doses of dolomitic limestone 0, 3,5, 5,7 and 11,1 t ha^{-1} were applied, on the surface, without incorporation. The species cultivated in winter did not differ in terms of the contribution of the effects of liming in depth. The application of lime on the soil surface, without incorporation, increased $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB and V% and reduced (H + Al) in the 0 to 10 cm layer in the first 5 months after application. Below this layer, the time and depth reached by liming depend on the analyzed variable, the used dose of the lime. In the 40 to 60 cm layer the effects occurred mainly from the third year of application of the lime on the surface and were higher the highest the dose of the lime. The increase in pH in the subsurface layers only occurs when the $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ in the layer immediately above reaches values close to or greater than 5.0.

Keywords: Pre-crops. Soil acidity. Alkalinization. Surface liming.

3.3 INTRODUÇÃO

No PD, a calagem de manutenção é realizada na superfície do solo, sem incorporação, levando à formação de uma frente de alcalinização (AMARAL; ANGHINONI, 2001; KAMINSKI et al., 2005; CAIRES et al., 2015; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015; TIRITAN et al., 2016; VARGAS et al., 2019) que avança em profundidade em função principalmente da dose e do tempo após a aplicação do corretivo. Os efeitos podem se limitar aos primeiros 5 cm (MIRANDA et al., 2005; SCHONINGER et al., 2010; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015) e 10 cm do solo (CAIRES et al., 2006), ou atingir as camadas mais subsuperficiais, 20 cm (PAULETTI et al., 2014; VIEIRA et al., 2016), 30 cm (TIRITAN et al., 2016; LI et al., 2019), 40 cm (TISSI; CAIRES; PAULETTI, 2004) e até 60 cm (FONTOURA et al., 2019).

As reações envolvidas na migração do calcário em subsuperfície são complexas e ainda necessitam maior elucidação. Porém, observa-se forte influência do pH (ALLEN; HOSSNER, 1991; OLIVEIRA; PAVAN, 1996; SANTOS et al., 2000) e têm-se atribuído à formação e movimentação principalmente de íons bicarbonato como a provável explicação para a correção da acidez no subsolo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; SANTOS et al., 2000; ANGHINONI, 2001; CAIRES et al., 2005; AMARAL; VARGAS et al., 2019).

O transporte pela água da chuva de partículas finas de calcário aplicado na superfície ou produtos de sua solubilização, pode ser rápido e intenso no PD (AMARAL et al., 2004), principalmente em regiões de elevada precipitação (FONTOURA et al., 2019; LI et al., 2019). Esse mecanismo é beneficiado pela presença de canais preferenciais e bioporos oriundos da decomposição das raízes, das galerias de minhocas e outros organismos do solo (GISH; JURY, 1983; SANTOS et al., 2000; CALEGARI et al., 2013). Alguns estudos sugerem que os resíduos de plantas de cobertura liberam ácidos orgânicos, tais como ácido cítrico, málico e succínico, de baixo peso molecular que formam complexos orgânicos com cátions trocáveis, facilitando o deslocamento destes em profundidade, beneficiando o efeito da calagem em subsuperfície (ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999; FRANCHINI et al., 2001).

Além da diminuição do pH, a calagem superficial promove diminuição do Al e aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis em subsuperfície (FONTOURA et al.,

2019; LI et al., 2019; VARGAS et al., 2019) o que é desejável para obtenção de elevadas produtividades.

Diante disso, o objetivo do presente trabalho é avaliar a velocidade e a persistência dos efeitos em profundidade da calagem realizada em superfície em área de plantio direto, considerando níveis de calagem e diferentes culturas de inverno em rotação com soja e milho. Com isso procura-se auxiliar na tomada de decisão quanto a dose e frequência de calagem, visando não apenas a correção da camada superficial, mas também a manutenção das variáveis químicas do solo que favorecem a migração dos efeitos da calagem em profundidade e beneficiam o crescimento do sistema radicular das espécies estudadas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

As características da área experimental estão descritas no item 2.4.1.

As variáveis químicas do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm anterior à instalação do experimento constam na TABELA 6.

TABELA 6 – VÁRIAVEIS QUÍMICAS DAS CAMADAS DE 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM DO SOLO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO. (11/05/04)

Prof.	MO	pH	Al ³⁺	(H+Al)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC _{pH7,0}	P	V	m
cm	%	CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³			mg dm ⁻³	-----	%
			-----			-----			3	-----	--
0-10	5,4	4,7	0,08	7,76	5,8	2,3	0,50	16,3	28,0	52	0,9
10-20	4,2	4,8	0,05	7,76	5,1	1,8	0,25	14,9	8,9	48	0,7
20-40	3,7	4,6	0,12	8,36	3,5	1,9	0,15	13,9	3,5	40	2,1
40-60	3,0	4,5	0,30	9,01	2,4	1,6	0,13	13,2	1,7	32	6,7

Prof. – Profundidade; CO – Carbono orgânico; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio

FONTE: O autor, (2020).

3.4.2 ANÁLISE DE SOLO

Para determinação das variáveis químicas do solo, foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm em novembro de 2004, maio de 2005, maio de 2006 (exceto 40 a 60 cm), maio de 2007, maio de 2009, maio de 2010, abril de 2011, maio de 2012, maio de 2013 e maio de 2014.

Os procedimentos de amostragem e análises estão descritos no item 2.4.2.

3.4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Foi realizada análise de correlação para o pH do solo entre as camadas avaliadas. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

3.5 RESULTADOS

As rotações de culturas não diferiram quanto às alterações nas variáveis químicas do solo avaliadas de forma isolada. Houve interação com os níveis de calagem apenas para o pH, na camada 10 a 20 cm nos anos 2010 e 2011, na camada 20 a 40 cm nos anos de 2007 a 2011 e na camada 40 a 60 cm nos anos de 2007 a 2010 (ANEXO 1). Por isso, a apresentação dos dados e discussões serão principalmente para os efeitos dos níveis de calagem.

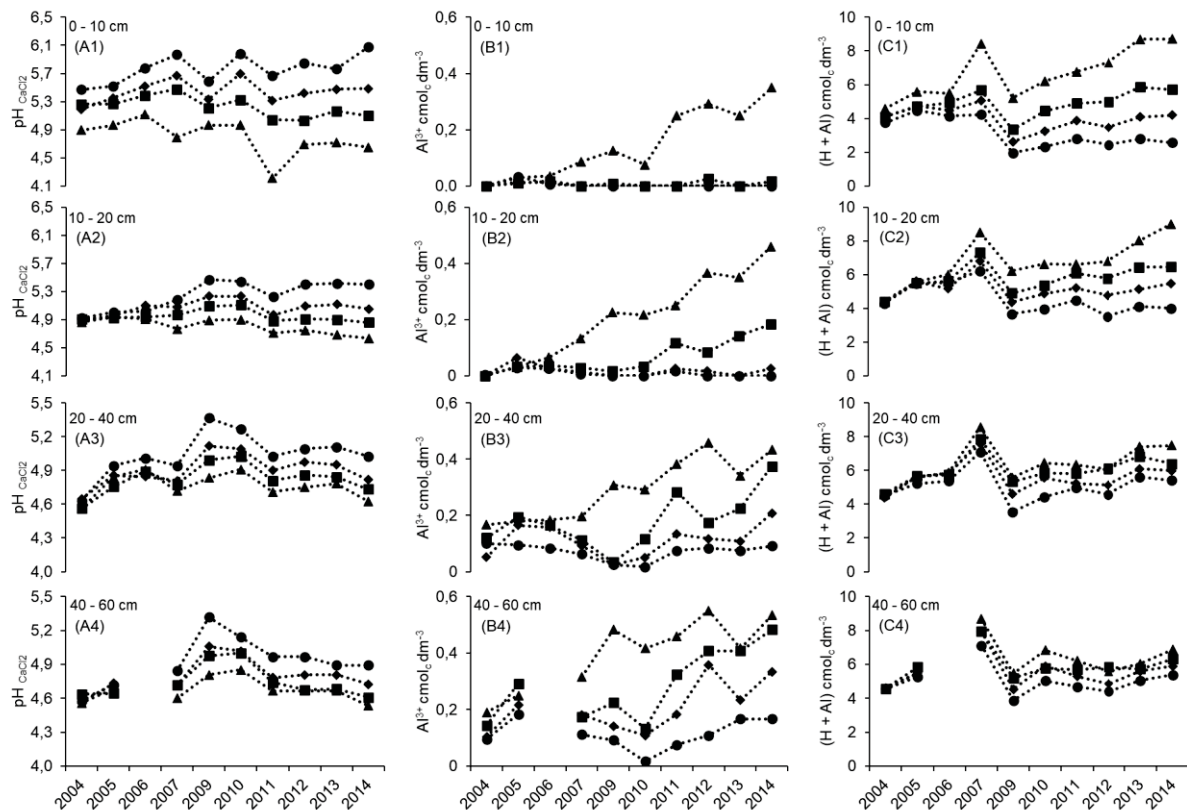
Os resultados constam nos GRÁFICOS 3 a 6 e ANEXOS 1 a 8, considerando todos os níveis de calagem em todos os anos avaliados (2004 a 2014) e respectivas profundidades do solo.

3.5.1 CAMADA 0 a 10 cm

Nos primeiros anos, o efeito dos níveis de calagem nas variáveis químicas do solo limitou-se à camada de 0 a 10 cm. As alterações no $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, $\text{H} + \text{Al}$, Ca^{2+} ,

Mg²⁺, SB, e V% foram evidentes logo após a aplicação (5 meses) e se mantiveram ao longo dos anos, sendo mais significativo à medida que se elevou o nível de calagem (GRÁFICOS 3 a 6).

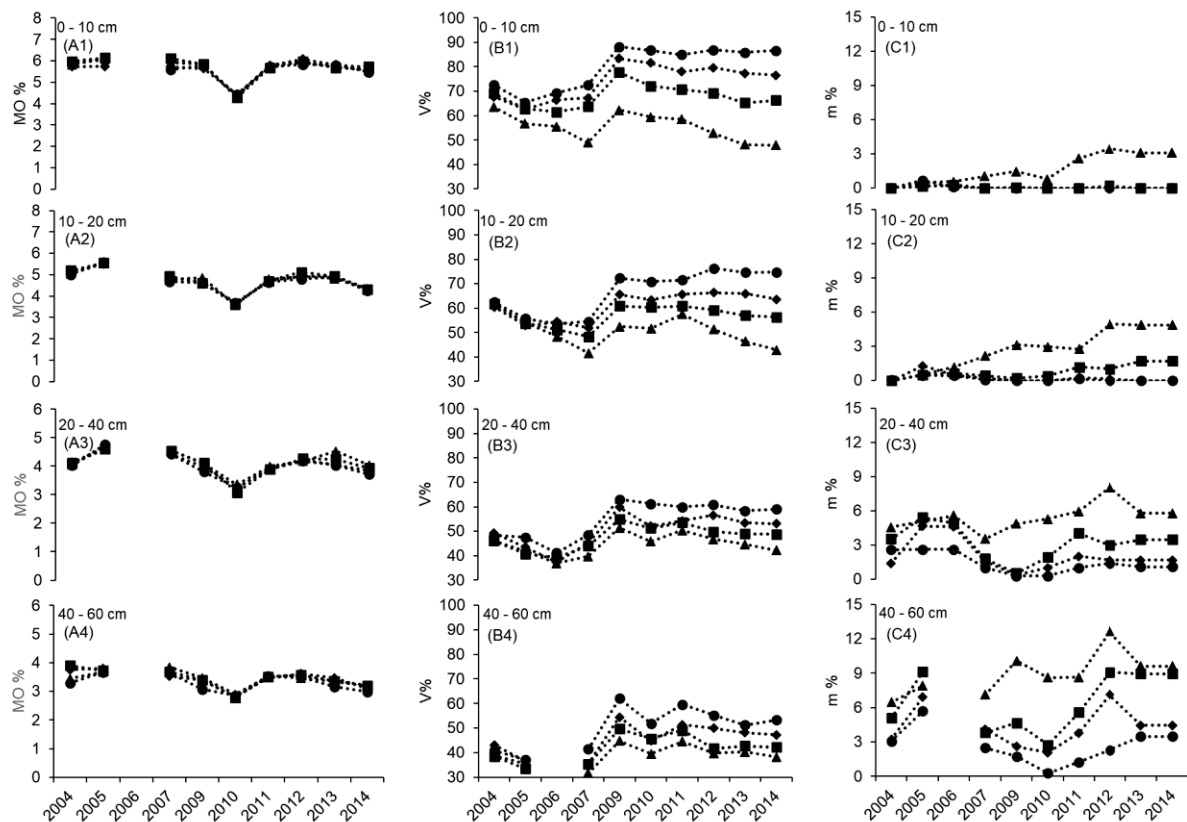
GRÁFICO 3 – INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NO pH_{CaCl2} (A), NOS TEORES DE Al³⁺ (B) E DE H+Al (C) NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.



FONTE: O autor (2020).

Todos os níveis de calagem foram suficientes para manter a neutralidade do Al³⁺ até o fim do experimento. Já no tratamento controle verificou-se Al³⁺ nas amostras a partir de 2007, aumentando os teores desde então (GRÁFICO 3B e ANEXO 2). O mesmo comportamento foi observado para o m% (GRÁFICO 4C e ANEXO 8). Para a CTC_{pH 7,0}, de modo geral, o efeito da calagem foi mais evidente no nível alto, onde obteve-se resposta em seis dos dez anos de avaliação, enquanto nos níveis baixo e médio, a diferença em relação ao controle ocorreu somente em um e dois anos de avaliação, respectivamente (GRÁFICO 5 e ANEXO 9).

GRÁFICO 4 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS VALORES DE MATÉRIA ORGÂNICA (A), E SATURAÇÃO POR BASES (B) E POR Al^{3+} (C) NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.

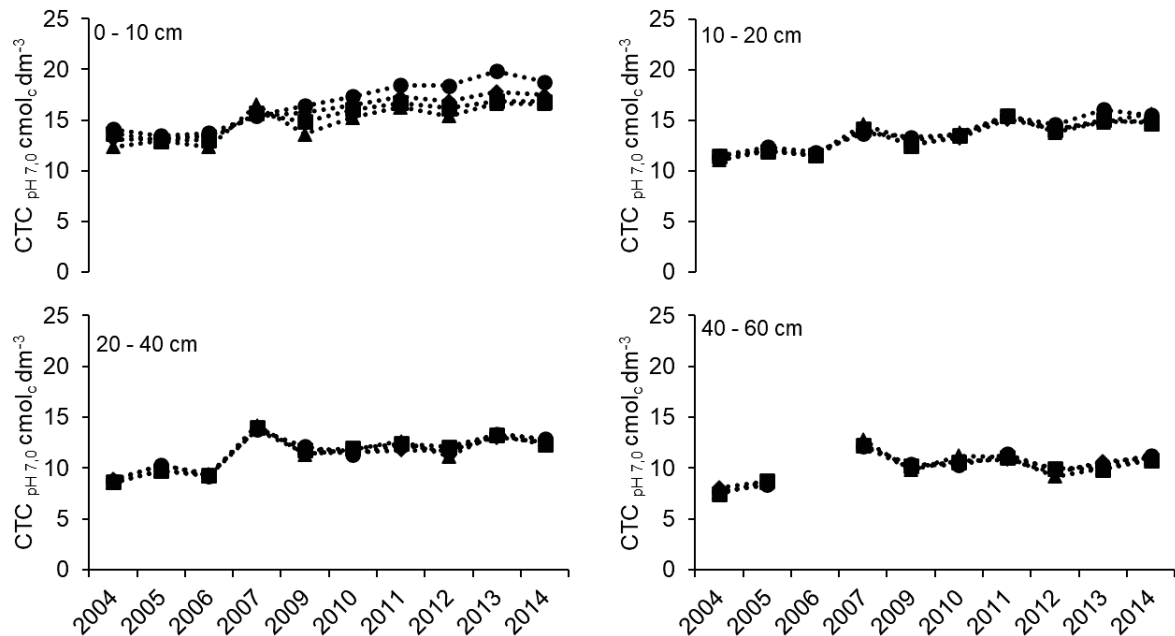


FONTE: O autor (2020).

3.5.2 CAMADA 10 a 20 cm

Na camada de 10 a 20 cm, 23 meses (2006) após a aplicação do corretivo ocorreu o mesmo efeito na neutralização do Al^{3+} que na camada superior, onde todos os tratamentos mantiveram a neutralidade do elemento até o fim do experimento, enquanto os teores no tratamento controle foram aumentando com o passar dos anos (GRÁFICO 3B e ANEXO 1). Resultados similares foram observados para m%, onde o uso dos níveis médio e alto resultaram em valores próximos a 0 ou menores que o controle a partir de 2006, e o nível baixo a partir de 2007 (GRÁFICO 4C e ANEXO 8). Além disso, a aplicação do nível alto de calagem aumentou o teor de Mg^{2+} nessa camada 23 meses após a aplicação, e para os demais níveis de calagem, esse efeito foi verificado após 35 meses com tendência crescente até 2011 e posterior estabilização, enquanto o controle passou a apresentar tendência de queda (GRÁFICO 6B e ANEXO 5).

GRÁFICO 5 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS VALORES DE $CTC_{pH7,0}$ NAS CAMADAS 0 A 10, 10 A 20, 20 A 40 E 40 A 60 CM NO PERÍODO DE 10 ANOS.

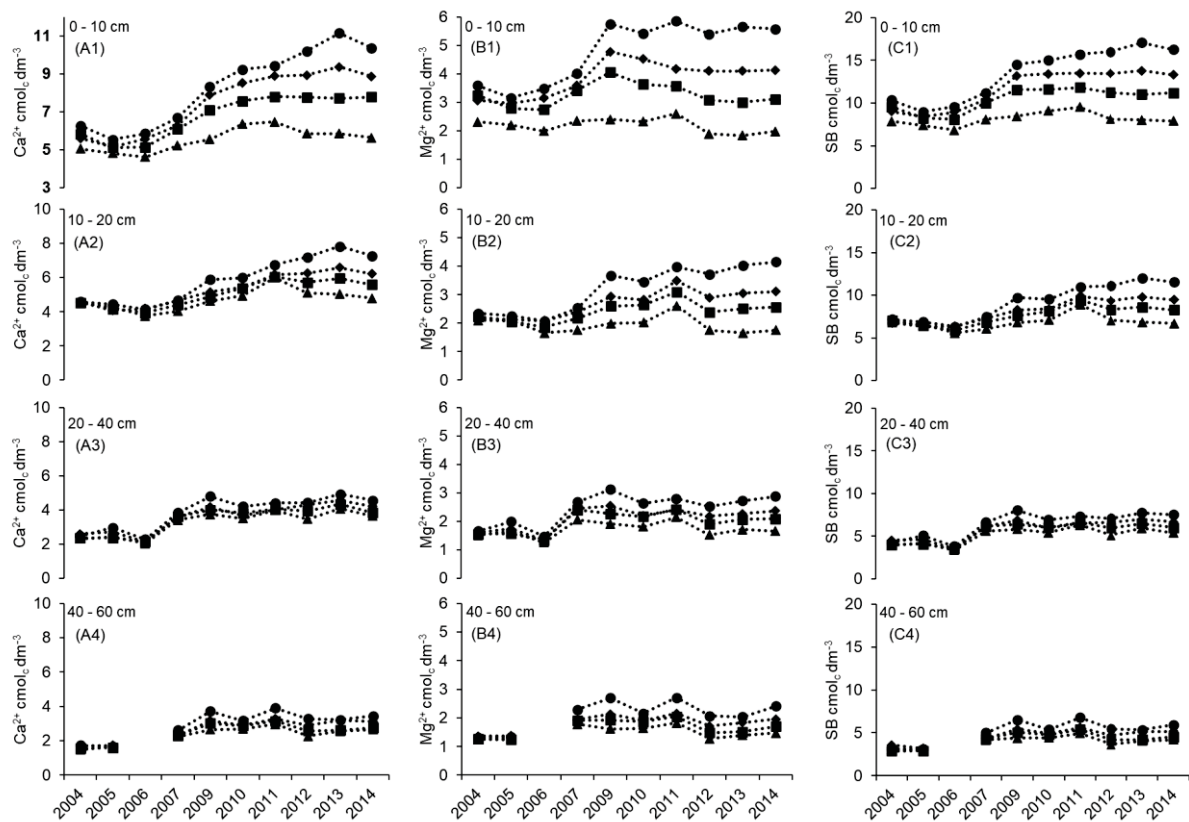


FONTE: O autor (2020).

As alterações no pH_{CaCl_2} , Ca^{2+} , SB, V% e m% ocorreram a partir do ano de 2007, 35 meses após a calagem. Tanto o pH_{CaCl_2} quanto a SB aumentaram de 2007 até 2010 e 2011, respectivamente, sendo mais evidente com a aplicação do maior nível de calagem, e posterior estabilização, enquanto no tratamento controle os valores passaram a decrescer (GRÁFICOS 1A e 6C e ANEXOS 1 e 6). Os aumentos nos teores de Ca^{2+} ocorreram para os níveis médio e alto de calagem, e seguiram de forma crescente até 2013, enquanto o nível baixo proporcionou um menor acréscimo acompanhado do controle, estabilizando após 2011 enquanto no controle começou a decrescer (GRÁFICO 6A e ANEXO 4). A partir de 2007, todos os tratamentos resultaram em elevação da V% até 2009, estabilizando e após 2012 iniciaram tendência decrescente, com decréscimos mais acentuados no tratamento controle (GRÁFICO 4(B)).

A diminuição da acidez potencial (H+Al) em relação à testemunha ocorreu a partir de 2010 para todos os tratamentos (GRÁFICO 3C e ANEXO 3).

GRÁFICO 6 - INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE CALAGEM (▲) CONTROLE, (■) BAIXO, (◆) MÉDIO E (●) ALTO NOS TEORES DE Ca^{2+} (A), Mg^{2+} (B) E NA SOMA DE BASES (C) NO PERÍODO DE 10 ANOS.



FONTE: O autor (2020).

3.5.3 CAMADA 20 a 40 cm

Os primeiros efeitos na camada 20-40 cm ocorreram 11 meses após a aplicação (ano 2005) e mantiveram-se até o fim do experimento para o nível alto de calagem nas variáveis Mg^{2+} e SB (GRÁFICO 6A e C e ANEXOS 5 e 6). Nos demais tratamentos verificou-se efeito da calagem no teor de Mg^{2+} a partir de 2007 e 2010, para os níveis médio e baixo, respectivamente. O nível médio manteve o efeito nessa variável ao longo do tempo, já o nível baixo resultou em diferença estatística somente em 2014, mas manteve os teores enquanto o controle começou a decrescer. Para SB verificou-se efeito do nível médio da calagem somente em 2012.

O efeito na neutralização do Al^{3+} foi semelhante às camadas anteriores, embora presente em teores muito baixos ($<0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). A partir de 2009, 59 meses após a aplicação do corretivo, os tratamentos mantiveram os valores do

elemento próximo da neutralidade e/ou abaixo dos teores do tratamento controle até o fim do experimento (GRÁFICO 3B).

Houve interação entre níveis de calagem e rotação de culturas para os valores de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ em 2007 até 2011. O efeito para o nível médio ocorreu apenas em 2012 e para o nível alto deste mesmo ano em diante (ANEXO 1).

Todos os tratamentos, inclusive o controle, tiveram tendência crescente quanto ao teor de Ca^{2+} ao longo do experimento (GRÁFICO 6A). O aumento do teor deste nutriente em relação ao controle ocorreu para o nível alto em 5 avaliações a partir de 2005, e para o nível médio apenas em 2012 (ANEXO 4).

A V% foi influenciado pelo nível alto de calagem em 4 análises a partir de 2009 e pelo nível médio em 2 análises a partir de 2012 (ANEXO 7). Já o H+Al foi inferior aos demais tratamentos somente no nível alto em 4 das 6 safras a partir de 2009 (ANEXO 3).

3.5.4 CAMADA 40 a 60 cm

Em 2009, 59 meses após a aplicação do corretivo, todos os tratamentos mantiveram o Al^{3+} e o m% inferiores ao tratamento controle, efeito também observado em 2010 (ANEXO 2 e 8). A partir de 2011 os níveis médio e alto conservaram os teores de Al e m%, respectivamente, abaixo de $<0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 5%, enquanto o tratamento baixo de calagem resultou em valores crescentes e mais próximos ao tratamento controle (GRÁFICOS 3B e 4C).

O nível alto da calagem manteve menores valores de H+Al de 2009 até o fim do experimento. No entanto, para os tratamentos baixo e médio este efeito limitou-se apenas a 2009 (GRÁFICO 3C e ANEXO 3).

A calagem aumentou os valores de pH a partir de 2011 e 2012 para os níveis alto e médio, respectivamente, e esse aumento se manteve até o fim do experimento (GRÁFICO 3A e ANEXO 1).

Em 2009, houve aumento nos teores de Mg^{2+} em relação ao controle para todos os tratamentos com aplicação de calcário. Esse efeito se repetiu para o nível médio a partir de 2012 e somente em 2014 para o nível baixo, enquanto o nível alto se manteve superior ao controle até o final do experimento (GRÁFICO 6B e ANEXO 5).

Os valores da SB foram maiores em relação ao controle nos anos de 2007 e 2009 para os níveis alto e médio de calagem, respectivamente. Esses aumentos se mantiveram para o nível alto durante todo o período de experimentação e voltaram a ocorrer a partir de 2012 para o nível médio (GRÁFICO 6C e ANEXO 6).

Com exceção de 2005, o tratamento alto resultou em maiores teores de Ca^{2+} em relação aos demais tratamentos em todos os anos avaliados. Houve aumento para o nível médio em relação ao controle somente em dois anos, 2004 e 2014 (GRÁFICO 6A e ANEXO 4).

Para os níveis alto e médio da calagem, a elevação da V% ocorreu a partir de 2009 e permaneceu maior que o controle até 2014, já para o nível baixo, esse efeito foi observado em 2010 e se repetiu em 2012 (GRÁFICO 4(B) e ANEXO 7).

3.6 DISCUSSÃO

A aplicação do calcário elevou o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de forma lenta e gradual inicialmente nas camadas superficiais, próximo ao local de deposição do corretivo, e com o passar dos anos a correção avançou ao longo do perfil do solo (GRÁFICO 3A). A velocidade e a profundidade alcançada pela frente corretiva foram maiores à medida em que se aumentou os níveis da calagem. No presente estudo os efeitos avançaram até a profundidade analisada de 60 cm nas maiores doses. Foram observados aumentos significativos nos teores dos cátions básicos Ca^{2+} e Mg^{2+} provenientes da dissolução do calcário em todas as camadas avaliadas, que conseqüentemente, implicou na elevação da SB e da V% (GRÁFICOS 4B e 6A, B, C).

O efeito observado na acidez potencial (H+Al) foi inversamente proporcional ao $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ e à V% (GRÁFICOS 3A,C e 4B), ou seja, diminuiu com o aumento da dose de calcário e com o aumento do pH em profundidade. Até o fim das avaliações do ensaio, baixos teores de Al^{3+} e valores de m% foram observados mesmo no tratamento controle (GRÁFICOS 3B e 4C).

Por ocorrer em regiões de altitude elevada e de clima subtropical, frio e úmido, os Latossolos Brunos são bem supridos em MO refletindo numa alta capacidade de troca de cátions no horizonte superficial em relação aos demais Latossolos (EMBRAPA, 1984). Altos teores de MO são observados até 60 cm de

profundidade, e não foram influenciados pelos níveis de calagem durante o período de 10 anos avaliado (GRÁFICO 4A).

Nesses solos, a fração argila é principalmente composta por caulinita e gibbsita, que juntamente à MO lhes conferem cargas predominantemente variáveis, ou seja, dependentes do pH (DEMATTE; GARCIA, 1999; ALBUQUERQUE et al., 2000; SILVA et al., 2008). Percebe-se que decréscimo da $CTC_{pH7,0}$ em profundidade (GRÁFICO 5) é acompanhado pela redução nos valores de MO (GRÁFICO 4A). A MO é a principal responsável pela CTC total dos solos altamente intemperizados, contribuindo nas camadas superficiais entre 56 a 91 % (RAIJ, 1969). Portanto, a redução de seus teores em profundidade implica em menores valores de CTC.

A aplicação do calcário consome o H^+ presente na solução do solo e conseqüentemente eleva o pH, e para restabelecer o equilíbrio da solução, ocorre a desprotonação das hidroxilas presentes na superfície dos óxidos e hidróxidos, nas arestas quebradas da caulinita, e principalmente dos grupamentos funcionais carboxílicos da MO. Quanto maior a elevação do pH da solução, maior é a desprotonação das hidroxilas dos coloides e maior é a exposição das cargas negativas do solo que podem ser ocupadas por cátions (CTC) (FONTES; DE CAMARGO; SPOSITO, 2001).

O Al^{3+} que é tóxico para as plantas (BATISTA et al., 2012) ocorre nos solos até ~ pH 4,8 em $CaCl_2$, onde ocorre a hidrólise completa deste elemento (MOTTA; MELO, 2009). A presença do Al^{3+} , mesmo que em teores menores que $0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ considerados baixos (NEPAR, 2019), somente ocorre nos anos em que houve decréscimos nos valores de pH para próximos ou abaixo de 4,8 (GRÁFICO 3A,B). Isso é observado apenas no tratamento controle nas camadas 0 a 10 cm e nos tratamentos controle e nível baixo de calagem na camada 10 a 20 cm. Nas camadas 20 a 40 e 40 a 60 cm os teores do elemento variam conforme os tratamentos, mas estão presentes devido ao pH estar em valores mais baixos que as camadas superiores, porém continuam menores que $0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. No PD grande parte do Al^{3+} da solução do solo está complexado na MO (ALLEONI et al., 2010) o que justifica os baixos valores obtidos mesmo em pH_{CaCl_2} menor que 4,8.

Como podemos observar, a acidez potencial ($H+Al$), que representa o poder de tamponamento do solo em relação à acidez trocável (Al^{3+}), até $pH_{CaCl_2} \sim 4,9$ e acidez ativa (H^+) até $pH_{CaCl_2} 7,0$, decresce com ao aumento do pH, que por sua vez possui relação direta com a V% (GRÁFICOS 3A,B,C e 4B), resultados também

obtidos por Silva et al. (2008). A relação entre V% e $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ já foi relatada por diversos autores (SILVA et al., 2008), sendo utilizada para o desenvolvimento do método de recomendação de calagem pela elevação da V%.

Porém, certo cuidado deve ser tomado devido essa relação variar de acordo com o poder tamponante de cada solo. Segundo Silva et al. (2008), diferentes solos apresentam diferentes valores de V para um mesmo pH em função da mineralogia da fração argila. Para um mesmo pH os autores encontraram que a V% decresce na seguinte ordem: solos com predomínio de óxidos de Fe e Al < solos com predomínio de caulinita < solos cauliniticos com minerais 2:1.

As cargas negativas da superfície dos coloides que foram expostas pela correção da acidez trocável e ativa do solo, são preenchidas pelas bases Ca^{2+} e Mg^{2+} provenientes da dissociação do calcário, aumentando a porcentagem de bases que estão ocupando o total de cargas negativas do solo a $\text{pH} 7,0$ (V%). Como estão relacionadas, é possível observar que as alterações da V%, SB e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram semelhantes, o que variou foi a proporção destes cátions conforme às camadas analisadas (GRÁFICOS 4B e 6A,B,C e ANEXOS 4 e 5).

Quase 10 anos após a aplicação do calcário, quando comparamos o aumento relativo dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos tratamentos que receberam a aplicação de calcário com o tratamento sem aplicação, observa-se que os acréscimos foram 90, 50 e 48 % maiores nos teores de Ca^{2+} em relação ao Mg^{2+} para os níveis baixo, médio e alto, respectivamente, na camada 0 a 10 cm. Na camada 10 a 20 cm, os aumentos relativos para os dois cátions foram praticamente na relação de 1:1 para todos os níveis de calagem, enquanto nas camadas inferiores embora os acréscimos foram pequenos, a proporção se manteve em 1:1 ou o aumento foi maior para o Mg^{2+} , principalmente no tratamento com nível baixo de aplicação de calcário (ANEXOS 4 e 5).

A proporção entre Ca^{2+} e Mg^{2+} tende a diminuir em profundidade devido à série preferencial de adsorção de cátions às cargas negativas do solo, denominada série liotrópica, que é definida pela valência e raio iônico hidratado do íon. A valência do Ca^{2+} é igual à do Mg^{2+} , porém o seu menor raio iônico hidratado aumenta sua atração às cargas negativas do solo (MOTTA; MELO, 2009). Portanto, o Ca^{2+} ocupa a maior proporção das cargas negativas das camadas superficiais e o Mg^{2+} é lixiviado às inferiores.

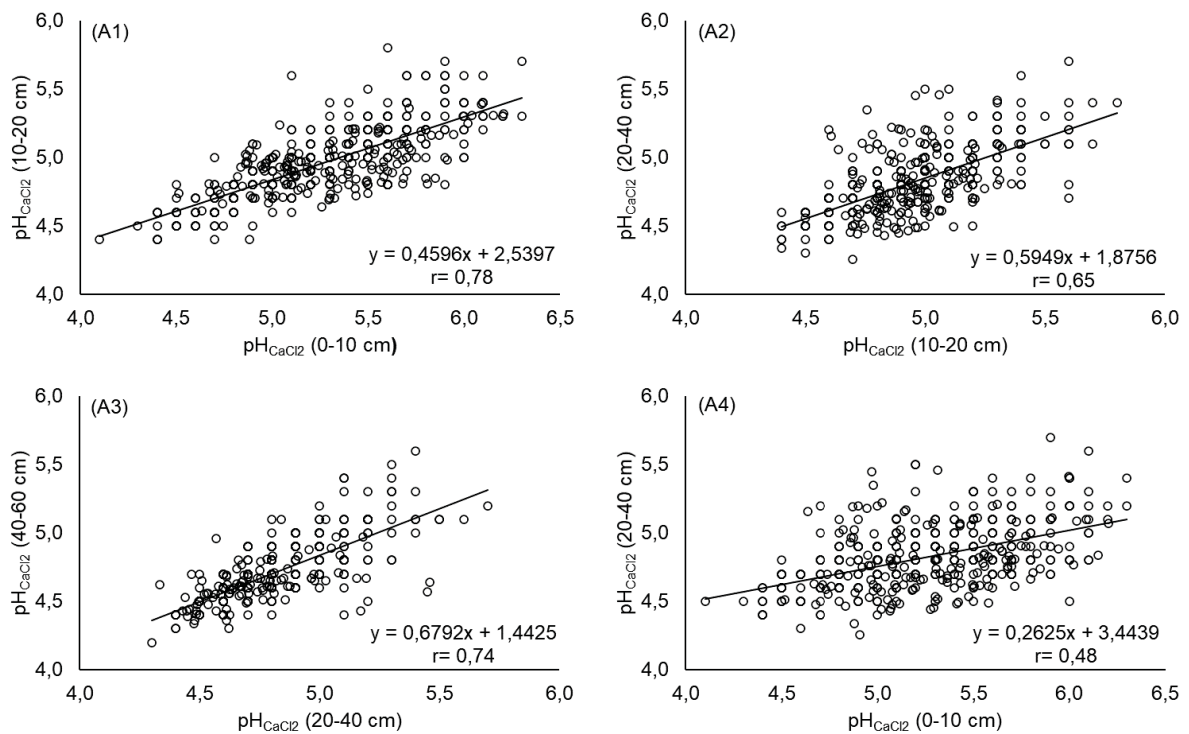
As reações do calcário que permitem a migração dos seus efeitos em profundidade são complexas e dependentes do pH. Allen e Hossner (1991) verificaram que quando o pH é menor que 5,5 em H₂O (~4,9 em CaCl₂) o calcário reage completamente e nenhum residual é encontrado. Enquanto o pH do solo permanecer baixo, o calcário reage completamente no local depositado, e segundo Oliveira e Pavan (1996), para aliviar a acidez do subsolo, deve ocorrer a migração do HCO₃⁻ gerado da dissolução do calcário acompanhado por Ca²⁺ e Mg²⁺ em profundidade. Santos et al., (2000) verificaram que somente após o pH na zona de dissolução do calcário ter atingido valores de 5,2 a 5,5 em H₂O (4,6 a 4,9 em CaCl₂) os efeitos da calagem ocorreram em profundidade.

Portanto, para que ocorra influência na acidez do subsolo, os produtos da dissociação do calcário aplicado na superfície, os ânions básicos OH⁻ e HCO₃⁻, devem ser movimentados por fluxo de massa das camadas superficiais (SANTOS et al., 2000; AMARAL; ANGHINONI, 2001; CAIRES et al., 2005). Após a dissolução do calcário, os ânions OH⁻ e HCO₃⁻ reagem com os cátions H⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Mn²⁺ até o pH atingir em torno 5,5 em H₂O (~4,9 CaCl₂) e enquanto existirem esses cátions ácidos, a reação de neutralização da acidez ficará limitada à camada onde o calcário foi aplicado, retardando o efeito em subsuperfície (SANTOS et al., 2000).

Segundo Miller (2015), a migração dos efeitos da calagem realizada na superfície para o subsolo, só ocorre se o pH_{CaCl2} da camada superficial for mantido acima de 5,5. Segundo a autora, a maior parte da alcalinidade é movida através da lixiviação dos íons bicarbonato (HCO₃⁻). Caires et al. (2005), observaram que o movimento significativo de alcalinidade até a camada 10 a 20 cm ocorreu somente quando o pH_{CaCl2} das camadas superiores foi maior que 5,0.

Em nosso estudo, desenvolvido em um Latossolo Bruno, os aumentos nos valores de pH ocorreram até 60 cm de profundidade apenas quando o pH_{CaCl2} da camada imediatamente superior foi maior ou igual a 5,0 (ANEXO 1), havendo correlação entre os pHs das camadas subsequentes (GRÁFICO 7). Portanto, pH semelhante aos observados pelos demais autores em solos distintos.

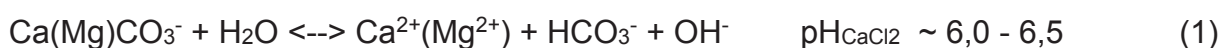
GRÁFICO 7 – CORRELAÇÕES ENTRE OS VALORES DE $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ DO SOLO NAS CAMADAS: A1 (0 A 10 CM E 10 A 20 CM), A2 (10 A 20 CM E 20 A 40 CM), A3 (20 A 40 CM E 40 A 60 CM) E A4 (0 A 10 CM E 20 A 40 CM).



FONTE: O autor (2020).

As correlações entre os pHs são maiores entre as camadas imediatamente sequenciais. Quando relacionada a camada 0 a 10 cm com 20 a 40 cm (camada não sequencial) a correlação diminui, ou seja, o efeito na camada depende da influência exercida pelo corretivo na camada imediatamente acima. Estas correlações reforçam que ocorre o efeito da calagem superficial em subsuperfície, mas depende da dose e do tempo após aplicação. Percebe-se também que para cada unidade de pH aumentada na camada superior, o efeito na camada inferior é maior à medida que aumenta a profundidade. De 0-10 para 10-20 = 0,459; de 10-20 para 20-40 = 0,5949 e de 20-40 para 40-60 = 0,6792. Apesar das diferenças entre a espessura das camadas comparadas, isso revela que o efeito do calcário migra mais rapidamente quando a $\text{CTC}_{\text{pH}7,0}$ (GRÁFICO 5) e o poder tamponante do solo são menores (GRÁFICOS 3C).

As Reações (1), (2) e (3) mostram os produtos da dissolução do calcário em função da faixa do pH.





Essas reações (1, 2 e 3) são bidirecionais e foram adaptadas a fim de ilustrar de forma didática a dissolução do calcário. À medida que as faixas de pH são atingidas a reação é deslocada para a esquerda.

Na presença de acidez e umidade ocorre a dissociação do calcário, sendo que o produto dessa reação é dependente do pH em que o solo se encontra. A reação pode ser extremamente rápida sob condições ácidas ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} < 4,9$) e o carbonato ser convertido diretamente em gás carbônico e OH^- , aliviando a acidez somente do local depositado. Ou extremamente lenta quando o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ for maior que 6,0, condição em que a dissolução do carbonato decresce muito. O produto intermediário da dissolução do calcário é o bicarbonato, e sua formação é favorecida em $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} \sim 5,5$. Os íons bicarbonato reagem com o excesso de íons hidrogênio (H^+) do solo e qualquer excesso de íons bicarbonato é lixiviado através da solução do solo até a próxima camada e as reações são repetidas.

Isso explica a formação do gradiente de correção a partir da superfície do solo e o fato de doses mais elevadas favorecerem o avanço da frente alcalina (GRÁFICO 3A e ANEXO 1).

O avanço da frente alcalina ou os efeitos da calagem em profundidade podem ser favorecidos por diversos outros mecanismos citados na literatura, que provavelmente agem em conjunto e contribuem de forma mais ou menos expressiva de acordo com o ambiente e práticas de manejo adotadas. Devido à alta precipitação pluviométrica da região (GRÁFICO 1), neste ensaio, um mecanismo que beneficiou os efeitos da calagem em subsuperfície foi a percolação de partículas finas de calcário ou produtos de sua solubilização pelos macroporos, ou porosidade contínua do perfil pela água da chuva. Os efeitos na camada de 40 a 60 cm para o Ca^{2+} em 2004, 5 meses após a aplicação, pode ser atribuído a esse mecanismo (ANEXO 4). Fontoura et al. (2019) verificaram efeito sensível no teor de Mg^{2+} , pH, V% e Al^{3+} no primeiro ano após à aplicação. Segundo, Amaral et al. (2004) o transporte pela água da chuva pode ser rápido e intenso em PD. Esse mecanismo é beneficiado pela presença de canais preferenciais e bioporos oriundos da

decomposição das raízes, das galerias de minhocas e outros organismos do solo (GISH; JURY, 1983; SANTOS et al., 2000; CALEGARI et al., 2013).

Outro mecanismo relacionado à migração dos efeitos da calagem em subsuperfície é a possível contribuição de diferentes plantas de cobertura através da liberação de ácidos orgânicos hidrossolúveis (FRANCHINI et al., 2001; ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999). Nas condições deste ensaio de longo prazo é possível inferir que, caso haja contribuição das diferentes espécies de inverno cultivadas em rotação com soja e milho na mobilidade dos efeitos da calagem no perfil do solo, essa contribuição não difere entre as espécies avaliadas e propósitos de cultivo no inverno (grãos ou biomassa) (ANEXOS 1 a 9).

3.7 CONCLUSÕES

Em área manejada sob PD há mais de 20 anos, as espécies cultivadas no inverno não diferem na contribuição dos efeitos da calagem em profundidade.

A calagem superficial altera as características químicas do solo 0 a 10 cm logo nos primeiros 5 meses após a aplicação. Abaixo dessa camada a velocidade e a profundidade atingidas pela calagem dependem da variável analisada, do tempo e da dose do corretivo.

Os efeitos observados na camada de 40 a 60 cm ocorreram principalmente a partir do terceiro ano de aplicação do corretivo em superfície e foram maiores quanto maior a dose do corretivo.

O aumento do pH nas camadas da subsuperfície só ocorre quando o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ na camada imediatamente acima atinge valores próximos ou maiores que 5,0.

3.8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 295–300, 2000.

ALLEN, E. R.; HOSSNER, L. R. Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures. **Soil Science**, v. 151, n. 3, p. 240–248, 1991.

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n.

3, p. 1010–1017, 2010.

AMARAL, A. S. do; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695–702, 2001.

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 359–367, 2004.

BATISTA, M. F. et al. Aluminum in corn plants: influence on growth and morphology of root and leaf. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 177–187, 2012.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 791–798, 2005.

CAIRES, E. F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 87–98, 2006.

CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.

CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Avaliação de atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 343–355, 1999.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Paraná**. Londrina, 1984.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. de; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 627–646, 2001.

FONTOURA, S. M. V. et al. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27–41, 2019.

FRANCHINI, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 357–360, 2001.

GISH, T. J.; JURY, W. A. Effect of plant roots and root channels on solute transport. **Transactions - American Society of Agricultural Engineers**, p. 440- 444,451,

1983.

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

LI, G. D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma**, v. 338, p. 236–246, 2019.

MILLER, L. How fast is lime moving and is it treating acidity at depth? **Southern Farming Systems**, p. 133–135, 2015.

MIRANDA, L. N. de et al. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563–572, 2005.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. DE F. Química dos solos ácidos. In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. de F. **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa: SBCS, 2009.

NEPAR - Núcleo Estadual do Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, p. 47–57, 1996.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

RAIJ, B. VAN. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, v. 28, n. 8, p. 85–112, 1969.

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

SANTOS, D. R. dos et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. v. 24, p. 797–805, 2000.

SCHONINGER, E. L. et al. Atributos químicos do solo e produtividade da cultura de soja em Soil chemical attributes and soybean yield in no-tillage system after surface liming. **Repositorio.Unesp.Br**, v. 31, n. 1, p. 1253–1262, 2010.

SILVA, V. da et al. Variáveis de acidez em função da mineralogia do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 551–559, 2008.

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

TISSI, J. A.; CAIRES, E. F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia**, v. 63, n. 3, p. 405–413, 2004.

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

VIEIRA, R. C. B. et al. Sampling layer for soil fertility evaluation in long-term no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–11, 2016.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, 1999.

CONCLUSÃO GERAL

O cultivo de diferentes espécies de plantas destinadas à produção de grãos ou biomassa no inverno, em área manejada sob PD há mais de 20 anos, não difere na contribuição para os efeitos da calagem em profundidade, tampouco altera a necessidade de calagem ou influencia a produtividade de grãos de milho e soja.

Em área manejada sob PD há mais de 20 anos, níveis de calagem superficiais que proporcionaram a manutenção do $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ acima de 4,9 e da V% acima de 55 foram suficientes para manutenção da produtividade de soja e milho por dez anos, porém doses mais elevadas proporcionaram maior migração dos efeitos da calagem em profundidade.

4 REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. T. da E. et al. (EDS.). **Boletim 200 - Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas**. 7. ed. Campinas - SP: Instituto Agrônomo, 2014.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 295–300, 2000.

ALLEN, E. R.; HOSSNER, L. R. Factors affecting the accumulation of surface-applied agricultural limestone in permanent pastures. **Soil Science**, v. 151, n. 3, p. 240–248, 1991.

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, p. 1010–1017, 2010.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

AMARAL, A. S. do; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695–702, 2001.

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 359–367, 2004.

BALA, A. et al. Nodulation of tree legumes and the ecology of their native rhizobial populations in tropical soils. **Applied Soil Ecology**, v. 22, p. 211–223, 2003.

BATISTA, M. F. et al. Aluminum in corn plants: influence on growth and morphology of root and leaf. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 177–187, 2012.

BLOSS, F. D. **Crystallography and crystal chemistry: An introduction**. New York: Holt, Rinehart e Winston, 1971.

BORTOLINI, D. et al. Surface applied lime dynamics and base saturation index in a consolidated no-tillage area. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 4, p. 473–485, 2016.

BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta á calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 7, p. 1007–1014, 2012.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 791–798, 2005.

CAIRES, E. F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 87–98, 2006.

CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.

CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: 1999.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira - grãos, Safra 2018-2019**. Brasília: 2018.

CONYERS, M. K. et al. Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 72, p. 85–94, 2003.

COSTA, C. H. M. DA et al. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop & Pasture Science**, v. 69, p. 488–505, 2018.

CQFS RS/SC - Comissão de Química e Fertilidade do Solo Núcleo Regional Sul. **Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

DEMATTE, J. A. M.; GARCIA, G. J. Avaliação de atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 343–355, 1999.

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2010.

EMATER-PR - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Evolução do Sistema Plantio Direto no Paraná. Levantamento da Realidade Municipal - Perfil da Realidade Agrícola**. Paraná: 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Paraná**. Londrina, 1984.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2018.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. de; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados.

Scientia Agricola, v. 58, n. 3, p. 627–646, 2001.

FONTOURA, S. M. V. et al. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27–41, 2019.

FRANCHINI, J. C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2267–2276, 1999.

FRANCHINI, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 357–360, 2001.

GISH, T. J.; JURY, W. A. Effect of plant roots and root channels on solute transport. **Transactions - American Society of Agricultural Engineers**, p. 440- 444,451, 1983.

GRAHAM, P. H. Stress tolerance in Rhizobium and Bradyrhizobium, and nodulation under adverse soil conditions. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 38, p. 475–484, 1992.

HAO, T. et al. Quantification of the contribution of nitrogen fertilization and crop harvesting to soil acidification in a wheat-maize double cropping system. **Plant and Soil**, 2018.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588#resultado>>. Acesso em: 3 fev. 2020.

INDA, A. V. et al. Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 33–41, 2010.

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

LI, G. D. et al. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma**, v. 338, p. 236–246, 2019.

LICHT, O. B.; PLAWIAK, R. A. B. **Levantamento Geoquímico Multielementar Do Estado Do Paraná Geoquímica de solo**. Curitiba: MINEROPAR, 2005.

MILLER, L. How fast is lime moving and is it treating acidity at depth? **Southern Farming Systems**, p. 133–135, 2015.

MIRANDA, L. N. de et al. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 40, n.

6, p. 563–572, 2005.

MOREIRA, S. G. et al. Efeito da calagem na disponibilidade de micronutrientes para soja, cultivada em solo sob diferentes tempos de cultivo em plantio direto. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89–97, 2017.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. DE F. Química dos solos ácidos. In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. de F. **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa: SBCS, 2009.

NEPAR - Núcleo Estadual do Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

OLIVEIRA, E. L. de; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, v. 38, p. 47–57, 1996.

PALHANO, J. B. et al. **Calagem para soja - Recomendação para o estado do Paraná**. Londrina: EMBRAPA, 1984.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1992.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. VAN. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 184–187, 1979.

RAIJ, B. VAN. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, v. 28, n. 8, p. 85–112, 1969.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de Fertilidade**. Campinas: Instituto agrônomo, 1983.

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

SANTOS, D. R. dos et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. v. 24, p. 797–805, 2000.

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

SCHONINGER, E. L. et al. Atributos químicos do solo e produtividade da cultura de soja em Soil chemical attributes and soybean yield in no-tillage system after surface liming. **Repositorio.Unesp.Br**, v. 31, n. 1, p. 1253–1262, 2010.

SILVA, V. da et al. Variáveis de acidez em função da mineralogia do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 551–559, 2008.

STAFF, S. S. **Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. USDA, 1999.

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

TISSI, J. A.; CAIRES, E. F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia**, v. 63, n. 3, p. 405–413, 2004.

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

VIEIRA, F. C. B. et al. Organic matter kept Al toxicity low in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilisation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 707–714, 2009.

VIEIRA, R. C. B. et al. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 188–198, 2012.

VIEIRA, R. C. B. et al. Sampling layer for soil fertility evaluation in long-term no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–11, 2016.

WIJANARKO, A.; TAUFIQ, A. Effect of lime application on soil properties and soybean yield on tidal land. **Agrivita**, v. 38, n. 1, p. 14–23, 2016.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, 1999.

5 APÊNDICES

ANEXO 1. PHCACL2 DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	5,3 a	5,3	5,6 a	5,9 a	5,8 a	6,0 a	5,4 a	5,8 a	5,8 a	5,9 a
Rot 2	5,4 a	5,4	5,3 b	5,51 a	5,7 a	6,0 a	5,6 a	5,7 a	5,8 a	5,8 a
Rot 3	5,0 b	5,1	5,4 ab	5,43 a	5,8 a	6,0 a	5,7 a	5,7 a	5,8 a	5,8 a
Controle	4,9 c	5,0	5,1 b	4,8 c	5,5 c	5,5 d	4,7 b	5,2 d	5,2 d	5,2 d
baixo	5,3 ab	5,3	5,4 ab	5,5 b	5,7 b	5,8 c	5,5 ab	5,5 c	5,7 c	5,6 c
médio	5,2 b	5,3	5,5 ab	5,7 b	5,8 b	6,2 b	5,8 a	5,9 b	6,0 b	6,0 b
alto	5,5 a	5,5	5,8 a	6,0 a	6,1 a	6,5 a	6,2 a	6,4 a	6,3 a	6,6 a
Interação	ns	0,02*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,9 a	4,9	5,0 a	5,0 a	5,7 a	5,6	5,5	5,5 a	5,5 a	5,4 b
Rot 2	5,0 a	5,0	4,9 a	5,0 a	5,7 a	5,6	5,4	5,5 a	5,5 a	5,5 b
Rot 3	4,8 a	4,9	5,0 a	5,0 a	5,7 a	5,7	5,4	5,6 a	5,6 a	5,5 a
Controle	4,9 a	4,9	4,9 a	4,8 c	5,4 c	5,4	5,2	5,3 c	5,2 d	5,1 c
baixo	4,9 a	4,9	4,9 a	5,0 bc	5,6 b	5,6	5,4	5,4 bc	5,4 c	5,4 b
médio	4,9 a	5,0	5,1 a	5,1 ab	5,7 b	5,7	5,5	5,6 b	5,6 b	5,6 b
alto	4,9 a	5,0	5,0 a	5,2 a	6,0 a	5,9	5,7	5,9 a	5,9 a	5,9 a
Interação	ns	0,01*	ns	ns	ns	0,009**	0,0001**	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,6 a	4,8 b	4,9 a	4,8	5,5	5,5	5,3	5,4 b	5,4 a	5,3b
Rot 2	4,6 a	4,7 b	4,9 a	4,8	5,6	5,5	5,4	5,4 b	5,4 a	5,2b
Rot 3	4,6 a	5,1 a	4,9 a	4,9	5,6	5,7	5,3	5,5 a	5,5 a	5,5a
Controle	4,6 a	4,8 ab	4,9 a	4,7	5,3	5,4	5,2	5,3 c	5,3 b	5,1 b
baixo	4,6 a	4,8 b	4,9 a	4,8	5,5	5,5	5,3	5,4 bc	5,3 ab	5,2 b
médio	4,6 a	4,9 ab	4,8 a	4,8	5,6	5,6	5,4	5,5 ab	5,3 ab	5,3 ab
alto	4,6 a	4,9 a	5,0 a	4,9	5,9	5,8	5,5	5,6 a	5,6 a	5,5a
Interação	ns	ns	ns	0,009**	0,01*	0,0001**	0,0071**	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,5 a	4,7 a		4,7	5,6	5,5	5,3 a	5,3 a	5,2 a	5,2 a
Rot 2	4,5 a	4,7 a		4,7	5,5	5,5	5,3 a	5,2 a	5,3 a	5,2 a
Rot 3	4,7 a	4,8 a		4,7	5,6	5,5	5,3 a	5,3 a	5,3 a	5,2 a
Controle	4,6 a	4,7 a		4,6	5,3	5,4	5,2 b	5,2 c	5,2 b	5,0 c
baixo	4,6 a	4,6 a		4,7	5,5	5,5	5,2 b	5,2 bc	5,2 b	5,1 bc
médio	4,6 a	4,7 a		4,7	5,6	5,5	5,3 b	5,3 b	5,3 a	5,2 ab
alto	4,6 a	4,7 a		4,8	5,8	5,6	5,5 a	5,5 a	5,3 a	5,4 a
Interação	ns	ns		0,005**	0,038*	0,01*	ns	ns	ns	ns

ANEXO 2. Al³⁺ DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,0 a	0,02 a	0,0 a	0,02 a	0,03 a	0,025 a	0,07 a	0,08 a	0,04 a	0,08 a
Rot 2	0,0 a	0,01 a	0,0 a	0,02 a	0,05 a	0,013 a	0,08 a	0,09 a	0,07 a	0,09 a
Rot 3	0,0 a	0,04 a	0,0 a	0,02 a	0,03 a	0,019 a	0,04 a	0,06 a	0,08 a	0,1 a
Controle	0,0 a	0,03 a	0,0 a	0,086 a	0,13 a	0,1 a	0,25 a	0,29 a	0,25 a	0,35 a
baixo	0,0 a	0,01 a	0,0 a	0,0 b	0,01 b	0,0 a	0,0 b	0,03 b	0,0 b	0,02 b
médio	0,0 a	0,01 a	0,0 a	0,0 b	0,0 b	0,0 a	0,0 b	0,0 b	0,0 b	0,0 b
alto	0,0 a	0,03 a	0,0 a	0,0 b	0,0 b	0,0 a	0,0 b	0,0 b	0,0 b	0,0 b
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,0 a	0,0 a	0,04 a	0,05 a	0,05 a	0,1 a	0,2	0,13 ab	0,14 a	0,18
Rot 2	0,0 a	0,0 a	0,06 a	0,06 a	0,09 a	0,1 a	0,1	0,16 a	0,13 a	0,22
Rot 3	0,0 a	0,1 a	0,02 a	0,03 a	0,04 a	0,0 a	0,1	0,07 b	0,1 a	0,1
Controle	0,0 a	0,0 a	0,07 a	0,13 a	0,23 a	0,2 a	0,3	0,37 a	0,35 a	0,46
baixo	0,0 a	0,0 a	0,04 ab	0,03 b	0,02 b	0,0 b	0,1	0,08 b	0,14 b	0,18
médio	0,0 a	0,1 a	0,03 b	0,01 b	0,0 b	0,0 b	0,0	0,02 b	0,0 c	0,03
alto	0,0 a	0,0 a	0,03 b	0,01 b	0,0 b	0,0 b	0,0	0,0 b	0,0 c	0,00
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,021*	ns	ns	0,0085**

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,2 a	0,2 a	0,22 a	0,14	0,06 b	0,13 ab	0,34	0,23 ab	0,22 a	0,34 a
Rot 2	0,1b	0,2 a	0,14 ab	0,16	0,16 a	0,2 a	0,14	0,3 a	0,24 a	0,36 a
Rot 3	0,0 b	0,1 a	0,09 b	0,05	0,08 ab	0,03 b	0,18	0,1 b	0,1 b	0,14 b
Controle	0,2 a	0,2 a	0,18 a	0,2	0,31 a	0,29 a	0,38	0,46 a	0,34 a	0,43 a
baixo	0,1 ab	0,2 a	0,17 a	0,11	0,03 b	0,12 ab	0,28	0,18 b	0,23 ab	0,38 ab
médio	0,1 c	0,2 a	0,16 a	0,09	0,03 b	0,05 b	0,13	0,12 b	0,11 b	0,21 bc
alto	0,1 bc	0,1 a	0,08 a	0,06	0,03 b	0,02 b	0,08	0,08 b	0,08 b	0,09 c
Interação	ns	ns	ns	0,018*	ns	ns	0,041*	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,2 a	0,3 a		0,2	0,2 a	0,2 a	0,3 a	0,3 a	0,3 a	0,4 a
Rot 2	0,2 a	0,2 a		0,2	0,3 a	0,2 a	0,3 a	0,5 a	0,4 a	0,5 b
Rot 3	0,1 a	0,3 a		0,2	0,2 a	0,1 a	0,2 a	0,2 a	0,2 a	0,3 a
Controle	0,2 a	0,3 a		0,3	0,5 a	0,4 a	0,5 a	0,6 a	0,4 a	0,5 a
baixo	0,1 a	0,3 a		0,2	0,2 b	0,1 b	0,3 ab	0,4 ab	0,4 a	0,5 a
médio	0,1 a	0,2 a		0,2	0,1 b	0,1 b	0,2 ab	0,4 ab	0,2 ab	0,3 ab
alto	0,1 a	0,2 a		0,1	0,1 b	0,0 b	0,1 b	0,1 b	0,2 b	0,2 b
Interação	ns	ns		0,034*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANEXO 3. H+AI DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	3,9 b	4,9	4,4 a	5,7 a	3,4 a	3,9 a	4,7 a	4,3 a	5,2 a	5,1 a
Rot 2	4,1 b	4,7	4,9 a	5,9 a	3,4 a	4,0 a	4,7 a	4,7 a	5,4 a	5,5 a
Rot 3	4,4 a	5,0	5,0 a	6,0 a	3,1 a	5,9 a	4,4 a	4,6 a	5,4 a	5,3 a
Controle	4,6 a	5,6	5,5 a	8,4 a	5,2 a	6,2 a	6,8 a	7,3 a	8,7 a	8,7 a
baixo	4,1 b	4,7	4,9 a	5,7 b	3,4 b	4,5 ab	4,9 b	5,0 b	5,9 b	5,7 b
médio	4,1 b	4,7	4,5 a	5,0 bc	2,6 bc	5,4 b	3,9 c	3,5 c	4,1 c	4,2 c
alto	3,8 b	4,5	4,1 a	4,2 c	2,0 c	2,3 c	2,8 d	2,4 d	2,8 d	2,6 d
Interação	ns	0,023*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,3 a	5,8 a	5,6	7,3	4,8	5,2 a	5,8	5,1	5,9 a	6,5 a
Rot 2	4,3 a	5,5 a	5,8	7,2	4,8	5,4 a	5,5	5,7	6,1 a	6,6 a
Rot 3	4,4 a	5,3 a	5,2	7,1	4,7	5,0 a	5,5	4,9	5,8 a	5,6 b
Controle	4,4 a	5,6 a	6,0	8,5	6,2	6,6 a	6,6	6,8	8,0 a	9,0 a
baixo	4,4 a	5,5 a	5,6	7,3	4,9	5,4 b	6,1	5,8	6,4 b	6,5 b
médio	4,3 a	5,6 a	5,2	6,8	4,4	4,9 bc	5,2	4,8	5,1 c	5,5 b
alto	4,3 a	5,5 a	5,5	6,2	3,7	4,0 c	4,5	3,5	4,1 c	4,0 c
Interação	ns	ns	0,009**	0,037*	0,01*	ns	0,041*	0,008**	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,6 a	5,9 a	6,2 a	8,1	5,0 a	5,7	5,9	5,6 a	6,8 a	6,7 a
Rot 2	4,6 a	5,7 a	5,8 a	8,1	5,0 a	6,0	5,1	5,7 a	6,6 a	6,5 ab
Rot 3	4,4 a	5,0 a	5,1 a	7,1	4,6 a	5,0	5,8	5,2 a	6,1 a	5,8 b
Controle	4,6 a	5,6 a	5,9 a	8,6	5,6 a	6,4	6,3	6,1 a	7,4 a	7,5 a
baixo	4,6 a	6,7 a	5,7 a	7,9	5,3 a	5,9	5,8	6,1 a	6,8 ab	6,4 ab
médio	4,4 a	5,6 a	5,9 a	7,6	4,6 ab	5,6	5,2	5,1 ab	6,1 ab	6,0 b
alto	4,5 a	5,2 a	5,4 a	7,1	3,6 b	4,4	5,0	4,6 b	5,6 b	5,4 b
Interação	ns	ns	ns	0,002**	ns	0,0001**	0,009**	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,4 a	5,8 a		7,9	4,7 a	5,9 a	5,5 a	5,1 a	5,5	5,9 a
Rot 2	4,6 a	5,3 a		8,2	5,0 a	5,8 a	5,5 a	5,3 a	5,8	6,4 a
Rot 3	4,7 a	5,5 a		7,6	4,6 a	5,9 a	5,5 a	5,1 a	5,5	6,0 a
Controle	4,6 a	5,5 a		8,7	5,5 a	6,8 a	6,2 a	5,6 ab	6,0	6,9 a
baixo	4,6 a	5,8 a		7,9	5,2 a	5,8 b	5,7 ab	5,8 a	5,7	6,3 ab
médio	4,5 a	5,5 a		7,9	4,5 ab	5,9 b	5,3 ab	4,8 bc	5,6	5,9 ab
alto	4,5 a	5,3 a		7,1	3,9 b	5,0 c	4,7 b	4,4 c	5,0	5,4 b
Interação	ns	ns		0,0006**	ns	ns	ns	ns	0,018*	ns

ANEXO 4. Ca²⁺ DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	5,8 a	5,6 a	5,5 a	6,3 a	7,7 a	7,9 a	8,3 ab	8,7 a	8,9 a	8,6 a
Rot 2	5,8 a	5,5 a	5,3 ab	6,1 a	7,4 a	8,3 a	7,4 b	8,2 ab	8,6 ab	8,3 ab
Rot 3	5,4 a	4,4 b	5,1 b	5,8 b	6,6 a	7,6 a	8,8 a	7,8 b	8,1 b	7,6 b
Controle	5,1 c	4,8 a	4,6 b	5,2 c	5,6 c	6,4 c	6,5 c	5,9 d	5,9 d	5,6 d
baixo	5,8 ab	5,1 a	5,1 ab	6,1 b	7,1 b	7,6 b	7,8 bc	7,8 c	7,7 c	7,8 c
médio	5,6 bc	5,2 a	5,6 a	6,3 ab	7,9 ab	8,5 ab	8,9 ab	9,0 b	9,4 b	8,9 b
alto	6,3 a	5,6 a	5,9 a	6,7 a	8,3 a	9,3 a	9,4 a	10,2 a	11,2 a	10,4 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	4,5 a	4,1 a	4,1	4,4 ab	5,1 a	5,4 a	6,2 a	6,0 a	6,4 a	6,0 a
Rot 2	4,6 a	4,3 a	4,0	4,7 a	5,4 a	5,4 a	6,2 a	6,2 a	6,4 a	5,8 a
Rot 3	4,5 a	4,3	4,0	4,2 b	4,9 a	5,5 a	6,3 a	6,0 a	6,2 a	6,1 a
Controle	4,5 a	4,3 a	3,8	4,0 b	4,6 b	4,9 b	6,0 a	5,1 c	5,0 c	4,8 d
baixo	4,5 a	4,2 a	3,9	4,4 ab	4,9 b	5,4 ab	6,1 a	5,7 bc	6,0 b	5,6 c
médio	4,6 a	4,1 a	4,2	4,6 a	5,2 ab	5,5 ab	6,2 a	6,3 ab	6,6 b	6,2 b
alto	4,6 a	4,4 a	4,1	4,7 a	5,9 a	6,0 a	6,8 a	7,2 a	7,8 a	7,3 a
Interação	ns	ns	0,016*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	2,1 b	2,2 b	2,1	3,4 b	4,2 a	3,6 a	4,0 a	4,0 a	4,5 a	3,9 a
Rot 2	2,2 b	2,2 b	1,9	3,6 ab	4,1 a	6,7 a	4,5 a	4,0 a	4,2 a	3,8 a
Rot 3	3,0 a	3,5 a	2,5	3,9 a	4,2 a	4,1 a	3,9 a	4,1 a	4,7 a	4,5 a
Controle	2,3 a	2,4 b	2,1	3,4 a	3,7 b	3,5 b	4,0 a	3,5 b	4,1 a	3,7 b
baixo	2,4 a	2,4 b	2,1	3,6 a	4,0 b	3,8 ab	4,1 a	4,0 ab	4,3 a	3,8 b
médio	2,6 a	2,7 ab	2,1	3,6 a	4,2 ab	3,7 ab	4,0 a	4,3 a	4,6 a	4,2 ab
alto	2,5 a	3,0 a	2,3	3,8 a	4,8 a	4,2 a	4,4 a	4,4 a	4,9 a	4,6 a
Interação	ns	ns	0,034*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	1,5 b	1,5 b		2,3 a	3,2 a	2,7 b	3,2 a	2,8 a	2,8 a	2,9 ab
Rot 2	1,6 ab	1,5 b		2,4 a	3,2 a	3,0 a	3,3 a	2,7 a	2,8 a	2,9 b
Rot 3	1,8 a	2,0 a		2,4 a	3,0 a	3,0 a	3,5 a	2,7 a	3,1 a	3,2 a
Controle	1,5 b	1,7 a		2,2 b	2,7 b	2,7 b	3,0 b	2,3 b	2,6 a	2,7 c
baixo	1,5 ab	1,6 a		2,3 ab	3,0 ab	2,9 ab	3,2 b	2,6 b	2,6 a	2,8 c
médio	1,7 a	1,7 a		2,3 ab	3,2 ab	2,9 ab	3,3 ab	2,9 ab	3,2 a	3,1 b
alto	1,7 a	1,7 a		2,6 a	3,7 a	3,2 a	3,9 a	3,3 a	3,2 a	3,5 a
Interação	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANEXO 5. Mg²⁺ DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	3,1 a	3,0 a	3,0 a	3,4 a	4,4 a	3,9 a	4,3 a	3,8 a	3,8 a	3,9 a
Rot 2	3,3 a	3,0 a	2,9 a	3,4 a	4,2 a	4,1 a	3,6 b	3,5 a	3,6 a	3,7 a
Rot 3	2,8 b	2,3 b	2,6 b	3,2 a	4,1 a	3,9 a	4,3 a	3,5 a	3,6 a	3,6 a
Controle	2,3 c	2,2 b	2,0 c	2,4 c	2,4 c	2,3 d	2,6 d	1,9 d	1,8 d	2,0 d
baixo	3,3 ab	2,8 a	2,8 b	3,4 b	4,1 b	3,6 c	3,6 c	3,1 c	3,0 c	3,1 c
médio	3,1 b	3,0 a	3,1 ab	3,6 ab	4,8 b	4,5 b	4,2 b	4,1 b	4,1 b	4,1 b
alto	3,6 a	3,2 a	3,5 a	4,0 a	5,8 a	5,4 a	5,9 a	5,4 a	5,7 a	5,6 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	2,2 ab	2,1 a	2,0 a	2,2 ab	2,7 a	2,7 a	3,3 a	2,7 a	2,9 a	2,9 a
Rot 2	2,4 a	2,2 a	2,0 a	2,4 a	3,0 a	2,7 a	3,4 a	2,7 a	2,8 a	2,9 a
Rot 3	2,0 b	2,0 a	2,1,7 a	2,0 b	2,7 a	2,8 a	3,3 a	2,7 a	2,8 a	2,9 a
Controle	2,1 a	2,1 a	1,7 b	1,8 c	2,0 c	2,0 c	2,6 c	1,8 c	1,7 d	1,8 d
baixo	2,2 a	2,1 a	1,9 ab	2,2 b	2,6 b	2,6 b	3,1 bc	2,4 bc	2,5 c	2,6 c
médio	2,2 a	2,1 a	2,1 ab	2,4 ab	2,9 b	2,8 b	3,5 ab	2,9 bc	3,1 b	3,1 b
alto	2,3 a	2,3 a	2,1 ab	2,5 a	3,7 a	3,5 a	4,0 a	3,7 a	4,0 a	4,2 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	1,5 a	1,6 b	1,4	2,3 a	2,3 a	2,1 a	2,4	2,0 a	2,2 a	2,2 a
Rot 2	1,6 a	1,6 b	1,3	2,4 a	2,6 a	2,2 a	2,7	2,1 a	2,1 a	2,2 a
Rot 3	1,7 a	2,1 a	1,4	2,5 a	2,5 a	2,3 a	2,3	2,0 a	2,2 a	2,4 a
Controle	1,5 a	1,7 b	1,3	2,1 b	1,9 c	1,8 c	2,2	1,5 c	1,7 b	1,7 d
baixo	1,6 a	1,6 b	1,3	2,4 ab	2,3 bc	2,2 b	2,4	1,9 bc	2,1 ab	2,1 c
médio	1,6 a	1,7 ab	1,3	2,5 a	2,6 b	2,2 b	2,4	2,2 ab	2,3 ab	2,4 b
alto	1,7 a	2,0 a	1,5	2,7 a	3,1 a	2,6 a	2,8	2,5 a	2,7 a	2,9 a
Interação	ns	ns	0,010*	ns	ns	ns	0,016*	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	1,3 a	1,2 a		1,9	2,2 a	1,8 b	2,1 a	1,7 a	1,6 a	1,8 a
Rot 2	1,3 a	1,2 a		2,1	2,2 a	1,9 ab	2,2 a	1,6 a	1,7 a	1,9 a
Rot 3	1,4 a	1,5 a		2,0	2,1 a	2,0 a	2,2 a	1,7 a	1,8 a	2,0 a
Controle	1,3 a	1,3 a		1,8	1,6 c	1,6 b	1,8 b	1,3 c	1,4 b	1,5 d
baixo	1,3 a	1,2 a		1,9	1,9 b	1,9 b	2,1 b	1,5 bc	1,5 b	1,7 c
médio	1,4 a	1,4 a		1,9	2,1 b	1,9 ab	2,2 b	1,7 ab	1,8 a	2,0 b
alto	1,3 a	1,3 a		2,3	2,7 a	2,2 a	2,7 a	2,1 a	2,0 a	2,4 a
Interação	ns	ns		0,033*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANEXO 6. SB DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	9,3 ab	8,9 a	8,8 a	10,3 a	12,6 a	12,2 a	13,1 a	12,9 a	13,0 a	12,8 a
Rot 2	9,6 a	8,8 a	8,4 ab	10,0 a	12,1 a	12,8 a	11,3 b	12,1 ab	12,6 a	12,3 ab
Rot 3	8,7 b	7,0 b	7,9 b	9,4 b	11,2 a	11,9 a	13,6 a	11,6 b	11,9 a	11,4 b
Controle	7,9 c	7,4 b	6,8 b	8,1 c	8,5 c	9,1 c	9,6 c	8,1 d	8,0 d	7,9 d
baixo	9,6 ab	8,2 ab	8,1 ab	10,0 b	11,6 b	11,6 b	11,8 b	11,2 c	11,0 c	11,2 c
médio	9,0 b	8,4 ab	8,9 a	10,4 ab	13,2 ab	13,4 a	13,5 b	13,5 b	13,8 b	13,3 b
alto	10,3 a	9,0 a	9,6 a	11,2 a	14,5 a	15,0 a	15,7 a	16,0 a	17,1 a	16,3 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	6,7 a	6,4 a	6,3	6,9 ab	8,0 a	8,2 a	9,7 a	8,9 a	9,4 a	9,0 a
Rot 2	7,3 a	6,7 a	6,1	7,3 a	8,6 a	8,3 a	9,8 a	9,1 a	9,4 a	8,8 a
Rot 3	6,9 a	6,5 a	5,8	6,5 b	7,7 a	8,4 a	9,9 a	8,8 a	9,1 a	9,1 a
Controle	6,8 a	6,6 a	5,6	6,1 b	6,8 c	7,1 c	8,9 b	7,1 c	6,9 d	6,7 d
baixo	7,1 a	6,4 a	5,9	6,9 a	7,6 bc	8,1 bc	9,4 b	8,3 bc	8,6 c	8,3 c
médio	6,7 a	6,4 a	6,4	7,3 a	8,3 ab	8,4 b	9,9 ab	9,4 b	9,8 b	9,5 b
alto	7,2 a	6,9 a	6,3	7,5 a	9,7 a	9,6 a	11,0 a	11,1 a	12,0 a	11,5 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	3,8 b	3,9 b	3,5	5,8 a	6,7 a	5,7 a	6,5 a	6,2 a	6,8 a	6,1 a
Rot 2	4,0 ab	3,8 b	3,2	6,1 a	6,8 a	6,0 a	7,3 a	6,2 a	6,5 a	6,1 a
Rot 3	4,7 a	5,8 a	4,0	6,5 a	6,9 a	6,6 a	6,3 a	6,2 a	7,1 a	6,9 a
Controle	3,9 a	4,2 b	3,4	5,6 b	5,8 b	5,4 b	6,3 a	5,1 b	5,9 b	5,4 c
baixo	4,0 a	4,1 b	3,5	6,2 ab	6,4 b	6,1 ab	6,6 a	6,0 ab	6,5 ab	6,0 bc
médio	4,5 a	4,6 ab	3,5	6,2 ab	6,9 b	6,0 b	6,6 a	6,6 a	7,0 ab	6,7 bc
alto	4,2 a	5,1 a	3,8	6,7 a	8,0 a	6,9 a	7,4 a	7,1 a	7,8 a	7,5 a
Interação	ns	ns	0,018*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	3,3 a	2,8 b		4,2 a	5,4 a	4,6 b	5,5 a	4,6 a	4,5 a	4,8 a
Rot 2	2,9 a	2,9 b		4,6 a	5,5 a	5,0 a	5,6 a	4,4 a	4,5 a	4,8 a
Rot 3	3,3 a	3,6 a		4,5 a	5,2 a	5,1 a	5,9 a	4,5 a	5,0 a	5,3 a
Controle	3,0 a	3,0 a		4,2 b	4,4 c	4,4 b	4,9 b	3,6 c	4,0 c	4,2 c
baixo	2,9 a	2,9 a		4,3 ab	5,1 bc	4,8 ab	5,4 b	4,2 bc	4,2 bc	4,6 c
médio	3,6 a	3,2 a		4,3 ab	5,4 ab	4,9 ab	5,6 b	4,7 ab	5,1 ab	5,2 b
alto	3,1 a	3,1 a		5,0 a	6,5 a	5,4 a	6,8 a	5,5 a	5,3 a	5,9 a
Interação	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANEXO 7. V% DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	69,1 a	64,1 a	65,9 a	64,5 a	78,4 a	75,9 a	73,3 a	74,4 a	70,6 a	71,1 a
Rot 2	69,6 a	64,4 a	62,5 a	63,4 ab	78,1 a	75,8 a	70,6 b	71,7 a	69,3 a	68,9 a
Rot 3	66,0 a	57,2 a	61,1 a	61,5 b	77,3 a	73,3 a	75,2 a	70,4 a	67,6 a	68,1 a
Controle	63,5 c	56,7 b	55,6 b	49,0 c	62,3 c	59,5 c	58,5 d	52,8 d	48,2 d	47,9 d
baixo	69,2 ab	62,9 ab	61,5 ab	63,7 b	77,8 b	72,2 b	70,8 c	69,3 c	65,3 c	66,3 c
médio	67,7 bc	62,7 ab	66,4 a	67,2 b	83,4 a	81,6 a	77,9 b	79,7 b	77,3 b	76,5 b
alto	72,6 a	65,4 a	69,3 a	72,6 a	88,2 a	86,8 a	85,0 a	86,9 a	85,9 a	86,7 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	60,6 a	52,6 a	52,5	48,7 a	62,4 a	61,4 a	63,0	63,5 a	61,5 a	58,4 b
Rot 2	62,7 a	54,9 a	50,7	50,7 a	63,8 a	60,6 a	64,5	62,3 a	60,7 a	57,8 b
Rot 3	61,6 a	54,8 a	52,4	47,9 a	62,2 a	62,8 a	64,4	64,1 a	60,7 a	62,1 a
Controle	61,9 a	54,0 a	48,3	41,6 c	52,5 d	51,7 c	57,6	51,3 d	46,3 d	42,9 d
baixo	61,6 a	53,8 a	51,2	48,3 b	60,8 c	60,3 b	60,9	59,2 c	57,0 c	56,4 c
médio	60,5 a	52,8 a	54,5	51,9 ab	65,6 b	63,4 b	65,8	66,3 b	65,9 b	63,7 b
alto	62,5 a	55,7 a	53,6	54,5 a	72,3 a	70,9 a	71,6	76,3 a	74,6 a	74,8 a
Interação	ns	ns	0,0007**	ns	ns	ns	0,042*	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	44,3 b	39,4 a	36,1	42,0	53,9 a	50,1	53,1	53,0 a	50,5 a	48,3 b
Rot 2	46,3 ab	39,8 a	35,2	43,1	57,8 a	50,4	58,9	52,9 a	49,8 a	49,0 b
Rot 3	51,6 a	51,1 a	44,7	48,0	60,1 a	57,2	51,5	54,6 a	53,8 a	55,0 a
Controle	45,9 a	42,0 a	36,9	39,7	51,4 b	45,8	50,3	46,8 c	44,6 b	42,2 c
baixo	46,1 a	40,8 a	39,3	44,1	54,8 ab	51,3	53,6	49,8 bc	48,9 ab	48,8 bc
médio	49,3 a	43,5 a	37,4	45,1	59,8 ab	52,0	54,3	56,6 ab	53,5 ab	53,1 ab
alto	48,3 a	47,5 a	41,1	48,5	63,0 a	61,2	59,9	60,8 a	58,4 a	59,0 a
Interação	ns	ns	0,011*	0,011*	ns	0,014*	0,019*	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	41,1 a	32,4 a		34,9	52,8 a	43,6 a	50,1 a	47,4 a	45,4	45,3 a
Rot 2	38,9 a	35,1 a		36,1	52,4 a	46,7 a	51,2 a	45,8 a	44,0	43,3 a
Rot 3	41,0 a	39,3 a		36,9	53,1 a	46,3 a	52,1 a	46,8 a	47,4	47,1 a
Controle	38,9 a	35,4 a		31,7	44,8 c	39,6 c	44,5 b	39,8 b	40,3	38,3 c
baixo	38,4 a	33,5 a		35,3	49,8 bc	45,8 b	49,0 b	41,8 a	42,8	42,2 bc
médio	43,1 a	36,5 a		35,4	54,5 b	44,8 b	51,3 ab	49,9 a	48,8	47,3 ab
alto	40,9 a	37,1 a		41,4	62,0 a	51,9 a	59,7 a	55,3 a	51,3	53,3 a
Interação	ns	ns		0,026*	ns	ns	ns	ns	0,043*	nc

ANEXO 8. m% DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,00 a	0,23 a	0,26 a	0,27 a	0,29 a	0,26 a	0,71 a	0,92 a	0,51 a	0,93 a
Rot 2	0,00 a	0,15 a	0,31 a	0,24 a	0,53 a	0,13 a	0,80 a	1,02 a	0,83 a	1,10 a
Rot 3	0,00 a	0,73 a	0,32 a	0,28 a	0,33 a	0,20 a	0,44 a	0,82 a	0,99 a	1,28 a
Controle	0,00 a	0,45 a	0,58 a	1,06 a	1,45 a	0,79 a	2,61 a	3,45 a	3,10 a	4,24 a
baixo	0,00 a	0,14 a	0,30 a	0,00 b	0,08 b	0,00 a	0,00 b	0,23 b	0,00 b	0,18 b
médio	0,00 a	0,22 a	0,20 a	0,00 b	0,00 b	0,00 a	0,00 b	0,00 b	0,00 b	0,00 b
alto	0,00 a	0,68 a	0,10 a	0,00 b	0,00 b	0,00 a	0,00 b	0,00 b	0,00 b	0,00 b
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	0,04 a	0,70 a	0,70 a	0,73 a	0,73 a	0,89 a	1,96 a	1,58 a	1,79 a	2,34
Rot 2	0,00 a	0,32 a	1,06 a	0,94 a	1,25 a	1,13 a	0,69 b	2,04 a	1,71 a	2,87
Rot 3	0,00 a	1,10 a	0,32 a	0,49 a	0,54 a	0,52 a	0,66 b	1,02 a	1,44 a	1,42
Controle	0,00 a	0,54 a	1,19 a	2,15 a	3,13 a	2,98 a	2,77 a	4,98 a	4,88 a	6,41
baixo	0,00 a	0,52 a	0,64 ab	0,43 b	0,22 ab	0,40 b	1,19 ab	1,03 b	1,71 b	2,16
médio	0,00 a	1,30 a	0,50 b	0,20 b	0,00 b	0,00 b	0,28 b	0,17 b	0,00 c	0,28
alto	0,06 a	0,47 a	0,45 b	0,09 b	0,00 b	0,00 b	0,18 b	0,00 b	0,00 c	0,00
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,027*

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	5,69 a	5,34 a	6,57 a	2,43	0,94 a	2,26 ab	5,28	3,76 ab	3,34 a	5,36 a
Rot 2	2,45 b	4,24 a	4,18 ab	2,75	2,49 a	3,59 a	1,90	5,04 a	4,07 a	5,91 a
Rot 3	0,95 b	3,77 a	2,55 b	0,75	1,13 a	0,53 b	2,59	1,78 b	1,61 b	2,13 b
Controle	4,58 a	5,07 a	5,59 a	3,53	4,88 a	5,28 a	5,94	8,06 a	5,78 a	7,56 a
baixo	3,53 ab	5,44 a	4,93 a	1,81	0,55 b	1,93 b	4,04	2,98 b	3,49 ab	5,88 ab
médio	1,40 c	4,65 a	4,61 a	1,57	0,38 b	1,01 b	2,03	1,68 b	1,68 b	3,20 bc
alto	2,60 bc	2,63 a	2,61 a	1,00	0,28 b	0,29 b	1,03	1,41 b	1,09 b	1,23 c
Interação	ns	ns	ns	0,029*	ns	ns	0,033*	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	5,64 a	8,92 a		3,98	4,33 a	3,34 a	6,46 a	7,39 a	6,63 ab	7,17 a
Rot 2	5,35 ab	5,99 a		5,31	5,60 a	4,47 a	4,83 a	10,36 a	8,69 a	9,14 a
Rot 3	2,41 b	7,31 a		3,87	4,40 a	2,21 a	3,18 a	5,16 a	4,57 b	5,95 a
Controle	6,47 a	7,91 a		7,12	10,08 a	8,63 a	8,65 a	12,64 a	9,63 a	11,22 a
baixo	5,08 a	9,13 a		0,381	4,68 b	2,75 b	5,59 a	9,08 ab	8,94 ab	9,40 ab
médio	3,24 a	6,91 a		4,13	2,60 b	2,07 b	3,80 a	7,13 ab	4,46 bc	6,29 bc
alto	3,07 a	5,68 a		2,49	1,75 b	0,28 b	1,24 a	2,29 b	3,48 c	2,78 c
Interação	ns	ns		0,013*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ANEXO 9. CTC_{pH7,0} DO SOLO NOS DIFERENTES ANOS E CAMADAS AMOSTRADAS, EM FUNÇÃO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS E NÍVEIS DE CALAGEM APLICADOS EM 2004.

0-10 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	13,2 ab	13,8 a	13,2 a	16,0 a	15,9 a	16,1 a	17,7 a	17,2 a	18,1 a	17,9
Rot 2	13,7a	13,6 a	13,2 a	15,9 ab	15,4 ab	16,8 a	16,0 b	16,8 ab	17,9 a	17,7
Rot 3	13,0 b	12,0 b	12,9 a	15,4 b	14,2 b	16,0 a	17,9 a	16,2 b	17,3 b	16,7
Controle	12,3 b	13,0 a	12,3 b	16,5 a	13,6 b	15,3 b	16,3 a	15,4 b	16,7 b	16,6
baixo	13,7 a	12,9 a	13,0 ab	15,7 b	14,9 ab	16,0 ab	16,7 a	16,2 b	16,9 b	16,9
médio	13,1 ab	13,1 a	13,4 a	15,4 b	15,8 a	16,5 ab	17,3 a	16,9 ab	17,8 b	17,5
alto	14,1 a	13,5 a	13,7 a	15,4 b	16,4 a	17,3 a	18,4 a	18,4 a	19,8 a	18,8
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,01*

10-20 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	11,0 a	12,2 a	11,9 a	14,2	12,8 a	13,4 a	15,4 a	14,0 a	15,3 a	15,5 a
Rot 2	11,6 a	12,2 a	11,9 a	14,5	13,4 a	13,7 a	15,3 a	14,7 a	15,5 a	15,4 a
Rot 3	11,2 a	11,9 a	11,0 a	13,6	12,3 a	13,4 a	15,4 a	13,7 a	14,8 a	14,6 a
Controle	11,1 a	12,1 a	11,6 a	14,6	13,0 a	13,7 a	15,5 a	13,8 a	14,8 b	15,7 a
baixo	11,5 a	11,9 a	11,5 a	14,2	12,5 a	13,5 a	15,5 a	14,0 a	15,0 b	14,7 a
médio	11,0 a	12,0 a	11,5 a	14,1	12,6 a	13,2 a	15,1 a	14,1 a	14,9 b	14,9 a
alto	11,5 a	12,3 a	11,8 a	13,7	13,3 a	13,5 a	15,4 a	14,6 a	16,1 a	15,5 a
Interação	ns	ns	ns	0,008**	ns	ns	ns	ns	ns	ns

20-40 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	8,5 a	9,8 a	9,7 a	13,9 a	11,8 a	11,4	12,3 a	11,7 a	13,6 a	12,7 a
Rot 2	8,5 a	9,6 a	8,9 a	14,3 a	11,8 a	12,1	12,4 a	11,8 a	13,1 a	12,6 a
Rot 3	9,1 a	10,7 a	9,1 a	13,7 a	11,4 a	11,5	12,1 a	11,4 a	13,1 a	12,6 a
Controle	8,5 a	9,8 a	9,2 a	14,2 a	11,3 a	11,8	12,6 a	11,1 a	13,3 a	12,8 a
baixo	8,6 a	9,7 a	9,3 a	14,0 a	11,7 a	11,9	12,4 a	12,1 a	13,3 a	12,3 a
médio	8,9 a	10,2 a	9,4 a	13,8 a	11,4 a	11,6	11,7 a	11,7 a	13,0 a	12,6 a
alto	8,7 a	10,3 a	9,2 a	13,8 a	12,1 a	11,3	12,3 a	11,6 a	13,3 a	12,9 a
Interação	ns	ns	ns	ns	ns	0,016*	ns	ns	ns	ns

40-60 cm	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rot 1	7,6 a	8,6 ab		12,1 a	10,0 a	10,5 a	10,9 a	9,7 a	10,0 a	10,7 a
Rot 2	7,5 a	8,1b		12,8 a	10,4 a	10,8 a	11,0 a	9,7 a	10,3 a	11,2 a
Rot 3	8,0 a	9,0 a		12,1 a	9,8 a	11,0 a	11,3 a	9,5 a	10,4 a	11,2 a
Controle	7,6 a	8,5 a		12,8 a	9,9 a	11,2 a	11,1 a	9,2 a	10,0 a	11,0 a
baixo	7,4 a	8,8 a		12,3 a	10,2 a	10,6 a	11,0 a	10,0 a	9,9 a	10,8 a
médio	8,1 a	8,7 a		12,2 a	9,9 a	10,8 a	10,8 a	9,5 a	10,7 a	11,0 a
alto	7,7 a	8,4 a		12,1 a	10,4 a	10,3 a	11,4 a	9,8 a	10,4 a	11,2 a
Interação	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns