

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ E MODOS DE APLICAÇÃO DE
FÓSFORO E POTÁSSIO: EFEITOS NA VARIAÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ
DO SOLO, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE
GRÃOS**

**Lucas Nascimento Brum
(Dissertação de MESTRADO)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ E MODOS DE APLICAÇÃO DE
FÓSFORO E POTÁSSIO: EFEITOS NA VARIAÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ
DO SOLO, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE
GRÃOS**

LUCAS NASCIMENTO BRUM
Engenheiro-Agrônomo (URI – Santiago)

Dissertação apresentada como um
dos requisitos à obtenção do Grau
de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Brum, Lucas
ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ E MODOS DE
APLICAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO: EFEITOS NA VARIAÇÃO
VERTICAL DA ACIDEZ DO SOLO, DISPONIBILIDADE DE
NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS / Lucas Brum. --
2023.

63 f.

Orientador: Tales Tiecher.

Coorientador: Tadeu Luis Tiecher.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2023.

1. Estratégias de calagem. 2. Calcário. 3. Óxido de
Cálcio. 4. Acidez em subsuperfície. 5. Calcário
incorporado. I. Tiecher, Tales, orient. II. Tiecher,
Tadeu Luis, coorient. III. Título.

LUCAS NASCIMENTO BRUM

Engenheiro Agrônomo
(Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das
Missões - URI)

DISSERTAÇÃO

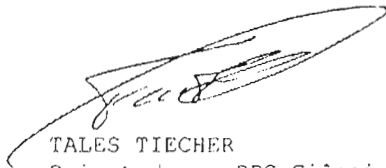
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 21.03.2023
Pela Banca Examinadora

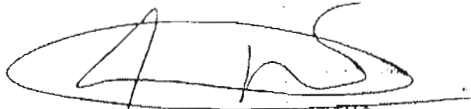
Homologado em: 28.08.2023
Por



TALES TIECHER
Orientador - PPG Ciência do Solo
UFRGS

Documento assinado digitalmente
gov.br ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Data: 30/08/2023 09:43:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo/UFRGS



AMANDA POSSELT MARTINS
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Documento assinado digitalmente
gov.br DJALMA EUGÊNIO SCHMITT
Data: 27/03/2023 11:20:56-0300
CPF: ***.180.526-**
Verifique as assinaturas em <https://validar.iti.gov.br>

DJALMA EUGÊNIO SCHMITT
PPG Ecossistemas Agrícolas e Naturais/UFSC

Documento assinado digitalmente
gov.br JESSE RODRIGO FINK
Data: 22/03/2023 08:30:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

JESSE RODRIGO FINK
IFPR
(através de videoconferência)

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ALBERTO BISSANI
Data: 30/08/2023 10:49:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia/UFRGS

*" Pensamos demasiadamente e sentimos muito pouco.
Necessitamos mais de humildade que de máquinas. Mais
de bondade e ternura que de inteligência. Sem isso, a
vida se tornará violenta e tudo se perderá."
Charles Chaplin, O Grande Ditador (1940)*

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Bruno Palmeiro Brum e Nivia Margarete Nascimento Flores, por terem propiciado a base para o caminho que decidi traçar, sempre com apoio incondicional e nunca me deixando desistir dessa caminhada desde o início. Também a minha madrastra Simone Fortes Brum e ao meu padrasto Manoel Flores, pessoas excepcionais que entraram na minha vida e acrescentaram ensinamentos, alegria e apoio.

Aos meu irmão Murilo Nascimento Brum, um grande amigo e companheiro inseparável mesmo que distante e aos meus irmãos “emprestados” Isadora Fortes Karnopp e Vitor Fortes Karnopp, que eu vi crescer e que vem me trazendo muita animação em todos esses anos.

À minha família, em especial a minha avó Nelcinda que desde sempre foi uma pessoa cuidadosa e resiliente que nunca deixou de me apoiar sempre e aos meus primos Gabriel e Raquel, que foram quase irmãos e que sempre estão presentes quando eu preciso.

Ao meu orientador Prof. Tales Tiecher e ao meu Coorientador Tadeu Luis Tiecher, pelos ensinamentos repassados, compreensão, parceria e prontidão para o desenvolvimento do trabalho, sendo sempre pessoas voltadas a resolução dos problemas e desenvolvimento do grupo.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo que de alguma forma sempre foram solícitos em esclarecer dúvidas e auxiliar nas demandas do trabalho.

Aos meus ex-colegas de iniciação científica, Thaynan, Daniel, Higor e aos demais, e ex-orientador Júlio, grandes amigos pra vida toda, que além do apoio na URI sempre me apoiaram no decorrer do mestrado também.

Aos amigos e colegas que encontrei durante o mestrado, e ao grupo de pesquisa IRGEB, pelos momentos de descontração, pelas inúmeras ajudas em campo e em laboratório.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de ensino público, pela infraestrutura e apoio nos projetos.

À Capes pela concessão da bolsa de mestrado, que possibilitou a minha permanência no programa e à Fundação Agrisus pelo financiamento do projeto.

E a todos que de alguma forma me ajudaram nessa caminhada e que esqueci de citar aqui. Fica aqui meu agradecimento.

ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO DA ACIDEZ E MODOS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO: EFEITOS NA VARIAÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ DO SOLO, DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

Autor: Lucas Nascimento Brum
Orientador: Prof. Tales Tiecher
Coorientador: Prof. Tadeu Luis Tiecher

RESUMO

A acidez do solo e a baixa concentração de nutrientes em profundidade ainda são alguns dos principais fatores limitantes da produtividade das culturas sob plantio direto. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes estratégias de correção da acidez do solo e diferentes modos de aplicação de P e K na variação vertical da acidez do solo, na disponibilidade de nutrientes e na produtividade de milho e soja. O estudo foi conduzido em um Plintossolo manejado sem um sistema definido desde 2004. O experimento foi instalado em novembro de 2020, em um desenho experimental bifatorial em blocos ao acaso com três repetições. O primeiro fator foi composto de estratégias de correção da acidez, sendo eles: (i) testemunha sem correção, (ii) aplicação superficial de óxido de cálcio e magnésio, (iii) aplicação superficial de calcário dolomítico e (iv) aplicação de calcário dolomítico incorporado a 20 cm. O segundo fator foi os modos de aplicação de P e K, sendo eles: (i) controle sem adubação, (ii) no sulco de semeadura e (iii) superficial à lanço. Em abril de 2021, seis meses após a instalação do experimento, amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30 e 30–40 cm. Foram determinados o pH em água, o teor de P e K disponível por Mehlich-1, e o teor de Ca, Mg e Al trocável com NH_4Cl 1 mol L^{-1} , e estimada a acidez potencial (H+Al) pelo método SMP. A incorporação do calcário resultou em maior pH e saturação por Ca+Mg+K e menor saturação por Al até 15 cm de profundidade do solo, resultando em um incremento de produtividade do milho de 66%, em relação aos demais tratamentos. A aplicação de P e K em superfície resultou em uma maior disponibilidade de P na camada de 0–5 cm do solo em relação aos demais tratamentos. A disponibilidade de K no solo não foi alterada em função dos modos de adubação. A aplicação de P e K em sulco de semeadura aumentou em 35% a produtividade do milho, comparado à aplicação na superfície. A correção de um maior volume de solo e em menor período de tempo só é possível através da incorporação do calcário, resultando em maior produtividade já na primeira safra, enquanto a aplicação que a aplicação em superfície corrige a acidez do solo somente nos primeiros centímetros do perfil, mesmo utilizando corretivos mais solúveis, como o óxido de Ca/Mg. A aplicação de P e K no sulco de semeadura traz mais benefícios em comparação com a aplicação a lanço, pois incrementa a produtividade, reduz o gradiente de P.

Palavras-chave: óxido de cálcio, calcário dolomítico, plantio direto, milho, soja.

Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (47p.) Março, 2023.

ACIDITY CORRECTION STRATEGIES AND PHOSPHORUS AND POTASSIUM APPLICATION MODES: EFFECTS ON VERTICAL SOIL ACIDITY VARIATION, NUTRIENT AVAILABILITY AND GRAIN PRODUCTIVITY

Author: Lucas Nascimento Brum
Adviser: Prof. Dr. Tales Tiecher
Co-adviser: Prof. Dr. Tadeu Luis Tiecher

ABSTRACT

The soil acidity and the low concentration of nutrients in depth still are some of the main limiting factors for crop productivity under no-tillage. This work aimed to evaluate the effect of different soil acidity correction strategies and different modes of P and K application on the vertical variation of soil acidity, nutrient availability and corn and soybean yield. The study was conducted on a Plinthosol managed without a defined system since 2004. The experiment was installed in November 2020, in a bifactorial experimental design in randomized blocks with three replications. The first factor was composed of acidity correction strategies, namely: (i) control without correction, (ii) surface application of calcium oxide, (iii) surface application of dolomitic limestone and (iv) application of dolomitic limestone incorporated into 20 cm. The second factor was the modes of application of P and K, namely: (i) control without fertilization, (ii) in the sowing furrow and (iii) superficial broadcast. In April 2021, six months after the installation of the experiment, soil samples were collected in layers of 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30 and 30–40 cm. The pH in water, the P and K available by Mehlich-1, and the Ca, Mg and Al content exchangeable with NH_4Cl 1 mol L^{-1} were determined, and the potential acidity was estimated by the SMP method. The incorporation of lime resulted in higher pH and saturation by Ca+Mg+K and lower saturation by Al up to 15 cm of soil depth, resulting in a 66% increase in corn productivity, in relation to the other treatments. Surface P and K resulted in greater P availability in the 0–5 cm soil layer compared to the other treatments. The availability of K in the soil was not altered according to the fertilization modes. The availability of K in the soil was not altered according to the fertilization modes. The application of P and K in the sowing furrow increased corn productivity by 35%, compared to the application on the surface. The correction of a larger volume of soil and in a shorter period of time is only possible through the incorporation of limestone, resulting in higher productivity already in the first harvest, while the broadcast application corrects the acidity of the soil only in the superficial layer of the soil, even using more soluble correctives, such as Ca oxide. The application of P and K in the sowing furrow brings more benefits compared to the broadcast application, as it increases productivity, reduces the P gradient.

Keywords: calcium oxide, dolomitic limestone, no-tillage, corn, soybean.

² Master's dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (47p.) March, 2023

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1. Acidez do solo	5
2.2. Correção da acidez do solo	7
2.3. Estratégias de correção e indicação do manual de calagem e adubação do Rio Grande do Sul e Santa Catarina	8
2.4. A acidez do solo e o modo de aplicação dos fertilizantes.....	9
2.5. Relações entre as características físicas do solo e a correção da acidez e da fertilidade do solo.....	12
3. HIPÓTESES	13
4. OBJETIVO	14
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
5.1. Descrição do experimento	15
5.2. Coleta de solo e análise.....	18
5.3. Análise estatística.....	20
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
6.1. Efeito das estratégias de correção da acidez sobre as propriedades químicas do solo Descrição do experimento	22
6.2. Efeito do modo de aplicação de fertilizantes na disponibilidade de P e K	26
6.3. Efeito da estratégia de correção da acidez na resistência a penetração do solo	29
6.4. Efeito do modo de adubação e correção da acidez do solo na produtividade da cultura do milho e da soja.....	31
7. CONCLUSÕES.....	37
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental até 40 cm de profundidade.....	19
Tabela 2. Descrição dos tratamentos utilizados, combinando modos de correção da acidez e adubação com P e K do solo.....	20
Tabela 3. Doses de corretivos da acidez e fertilizantes utilizados nos cultivos implantados. As doses de N, P e K foram calculadas para uma expectativa de rendimento de 10 Mg ha ⁻¹ para milho e 4 Mg ha ⁻¹ para soja.....	21
Tabela 4. Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações nas propriedades químicas do solo, como resultado da análise de variância (ANOVA).....	26

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição relativa das espécies de alumínio de acordo com o pH da solução do solo.....	9
Figura 2. Precipitação e temperatura médias mensais, no período de avaliação do experimento (outubro de 2020 a setembro de 2022) no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil	17
Figura 3. Croqui do experimento, com a distribuição dos tratamentos das diferentes estratégias de calagem e modos de adubação do solo.....	22
Figura 4. pH do solo (A), saturação por Ca+Mg+K (B), Ca trocável (C), Mg trocável (D), saturação por Al (E) e acidez potencial (H+Al) (F) nas diferentes camadas do solo, relacionados as estratégias de correção da acidez do solo.	28
Figura 5. Teor de fósforo (A) e potássio (B) disponível extraído com Mehlich-1 afetado pelas formas de aplicação de fertilizante do sulco de semeadura e à lança na superfície do solo até 40 cm de profundidade.....	32
Figura 6. Umidade gravimétrica do solo em função das estratégias de correção da acidez (A) e modos de adubação do solo (B) nas diferentes camadas do solo.....	35
Figura 7. Valores de resistência do solo a penetração afetados pelos modos de adubação (A) e pelas estratégias de correção da acidez (B) até 40 cm de profundidade	36
Figura 8. Produtividade de grãos da cultura do milho em função das estratégias de calagem e modos de adubação do solo.....	37
Figura 9. Relação entre a produtividade do milho e o pH do solo nas camadas de 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B) e com a saturação por Al nas camadas de 0 a 10 cm (B) e 10 a 20 cm (D).....	39
Figura 10. Produtividade da soja em função das estratégias de calagem (A) e os modos de adubação (B) em um Plintossolo do Sul do Brasil.....	41

1. INTRODUÇÃO

Durante as décadas de 1950 e 1960, no Sul do Brasil, houve uma ampla expansão da área cultivada para produção de grãos. Para isso, foram adotadas operações como gradagem pesada, aração e queima de resíduos, com o tempo esses manejos resultaram em graves problemas em relação a perda de nutrientes e matéria orgânica do solo (MOS) (CASÃO JUNIOR et al., 2012). Essa degradação foi decorrente justamente por consequência dos cultivos sucessivos com solos descobertos entre os cultivos e sem rotação de cultura ou plantas de cobertura. Embora ganhos de produtividade tenham sido obtidos através da utilização dos insumos e melhoria nos atributos químicos, as queimadas provocaram selamento superficial e formação de uma camada compactada em subsuperfície, abaixo da camada preparada por arado e grade (ANGHINONI et al., 2019). A partir da década de 1960, através de convênios entre o Ministério da Agricultura e o Ministério da Educação e Cultura com instituições estadunidenses, pesquisas sobre a fertilidade do solo foram implementadas no Brasil (CANTARUTTI et al., 2007). Isso possibilitou um estudo aprofundado nos métodos de análise de solo e calibrações adaptadas ao clima e ao solo brasileiro, o que foi um pilar para o avanço na implantação de recomendações de doses de corretivos de acidez de solo e fertilizantes (ANGHINONI et al., 2019).

Nesse período, o principal sistema de preparo de solo utilizado seguia sendo o preparo convencional, com frequentes arações e gradagens antes de cada cultivo. Nesse sistema, a camada de solo diagnóstica utilizada para fins de análise de solo foi justamente aquela que era frequentemente revolvida e homogeneizada através do preparo do solo, também chamada de “camada arável” (0 a 20 cm). Apesar dos avanços em termos de diagnose da fertilidade e ganhos em produtividade, o sistema de preparo convencional

gerava uma acelerada degradação do solo devido ao seu preparo intensivo e ausência de cobertura vegetal, viva ou morta, entre os cultivos (ANGHINONI et al., 2019). Assim, com o passar dos anos da utilização do sistema de plantio convencional, começou a se observar grandes perdas de solo por conta da erosão hídrica, perda no aproveitamento dos insumos aplicados e drástica redução nos teores de MOS e produtividade das culturas.

Nesse contexto, o plantio direto (PD), surgiu no Brasil no início da década de 1970 como uma alternativa interessante, pois gerou grandes melhorias quanto à conservação do solo, diminuindo o revolvimento, reduzindo os custos operacionais e os impactos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MINGOTTE et al., 2014). A partir de pesquisas relacionadas à fertilidade do solo e às aplicações de fertilizantes e corretivos da acidez em plantio direto, essas áreas degradadas gradualmente voltaram a ser produtivas (ROY et al., 2016). Com o advento do PD, a área cultivada no Brasil cresceu exponencialmente, passando de 19 milhões de hectares em 1985 para 55 milhões de hectares no ano de 2020 (MAPBIOMAS, 2021). Isso fez com que agricultura ganhasse um papel de destaque no desenvolvimento econômico do Brasil, alcançando no ano de 2020 um recorde de 225,4 milhões de toneladas de grãos (PAM/IBGE, 2020). Mesmo com um abrupto crescimento nos últimos anos, a produtividade média das principais culturas do Brasil está muito abaixo do que permite o potencial genético e climático (BATTISTI et al., 2018). Parte disso se deve à distribuição irregular de chuvas em algumas safras, mas, na maioria das vezes, a eficiência do uso da água é limitada pelo baixo desenvolvimento radicular devido à acidez do solo e baixa disponibilidade de fósforo (P) e potássio (K) nas camadas mais profundas do solo em áreas de plantio direto (BELLINASO et al., 2021). Além disso, muitas áreas que hoje são manejadas sob plantio direto, em detrimento da maior operacionalidade no manejo, não seguiram as orientações técnicas visando a correção das limitações químicas do solo em camadas subsuperficiais (REINHEINHEIMER et al. 2018a). Por isso, grande parte dos solos cultivados atualmente sob PD apresentam alta fertilidade química na superfície (0 a 10 cm de profundidade), com altos teores de P e K e livre de acidez; no entanto, em subsuperfície essa situação é inversa, com alta concentração de Al^{3+} (alumínio trocável) e baixa

disponibilidade de nutrientes (RHEINHEIMER et al., 2008; TIECHER et al., 2012; CALEGARI et al., 2013). Nessas camadas, a acidez do solo impõe restrições ao sistema radicular das culturas, prejudicando a absorção de água e nutrientes em profundidade. Tais restrições expõem a cultura a fatores limitantes da produtividade, como deficiência nutricional e estresse hídrico (SÁ et al., 2010). Isso é particularmente importante frente aos cenários futuros de diminuição da disponibilidade hídrica (SIQUEIRA et al., 2021; MAKSIĆ et al., 2022).

A correção da acidez do solo, por meio da calagem, visa elevar o pH do solo, reduzir os níveis de Al^{3+} e elevar a capacidade de troca de cátions (CTC) e as concentrações de cálcio trocável (Ca^{2+}) e magnésio trocável (Mg^{2+}) no solo (RHEINHEIMER et al., 2018b). Tal correção vem sendo objeto de estudos há décadas (MOHR, 1960), em busca da quantificação de doses (KAMINSKI, 1974) e do modo mais adequado para tal correção, com o intuito de definir a estratégia mais eficaz. No entanto, principalmente em PD, ainda existem lacunas quanto às melhores estratégias para a correção da acidez do solo, relacionadas principalmente à forma e ao tipo de corretivo a ser utilizado. Com base nesses aspectos é possível determinar a reatividade e a velocidade de reação do corretivo no solo (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). O corretivo mais utilizado na agricultura é o calcário, sendo uma boa opção para suprimento de Ca e Mg. No entanto, quando utilizado sob condições restritivas, como em solos sem um sistema consolidado de cultivo e com limitações físicas e químicas, este insumo apresenta baixa solubilidade e movimentação lenta no perfil do solo (RHEINHEIMER et al., 2018a). Neste contexto, o óxido de Ca/Mg é uma opção para a correção da acidez do solo em profundidade quando aplicado em superfície sem incorporação, pois apresenta granulometria mais fina, em relação ao calcário, e maior solubilidade, o que facilita a descida da frente alcalinizante (CHINAIDER, 2014). O óxido de Ca/Mg possui uma capacidade de neutralização em relação ao Calcário de 1,79, o que indica que 100 kg do óxido equivalem a 179 kg de calcário (ALCARDE, 2005). Quanto a solubilidade, a 25°C, a solubilidade do óxido é de 1200 mg L⁻¹ enquanto a do calcário é 14 mg L⁻¹.

Em conjunto com a correção da acidez do solo, o modo de aplicação

dos fertilizantes tem impacto direto na dinâmica dos nutrientes no solo e na produtividade das culturas. Tradicionalmente, P e K são aplicados no sulco de semeadura, e esse princípio é baseado na localização do fertilizante o mais próximo possível do sistema radicular das plantas, favorecendo a difusão até as raízes e conseqüente absorção, diminuindo a sua adsorção pelas partículas do solo, reduzindo as perdas de P e K por escoamento (NKEBIWEA, 2016). As vantagens da aplicação no sulco de semeadura são perceptíveis na cultura a campo, promovendo um melhor arranque da cultura, favorecendo alongação do mesocótilo, emergência de plântulas, absorção dos nutrientes e potencialização dos componentes de rendimento da planta (TEIXEIRA et al., 2018). Por outro lado, a aplicação superficial do fertilizante traz vantagens operacionais e menor custo. Contudo, a aplicação a lanço também favorece a concentração dos nutrientes na camada de 0 a 5 cm, diminuindo o crescimento do sistema radicular em profundidade, o que conseqüentemente reduz o potencial produtivo das culturas (RAFAIN et al., 2020).

Dessa forma, torna-se necessário a busca por estratégias de calagem e adubação com P e K que corrijam a acidez do solo e proporcionem uma maior disponibilidade de nutrientes em um volume maior de solo, e que garantem produtividades satisfatórias das culturas. Assim, hipotetiza-se que a incorporação do calcário na implantação do plantio direto, aliada à aplicação dos fertilizantes fosfatados e potássicos no sulco de semeadura, pode proporcionar um ambiente livre de acidez e Al^{3+} e maior disponibilidade de nutrientes em camadas mais profundas do solo, o que auxilia no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade das culturas. Sendo assim, esse estudo buscou investigar a melhor estratégia de correção da acidez e modo de adubação de P e K do solo após 6 meses da implantação do experimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Acidez do solo

Grande parte dos solos brasileiros apresentam limitações químicas, especialmente a acidez, ao estabelecimento dos sistemas produtivos. Entre os solos utilizados para agricultura no Brasil, estima-se que em torno de 70% sejam naturalmente ácidos (QUAGGIO, 2000). A acidez do solo possui várias origens. Naturalmente, um dos principais fatores é o processo de intemperismo das rochas durante a gênese do solo, sendo mais acentuada em regiões tropicais e subtropicais, principalmente em função da pluviosidade e temperatura. Em solos onde o processo ocorre de maneira mais intensa (Latosolos e Argissolos), a partir do processo de hidrólise e perda de silício dos minerais, ocorre a liberação de alguns cátions de menor valência e maior raio iônico na solução do solo ($\text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^{+} < \text{Na}^{+}$) que são lixiviados (QUAGGIO, 2004). Concomitantemente são liberados também íons com maior valência como Al^{3+} e o Fe^{3+} , que se acumulam nos sítios de troca da argila e da matéria orgânica (MEURER; BISSANI; CARMONA, 2017; FAGERIA; NASCENTE, 2014). O Al^{3+} apresenta alta reatividade com os grupos funcionais do solo e da MOS, sendo praticamente imóvel no perfil do solo (EMIL-FRAGA, 2012), apresentando um equilíbrio na concentração adsorvida nos grupos funcionais e na solução do solo, essas características do elemento provem um acúmulo nos primeiros centímetros do solo, onde se estabelece o sistema radicular das plantas (NOVAIS, 2007) Por meio de reações de hidrólise o Al na solução rompe a ligação com a água, ligando-se com o OH^{-} e produzindo um H^{+} , o que contribui para a acidificação do solo (BARROW, 1985).

A matéria orgânica do solo (MOS) também está relacionada a processos de acidificação do solo, sendo que a ionização do hidrogênio de

ácidos carboxílicos, fenólicos e álcoois terciários presentes na MOS aumenta a acidez do solo. A oxidação biológica de compostos orgânicos produz CO_2 , o qual reage com a água, formando HCO_3^- , que se dissocia liberando prótons (H^+) (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). No entanto, em condições de acúmulo de MOS e em seu estágio final de mineralização, a oxidação libera elétrons, o que pode ocasionar o aumento do pH do solo (MCBRIDE, 1994). Assim pode-se considerar a MOS como um potencial acidificante do solo, sendo tanto parte do processo de acidificação quanto do processo de alcalinização, atuando como um regulador das alterações do meio.

As plantas também são responsáveis pela acidificação do solo, pois durante o processo de absorção dos nutrientes liberam na rizosfera íons H^+ ou OH^- , quando ocorre a absorção ativa de um cátion ou um ânion, respectivamente, para equilibrar o meio (GOULDING, 2016; HAO et al., 2020). As leguminosas, por absorverem mais cátions do que ânions, devido a menor necessidade de absorção do nitrato do solo, visto que obtém o N pela fixação simbiótica, podem exsudar mais H^+ do que OH^- , gerando uma maior acidificação do solo em comparação às gramíneas. (KUZUYAKO & RAZAVI, 2019).

Além destes fatores, a adição de fertilizantes nitrogenados de fontes amoniacais, tais como o sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), o nitrato de amônio (NH_4NO_3), sempre terá caráter acidificante, resultando no saldo de um ou dois íons H^+ para cada molécula de NH_4^+ nitrificada. Isso está relacionado diretamente com o destino do NO_3^- gerado na nitrificação, se absorvido pelas plantas (saldo de 1 H^+), se lixiviado (saldo de 2 H^+) (ERNANI, 2008). Para manter a eletroneutralidade na solução do solo, ocorre o arraste de um cátion acompanhante (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ou Mg^{2+}) ligado ao NO_3^- lixiviado, o que acentua ainda mais a acidificação do solo (ARNUTI, 2014).

O alumínio (Al) constitui um importante componente da acidez do solo, sendo que a hidrólise do Al^{3+} em solução contribui para o poder tampão dos solos. Além disso, o Al e o manganês (Mn), quando em altas concentrações, podem ser tóxicos às plantas, sendo uma das principais limitações da produtividade das culturas em solos ácidos. Os efeitos associados à presença do Al^{3+} se caracterizam por mudanças no desenvolvimento fisiológico das raízes de grande parte das culturas agrícolas, levando ao atraso no desenvolvimento, na degeneração, no espessamento e na mudança na coloração das raízes, além

do aparecimento de ramificações e da ausência de pelos radiculares (DELHAIZA; RYAN, 1995; BORTOLUZZI et al., 2014). Sendo assim, é fundamental criar um ambiente onde ocorra o desenvolvimento radicular inicial livre da toxidez pelo Al^{3+} (REINHEIMMER; KAMINSKI, 1995; TIECHER et al., 2017). A má formação radicular das culturas é evidente, principalmente tendo em vista que com a sua capacidade de explorar o solo limitada, a planta diminui a absorção de nutrientes e água, tornando-se mais suscetível, principalmente em períodos de déficit hídrico (PIAS et al., 2020; TIECHER et al., 2018). Desta forma, é essencial uma correção adequada da acidez do solo em um grande volume de solo para atender a demanda produtiva das culturas anuais, principalmente na zona explorada pelas raízes, através do aumento do pH do solo, neutralização do Al^{3+} e aumento da saturação por $Ca+Mg+K$ e da disponibilidade de nutrientes (ZANDONÁ et al., 2015).

2.2 Correção da acidez do solo

A calagem é a prática mais utilizada e mais eficaz para reduzir a acidez do solo e, conseqüentemente, elevar a produtividade agrícola (FAGERIA; BALIGAR 2008; KUNHIKRISHNAN et al., 2016). Os benefícios se estendem também ao fornecimento direto de cátions de grande importância agrícola e que fazem parte da constituição do corretivo (Ca^{2+} e Mg^{2+}) (FAGERIA; NASCENTE, 2014). Diversos estudos mostram também uma ação positiva da calagem na absorção de nutrientes pela planta, através de sua relação com a atividade microbiológica do solo (CHENG et al., 2013), além da redução da disponibilidade de metais pesados no solo (BOLAN et al., 2003), eficiência no uso de nutrientes (FAGERIA; NASCENTE, 2014) e emissões de gases de efeito estufa de solos ácidos (KUNHIKRISHNAN et al., 2016). A escolha do corretivo e seu modo de aplicação são fatores preponderantes para uma correção com maior efetividade da acidez do solo. Dentre os fatores que influenciam a ação da calagem, se considera a reatividade do corretivo, de acordo com a sua granulometria e método de aplicação (KURIHARA et al., 1999; VERLENGIA; GARGANTINI, 1972), bem como a frequência e o modo de reaplicação (LUKIN; EPPLIN, 2003; REINHEIMMER et al., 2018a; BELLINASO et al., 2021).

Corretivos da acidez do solo são compostos por bases químicas como carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), hidróxidos (OH^-) e óxidos junto a cátions acompanhantes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e em alguns casos, silício (Si^{4+}) (TIECHER et al., 2022). A correção da acidez do solo é comumente realizada através da adição dos calcários, mas não se restringe apenas a esses materiais. Também podem ser utilizados outros materiais com poder neutralizante, como os óxidos, hidróxidos e silicatos de Ca ou Mg (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). A solubilidade em água dos corretivos da acidez, tem como base o pH próximo a neutralidade, em uma determinada temperatura, como exemplos: CaCO_3 (0,014 g/l a 25°C) e MgCO_3 (0,106 g/l a 25°C). No caso do CaO e MgO, ambos reagem com a água produzindo seus respectivos hidróxidos: Ca(OH)_2 (1,85 g/l a 0°C) e Mg(OH)_2 (0,009 g/l a 18°C). (ALCARDE, 2005). Após a solubilização e dissociação do CaCO_3 é gerado OH^- , tendo como ânion intermediário o HCO_3^- . As reações do OH^- com a acidez ativa na solução do solo eleva o pH, como descrito nas equações (1, 2 e 3). Mais especificamente, ocorre a difusão dos íons H^+ da solução do solo, para a dupla camada difusa. Após isso ocorre a neutralização por meio da destruição do mineral e liberação do CO_2 , o que promove a dissociação dos íons H^+ e Al^{3+} adsorvido aos grupos funcionais do solo (acidez potencial), amortecendo o consumo de prótons da solução até que um novo equilíbrio químico seja alcançado (TIECHER et al., 2022). Com isso, ocorre o aumento do pH do solo, dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e da precipitação do Al^{3+} , que permanece em formas não fitotóxicas (**Figura 1**) (BERTSCH; PARKER, 1995; SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008).



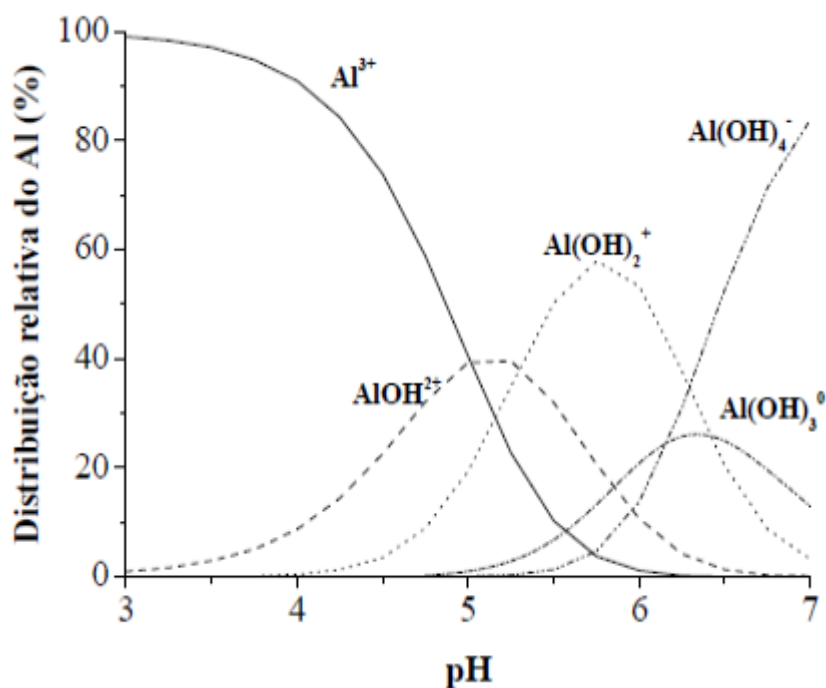


Figura 1. Distribuição relativa das espécies de alumínio de acordo com o pH da solução do solo (BERTSCH; PARKER, 1995).

2.3. Estratégias de correção da acidez do solo e indicação do Manual de Calagem e Adubação do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina

O sistema de recomendação de corretivos de acidez para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016), utiliza um pH de referência para cada grupo de culturas, baseado no grau de sensibilidade à acidez do solo e, em alguns casos, também o sistema de cultivo. Neste sistema de recomendação, quando o valor de pH está acima do valor de referência, não há resposta econômica da cultura à aplicação do corretivo e, portanto, não há a necessidade de sua aplicação. Atualmente, a definição da dose, para culturas de grãos de sequeiro, é indicada pelo Manual da CQFS-RS/SC (2016) através do índice SMP, em função da alta correlação com $H+Al$, determinado com acetato de cálcio pH 7,0 (RAIJ, 1989; CIPRANDI, 1993; GAMA, 1998; NOLLA; ANGHINONI, 2004).

Outros métodos alternativos também são recomendados para cultura de grãos no Manual da CQFS-RS/SC (2016), porém, com a calibração menos ajustada que o atualmente utilizado (QUAGGIO et al., 1986). Em solos com baixo poder tampão e/ou pobres em matéria orgânica (MOS), geralmente o índice SMP

costuma subestimar a acidez potencial e então indicar uma dose menor do corretivo, o que não é o suficiente para elevar o solo para o pH desejado. Nesse caso, o Manual da CQFS-RS/SC (2016) recomenda a utilização das equações polinomiais, que levam em conta o teor de MOS e o Al trocável para definir a dose do corretivo.

No sistema de plantio convencional ou na implantação do SPD, é recomendada a análise da camada de 0 a 20 cm. A dose do corretivo é determinada através do índice SMP, e após a aplicação deve ser realizada a incorporação do corretivo, preferencialmente antes da semeadura da cultura de inverno (CQFS RS/SC, 2016). Diversos trabalhos demonstram que essa é a forma mais rápida de correção da acidez do solo e mitigação da presença de Al^{3+} em profundidade (BORTOLUZZI et al., 2014; MIOTTO et al., 2020; BELLINASSO et al., 2021). Porém, depois de consolidado o SPD, é recomendada a amostragem apenas da camada de 0 a 10 cm, com monitoramento frequente da camada de 10 a 20 cm e, caso não existam restrições químicas em subsuperfície, a aplicação do calcário pode ser feita em superfície, sem incorporação de $\frac{1}{4}$ da dose indicada pelo índice SMP para elevar o pH do solo até 6,0. De acordo com a CQFS-RS/SC (2016), essa dose é o suficiente para neutralizar a acidez de uma possível reacidificação na camada superficial (0 a 5 cm).

No entanto com o crescimento da área cultivada sob SPD no Brasil, a calagem passou a ser feita em superfície indiscriminadamente, sem incorporação, visando preservar o estoque de C e a estrutura do solo (FUENTES-LLANILLO et al., 2021). Mesmo que tais benefícios não devam ser desprezados, em situações de manejo inadequado do solo sob SPD, como em solos sem um sistema de cultivo consolidado, a frente alcalinizante do solo tem seu efeito restrito a aproximadamente 10 cm de profundidade, o que dificulta a correção da acidez, a eliminação do Al^{3+} e o aporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} em subsuperfície (CONDON; BURNS; LI, 2020; RHEINHEIMER et al., 2018b).

2.4 A acidez do solo e o modo de aplicação dos fertilizantes

A acidez do solo é relacionada diretamente com a disponibilidade nutricional dos solos, visto que solos altamente intemperizados, como os

encontrados no Sul do Brasil, possuem naturalmente elevada acidez e baixa fertilidade (BORTOLUZZI et al., 2015). Nesses solos, grande parte da mineralogia é composta por óxidos de Fe (FINK et al., 2016), que em condições de baixo pH apresenta a protonação dos grupos funcionais Fe-OH, os quais são trocados por íons como fosfato (carga negativa), formando complexos de esfera interna com alta energia (BARROW, 1978). A incorporação do calcário é uma forma eficaz de diminuir esse problema (BELLINASSO et al., 2021), visto que as reações de adsorção do elemento no solo são extremamente rápidas e intensas (GAO et al., 2019). Por conta dessa velocidade de reação, o P é comumente considerado pouco móvel no solo. Porém, essa mobilidade é em parte definida pelo local em que o nutriente é depositado e, por isso, deve-se considerar a aplicação dos fertilizantes fosfatados o mais próximo e em maior volume em torno das raízes das plantas. Em solos com aplicação superficial do calcário, normalmente é observada baixa acidez em superfície e maior disponibilidade de P (CALEGARI et al. 2013). Porém, esse efeito é reduzido bruscamente quando analisadas as camadas subsuperficiais, formando um forte gradiente de acidez e disponibilidade de P em profundidade (TIECHER et al., 2017).

A disponibilidade de K é diretamente relacionada a variação da CTC que pode ocorrer devido ao aumento do pH do solo pela correção da acidez. A calagem pode aumentar a capacidade do solo de reter o K e modifica a distribuição entre a sua forma trocável e a solução do solo (SOUSA; LOBATO, 2004). Quanto aos modos de adubação, a aplicação em superfície do fertilizante permite que o processo de semeadura ocorra de forma mais rápida, gerando um melhor aproveitamento da janela de semeadura, e a possibilidade da distribuição da dose total ou parcial antes ou depois da semeadura (BATISTA et al., 2018). Contudo quando aplicado superficialmente o K, assim como o P, forma um gradiente de disponibilidade, com uma grande concentração do elemento na camada superficial do solo (AMARAL et al., 2004; COSTA et al., 2008). Já a aplicação no sulco de semeadura facilita a absorção pelas plantas, pois o nutriente é adicionado próximo ao sistema radicular das plantas. Grande parte do K aplicado no solo é absorvido pelo sistema radicular das plantas pelo processo de difusão, sendo assim, a aplicação de fertilizantes potássicos no solo favorece o processo de difusão, por conta do aumento do gradiente de

concentração, já que a concentração na superfície das raízes, normalmente é bastante baixa.

O cloreto de potássio (KCl) é o principal fertilizante mineral potássico utilizado na agricultura (BELAVILAQUA et al., 1996), contudo, em quantidades excessivas, em razão da salinização e por perdas por lixiviação, não são recomendadas aplicações acima de 80 kg ha^{-1} de K_2O , principalmente em solos arenosos e com baixa CTC (CQFS/RS-SC, 2016). Por ter um alto índice salino (1,93 por unidade de K) (OSAKI, 1991), o KCl aumenta a pressão osmótica da solução do solo nas regiões fertilizadas e nas suas adjacências, o que pode causar problemas na germinação, desenvolvimento inicial das raízes e por consequência na produtividade das culturas, estudos relatam redução na população de plantas e na produtividade da soja (SOUZA et al., 2007), além de diminuição da massa seca da parte aérea e de raízes do milho (NEVES, 2007). A mesma autora ainda demonstra que embora a dose seja um fator importante na aplicação do fertilizante potássico, o fator primordial de influência, principalmente no poder de salinização, é a distância do local de aplicação do fertilizante para a semente.

O sistema de recomendação de adubação do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016) tem como premissa a correção e a manutenção dos teores de P e K no solo, tendo em vista a otimização dos retornos econômicos das culturas. O modo de aplicação influencia diretamente na variabilidade horizontal dos nutrientes no solo, o que se deve principalmente às aplicações localizadas, no sulco de semeadura ou em superfície, dos adubos e corretivos, e ao não revolvimento do solo (ANGHINONI, 2007). Klay et al. (1998) explicam que a adubação localizada mantém uma ação residual prolongada, especialmente em se tratando do P, por conta das limitações de mobilidade, já relatadas na revisão bibliográfica deste trabalho. Contudo, ainda existe uma falta de clareza sobre as estratégias de manejo de P e K, tendo em vista que usualmente a aplicação de fertilizantes contendo esses nutrientes é feita sem levar em consideração a correção adequada da acidez do solo, principalmente nas camadas subsuperficiais (BELLINASSO et al., 2021).

2.5 Relações entre as características físicas do solo e a correção da acidez e da fertilidade do solo

Diversos estudos relatam a influência das propriedades físicas do solo com a sua fertilidade química (AMARAL et al., 2004, FRANCHINI et al., 2017; CALONEGO et al., 2017; NUNES et al., 2019). Fatores que influenciam a migração do calcário através do perfil do solo incluem, a quantidade aplicada, o tempo entre a aplicação e o plantio, a precipitação, textura do solo, mineralogia, tipo de calcário e tamanho de partícula e grau de compactação do solo (BLEVINS et al., 1978; FARINA et al., 2000; GODSEY et al., 2007; CAIRES et al., 2015). Levando em consideração sistemas unicamente agrícolas e com baixo aporte de resíduos e rotação de culturas, a aplicação em superfície do calcário limita o crescimento das raízes nos primeiros centímetros do solo. Isso se deve a maior concentração de nutrientes na camada superficial, aliada à compactação nas camadas subsuperficiais, dificultando o acesso das raízes a água e nutrientes (NUNES et al., 2015; FRANCHINI et al., 2017). Corretivos com menor granulometria tem a tendência de migrar pelos macroporos e assim corrigir a acidez em subsuperfície (NUNES et al., 2019). Porém, isso ocorre principalmente quando o SPD foi bem implementado, aliado à implantação de plantas de cobertura. Os benefícios das plantas de cobertura são relatados por diversos autores (CONCEIÇÃO et al., 2013; MBUTHIA et al., 2015; TELES et al., 2017; CALONEGO et al., 2017), sendo que cabe destacar a influência na absorção de nutrientes aplicados via fertilizantes e principalmente os aplicados em sulco de semeadura, além de melhorar as condições estruturais do solo por meio do aporte de matéria orgânica. Tais efeitos mostram que a cobertura do solo tem a capacidade de melhorar suas condições físicas, sendo uma alternativa para solucionar problemas de compactação. No entanto em um sistema de cultivo mal conduzido, geralmente esse aporte de MOS é negligenciado, sendo priorizada a maior praticidade de um monocultivo intensivo, sem qualquer cuidado com cobertura vegetal na entre safra.

HIPÓTESES

(i) Após 6 meses da aplicação de corretivos da acidez, com diferentes fontes, em áreas sob plantio direto com rotação de culturas e acidez em subsuperfície, a incorporação dos corretivos é a estratégia mais eficiente para recuperar o potencial produtivo do solo.

(ii) Após 6 meses da aplicação dos fertilizantes, em áreas sob plantio direto com rotação de culturas, a aplicação de P e K no sulco de semeadura contribui para diminuir o gradiente de disponibilidade desses nutrientes em profundidade no solo, resultando em efeitos positivos na produtividade das culturas.

OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar estratégias de correção da acidez do solo e modos de aplicação de P e K na distribuição vertical da acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes, bem como seus efeitos na produtividade da cultura do milho e da soja em um Plintossolo sob plantio direto Sul do Brasil após 6 meses da implantação do experimento.

MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Descrição do experimento

estudo de campo foi desenvolvido em um experimento instalado em outubro de 2020 na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 30°05' S, longitude 51°40' O e altitude 28 m). O clima da região é caracterizado como Cfa, subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 20°C e precipitação média anual de 1.481 mm (INMET, 2017). Detalhes da pluviosidade e temperatura durante o período de avaliação do experimento são apresentados na **Figura 2**.

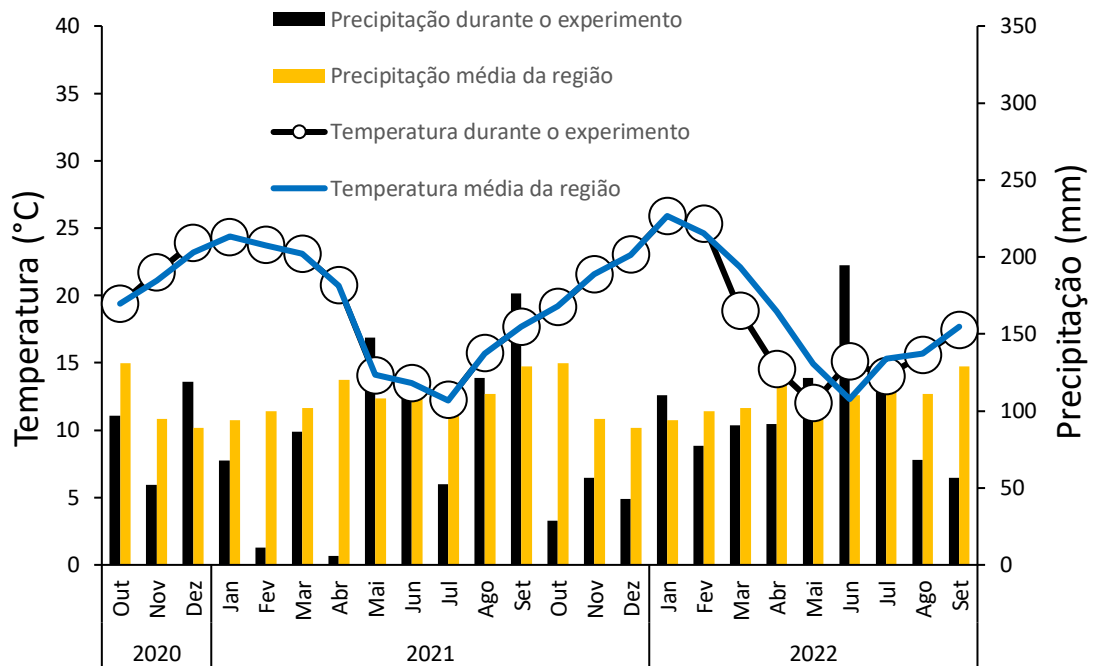


Figura 2. Precipitação e temperatura médias mensais, no período de avaliação do experimento (outubro de 2020 a setembro de 2022) e médias mensais dos últimos 20 anos no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

O solo do local é caracterizado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (EMBRAPA, 2013), com textura média nos primeiros 40 cm, contendo 177, 251 e 573 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente. A caracterização química do solo na área experimental antes da implantação do experimento é apresentada na **Tabela 1**. A área experimental não tem histórico definido de um sistema de plantio definido, com diferentes estratégias de semeadura desde 2004. Eram utilizadas como culturas verão, a soja e o milho, e no inverno, aveia preta ou pousio, sendo que no ano anterior à instalação do experimento (2019), foi cultivado com milho para produção de silagem no verão e aveia preta para cobertura no inverno. A adubação era realizada sempre no momento da semeadura e utilizava doses de fertilizantes de 200 a 250 kg/ha na formulação 5-20-20. No entanto, em uma determinada aplicação realizada em um período desconhecido, ocorreu um erro de aplicação do fertilizante que elevou consideravelmente os teores de P e K (**Tabela 1**). Não há registros de calagem

efetuada na área, portanto nunca havia recebido nenhum tipo de corretivo anteriormente.

Tabela 1. Caracterização química do solo da área experimental até 40 cm de profundidade. Coletada em outubro de 2020 na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Propriedade química	Camadas (cm)			Interpretação da CQFS-RS/SC (2016) para a camada de 0 a 10 cm do solo	Referência
	0-10	10-20	20-40		
Argila (g kg ⁻¹)	148	175	-	Classe 4	Classe Textural 4
pH-H ₂ O (1:1, v/v)	5,4	4,6	4,5	Abaixo do valor de referência	pH do abaixo do valor de referência pra o sistema de plantio direto (pH ≥6,0)
Índice SMP	6,3	5,8	5,2	-	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,1	5,9	11,6	-	-
P disponível (mg dm ⁻³)	70,3	45,6	21,0	Alto	P disponível alto para o solo contendo menos de 210 g kg ⁻¹ de argila (60 mg dm ⁻³)
K disponível (mg dm ⁻³)	159	89	90	Alto	K disponível Alto para a CTC entre 7,6 e 15,0 cmol _c dm ⁻³ (90 mg dm ⁻³)
Al trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,2	1,2	2,2	-	-
Ca trocável (cmol _c dm ⁻³)	2,9	0,6	0,3	Abaixo do valor de referência	Ca ²⁺ abaixo do limite adequado (4,0 cmol _c dm ⁻³)
Mg trocável (cmol _c dm ⁻³)	1,4	0,4	0,2	Acima do valor de referência	Mg ²⁺ acima do limite adequado (1,0 cmol _c dm ⁻³)
Zn disponível (mg dm ⁻³)	2,0	0,5	0,5	Acima do valore de referência	Zn acima do limite adequado (0,5 mg dm ⁻³)
Cu disponível (mg dm ⁻³)	0,7	0,9	1,0	Acima do valore de referência	Cu acima do limite adequado (0,4 mg dm ⁻³)
Mn trocável (mg dm ⁻³)	37,0	13,5	7,0	Acima do valore de referência	Mn acima do limite adequado (5,0 mg dm ⁻³)
Soma de Ca+Mg+K (cmol _c dm ⁻³)	4,8	1,3	0,8	-	-
CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	4,9	2,4	3,0	-	-
CTC a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	7,8	7,1	12,4	-	-
Saturação por Ca+Mg+K (%) ¹	56	18	7	Abaixo do valor de referência	Saturação por Ca+Mg+K abaixo do valor de referência (≥65 %)
Saturação por Al (%) ²	8	50	74	Abaixo do valor de referência	Saturação por Al abaixo do valor de referência (≥10 %)

¹ Saturação por Ca+Mg+K (%) = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K+ / CTC a pH 7,0) x 100

² Saturação por Al (%) = (Al³⁺/CTC efetiva) x 100

Os tratamentos utilizados combinaram modos de correção da acidez do solo (testemunha sem calcário, calcário superficial, calcário incorporado e óxido de Ca/Mg superficial) e formas de adubação de P e K (testemunha sem P e K, em linha e a lanço) (**Tabela 2**). Conforme os resultados da **Tabela 1**, foi realizada uma média ponderada dos valores das propriedades analisadas para caracterização do solo, na camada de 0 a 20 cm e assim foi estimada a dose de corretivos necessária para elevar o pH do solo a 6,0, na camada de 0 a 20 cm a partir do índice SMP, resultando em uma dose de 4,5 Mg ha⁻¹ de equivalente

PRNT 100%. De acordo com as análises físicas e químicas dos corretivos da acidez, o calcário apresentou um PRNT de 75%, PN de 94,95% e RE de 0,80% contendo 30 % de CaO e 16,4% de MgO. Já o óxido de Ca/Mg apresentou um PRNT de 175%, contendo 49,3% de CaO e 31,9% de MgO. Foram utilizados no experimento, 5,6 e 2,6 Mg ha⁻¹ de calcário e óxido de Ca, respectivamente.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos utilizados, combinando modos de correção da acidez e adubação com P e K do solo.

Tratamento	Correção da acidez	Adubação com P e K
1	Testemunha sem calagem	Sem P e K
2	Testemunha sem calagem	P e K a lanço na superfície
3	Testemunha sem calagem	P e K no sulco de semeadura
4	Calcário superficial	Sem P e K
5	Calcário superficial	P e K a lanço na superfície
6	Calcário superficial	P e K no sulco de semeadura
7	Óxido de Ca superficial	Sem P e K
8	Óxido de Ca superficial	P e K a lanço na superfície
9	Óxido de Ca superficial	P e K no sulco de semeadura
10	Calcário incorporado	Sem P e K
11	Calcário incorporado	P e K superficial
12	Calcário incorporado	P e K no sulco de semeadura

As doses de P e K foram estipuladas para a manutenção da fertilidade do solo no momento da instalação do experimento levando em consideração a expectativa de colheita de 4 Mg ha⁻¹ para soja e 10 Mg ha⁻¹ para milho. Posteriormente, no momento da implantação de cada cultura, foram aplicadas doses de fertilizantes correspondentes aos níveis que se encontravam os nutrientes no solo, com base nas recomendações da CQFS-RS/SC (2016). A dose de N recomendada na cultura do milho foi estipulada considerando o teor de MOS, densidade de plantas maior que 65.000 plantas ha⁻¹ a expectativa de rendimento de 10 Mg ha⁻¹, sendo acrescentados 35 kg ha⁻¹ de N na semeadura, e duas aplicações em cobertura utilizando ureia nos estágios V4 e V8. A

descrição das doses utilizadas e culturas implantadas estão apresentadas na **Tabela 3**.

Tabela 3. Doses de nutrientes aplicados nos cultivos implantados. As doses de N, P e K foram calculadas para uma expectativa de rendimento de 10 Mg ha⁻¹ para milho e 4 Mg ha⁻¹ para soja na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Data	Cultura	Adubação (kg ha ⁻¹)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
31 de outubro de 2020	Milho	135	140	160
23 de abril de 2021	Aveia	50	-	-
26 de novembro de 2021	Soja	35	180	120
Dose acumulada		220	320	280

Durante a condução do experimento, as condições climáticas e o estabelecimento inadequado da cultura do milho na segunda safra de verão (4 de dezembro de 2021) ocasionaram em um replantio da área com a cultura da soja. Sendo assim, a recomendação de adubação foi adaptada para a soja (**Tabela 3**). Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos casualizados, com 3 repetições de campo, em parcelas de 6 x 10 m, totalizando 60 m², com intervalos de 3 m entre os blocos, visando facilitar a aplicação dos produtos utilizados no manejo dos cultivos e a aplicação da adubação de manutenção de P e K na implantação dos cultivos sem que houvesse tráfego dos implementos sobre a área útil da parcela, totalizando uma área de aproximadamente 0,45 ha considerando os espaços vazios (**Figura 3**).

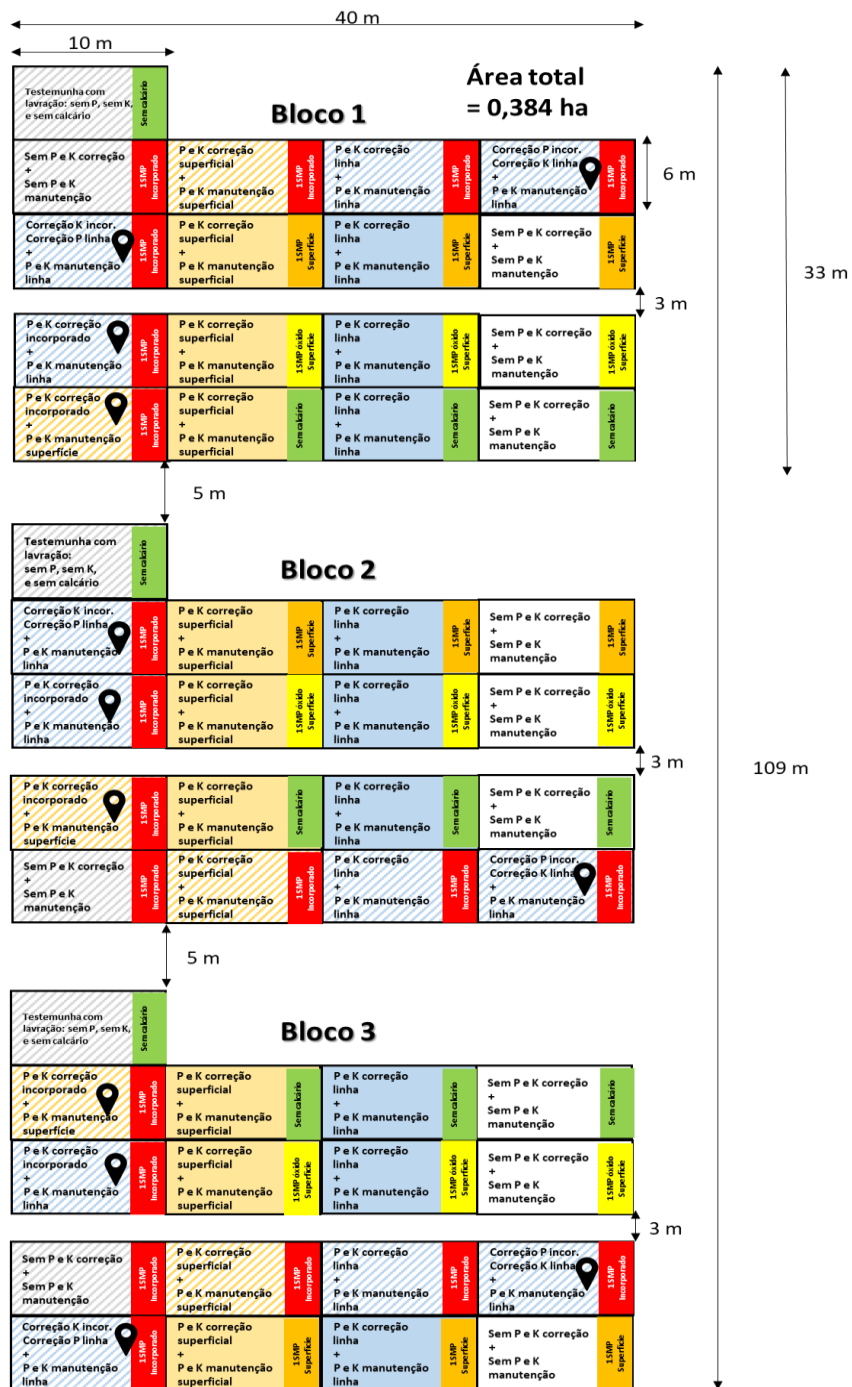


Figura 3. Croqui do experimento, com a distribuição dos tratamentos das diferentes estratégias de calagem e modos de adubação do solo na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul, RS. Nem todos os tratamentos apresentados no croqui foram utilizados. Foram utilizadas as seguintes estratégias de correção da acidez: (i) testemunha sem correção, (ii) aplicação superficial de óxido de cálcio e magnésio, (iii) aplicação superficial de calcário dolomítico e (iv) aplicação de calcário dolomítico incorporado a 20 cm. E os seguintes modos de adubação com P e K: (i) controle sem adubação, (ii) no sulco de semeadura e (iii) superficial à lanço.

As variedades das culturas foram: milho (*Zea mays*), híbrido Balu 388 VIP3, com densidade populacional de 55 a 60 mil plantas ha⁻¹; aveia preta (*Avena strigosa*), cultivar EMBRAPA 139, com a densidade de 350 mil plantas ha⁻¹; soja (*Glycine max*) (M 5947 IPRO), com densidade de 250 a 300 mil plantas ha⁻¹. Durante a condução do experimento foi adotado o SPD, com controle químico das plantas invasoras.

5.2 Coleta de solo e análises

As amostras de solo foram coletadas em abril de 2021 (6 meses após a aplicação dos tratamentos) nas camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 20, 20 a 25, 25 a 30 e 30 a 40 cm, utilizando a pá de corte até a profundidade de 30 cm e na camada de 30 a 40cm, o trado calador. Nos tratamentos que contem adubação em sulco de semeadura, a coleta foi realizada entre as linhas de semeadura. Já nos tratamentos com aplicação a lanço superficial, a coleta foi realizada sem essa especificação. Posteriormente as amostras foram secas ao ar, moídas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Foram realizadas análises de pH em água e índice SMP (TEDESCO et al., 1995) e, a partir do índice SMP, foi possível estimar o valor de H+Al (**Equação 4**), conforme Kaminski; Rheinheimer; Bartz (2001)

$$H + Al (cmol_c dm^{-3}) = e^{(10,665 - (1,14483SMP))} / 10 \quad \text{(Equação 4)}$$

Os teores de P e K disponíveis, foram determinados a partir do extrator Mehlich-1, enquanto Ca, Mg, Al e micronutrientes foram obtidos através da extração com NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹. A leitura dos extratos foram realizadas por meio da espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). A partir dessas análises foi possível obter os valores da soma de Ca+Mg+K (**Equação 5**), CTC efetiva (**Equação 6**), CTC pH 7,0 (**Equação 7**), saturação por Ca+Mg+K (V%) (**Equação 8**) e saturação por Al (m%) (**Equação 9**).

$$SC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{2+} \quad (\text{Equação 5})$$

$$CTC_{efetiva}(cmol_c dm^{-3}) = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{2+} + Al^{3+} \quad (\text{Equação 6})$$

$$CTC_{pH7,0}(cmol_c dm^{-3}) = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{2+} + (H + Al) \quad (\text{Equação 7})$$

$$m(\%) = \left(\frac{Al^{3+}}{CTC_{efetiva}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

$$V(\%) = \left(\frac{SC}{CTC_{pH7,0}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Em 21 de junho de 2021 foram realizados testes de resistência mecânica do solo à penetração, na profundidade de 0 a 40 cm, utilizando o penetrômetro digital, modelo Falker PLG 1020. Os dados foram mensurados a cada 1 cm e agrupados nas camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 20, 20 a 25, 25 a 30 e 30 a 40 cm. No mesmo dia, também foram realizadas coletas de amostras de solo para obtenção da umidade gravimétrica do solo. O método utilizado foi conforme Donagemma (2011), através de coleta de amostras nas camadas do estudo, em estrutura deformada, utilizando embalagens plásticas evitando a perda de umidade das amostras, posterior secagem a 105°C e pesagem das amostras para a obtenção da massa da amostra úmida e seca.

5.3 Análise estatística

A normalidade dos dados foi verificada a partir do teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variância pelo teste do Levene, ambos com um nível de significância de 5%. Quando normais e homogêneos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando os modos de correção da acidez, estratégias de adubação e as camadas do solo como efeito fixo e blocos como efeito aleatório. Quando a ANOVA foi significativa ($p < 0,05$), as diferenças entre as médias dos tratamentos foram avaliadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O software utilizado para as análises estatística foi o Sisvar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nenhuma das variáveis avaliadas no presente estudo apresentaram interação tripla entre as estratégias de correção da acidez, os modos adubação de P e K e as camadas de solo avaliadas (**Tabela 4**). Contudo, as propriedades químicas relacionadas com a acidez do solo (pH, H+Al, Ca e Mg trocável, saturação por Ca+Mg+K e saturação por Al) foram significativamente afetadas pela interação entre as estratégias de correção de acidez e camadas de solo (**Tabela 4**), e a disponibilidade de P foi influenciado pela interação entre os modos de adubação e as camadas de solo (**Tabela 4**). Ocorreu interação entre os modos de adubação e as estratégias de calagem em relação produtividade do milho (**Tabela 4**). Por fim, a RP obteve interações entre as camadas do solo tanto com os modos de adubação as estratégias de correção da acidez (**Tabela 4**). Os resultados a seguir serão apresentados e discutidos conforme a seguinte ordem: (i) efeito das estratégias de correção da acidez sobre as propriedades químicas do solo; (ii) efeito do modo de aplicação de P e K na disponibilidade desses nutrientes no solo (iii) efeito da estratégia de correção da acidez na resistência à penetração do solo e (iv) efeito do modo de adubação de P e K das estratégias de correção da acidez do solo na produtividade da cultura do milho e da soja.

Tabela 4. Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações nas propriedades químicas do solo, como resultado da análise da variância (ANOVA).

Variável	Modo de adubação P e K (MA)	Estratégia de correção da acidez (CA)	Camada de solo (CS)	MA × CS	CA × CS	MA × CA	MA × CA × CS
pH do solo	ns	*	***	ns	***	ns	ns
Acidez potencial do solo (H+Al)	ns	ns	***	***	*	ns	ns
Ca trocável no solo	*	*	***	ns	***	ns	ns
Mg trocável no solo	**	**	***	ns	***	ns	ns
Saturação por Ca+Mg+K do solo	ns	ns	***	ns	***	ns	ns
Saturação por Al do solo	ns	ns	***	ns	*	ns	ns
P disponível no solo	ns	ns	***	***	ns	ns	ns
K disponível no solo	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns
Resistência à penetração do solo	ns	*	***	*	*	ns	ns
Produtividade do milho	**	**	-	-	-	**	ns
Produtividade da soja	ns	ns	-	-	-	ns	ns

*Significativo a $p < 0,05$;

**Significativo a $p < 0,01$;

***Significativo a $p < 0,001$;

ns, não significativo ($p > 0,05$).

6.1 Efeito das estratégias de correção da acidez sobre as propriedades químicas do solo

A aplicação superficial do calcário, após 6 meses, mostrou-se efetiva para corrigir a acidez do solo apenas na camada superficial, de 0–5 cm (**Figura 2A**), elevando o pH do solo para valores acima de 5,5, considerado crítico para a maioria das culturas (CQFS-RS/SC). Além disso, a aplicação de calcário em superfície também elevou os teores de Ca trocável apenas na camada de solo

de 0–5 cm (**Figura 2C**). Para esta mesma camada, a saturação por Ca+Mg+K, os teores de Mg trocável e a saturação por Al do solo foram semelhantes ao tratamento controle sem aplicação de corretivo (**Figura 2**).

Antes da implantação do experimento, a área tinha um longo histórico de produção agrícola, porém sem um sistema de plantio definido, utilizando-se soja e milho no verão e aveia no inverno ou pousio no inverno, sendo que a acidez do solo nunca havia sido corrigida, assim a testemunha demonstra a acidez natural da área do estudo, sendo notável que os níveis das propriedades químicas relacionadas à acidez do solo são considerados próximos aos ideais somente na camada de 0 a 5 cm do solo (**Figura 4**). Porém, nas camadas inferiores, é notável o gradiente de disponibilidade de nutrientes e a maior acidez (**Figura 4**). Tais resultados mostram que o efeito da calagem superficial nas camadas mais profundas do solo é lento, assim como também foi relatado por Rheinheimer et al. (2018a). Portanto, pode-se constatar que a aplicação de calcário em superfície é uma alternativa viável apenas quando a acidez do solo e a toxidez por Al^{3+} nas camadas mais profundas do solo foram previamente corrigidas, através da incorporação do calcário na implantação do SPD (BORTOLUZZI et al., 2014).

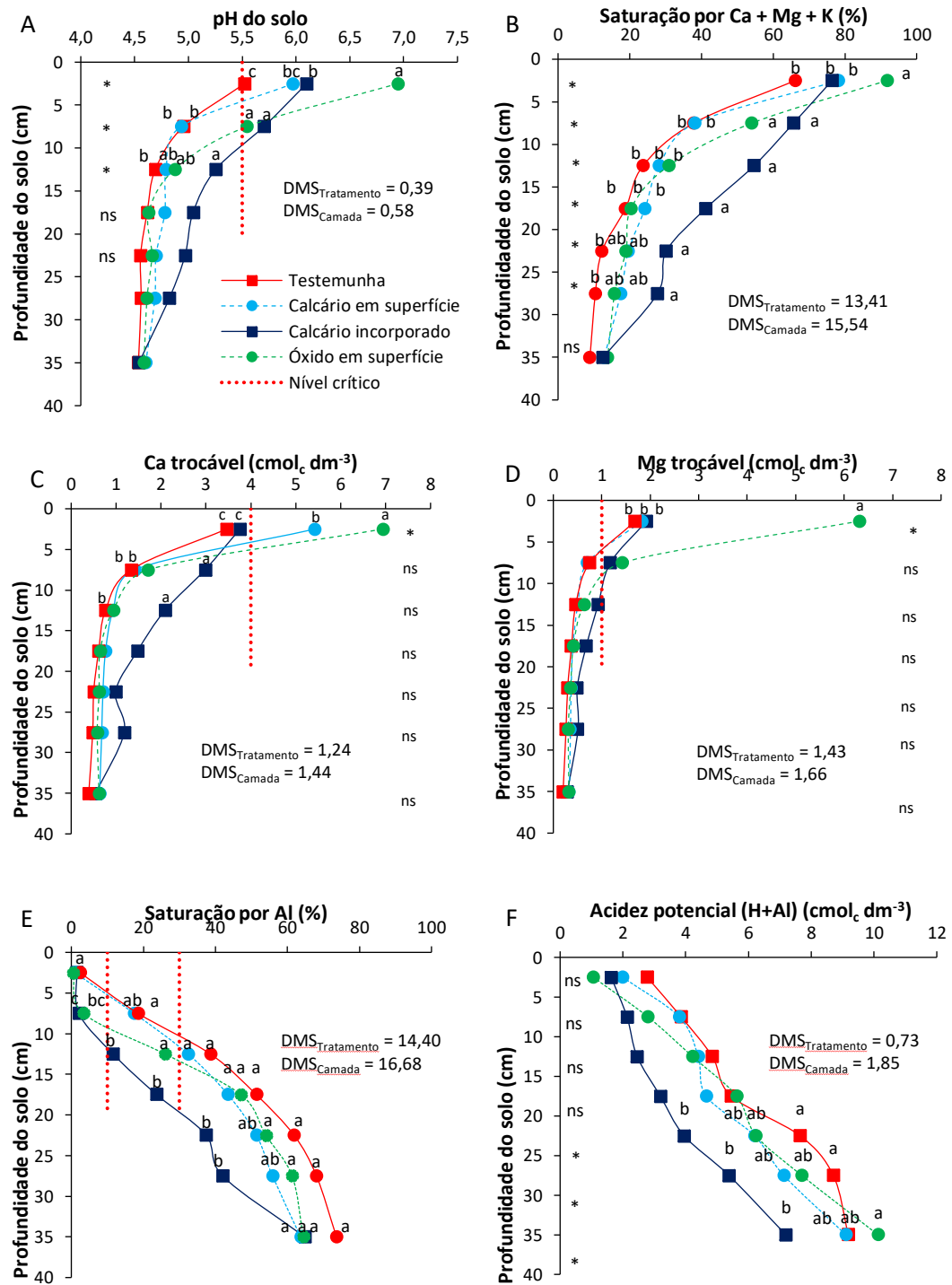


Figura 4. pH do solo (A), saturação por Ca+Mg+K (B), Ca trocável (C), Mg trocável (D), saturação por Al (E) e acidez potencial (H+Al) (F) nas diferentes camadas do solo, relacionados às estratégias de correção da acidez do solo, após 6 meses da aplicação dos tratamentos em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas de letras representam a comparação entre os tratamentos relacionados às estratégias da correção da acidez do solo em função das camadas do solo* = significativo a Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo a Tukey ($p > 0,05$).

É notória a formação de uma restrita frente alcalinizante quando o calcário é aplicado em superfície, como já foi observado por Bellinaso et al. (2021). A partir da dissolução do calcário, ocorre a dessorção do Al^{3+} e do H^+ dos complexos de superfície do solo, gerando uma reação com os íons CO_3^{2-} e OH^- presentes na solução do solo. Dessa forma, assim como há um excesso de calcário na camada 0-5 cm do solo quando aplicado em superfície, o efeito dos produtos da dissolução do corretivo não foi suficiente para correção da acidez do solo nas camadas subsuperficiais. Sendo assim, levando em consideração os 6 primeiros meses, a aplicação superficial de calcário não se mostra a melhor estratégia para neutralizar o Al^{3+} presente em camadas mais profundas do solo (NUNES et al., 2019; CAIRES et al., 2016; da COSTA et al., 2016; BELLINASSO et al., 2021). Em condições de pH do solo abaixo de 5,5, a movimentação descendente do calcário é prejudicada, por conta do menor desenvolvimento radicular, o que dificulta a formação de bioporos, os quais facilitam a migração do corretivo para as camadas subsuperficiais (LI et al., 2019; CONDON et al., 2021).

A incorporação do calcário com aração até 20 cm de profundidade seguida da gradagem elevou o pH do solo para valores acima de 5,5 até 10 cm de profundidade (**Figura 4A**). Mesmo com a incorporação, a calagem não corrigiu a toda a camada revolvida, isto pode estar relacionado a pluviosidade abaixo da média regional no tempo transcorrido da aplicação até a coleta do solo para análise (**Figura 2**), o que compreende uma pluviosidade 29,4% abaixo do esperado em 6 meses. O regime pluvial interfere fortemente na velocidade de reação do carbonato nas camadas subsuperficiais, sendo um importante transportador das partículas do calcário para maiores profundidades (MIYAZAWA et al., 2002; SORATO; CRUSCIOL, 2008; CALEGARI et al., 2013; TIRITAN et al., 2016). Como consequência disso, houve redução na saturação por Al^{3+} para valores menores que 30% até a camada de 20 cm profundidade do solo, além de apresentar saturação por Al^{3+} menor que a testemunha até 30 cm de profundidade (**Figura 4E**). A incorporação do calcário também aumentou a saturação por $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}$ nas camadas de 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm do solo, e os teores de Ca trocável na camada de 5 a 15 cm em relação ao calcário em superfície (**Figura 4**). Esses resultados vão ao encontro dos obtidos

por Bellinaso et al. (2021) e Bortoluzzi et al. (2014). Por meio da incorporação os produtos da solubilização do calcário desbloqueiam os grupos funcionais de superfície dos colóides do solo em profundidade, além de desprotonar sítios de sorção da MOS, formando complexos superficiais com Ca e Mg. A maior profundidade da frente alcalinizante no perfil do solo apresentada no tratamento com calcário incorporado, se assemelhou aos resultados encontrados por Rheinheimer et al. (2018b). Pelo fato de o corretivo aplicado estar mais bem distribuído na camada revolvida com a incorporação, a correção é mais rápida e efetiva, devido ao maior contato entre o calcário e as partículas do solo (Ernani et al., 2004). Contudo, Kaminski et al. (2005) explicam que a diluição da dose aplicada na camada revolvida, resulta em uma menor migração dos produtos da calagem para as camadas mais profundas do solo. Portanto, a incorporação do calcário é essencial na implantação do SPD, proporcionando um ambiente inicialmente livre da toxidez por Al^{3+} e uma fertilidade do solo mais próxima da ideal, principalmente na zona de maior exploração das raízes.

A aplicação superficial do óxido de Ca/Mg mostrou-se efetiva para corrigir a acidez do solo até 10 cm de profundidade (**Figura 4**). A aplicação do óxido de Ca/Mg resultou em um efeito ainda maior que a aplicação do calcário na camada superficial do solo (0–5 cm), obtendo valores de pH do solo, saturação por Ca+Mg+K, e Ca e Mg trocáveis superiores aos demais tratamentos (**Figura 4A, 4B, 4C e 4D**). O aumento significativo desses atributos acontece por conta da reação mais intensa e rápida dos produtos solúveis do óxido. A menor granulometria do corretivo também é um fator importante quanto a ação do óxido de Ca/Mg nas camadas subsuperficiais do solo, sendo evidenciada por valores de pH do solo e saturação por Ca+Mg+K, na camada de 5–10 cm do solo, o que demonstra ser um corretivo mais eficiente do que o calcário a curto prazo quando da aplicação em superfície (**Figura 4A e 4B**). Na camada de 5-10 cm do solo, a aplicação do óxido de Ca/Mg se mostrou efetiva em corrigir a saturação por Al comparativamente ao tratamento testemunha (sem aplicação de corretivos) e resultados similares à incorporação de calcário (**Figura 4E**).

A liberação de OH^- do óxido de Ca/Mg é imediata e total, o que confere ao corretivo o caráter de base forte, sendo que o OH^- produzido neutralizará o

H⁺ na solução do solo, responsável pela acidez (ARCARDE, 2003), o que também explica os elevados teores de Ca e Mg na camada de 0 a 5 cm do solo (**Figura 4C**). A rápida dissolução do corretivo nessa camada resultou na correção rápida e eficaz a curto prazo, além de aumentar a disponibilidade de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo em relação aos demais tratamentos (**Figura 4C e 4D**). Apesar de no curto prazo a aplicação de óxido de Ca em superfície ter se mostrado uma solução rápida e eficaz para a correção da acidez em superfície, é de suma importância analisar a viabilidade econômica do corretivo. No ano de 2023, de acordo com índices médios de cotação regional no estado do Rio Grande do Sul, o óxido de Ca/Mg com a utilizada no estudo tem o valor de 3 a 4 vezes maior em relação ao calcário dolomítico. O uso do óxido de Ca/Mg como ferramenta alternativa para incrementar o pH do solo e reduzir a saturação por Al também foi relatado por Lima et al. (2017), proporcionando um ambiente mais favorável ao crescimento radicular das culturas e conseqüentemente um maior aproveitamento dos nutrientes e menor susceptibilidade ao estresse hídrico (ALCANTARA, 2020).

6.2. Efeito do modo de adubação de P e K na sua disponibilidade no solo

A aplicação superficial de P elevou os teores do nutriente na camada de 0 a 5 cm, atingindo valores de 137 mg dm⁻³ (**Figura 5A**). Enquanto que nos tratamentos com aplicação de P em linha e na testemunha (sem aplicação de fertilizantes) não foi observada diferença, havendo um teor médio de 76 mg dm⁻³ de P nesta mesma cada. Nas camadas de solo abaixo de 5 cm de profundidade, não houve influência do modo de adubação fosfatada (**Figura 5A**).

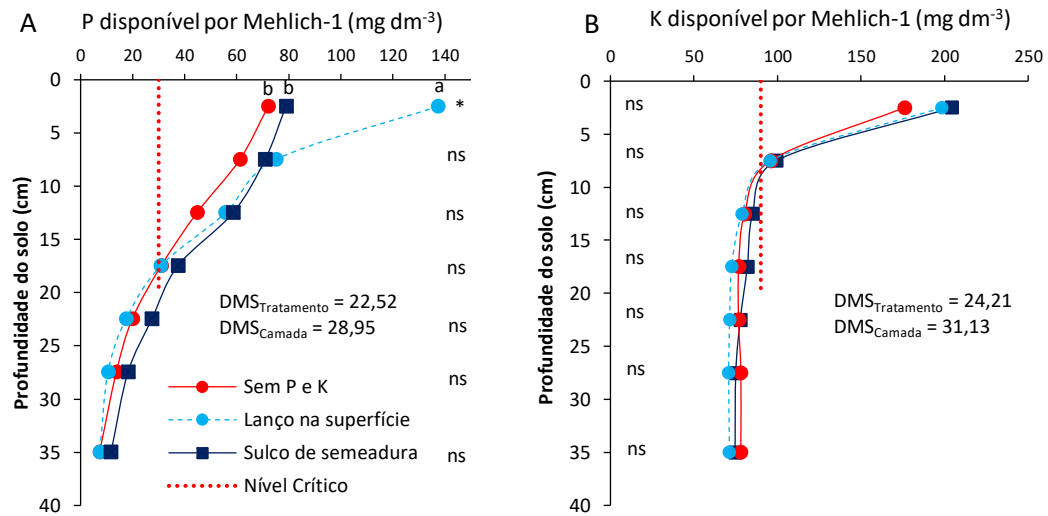


Figura 5. Teor de fósforo (A) e potássio (B) disponível extraído com Mehlich-1 em função das formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço nas diferentes camadas do solo, após 6 meses da aplicação dos tratamentos em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas de letras representam a comparação entre os tratamentos relacionados ao modo de adubação em função das camadas do solo* = significativo a Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo a Tukey ($p > 0,05$).

Como os sítios de troca de P no solo já estavam ocupados, por conta dos altos teores legados das adubações anteriores à instalação do experimento, provavelmente a maior parte do fosfato aplicado foi adsorvido com baixa energia ou ficou prontamente disponibilizado na solução do solo (TIECHER et al., 2012). Apesar da maior disponibilidade de P para as plantas, o acúmulo de fosfato na superfície do solo representa um grande risco de eutrofização dos corpos d'água devido ao transporte de P pelo escoamento superficial (PANUELAS et al., 2009). De acordo com Gatiboni et al. (2020), o limite crítico ambiental de P para o teor de argila do solo em estudo é entre 48 a 83 mg dm^{-3} . Portanto, a média da primeira camada (0 a 5) no tratamento com aplicação do fertilizante em superfície está bem acima deste limite, assim como a média ponderada até 10 cm de profundidade ($106,2 \text{ mg dm}^{-3}$). Levando em consideração tais valores, a aplicação do fertilizante fosfatado não é mais recomendada na área do estudo.

Provavelmente em função dos altos teores de P na camada de 0 a 20 cm ($74,7 \text{ mg dm}^{-3}$), não foi observada diferença entre o modo de aplicação nas

camadas abaixo de 5 cm. Mesmo sem apresentar diferença estatística, é possível perceber um incremento de P de 9,4, 15,5 e 30,9 % nas camadas de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 15 cm, respectivamente, da aplicação do P em linha em relação a testemunha, o que provavelmente está relacionado com o local onde o fertilizante foi depositado no momento da semeadura (**Figura 5A**). Agronomicamente, tais resultados podem expressar um impacto na tomada de decisão no momento da recomendação da aplicação dos fertilizantes, levando em consideração que a CQFS-RS/SC (2016) considera uma variação de 9,9 mg dm⁻³ o suficiente para mudança de classe de disponibilidade para recomendação de aplicação de P com o de argila menor que 20%.

Em todos os tratamentos é perceptível a formação de um gradiente de disponibilidade de P no solo, com maior concentração na camada superficial, diminuindo abruptamente com a profundidade do solo, o que é característico do SPD (TIECHER et al., 2017). Pode-se perceber que mesmo com a aplicação de 140 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente, a disponibilidade dos nutrientes não apresentou diferença em relação à testemunha, com exceção da aplicação em P na camada de 0 a 5 cm (**Figura 5A e 5B**). Em se tratando do P, isso é perceptível principalmente nas camadas abaixo de 5 cm de profundidade. Isso pode estar relacionado à maior adsorção dos grupos funcionais do solo em camadas mais profundas por conta da maior acidez do solo nessas camadas. Já para o K isso pode estar relacionado aos argilominerais 2:1 presentes principalmente no horizonte B plíntico dos Plintossolos (ASIAMAH; DEDZOE, 1999).

Em condições de restrição hídrica, como ocorrido durante o tempo transcorrido até a coleta do solo para análise, o mecanismo de difusão do P é restringido (COSTA, 2006) o que também explica a concentração da disponibilidade do nutriente na camada superficial. A absorção do fosfato pelas raízes se dá por meio da difusão; portanto, é necessária uma maior proximidade do elemento com a rizosfera (GRANT, 2001). Logo, o maior aporte do fosfato na linha de semeadura (mais próximo as raízes) pode ter favorecido essa absorção e resultado em maior produtividade e, conseqüentemente, maior exportação do nutriente.

Quanto à disponibilidade do K no solo, também é evidente a formação do gradiente de disponibilidade, com um abrupto decréscimo nos teores a partir dos 5 cm de profundidade (**Figura 5B**). Como acontece com o P, isso se deve a aplicação em superfície do fertilizante e a deposição de resíduos vegetais na superfície do solo (JORIS et al., 2016; MARTINS et al., 2014). Entretanto, a aplicação em linha do K apresenta resultados semelhantes ao aplicado em superfície e a testemunha demonstra que o K adicionado pode ter sido adsorvido nas entrecamadas dos argilominerais 2:1 do solo, como constatado por Ernani et al. (2007) e Alves et al. (2019).

6.3. Efeito da estratégia de correção da acidez na resistência à penetração do solo

A resistência à penetração do solo (RP) foi utilizada como um parâmetro para avaliar o efeito das operações de incorporação e revolvimento do sulco realizadas no experimento, sendo que esta é uma propriedade dependente da umidade do solo no momento da avaliação. Os valores de umidade gravimétrica estão demonstrados na **Figura 6**.

A incorporação do calcário apresentou valores de RP abaixo dos considerados restritivos, sendo que os demais tratamentos se encontram mais próximos desses valores, na camada de 5 a 15 cm do solo (**Figura 7B**), o que está diretamente relacionado ao local de maior revolvimento do solo em função do efeito da aração e da gradagem, preconizada até 20 cm de profundidade. Os valores de RP encontrados no tratamento com incorporação estão dentro da faixa considerada adequada para o crescimento radicular das plantas nas camadas avaliadas. Valores críticos de RP variam de 1.500 a 4.000 kPa (ROSOLEM et al., 1999), sendo que a restrição do crescimento radicular ocorre em 2.000 kPa (TORMENA et al., 1998). É relatado por Blanco-Canqui e Wortmann (2020) que a incorporação do calcário não causa efeitos físico-biológicos nocivos ao solo. Pelo contrário, pois a rápida neutralização e eficaz precipitação do Al^{3+} , aliado ao aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , a maior disponibilidade de P e à eliminação de camadas compactadas do solo, oferece melhores condições para o desenvolvimento das raízes, provendo um melhor

volume de solo explorado e maior aproveitamento da água e nutrientes por parte das plantas.

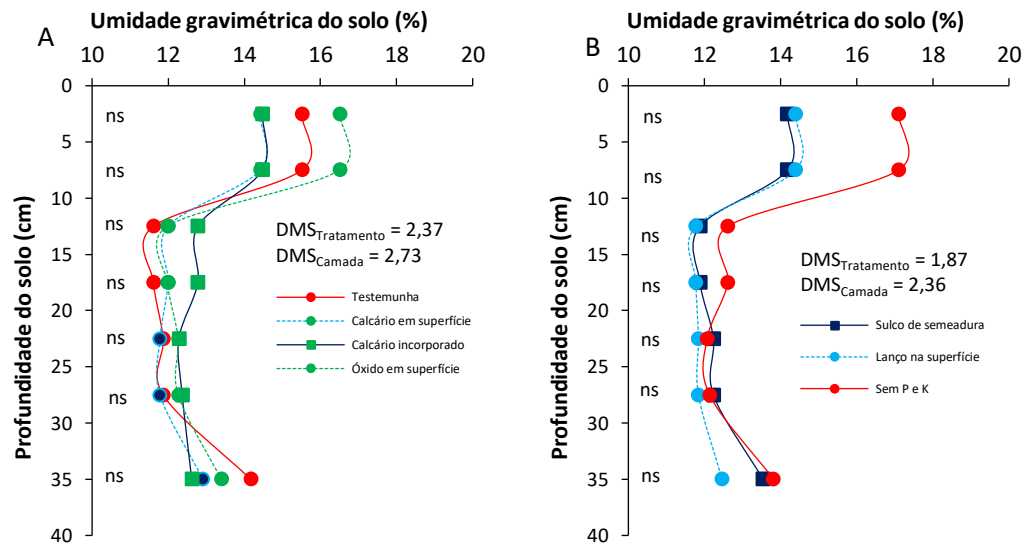


Figura 6. Umidade gravimétrica do solo em função das estratégias de correção da acidez (A) e modos de adubação do solo (B) nas diferentes camadas do solo de um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas de letras representam a comparação entre os tratamentos relacionados ao modo de adubação em função das camadas do solo* = significativo a Tukey ($p < 0,05$); ns = não significativo a Tukey ($p > 0,05$).

A aplicação do óxido de Ca/Mg em superfície não apresentou valores de RP diferentes da testemunha, sem calagem. Os valores encontrados se aproximam do limite crítico a partir de 5 cm de profundidade, porém não são considerados restritivos ao desenvolvimento radicular (**Figura 7A**). Já para as estratégias sem o revolvimento do solo (calcário em superfície, óxido em superfície e testemunha) não apresentaram diferenças entre si, nas camadas até 15 cm de profundidade (**Figura 7B**). Porém, do ponto de vista agrônomo, nas camadas entre 10 e 25 cm do solo os valores podem ser considerados restritivos (**Figura 7B**). Tais valores não podem ser considerados como um possível efeito da estratégia de correção da acidez, pois o método de aplicação sem o revolvimento do solo foi o mesmo nos dois tratamentos com aplicação em superfície. Porém, isso demonstra que o efeito da incorporação diante da aplicação em superfície do calcário, foi perceptível do ponto de vista físico até

25 cm de profundidade. Cabe salientar que o Ca aportado através da dissolução dos corretivos auxilia na formação de agregados do solo, melhorando a sua estrutura através da dispersão das partículas do solo (CHAN; HEENAN, 1998; BOLAN et al., 2003). Portanto, é perceptível que quanto menor das partículas do corretivo através do perfil do solo, maiores são as restrições de ordem física no desenvolvimento radicular.

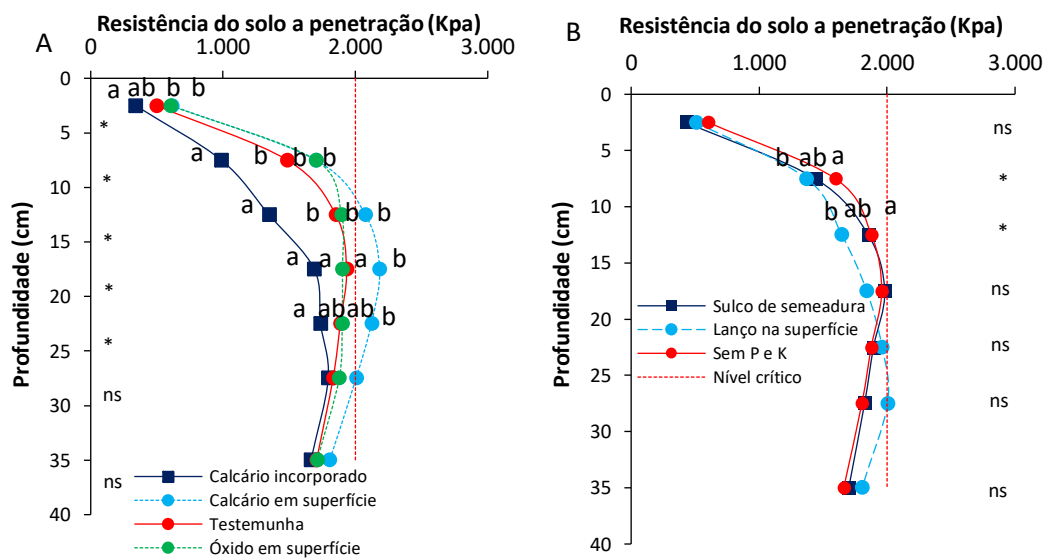


Figura 7. Valores de resistência do solo a penetração em função das estratégias de correção da acidez (A) e modos de adubação do solo (B) até 40 cm de profundidade em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. *, p<0,05; ns, não significativo a Tukey p<0,05; nível crítico de acordo com Tormena et al. (1998).

6.4. Efeitos do modo de adubação e das estratégias de correção da acidez do solo na produtividade da cultura do milho e da soja

Considerando se tratar da primeira safra avaliada, a produtividade do milho foi influenciada tanto pelas estratégias de correção da acidez quanto pelo modo de adubação, além da interação entre os dois fatores (**Figura 8**). A incorporação do calcário se mostrou a estratégia mais adequada para uma maior produtividade da cultura (considerando ser a primeira cultura implantada após a instalação do experimento), assim como a aplicação do fertilizante na linha de semeadura (**Figura 8**). As maiores produtividades obtidas no experimento foram observadas nos tratamentos com a combinação entre a correção da acidez com

revolvimento do solo (calcário incorporado) e a adubação de P e K em linha, provavelmente muito em função da melhor distribuição do adubo nas camadas inferiores do solo, aliada à correção em profundidade da acidez do solo, o que provavelmente possibilitou a exploração de um volume maior de solo pelas raízes da cultura. Em complemento, os resultados relacionados à RP demonstram que os tratamentos onde ocorreu a incorporação do calcário e adubação em sulco de semeadura apresentaram os menores valores de RP, o que indica uma menor compactação do solo e condições mais favoráveis ao desenvolvimento radicular e à absorção de nutrientes.

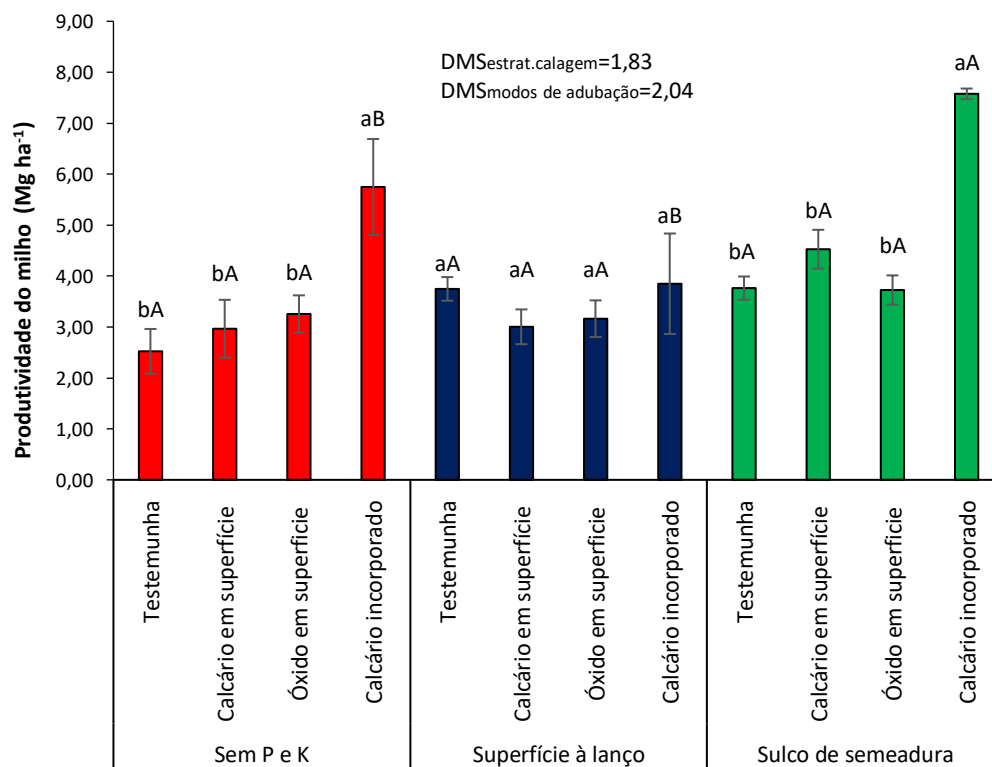


Figura 8. Produtividade de grãos da cultura do milho em função das estratégias de calagem e modos de adubação do solo em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas expressam a comparação entre as estratégias de calagem para cada modo de adubação, médias seguidas de letras maiúsculas representam a comparação dos modos de adubação em função das estratégias de correção da acidez. *, $p < 0,05$; ns, não significativo à $p < 0,05$.

Também foi constatado que quando não foi adicionado fertilizante

(considerando que os teores de P e K disponíveis no solo já estavam adequados), a aplicação incorporada do calcário obteve a melhor resposta em produtividade comparado aos demais tratamentos (**Figura 8**). Quando o fertilizante foi aplicado em superfície, as estratégias de correção da acidez não obtiveram diferenças estatísticas (**Figura 8**). Os resultados encontrados através da interação, entre o tratamento testemunha (sem calagem) e os modos de adubação não apresentaram diferença estatística, assim como na interação entre a aplicação superficial de calcário e óxido de Ca/Mg com os modos de adubação (**Figura 8**).

Individualizando a camada de 0 a 10 cm, o óxido de Ca/Mg apresentou 0,3 unidades de pH e 1,86% a mais de saturação por Ca+Mg+K e valores de saturação por Al semelhantes em relação ao calcário incorporado. Já na camada de 10 a 20 cm, é notável valores mais adequados ao desenvolvimento da cultura, quando o calcário é incorporado, mostrando uma maior da análise dessa camada para explicar uma produtividade 66% maior com a incorporação (**Figura 9**). A CQFS-RS/SC (2016) recomenda a utilização da camada de 0 a 10 cm para diagnosticar a fertilidade do solo sob PD, com análise ocasional da camada de 10 a 20 cm. A relação entre a produtividade do milho e as propriedades químicas do solo em diferentes camadas demonstra uma ineficácia da análise da camada de 0 a 10 cm para o diagnóstico da fertilidade do solo e o potencial produtivo da cultura sob PD, resultados semelhantes foram encontrados por Condon et al. (2021) e Bellinaso et al. (2021). Nesse caso, se mostra necessária uma análise estratificada da camada de 10 a 20 cm para definir com maior exatidão a recomendação de calagem.

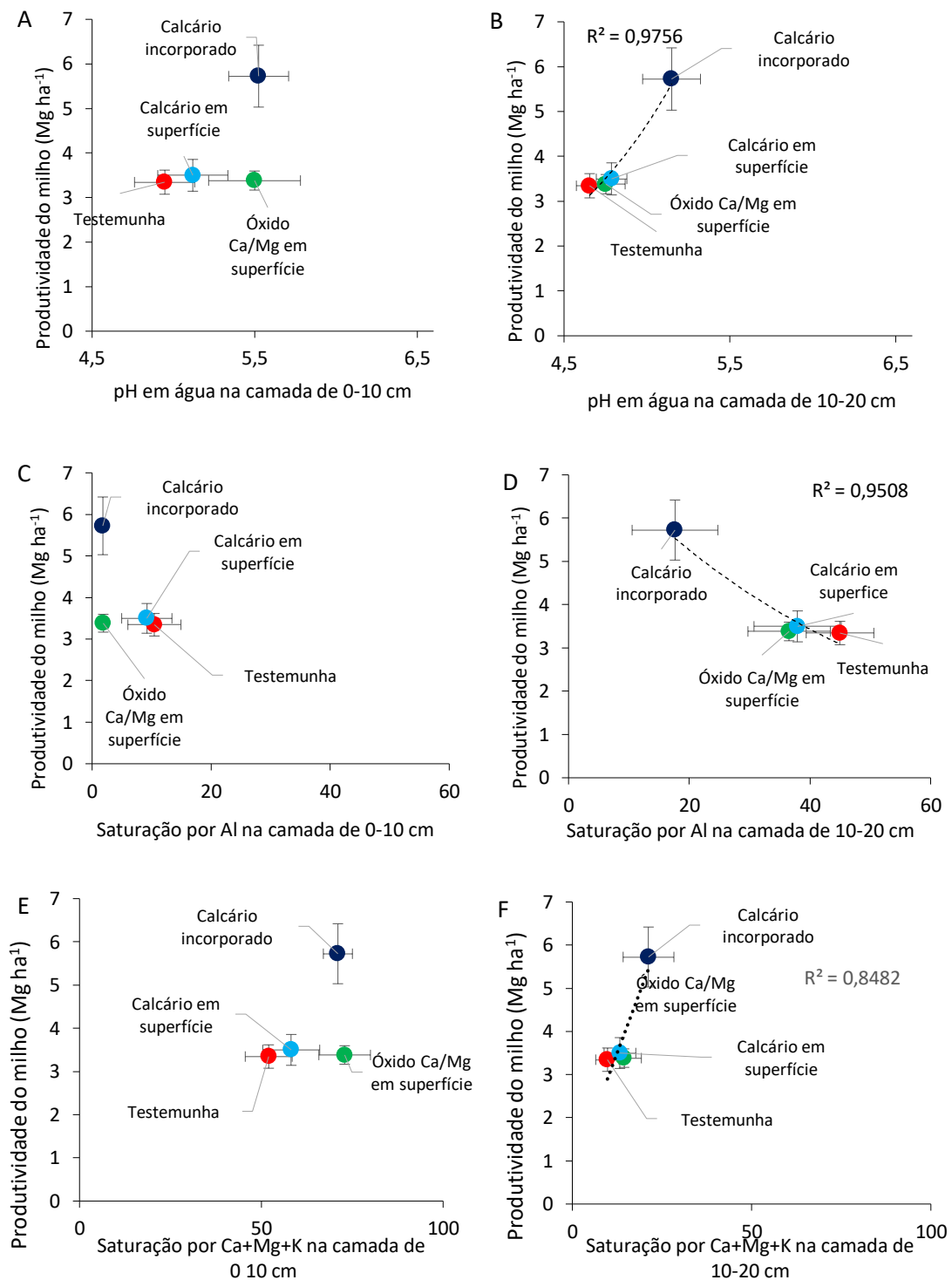


Figura 9. Relação entre a produtividade do milho e o pH do solo nas camadas de 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B), com a saturação por Al nas camadas de 0 a 10 cm (C) e 10 a 20 cm (D) e com a saturação por Ca+Mg+K nas camadas de 0 a 10 cm (E) e 10 a 20 cm (F) em um Plintossolo Argilúvico Ditrófico típico na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. As barras nos pontos representam o erro padrão das médias dos tratamentos.

As estratégias de calagem e os modos de adubação não foram efetivos sobre a produtividade da cultura da soja, na segunda safra de verão avaliada (**Figura 10**). A produtividade da cultura da soja fez uma média de entre todos tratamentos de 4,78 Mg ha⁻¹, considerando a média do Rio Grande do Sul (1,53 Mg ha⁻¹) (CONAB, 2021), a cultura obteve uma boa média de produtividade o que possivelmente está relacionado a pluviosidade maior no local do estudo em comparação com a média regional, principalmente no mês de janeiro (**Figura 2**). Cabe salientar que, em situações de déficit hídrico, a cultura tem maior suscetibilidade à redução da produção em função da alta acidez e presença de elementos tóxicos.

Também pode-se inferir que a cultura não respondeu aos modos de adubação pelo fato de o solo apresentar teores altos de P e K disponível, não demonstrando deficiências nutricionais e desempenhado plenamente suas funções fisiológicas, mesmo que sem adubação, ou aporte dos nutrientes em linha ou em superfície. Além disso, resultados encontrados por Paganí e Mallarino (2015) indicaram que a cultura do milho é mais responsiva ao efeito da calagem do que a soja. Além disso, a meta-análise incluindo 175 manuscritos, relatam que o milho (n = 71) como mais responsiva que a soja (n = 23), independente da fonte da calagem (LI et al., 2019). Diferentes espécies de plantas têm diferentes CTC nas paredes celulares das raízes, sendo que as raízes de espécies monocotiledôneas têm uma CTC menor em comparação com raízes de dicotiledôneas (WHITE, 2012; WHITE & BROADLEY, 2003), isso indica que espécies monocotiledôneas como o milho, são mais suscetíveis a solos ácidos (SOTO et al., 2023).

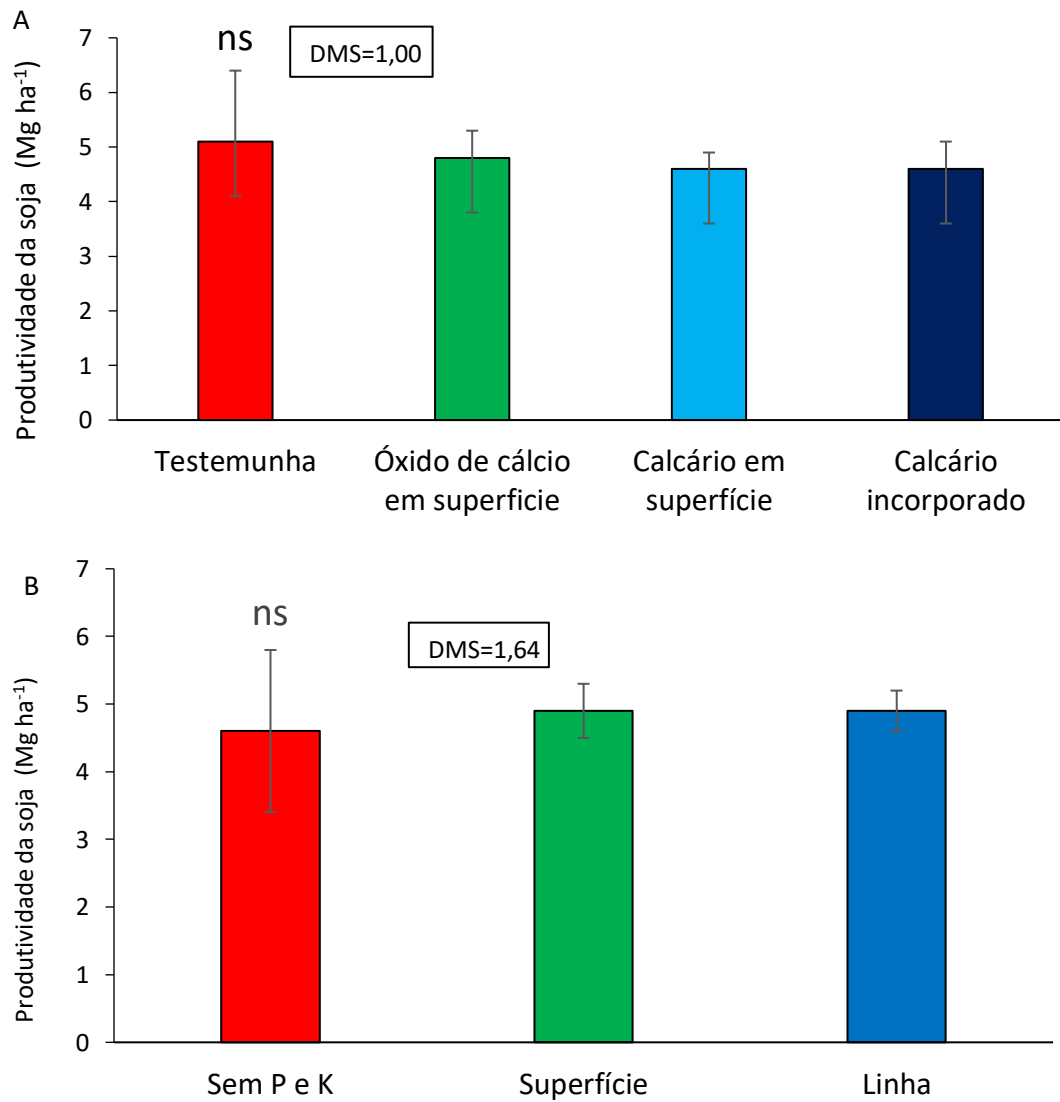


Figura 10. Produtividade da soja em função das estratégias de calagem (A) e os modos de adubação do solo (B) em um de um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS em Eldorado do Sul-RS. ns, não significativo à $p < 0,05$.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram após 6 meses da aplicação dos corretivos da acidez, correção de um maior volume de solo e em menor período só é possível através da incorporação do calcário, proporcionando um melhor ambiente físico e químico do solo, resultando em maior produtividade de milho já na primeira safra, enquanto a aplicação em superfície corrige a acidez do solo somente na camada superficial do solo, mesmo utilizando corretivos mais solúveis, como o óxido de Ca/Mg.

A aplicação de P e K no sulco de semeadura traz mais benefícios em comparação com a aplicação a lanço, pois incrementa a produtividade do milho reduz o gradiente de P no solo propicia melhorias nas propriedades físicas do solo

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, H. P. **Óxido de cálcio e magnésio aplicados no fundo do sulco de plantio da cana** - 67 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos de acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2005. (Boletim técnico, 6).
- ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Quality and legislation of fertilizers and acidity correction sources. : CURI, N. *et al.* (ed.). **Topics in soil science**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 291–334.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, L. A. *et al.* Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 351, p. 197-208, 2019.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 115–123, 2004.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873- 928.
- ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; CARMONA, F. C. Inter-relação entre manejo e atributos químicos do solo. : BERTOL, M. *et al.* (ed.). **Manejo e conservação do solo e da água**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 251-79.
- ARNUTI, F. **Dinâmica do nitrogênio em Argissolo em função de irrigação e adubação nitrogenada do milho em plantio direto**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ASIAMAH, R. D.; DEDZOE, C. D. Plinthization-A threat to agricultural production. **Ghana Journal of Agricultural Science**, Ghana, v. 32, n. 2, p. 223-227, 1999.

BARROW, N. J. The description of phosphate adsorption curves. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 29, p. 447-462, 1978.

BATISTA, M. A. *et al.* Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. *In*: BRANDÃO-FILHO, J. U. T. *et al.* **Hortaliças-fruto**. Maringá: EDUEM, 2018. p. 113-161.

BATISTELLA, M.; VALLADARES, G. S. Farming expansion and land degradation in Western Bahia, Brazil. **Biota Neotropica**, São Paulo, v. 9, p. 61-76, 2009.

BATTISTI, R. *et al.* Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, Cham, v. 12, p. 159-168, 2018.

BELLINASSO, R. J. S. *et al.* Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil Research**, Collingwood, v. 60, n.1, p. 33-49, 2021.

BLEVINS, R. L.; MURDOCK, L.; THOMAS, G. W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 322-326, 1978.

BERTSCH, P. M.; PARKER, D. R. Aqueous polynuclear aluminum species. *In*: SPOSITO, G. (coord.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton : CRC Press, 1995. p. 117-168.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, [art.] 104534, 2020.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 104, p. 196-204, 2015.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 262-271, 2014.

BOLAN, N. S.; ADRIANO, D. C.; CURTIN, D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 78, p. 215-272, 2003.

CAIRES, E. F. *et al.* Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. **Pedosphere**, Beijing, v. 26, p. 474–485, 2016.

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

CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **No-till agriculture in southern Brazil: factors that facilitated the evolution of the system and the development of the mechanization of conservation farming**. Londrina: IAPAR, 2012.

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**, Amsterdam, v. 133, p. 32–39, 2013

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 85, p. 31–37, 2017.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. Effect of lime (CaCO₃) application on soil structural stability of a red earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 36, n. 1, p. 73–86, 1998.

CHENG, Y. *et al.* Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 57, p. 848–857, 2013. Supl. C.

CHINAIDER, W. C.; NUNES, J. Avaliação da produtividade do milho em diferentes dosagens de óxido de cálcio. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 7 n. 3, p. 90-99, 2014.

CIPRANDI, M. A. O. **Avaliação da metodologia de determinação da acidez ativa e potencial em solos do Rio Grande do Sul**. 1993. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 376 p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2016. 400 p.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABSTECIMENTO. Safra 2021/22. **Perspectivas para a Agropecuária: Grãos**, Brasília, DF, v. 9, p. 1-85, ago. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria>. Acesso em: 25 dez. 2022.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, p. 40–47, 2013.

CONDON, J.; BURNS, H.; LI, G. The extent, significance and amelioration of subsurface acidity in southern New South Wales, Australia. **Soil Research**, Collingwood, v. 59, n. 1, p. 1-11, 2020.

COSTA, J. P. V. *et al.* Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 828-835, 2006.

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

DELHAIZA, E.; RYAN, P. R. Aluminium toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DONAGEMMA, G. K. *et al.* **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F. S.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 889–901, 2004.

ERNANI, P. R. *et al.* Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 393-401, 2007.

ERNANI, P. R. *et al.* **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**.

Lages: Paulo Ernani, 2008. 230 p.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *In*: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in agronomy**. [Amsterdam]: Elsevier, 2014. v. 128, p. 221–275.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 345–399, 2008.

FINK, J. R. *et al.* Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 62–68, 2016.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 2, p. 715-724, 2017.

FUENTES-LLANILLO, R. *et al.* Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 208, [art.] 104877, 2021.

GAMA, M. A. P. **Determinação da acidez potencial e da necessidade de calagem em solos do nordeste Paraense**. 1998. 72 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

GAO, W. *et al.* Effect of localised phosphorus application on root growth and soil nutrient dynamics in situ – comparison of maize (*Zea mays*) and faba bean (*Vicia faba*) at the seedling stage. **Plant and Soil**, The Hague, v. 441, p. 469–483, 2019.

GATIBONI, L. C. *et al.* Establishing environmental soil phosphorus thresholds to decrease the risk of losses to water in soils from Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 44, [art.] e0200018, 2020.

GODSEY, C. B. *et al.* Management of soil acidity in no-till production systems through surface application of lime. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 3, p. 764-772, 2007.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 32, p. 390–399, 2016.

GRANT, C. A. *et al.* The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 81, n. 2, p. 211-224, 2001.

HAO, T. *et al.* Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. **Journal of Environmental Management**, London, v. 270, [art.] 110888, Sept. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 20 out. 2021.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, DF: INMET, 2017.

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

KAMINSKI, J. **Fatores da acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul**. 1974. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.; BARTZ, H. Proposta de nova equação para determinação do valor de H + Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC. *In*: REUNIÃO ANUAL DA ROLAS, 23., 2001, Frederico Westphalen. **Anais**. Frederico Westphalen: ROLAS/SBCS, 2001. p. 21-26.

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**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

KAMINSKI, J. *et al.* Acidez e calagem no sul do Brasil: aspectos históricos e perspectivas futuras. *In*: TÓPICOS em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 307-332.

KUNHIKRISHNAN, A. *et al.* Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 139, p. 1-71, 2016.

KURIHARA, C. M. S.; HERNANI, L. C.; SILVA, W. M. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcários sul-mato-grossenses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 1443–1449, 1999.

KUZYAKOV, Y.; RAZAVI, B. S. Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 135, p. 343–360, 2019.

LI, Y. *et al.* Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 19, p. 1393-1406, 2019.

LIMA, E. S. *et al.* Variabilidade espacial das propriedades dendométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

LUKIN, V. V.; EPPLIN, F. M. Optimal frequency and quantity of agricultural lime applications. **Agricultural Systems**, Barking, v. 76, p. 949–967, 2003.

MAKSIC, J. *et al.* Brazilian biomes distribution: past and future. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 585, [art.] 110717, 2022.

MARTINS, A. P. *et al.* Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 141–149, 2014.

MBUTHIA, L. W. *et al.* Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: implications for soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 89, p. 24–34, 2015.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; CARMONA, F. C. Solos ácidos e solos afetados por sais. *In*: MEURER, Egon José (ed.). **Fundamentos da química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. cap. 6, p. 155-175.

MINGOTTE, F. L. C. O feijoeiro no sistema de plantio direto: o caminho para a sustentabilidade. **Journal of Agronomic Sciences**, Maringá, v. 3, p. 329–352, 2014.

MIOTTO, A. *et al.* Soil acidity and aluminum speciation affected by liming in the conversion of a natural pasture from the Brazilian Campos Biome into no-tillage system for grain production. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Berlin v. 66, n. 2, p. 138–151, 2020.

MOHR, W. A influência da acidez sobre a fertilidade dos solos. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1., 1960, Campinas, SP, Brasil. **Anais**. São Paulo: Secretaria da Agricultura, 1963. p. 61-76.

NEVES, L. S. **Influência de doses e da localização de cloreto de potássio na germinação de milho e na difusão de K em solos**. 2007. 68 f.

Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2007.

NKEBIWE, P. M. *et al.* Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 196, p. 389-401, 2016.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 6, n. 1, p. 97-111, 2004.

NUNES, M. R. *et al.* Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119–126, 2015.

NUNES, M. R. *et al.* Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 285, [art.] 106607, 2019.

OSAKI, F. **Calagem e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

PAGANI, A.; MALLARINO, A. P. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 1, p. 71–82, 2015.

PANUELAS, J. *et al.* Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain. **Journal of Environmental Biology**, Luknow, v. 30, p. 841-846, 2009.

PIAS, O. H. C. *et al.* Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 675–692, 2020.

QUAGGIO, J. A. Reação do solo e seu controle. *In*: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1986, Piracicaba, SP. [Anais]. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 9-39.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000.

QUAGGIO, J. A. *et al.* Peanut response to lime and molybdenum application in low pH soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 659-664, 2004.

RAFAIN, E. F. *et al.* Correlation between sowing and fertilizer application systems and weeds in soybean crops. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 2, p. 281–86, 2020.

RAIJ, B. V. Acidez e calagem. *In*: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S. L.; BECKER,

F. C. (ed.). **Seminário sobre corretivos da acidez do solo**. Santa Maria: UFSM, 1989. v. 2, p. 74-100.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 7-16, 2018a.

RHEINHEIMER, D. S. *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**, Amsterdam, v. 180, p. 222–223, 2018b.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Intensidade de colonização do córtex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim-pensacola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 223-228, 1995.

ROSOLEM, C. A. *et al.* Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 821-828, 1999.

ROY, E. D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, London, v. 2, n. 5, p. 1-6, 2016.

SÁ, J. C. M. *et al.* Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. *In*: L.I. PROCHNOW *et al.* (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 383-420.

SIQUEIRA, P. P. *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 37, [art.] 100931, 2021.

SOTO, A. L. *et al.* Managing soil acidity vs. soil Ca: Mg ratio: what is more important for crop productivity? **Crop, Forage & Turfgrass Management**, Madison, v. 9, n. 1, [art.] e20210, 2023.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAES, R. F. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 205–274.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. *In*: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.

SOUZA, F. S.; FARINELLI, R.; ROSOLEM, C. A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 387-392, 2007.

SPARKS, D. L. Inorganic soil components. *In*: SPARKS, D. (ed.). **Environmental soil chemistry**. 2nd ed. Elsevier, 2003. Cap. 2, p. 43-73.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2008. 330 p.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: [S.n.], 1995.

TEIXEIRA, H. R. S. *et al.* Efeito da profundidade de adubação e semeadura na cultura do milho. **Revista Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 27, n. 1, p. 91-100, 2018.

TELES, A. P. B. *et al.* Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 34-44, 2017.

TIECHER, T. *et al.* Base saturation is an inadequate term for Soil Science. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 46, [art.] e0220125, 2022.

TIECHER, T. *et al.* Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 42, [art.] e0170025, 2018.

TIECHER, T. *et al.* Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78-85, 2017.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long-term experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 57-67, 2012.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 573-581, 1998.

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

VERLENGIA, F.; GARGANTINI, H. Estudo sobre a eficiência de diferentes frações granulométricas de calcário no solo. **Bragantia**, Campinas, v. 31, p. 119-128, 1972.

WANG, X.; YAN, X.; LAIO, H. Genetic improvement for phosphorus efficiency in a soybean: a radical approach. **Annals of Botany**, Oxford, v. 106, n. 1, p. 215-222, 2010.

WHITE, P. J. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. *In*: MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2012. Cap. 2, p. 7-47.

WHITE, P. J. Calcium in plants. **Annals of Botany**, Oxford, v. 92, n. 4, p. 487-511, 2003.

ZANDONÁ, R. R. *et al.* Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, 2015.