

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CURSO DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

ANDRÉ CARLOS AULER

EFEITOS DE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO ASSOCIADOS AO GESSO
AGRICOLA SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

PONTA GROSSA – PR

2018

ANDRÉ CARLOS AULER

EFEITOS DE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO ASSOCIADOS AO GESSO
AGRICOLA SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

Tese apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa
para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de
Concentração: Agricultura. Linha de Pesquisa: Uso e
Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA – PR

2018

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

A924 Auler, André Carlos
 Efeitos de corretivos da acidez do solo
 associados ao gesso agrícola sobre os
 atributos físicos e químicos do solo/
 André Carlos Auler. Ponta Grossa, 2018.
 134f.

 Tese (Doutorado em Agronomia - Área de
 Concentração: Agricultura), Universidade
 Estadual de Ponta Grossa.

 Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
 Pires.

 Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
 Caires.

 1.Acidez do solo. 2.Calagem.
 3.Agregação do solo. 4.Estrutura do solo.
 5.Retenção de água no solo. I.Pires, Luiz
 Fernando. II. Caires, Eduardo Fávero.
 III. Universidade Estadual de Ponta
 Grossa. Doutorado em Agronomia. IV. T.

CDD: 631.41



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: **"Efeitos de corretivos da acidez do solo associados ao gesso agrícola sobre os atributos físicos e químicos do solo"**.

Nome: André Carlos Auler

Orientador: Luiz Fernando Pires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

Prof. Dr. João Tavares Filho

Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab

Prof. Dr. Luis Miguel Schiebelbein

Prof. Dr. Jaime Alberti Gomes

Data da Realização: 25 de Abril de 2018.

Dedico este trabalho a todos aqueles que se permitem questionar,
que não se contentam com as respostas apresentadas até então,
que procuram pelo conhecimento.

Àqueles que representam símbolos de resistência,
em períodos tão sombrios de intolerância e extremismos,
que são minorias e não se calam,
demonstrando que sempre podemos e devemos ir em frente.

Também dedico àqueles que ainda nem conheço,
mas sei que estão à minha espera, meus filhos!

Saibam que vocês são a razão para as quais continuo minha jornada!

AGRADECIMENTOS

Esta Tese só foi possível graças a participação de inúmeras pessoas e instituições, sem distinção de maior ou menor participação ou mesmo de importância. Sendo assim, peço desculpas adiantadas pela extensão do texto, mas gostaria de expressar meus mais singelos agradecimentos:

À Deus, pelo existencialismo, proteção, bênçãos e guiaamentos concedidos.

À minha família, em especial ao meu amigo, esposo e eterno namorado, Elison Berger, o qual me faz querer ser um ser humano melhor! Obrigado pelo simples fato de sorrir para mim quando parecia que o meu mundo ia desabar. Obrigado pelos: “ajuda eu dizer que te amo! ”. Também aos nossos filhos Lea Michelle e Leon Eduardo (os melhores gatos do mundo!), que embora sejam “irracionais” seu carinho e amor incondicional muitas vezes me acalmaram. Ao meu irmão, Anderson G. Auler, que não se incomodou em fazer mais de 400 km para meu auxiliar em muitas análises. Aos meus pais, Carlos G. Auler e Adilce B. Auler, por terem suportado a barra dos longos primeiros 7 meses sem bolsa no curso!

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia desta instituição, pela oportunidade de ser integrante de seu corpo discente, e por poder atuar como representante discente junto ao colegiado do PPG. Em especial, gostaria de agradecer ao Prof. Rodrigo R. Matiello, por todas as conversas e conselhos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luiz Fernando Pires e Prof. Eduardo Fávero Caires pelos ensinamentos, confiança em mim depositada nas diversas atividades da pós-graduação e, principalmente, pela amizade. Saibam que no que depender de mim, essa parceria de trabalho e nossos laços perduraram o tempo. Ao Prof. Pires, em especial, muitíssimo obrigado pelas oportunidades de trabalho que o Sr. me proporcionou ao longo destes quase seis anos de pós-graduação. Ao Prof. Eduardo por toda a paciência e plenitude em transmitir seus conhecimentos, em especial pelo convite para o Pós-Doc! Sem sombra de dúvidas, o profissional que sou hoje é um reflexo dos belos exemplos que tive.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Agrisus – Agricultura Sustentável, pelo financiamento dos projetos de pesquisa 1483/15 e 1998/17, que foram fundamentais para a realização desta Tese.

À Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, pela concessão da área experimental e todo o suporte técnico de campo oferecido para a condução do experimento, em especial ao Pesquisador Dr. Gabriel Barth.

Ao Instituto Agronômico do Paraná, em especial ao Pesquisador Dr. Jadir Aparecido da Rosa, pelo empréstimo das câmaras de Richards e auxílio no levantamento das curvas de retenção de água no solo.

Ao complexo de laboratório multiusuários da UEPG, C-LABMU, em especial a laboratorista Rachel Gouvea, por toda calma, suporte e comprometimento nas leituras do Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

Aos amigos, colegas e ex-colegas dos Programas de Pós-Graduação em Agronomia e em Ciências/Física. Em especial à Jucimare Romaniw, fiel amiga e comadre (literalmente!), muito obrigado pelo auxílio nas análises de C e, principalmente, por me presentear com a Pietra, à Shivelly L. Galetto, pela amizade, auxílio em análises químicas e exemplo de pessoa com persistência e comprometimento. À Lohane Tech, uma amiga sem precedentes, que além do auxílio nas medidas de densidade de partículas, me fez rir e muito na vida rotineira do laboratório. À Janaína Schardosin, que de um jeito meigo e sutil, cativou minha amizade, obrigado pelos risos no lab., obrigado por todas as dúvidas esclarecidas. À Aline Mari Huf dos Reis, com me identifico muito, obrigado pela amizade, preocupação e dedicação em simplesmente saber se estava tudo bem comigo. Ao Adriano Haliski e ao Angelo R. Bini, por todo o companheirismo durante a Pós-Graduação, mas em especial pelo auxílio e explicações em muitas análises laboratoriais. À Talita F. Rosas, que muito me auxiliou no início do projeto, no levantamento das CRAs e nas análises laboratoriais. À Jaqueline A. R. Borges, por todo o auxílio durante todos esses anos. Ao Luís Valério Prandel, por todo o conhecimento repassado para a realização das análises de DRX e FRX. Ao Victor Akio Yanaguisawa, pelo companheirismo e colaboração nas medidas do FRX. Ao Luís Miguel Schiebelbein, pela amizade, por todos os conhecimentos repassados, por confiar em meu profissionalismo ao me indicar para trabalhar em instituições de ensino ao seu lado. À Tiffani e a Risadinha, nossas cachorras comunitárias, por alegrarem o Bloco L e seu companheirismo nas longas tardes de domingo e feriados que passei sozinho no lab.

Aos alunos de graduação, orientados e estagiários dos laboratórios de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais, Matéria Orgânica do Solo e Fertilidade do Solo da UEPG. Em especial, meus singelos agradecimentos aos alunos que estiveram envolvidos comigo e como o projeto por tanto tempo, Ataíde Kapp Neto, Aline Lima Gomes e Elida M. Nogueira. Embora toda a ajuda de vocês foi inigualável, meu maior agradecimento é pela confiança em permitir que eu participasse de vossa formação acadêmica, muitíssimo obrigado pelos 3 brilhantes anos de coorientação que tive com vocês. Também agradeço aos alunos e ex-alunos desses laboratórios Izabelle C. Barros, Franciellen Stanislavski, Luiz M. S. Guilherme, Layon O. de

Souza, Luiz O. R. Solak e Cristian F. Minozzo, por todo o auxílio prestado. Agradecimentos especiais às novas integrantes do Laboratório de Fertilidade do Solo, Larissa E. C. Luiz, Rafaela P. Marcantes e Geisilaine F. Andrade, que embora sejam alunas de 1º ano, agarraram a oportunidade e a cada dia demonstram mais e mais interesse na área de Física do Solo. MUITÍSSIMO obrigado por toda a ajuda prestada, saibam que é muito bom ver que meu trabalho inspira jovens principiantes!

Aos funcionários da instituição Luciane Henneberg, Zima R. Guera, Nilcéia Lara, por todos os cafés e risos nesses longos quase 6 anos de minha estadia na UEPG. Porém, em especial expresso meus agradecimentos a laboratorista do laboratório de Fertilidade do Solo, Dirce V. Oliveira, e a laboratorista do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo, Jaqueline A.

Gonçalves, pelo auxílio nas análises laboratoriais, pela amizade e exímio exemplo de dedicação ao trabalho público. Dirce, saiba que jamais terei palavras para lhe agradecer! Graças a você posso falar que hoje sei fazer análises químicas de solo, muitíssimo obrigado!

Aos demais membros do grupo de pesquisa que faço parte, Física Aplica a Solos e Ciências Ambientais, os quais não citei os nomes. Todavia, gostaria de agradecer em especial ao meu chará, Prof. Dr. André Maurício Brinatti e ao Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab, por serem exemplos de dedicação e transparecer o amor pela vida de docente. Isto é de grande valia para mim, pois me estimula a continuar nessa jornada. Obrigado também por toda a confiança que tiveram em mim ao longo desses anos.

Aos colegas do Laboratório de Propriedades Mecânicas e de Superfície, vizinhos do Bloco L, em especial à Mariza V. Senk e à Iolanda C. J. Dechandt, por toda a amizade.

Aos amigos de bar, além dos amigos do PPG, por toda a descontração e horas de lazer (quando possível!), por todas as filosofias de boteco e a oportunidade de discutirmos tantos assuntos! Em especial, Gabriel G. Soares, Fabrício S. Hennipman, Maiquel Alberts e Ruan Gustavo.

Às pessoas que são de grande importância sentimental para mim, que foram pilares de motivação, em especial à Angélica L. Michalowski, Regina B. Verona e Maristela Vogel. A essas, embora não tenham participado efetivamente do trabalho, gostaria de agradecer em especial por serem exemplos de mulheres batalhadoras. Ao meu sobrinho Murilo Berger, que além do vínculo familiar, há o vínculo profissional, obrigado pelo auxílio em tantas análises e obrigado por permitir que eu participasse de sua formação acadêmica.

Às Instituições de Ensino em que atuo como docente, o Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE) e a Faculdades Ponta Grossa (FacPG). Em especial, agradeço pela compreensão no período final de redação da Tese.

“If you can't love yourself, how in the hell you gonna love somebody else?”

(RuPaul)

“Você pode decepcionar o mundo todo.

A única pessoa que você não pode decepcionar é você mesmo! ”

(Prof. Luiz Fernando Pires)

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

AULER, A. C. **EFEITOS DE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO ASSOCIADOS AO GESSO AGRÍCOLA SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO**. 2018. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

RESUMO

A acidez do solo é um importante fator que restringe a produção agrícola no mundo. Solos ácidos apresentam baixos valores de pH, elevados teores de alumínio trocável (Al^{3+}) e baixa disponibilidade de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) trocáveis. Para corrigir os problemas causados pela acidez do solo, diversos materiais podem ser utilizados, com destaque para os carbonatos e os silicatos de Ca e Mg. Tais produtos apresentam distinções quanto a sua composição química e características físicas, o que repercute sobre sua reatividade no solo. Contudo, com o advento do plantio direto (SPD), os corretivos da acidez são aplicados sobre a superfície do solo, o que restringe a correção da acidez em subsuperfície. Neste contexto, o gesso agrícola é aplicado em associação aos corretivos da acidez. Embora o gesso agrícola não atue sobre a acidez ativa do solo, em subsuperfície ele atua reduzindo os teores de Al^{3+} e elevando os teores de Ca^{2+} , o que melhora o ambiente radicular. O manejo químico do solo, por meio da aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola pode alterar a estrutura do solo e os processos termodinâmicos que nela ocorrem. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar os efeitos de corretivos de acidez do solo [calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)], associados ou não ao gesso agrícola, sobre os atributos físicos e químicos do solo e a produtividade de culturas no SPD. Para isso, instalou-se um experimento em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico de textura argilo-arenosa, em Ponta Grossa-PR. Os tratamentos foram os três corretivos da acidez do solo CRM ($3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), ES ($4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) e CC ($2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) mais um tratamento controle (sem correção da acidez), associados ou não ao gesso agrícola ($2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$). As doses dos corretivos foram calculadas para elevar a saturação por bases da camada 0-0,20 m a 70 %, com base em seus equivalentes carbonatos. A dose de gesso agrícola foi calculada com base no teor de argila do solo. Os corretivos e o gesso agrícola foram aplicados sobre a superfície do solo, em agosto de 2015. A rotação de culturas utilizada foi milho (2015/16) – trigo (2016) – soja (2016/17) – aveia preta (2017) – feijão (2017/18). Após a colheita do milho e do trigo, respectivamente aos 7 e aos 15 meses após a aplicação dos tratamentos, foram coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo. Foram coletadas amostras indeformadas de solo em (i) monólitos, nas camadas 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, para avaliação da agregação e da estabilidade de agregados; e em (ii) anéis volumétricos, nas camadas 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, para avaliação da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e retenção de água no solo. As amostras deformadas foram coletadas nas mesmas camadas de coleta dos anéis volumétricos, para determinação dos componentes da acidez do solo (pH, H^+ e Al^{3+}), cátions básicos trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) e teores de carbono lábil (COXP) e total (CO). A produtividade das culturas foi avaliada e utilizada para se determinar a eficiência agrônômica dos corretivos e do gesso agrícola. Tanto aos 7 quanto aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, os teores dos cátions básicos foram mais afetados que os componentes da acidez. Via de regra, a aplicação de gesso agrícola promoveu intensa lixiviação de Mg^{2+} e K^+ nas camadas mais superficiais do solo, o que resultou no aumento da concentração dos nutrientes em profundidade. Referindo-se aos componentes da acidez, o Al^{3+} foi o componente mais alterado pela aplicação dos tratamentos, principalmente aos 15 meses após aplicação. Um resultado a ser destacado é que a ES com gesso aumentou os

teores de Al^{3+} em profundidade. Os teores de COXP e CO não foram afetados pelos tratamentos. As alterações nos atributos químicos do solo repercutiram sobre os atributos físicos. O diâmetro médio ponderado dos agregados e as proporções de macroagregados grandes foram mais influenciadas aos 15 meses após aplicação, em relação aos 7 meses, demonstrando a importância do tempo de reação dos materiais no solo sobre sua agregação. A Ds, a Pt e a Ma foram alteradas pelos tratamentos na camada de 0,40–0,60 m, diferentemente da Mi, que foi afetada nas camadas mais superficiais do solo (0–0,20 m). A retenção de água no solo foi sensível as alterações na estrutura do solo, principalmente quando os corretivos foram aplicados associados ao gesso agrícola. Deste modo, pode-se concluir que a dinâmica dos íons no solo pela correção da acidez e aplicação de gesso agrícola influencia os atributos físicos do solo, tanto em superfície como em profundidade. O aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e a redução do Al^{3+} melhora a estrutura do solo, reduzindo sua Ds e aumentando sua Pt; e, a substituição de Al^{3+} por Mg^{2+} no complexo de troca do solo, decorrentes da aplicação da ES e do gesso agrícola influencia a retenção de água no solo. Sendo que a maior concentração do Mg^{2+} favorece a retenção. Os efeitos da correção da acidez do solo, independentemente do corretivo, e do gesso agrícola sobre a produtividade das culturas ocorre de maneira independente. Também, as culturas respondem de maneira distinta a correção da acidez e a gessagem. Todavia, o calcário calcinado foi o corretivo com maior eficiência agrônômica, tanto quando aplicado isoladamente como quando associado ao gesso agrícola.

Palavras-chave: Acidez do solo. Calagem. Agregação do solo. Estrutura do solo. Retenção de água no solo. Sistema plantio direto.

AULER, A. C. **EFFECTS OF SOIL ACIDITY CORRECTIVES ASSOCIATED WITH PHOSPHOGYPSUM ON SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES**. 2018. 134 s. Thesis (Doctorate in Agronomy) – Ponta Grossa State University, Ponta Grossa, 2018.

ABSTRACT

Soil acidity is an important factor that restricts agricultural production in the world. Acid soils have low pH values, high exchangeable aluminum (Al^{3+}) content and low availability of exchangeable calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) and potassium (K^+). To correct the problems caused by the soil acidity, several materials can be used, with emphasis on carbonates and silicates of Ca and Mg. These products present distinctions as to their chemical composition and physical characteristics, which has repercussions on their reactivity on the soil. However, with the advent of no-till (NT), acidity correctives are applied to the soil surface, which restricts the correction of acidity in subsurface. In this context, the phosphogypsum is applied in association with acidity correctives. Although the phosphogypsum does not act on the active acidity of the soil, in subsurface it acts reducing the Al^{3+} contents and increasing the Ca^{2+} contents, which improves the root environment. The chemical management of the soil, through the application of correctives of acidity and of agricultural gypsum can alter the soil structure and the thermodynamic processes that occur in it. In this context, the general aim of this study was to evaluate the effects of soil acidity correctives [ground rock limestone (GRL), steel slag (SS) and calcined limestone (CL)], associated or not with soil physical and chemical attributes and crop productivity in NT. For this purpose, an experiment was carried out on a sandy-clay Typic Hapludox, at Ponta Grossa-PR. The treatments were the three soil acid correctives: GRL (3.8 Mg ha^{-1}), SS (4.2 Mg ha^{-1}) and CL (2.7 Mg ha^{-1}), plus one control treatments (without acidity correction), associated or not with phosphogypsum (2.4 Mg ha^{-1}). The corrective doses were calculated to raise the base saturation of the 0-0.20 m layer to 70%, based on their carbonate equivalents. The dose of phosphogypsum was calculated based on the soil clay content. Correctives and phosphogypsum were applied to the soil surface in August 2015. The crop rotation was corn (2015/16) – wheat (2016) – soybean (2016/17) – black oat (2017) – beans (2017/18). After the corn and wheat were harvested, at 7 and 15 months after the treatments, undisturbed and disturbed soil samples were collected. Undisturbed soil samples were collected in (i) monoliths, in the 0–0.05; 0.05–0.10 and 0.10–0.20 m layers, for evaluation of aggregation and aggregates stability; and in (ii) volumetric rings, in the 0–0.05; 0.05–0.10; 0.10–0.20; 0.20–0.40 and 0.40–0.60 m layers, to evaluate the soil bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) and soil water retention. The deformed samples were collected in the same collection layers of the volumetric rings to determine the soil acidity components (pH, H^+ and Al^{3+}), exchangeable basic cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+) and labile (POxOC) and total (OC) carbon contents. The yield crops was evaluated and used to determine the agronomic efficiency of the correctives and the phosphogypsum. Both at 7 and 15 months after application of treatments, the basic cations contents were more affected than the acidity components. As a rule, the application of phosphogypsum promoted intense Mg^{2+} and K^+ leaching in the more superficial layers of the soil, which resulted in increased concentration of nutrients in depth. Referring to the components of acidity, Al^{3+} was the most altered component by the application of treatments, especially at 15 months after application. One result to be highlighted is that SS with phosphogypsum increased Al^{3+} contents in depth. The POxOC and OC contents were not affected by the treatments. The changes in the soil chemical attributes had repercussions on the physical attributes. The weight mean diameter of the aggregates and the proportions of large macroaggregates were more influenced at 15 months

after application, in relation to the 7 months, demonstrating the importance of the reaction time of the materials in the soil on their aggregation. BD, TP and Ma were altered by treatments in the layer of 0.40–0.60 m, while Mi was affected in the most superficial layers of the soil (0–0.20 m). The soil water retention was sensitive to changes in soil structure, especially when the correctives were applied associated with the phosphogypsum. In this way, it can be concluded that soil ion dynamics by the acidity correction and phosphogypsum application influences the physical attributes of the soil, both in surface and in depth. The increase in the Ca^{2+} and Mg^{2+} contents and the Al^{3+} reduction improve the soil structure, reducing its BD and increasing its TP; and, the substitution of Al^{3+} for Mg^{2+} in the soil exchange complex, due to the application of SS and phosphogypsum influences soil water retention. The higher concentration of Mg^{2+} favors retention. The effects of correcting soil acidity, regardless of the corrective, and the phosphogypsum on crop yield, occur independently. Also, crops respond differently to acidity correction and phosphogypsum application. However, the calcined limestone was the corrective with higher agronomic efficiency, both when applied alone and when associated with agricultural gypsum.

.

Keywords: Soil acidity. Liming. Soil aggregation. Soil structure. Soil water retention. No tillage system.

LISTA DE FIGURAS

3 – REVISÃO DE LITERATURA

Figura 3.1 –	Distribuição da acidez do solo no globo terrestre.....	22
--------------	--	----

4 – MATERIAL E MÉTODOS

Figura 4.1 –	Croqui do experimento instalado no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. T1 – sem correção da acidez e sem gesso agrícola (GA); T2 – GA; T3 – calcário de rocha moída (CRM); T4 – CRM associado ao GA; T5 – escória de siderurgia (ES); T6 – ES associado ao GA; T7 – calcário calcinado (CC); T8 – CC associado ao GA.....	37
Figura 4.2 –	Detalhes da aplicação superficial dos tratamentos sobre palhada de aveia-preta.....	38
Figura 4.3 –	Detalhes da coleta de monólitos de solo: (a) trincheira aberta para coleta dos monólitos em sua lateral; (b) aspecto da parede lateral da trincheira após a coleta do monólito na camada de 0–0,05 m; (c, d) processo de embalagem da amostra com filme plástico após a coleta...	41
Figura 4.4 –	Representação esquemática da coleta de amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos: (a) preparo da superfície do solo para coleta das amostras na camada de 0-0,05 m; (b) coleta da amostra com detalhe do amostrador de Uhland adquirido com recursos do projeto; (c) aspecto do solo após a coleta da amostra; (d) detalhe da luva de coleta/proteção do anel volumétrico, na parte inferior do amostrador de Uhland; (e) detalhe do anel volumétrico após retirada da luva de coleta/proteção; (f) abertura de trincheira para coleta de amostras na camada de 0,05-0,10 m, com o auxílio de espátulas; (g) coleta de amostra na profundidade de 0,10-0,50 m; (h, i, j) detalhes da abertura da trincheira para coleta da amostra em profundidades maiores, com o auxílio de cavadeira (h) e espátula (i), com ênfase na medição lateral para determinação da profundidade média da camada (j).....	42
Figura 4.5 –	Detalhes do processo de tamisamento: (a) separação dos agregados dos monólitos seguindo as linhas de fraqueza do solo; (b) detalhes de restos culturais e raízes que atuam como agentes cimentantes e induzem as linhas de fraqueza; (c) amostras no aparelho de Yoder durante o processo de tamisamento, e (d) amostras tamisadas após secagem em estufa.....	45

5 – RESULTADOS

Figura 5.1 –	Difratogramas dos corretivos da acidez do solo: calcário de rocha moída (a), calcário calcinado (b) e escória de siderurgia (c); e do gesso agrícola (d). Ab = Albita. Am = Aluminita. An = Alunita. At = Anortita. Ap = Apatita-(CaOH). Ba = Basaluminita. Bs = Bassanita. Cc = Calcita. Cn = Clinocrisotila. Dp = Diásporo. Dl = Dolomita. Gp = Gipsita. Ht = Hidrotalcita. Mg = Magnesita. Mc = Monohidrocalcita. Nq = Nesqueonita. Ov = Olivine. Pg
--------------	---

	Paligorsquita. Pr = Pirita. Qz = Quartzo. Sh = Silhidrita. Sz = Szomolnokita. Tc = Talco. Vt = Vaterita. Wv = Wavellita.....	52
Figura 5.2 –	Acidez ativa (pH em CaCl ₂), potencial (H+Al) e trocável (Al ³⁺) do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d, f), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F (p< 0,05); **Interação significativa; ^{ns} Não significativo.....	55
Figura 5.3 –	Acidez ativa (pH em CaCl ₂), potencial (H+Al) e trocável (Al ³⁺) do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d, f), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F (p< 0,05); **Interação significativa; ^{ns} Não significativo.....	58
Figura 5.4 –	Teores de cálcio, magnésio e potássio trocável do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d, f), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F (p< 0,05); **Interação significativa; ^{ns} Não significativo.....	65
Figura 5.5 –	Teores de cálcio, magnésio e potássio trocável do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d, f), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F (p< 0,05); **Interação significativa; ^{ns} Não significativo.....	69
Figura 5.6 –	Conteúdo de carbono orgânico “lábil” do solo (g kg ⁻¹), oxidado por permanganato de potássio, em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d), aos 7 (acima) e aos 15 meses (abaixo) após aplicação dos tratamentos. ^{ns} Não significativo ao teste F (p< 0,05).....	74
Figura 5.7 –	Conteúdo de carbono orgânico “total” do solo (g kg ⁻¹) em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída (◇), calcário calcinado (○) e escória de siderurgia (□)] (a, c) e de gesso agrícola [sem (▲) e com (◆)] (b, d), aos 7 (acima) e aos 15 meses (abaixo) após aplicação dos tratamentos. ^{ns} Não significativo ao teste F (p< 0,05).....	78
Figura 5.8 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05 (a), 0,05–0,10 (b) e 0,10–0,20 m (c) aos 7 meses após a aplicação de corretivos da acidez do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de uma	

	mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	79
Figura 5.9 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m aos 7 meses após a aplicação de gesso agrícola. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	80
Figura 5.10 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05 (a), 0,05–0,10 (b) e 0,10–0,20 m (c) aos 15 meses após a aplicação de corretivos da acidez do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	81
Figura 5.11 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m aos 15 meses após a aplicação de gesso agrícola. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	82
Figura 5.12 –	Densidade do solo (g cm^{-3}) em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d), aos 7 (acima) e aos 15 meses (abaixo) após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns} Não significativo.....	87
Figura 5.13 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05 (a), 0,05–0,10 (b) e 0,10–0,20 m (c) aos 7 meses após a aplicação de corretivos da acidez do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	88
Figura 5.14 –	Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m aos 7 meses após a aplicação de gesso agrícola. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	92
Figura 5.15 –	Curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [controle (Δ), calcário de rocha moída	96

($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.....

Figura 5.16 – Curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.....

LISTA DE TABELAS

3 – REVISAO DE LITERATURA

Tabela 3.1 – Principais resultados observados em artigos científicos sobre os efeitos de corretivos da acidez em alguns atributos físicos do solo de solos brasileiros.....	29
---	----

4 – MATERIAL E MÉTODOS

Tabela 4.1 – Atributos físicos e químicos do solo prévios a instalação do experimento (agosto/2015).....	34
Tabela 4.2 – Precipitação pluvial média e histórica e temperaturas médias e históricas ocorridas entre a instalação do experimento (agosto de 2015) e novembro de 2017.....	36
Tabela 4.3 – Detalhamento da rotação de culturas utilizada no experimento.....	38

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 5.1 – Características físicas e químicas dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola.....	50
Tabela 5.2 – Classificação e fórmula química dos minerais identificados nos difratogramas dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola.....	53
Tabela 5.3 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os componentes da acidez [acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al^{3+})] em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.....	56
Tabela 5.4 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os componentes da acidez [acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al^{3+})] em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.....	59
Tabela 5.5 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os teores de cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+})] em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.....	66
Tabela 5.6 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os teores de cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+})] em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.....	70
Tabela 5.7 – Efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola (sem e com) sobre o diâmetro médio ponderados dos agregados (DMP, mm), em camadas de solo, aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.....	77

Tabela 5.8 –	Correlações lineares (Pearson) entre os atributos relacionados com a agregação e estabilidade de agregados e os atributos químicos do solo	78
Tabela 5.9 –	Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.	90
Tabela 5.10 –	Correlações lineares (Pearson) entre os atributos físicos estruturais e os atributos químicos do solo.....	91
Tabela 5.11 –	Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.....	93
Tabela 5.12 –	Produtividade (kg ha^{-1}) das culturas do milho, trigo e soja após a aplicação de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola.....	102
Tabela 5.13 –	Eficiência agronômica (EA), expressa em quilogramas de grãos produzidos por kg de produto aplicado, de corretivos da acidez do solo, associados ou não ao gesso agrícola, e EA do gesso sobre a produtividade acumulada de grãos de milho, trigo, soja e massa seca de aveia-preta.....	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	21
2.1	HIPÓTESE.....	21
2.2	OBJETIVO GERAL.....	21
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1	ORIGEM DA ACIDEZ DO SOLO.....	22
3.2	EFEITOS DA ACIDEZ DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS.....	23
3.3	CORREÇÃO DA ACIDEZ E MELHORIA DO AMBIENTE RADICULAR NO SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	24
3.4	EFEITOS DA CALAGEM E GESSAGEM EM ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS: O ESTADO DA ARTE ALIADO AO PROBLEMA DE PESQUISA.....	27
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	34
4.2	DESIGN EXPERIMENTAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	37
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO E DO GESSO AGRÍCOLA.....	39
4.4	AMOSTRAGENS DE SOLO.....	41
4.5	AVALIAÇÕES E ANÁLISES.....	43
4.5.1	Análise granulométrica e densidade de partículas.....	43
4.5.2	Agregação e estabilidade de agregados em água.....	44
4.5.3	Atributos estruturais e curvas de retenção de água no solo.....	46
4.5.4	Atributos químicos do solo.....	47
4.6	AMOSTRAGENS E AVALIAÇÕES DE PLANTA.....	48
4.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO E DO GESSO AGRÍCOLA.....	50
5.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	54
5.2.1	Componentes da acidez do solo.....	54
5.2.2	Cátions básicos trocáveis.....	64
5.2.3	Carbono orgânico lábil e “total”.....	74

5.3	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	77
5.3.1	Agregação e estabilidade de agregados.....	77
5.3.2	Atributos estruturais.....	87
5.3.3	Retenção de água no solo.....	95
5.4	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ E DO GESSO AGRÍCOLA.....	102
6	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS.....	106
	APÊNDICES A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DA ANÁLISE DA RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	117
	APÊNDICES B – QUADROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	121

1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um fator limitante à produção agrícola em extensas áreas do mundo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (von UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Para a correção da acidez, podem ser aplicados diferentes materiais ao solo (ALCARDE, 1983). Contudo, o calcário de rocha moída é o corretivo mais utilizado, o qual tem sido aplicado sobre a superfície do solo, em função do advento do sistema plantio direto (SPD). Todavia, com esta prática, a correção da acidez é limitada a camada mais superficial do solo (0-0,10 m), pois o calcário apresenta baixa solubilidade em água e os produtos de sua reação com o solo têm mobilidade limitada no perfil (CAIRES et al., 1998).

No mercado também existem corretivos alternativos ao calcário, como a escória de siderurgia ou produtos calcinados (nominados como calcário calcinado). Tais corretivos apresentam como vantagens a maior solubilidade em água, o que pode favorecer sua reação no solo (SOUZA; BRAGANÇA, 2013; CRUSCIOL et al., 2016). Entretanto os estudos sobre o uso desses materiais são escassos, principalmente sobre o ponto de vista da física do solo.

Para mitigar a limitação da correção da acidez do solo à camada mais superficial do solo, tem sido usado o gesso agrícola como melhorador do ambiente radicular em subsuperfície (CAIRES et al., 2011a). Embora o gesso agrícola não seja um corretivo da acidez, ele atua na neutralização do Al^{3+} em subsuperfície, favorecendo o crescimento radicular de culturas agrícolas (CAIRES et al., 2011b; COSTA; CRUSCIOL, 2016).

Tanto a correção da acidez do solo (AULER et al., 2017a, 2017b) como a gessagem (CARDUCCI et al., 2015) influenciam os atributos físicos do solo. Contudo, os trabalhos que reportam estes efeitos são contrastantes, escassos e poucos consideram os sinergismos entre corretivos da acidez do solo, diferentes do calcário de rocha moída, e o gesso agrícola (PARADELO et al, 2015).

Deste modo, a presente Tese estará apresentando importantes considerações acerca de inter-relações entre a fertilidade física e a fertilidade química do solo que possam proporcionar incrementos na produção agrícola pela aplicação de diferentes corretivos da acidez do solo (calcário de rocha moída, escória de siderurgia e calcário calcinado), mas um tratamento controle (sem correção da acidez), associados ou não ao gesso agrícola. Neste contexto, será dada maior ênfase aos efeitos destes tratamentos sobre os atributos físicos do solo.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

A correção da acidez do solo com o uso de corretivos mais solúveis associados ao gesso agrícola, que possibilitarão maior eficiência em minimizar os problemas da acidez do solo, proporcionará melhorias na agregação, nos atributos físicos estruturais e hidráulicos do solo em profundidade, em menor período de tempo.

O corretivo da acidez que proporcionará a máxima produtividade às culturas, será o mesmo que afetará positivamente a estrutura do solo e os processos hidráulicos que nela ocorrem.

2.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de corretivos de acidez do solo (calcário de rocha moída, escória de siderurgia e calcário calcinado), associados ou não ao gesso agrícola, sobre os atributos físicos e químicos do solo e a produtividade de culturas no sistema plantio direto.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Distinguir os efeitos dos corretivos (calcário de rocha moída, escória de siderurgia e calcário calcinado”), quando aplicados isolados ou em combinação com o gesso agrícola, sobre os atributos químicos do solo relacionados à acidez do solo.

Buscar correlações entre as alterações nos atributos químicos do solo pela aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola com os atributos físicos do solo.

Descrever a dependência do tempo de reação dos corretivos da acidez do solo, aplicados isoladamente ou com gesso agrícola sobre a dinâmica da agregação e da estrutura do solo.

Verificar o efeito das trocas iônicas entre cátions, mediadas pelas reações dos corretivos da acidez e do gesso agrícola sobre a retenção de água no solo.

Avaliar produtividade de culturas após a aplicação de corretivos da acidez, associados ou não ao gesso agrícola, inferindo sua eficiência agronômica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ORIGEM DA ACIDEZ DO SOLO

A acidez do solo é um fator limitante à produção agrícola em extensas áreas do mundo (Figura 3.1), especialmente em regiões tropicais e subtropicais (von UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Especificamente no Brasil, estima-se que aproximadamente 70 % do território nacional é composto por solos ácidos, capazes de reduzir 40 % do potencial produtivo das culturas agrícolas (QUAGGIO, 2000). De maneira geral, um solo é considerado ácido quando o seu valor de pH em água é menor que 7,0. Porém, determinados valores de pH não são restritivos ao desenvolvimento das culturas. Deste modo, são adotadas diferentes terminologias para descrever o nível de acidez do solo conforme o valor de pH: (i) pH < 4,5 – extremamente ácido; (ii) pH 4,6-5,5 – muito fortemente a fortemente ácido; (iii) pH 5,6-6,0 - moderadamente ácido; (iv) pH 6,1-7,3 fracamente ácido a neutro; (v) pH 7,4-7,8 – fracamente alcalino (SPARKS, 2003).

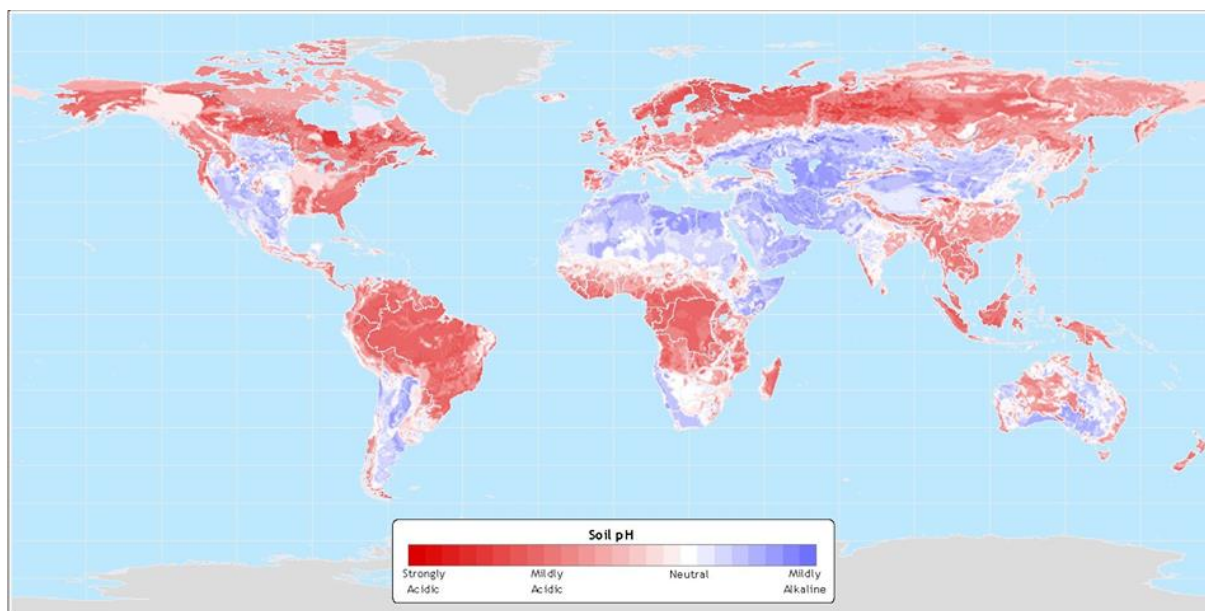


Figura 3.1 – Distribuição da acidez do solo no globo terrestre.

Fonte: Adaptado de IGBP-DIS Global Soils Dataset (1998).

Naturalmente, a acidificação do solo é decorrente do próprio material de origem e da ação do intenso processo de intemperismo, que promove a remoção de cátions de caráter básico

[Ca^{2+} , Mg^{2+} e potássio (K^+)] do complexo de troca, com consequente acúmulo de cátions ácidos [Al^{3+} , hidrogênio (H^+) e manganês (Mn^{2+})]. A desprotonação de grupos carboxílicos, fenólicos e alcoólicos da matéria orgânica também é uma fonte natural importante para a acidificação do solo (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007)

Contudo, em solos cultivados, o processo de acidificação pode ser atribuído à absorção e exportação de cátions básicos pelas plantas, à nitrificação do amônio advindo dos fertilizantes amoniacais utilizados na adubação das culturas e à oxidação da matéria orgânica e à oxidação do enxofre (BOLAN et al., 2003). A acidificação também é dependente do sistema de cultivo adotado. Resultados de pesquisa tem demonstrado que em sistemas convencionais de cultivo há diluição da acidez no perfil do solo, enquanto que no sistema de plantio direto (SPD) há intensa acidificação e concentração da acidez na camada superficial do solo (BLEVINS et al., 1983; CIOTTA et al., 2002). Todavia, o constante aporte de resíduos orgânicos no SPD pode amenizar os efeitos negativos da acidificação superficial do solo, pela complexação do Al^{3+} (MIYAZAWA; PAVAN; CALEGARI, 1993).

3.2 EFEITOS DA ACIDEZ DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS

Resultados de pesquisas comumente tem demonstrado que a acidez do solo restringe o crescimento de plantas cultivadas. Os primeiros efeitos da acidez ocorrem sobre o sistema radicular das plantas, especialmente em condições de déficit hídrico. Nestas condições, a acidez do solo reduz o comprimento radicular de trigo (CAIRES et al., 2008a), soja e milho (JORIS et al., 2013).

A limitação da acidez do solo no crescimento radicular está relacionada, entre outras, com a fitotoxidez por Al^{3+} (DELHAIZE; RYAN, 1995). Mattiello et al. (2010) apontam diferentes mecanismos pelo qual a fitotoxidez por Al^{3+} influi sobre o crescimento radicular, entre eles: (i) mudança no número e posicionamento das células; (ii) inibição da progressão do ciclo celular e da diferencial celular; (iii) rompimento da homeostase de Ca^{2+} ; (iv) aumento na produção de etileno pela maior atividade da enzima AAC oxidase.

Especialmente sob déficit hídrico, o menor crescimento radicular pode reduzir a absorção de água e nutrientes (DELHAIZE; RYAN, 1995; CAIRES, 2008a; JORIS et al., 2013) e alterar o balanço hormonal das plantas, em decorrência da limitação química que a acidez do solo promove (SUN et al., 2007). Por sua vez, essas alterações morfofisiológicas repercutem

sobre o desenvolvimento e rendimento das plantas. O acúmulo de fitomassa e o produtividade de culturas agrícolas, como observado para trigo (CAIRES, 2008a), soja e milho (JORIS et al., 2013), são influenciados pela acidez do solo, principalmente pela redução da absorção de P, Ca e Mg.

3.3 CORREÇÃO DA ACIDEZ E MELHORIA DO AMBIENTE RADICULAR NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

Com o advento do sistema de plantio direto (SPD) a aplicação de corretivos, principalmente o calcário, passou a ser realizada sobre a superfície do solo. Porém, como os materiais corretivos da acidez utilizados na agricultura são pouco solúveis em água e os produtos de sua reação com o solo têm mobilidade limitada, a ação da calagem realizada na superfície é lenta na redução da acidez em subsuperfície, especialmente em solos com predomínio de cargas variáveis (CAIRES et al., 1998; ERNANI et al., 2004; CAIRES et al., 2008a; 2008b; 2011b).

A correção da acidez do solo visa neutralizar os cátions de reação ácida presentes na solução do solo, principalmente H^+ e Al^{3+} (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Para a correção da acidez podem ser empregados diferentes materiais ao solo. Os materiais considerados corretivos da acidez apresentam como constituintes neutralizantes: carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e, ou de magnésio (ALCARDE, 1983). O modo como ocorre a neutralização varia de acordo com a natureza química do corretivo da acidez utilizado (ALCARDE; RODELLA, 1996).

Os calcários agrícolas são os corretivos mais utilizados para a correção da acidez do solo. O calcário agrícola é um produto obtido a partir da moagem de rocha calcária, cujos seus constituintes são o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o carbonato de magnésio ($MgCO_3$). Contudo, em função da origem geológica e da mineralogia da rocha calcária, os teores de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ oscilam entre os calcários agrícolas disponíveis no mercado (CREGAN; HIRTH; CONYERS, 1989; ALCARDE, 1992).

O mecanismo de correção da acidez pelo calcário agrícola inicia-se com a solubilização dos carbonatos [$Ca(Mg)CO_3$]. Com a solubilização ocorre a formação de bicarbonato (HCO_3^-) e a liberação de hidroxilas (OH^-) no solo, as quais inicialmente neutralizam o H^+ em solução, e

posteriormente, podem atuar precipitando o Al^{3+} , conforme reações (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008):



Embora a relação custo-benefício do uso de calcário agrícola seja alta, encontram-se disponíveis no mercado produtos calcinados para o uso agrícola. No processo de calcinação, através de elevadas temperaturas, o calcário é decomposto, e sua dissociação resulta na formação de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), com liberação de dióxido de carbono (CO_2), conforme reação (ÁVILA; CRNKOVIC; MILIOLI, 2007; SOUZA; BRAGANÇA, 2013):



O processo de calcinação afeta fisicamente o calcário, que se torna mais poroso e mais reativo pela liberação do CO_2 de sua estrutura interna. Deste modo, o produto proveniente da calcinação – nominado como calcário calcinado, apresenta reação mais rápida no solo, principalmente pelos maiores teores CaO e MgO em sua composição (SOUZA; BRAGANÇA, 2013). Todavia, o custo de calcários calcinados é demasiadamente oneroso, em comparação ao calcário calcítico ou dolomítico, o que limita o seu uso, especialmente na agricultura.

Outros materiais têm sido utilizados para a correção da acidez do solo. Alguns corretivos alternativos são as escórias de siderurgia, as quais apresentam em sua composição silicatos de cálcio (CaSiO_3) e, ou magnésio (MgSiO_3). O potencial de uso agrícola da escória de siderurgia tem se destacado pois seu uso diminui o impacto ambiental em torno das indústrias produtoras de ferro e aço (PRADO; FERNANDES; NATALE, 2001; PRADO et al., 2004).

As escórias de siderurgia são fontes abundantes de silicatos, originárias do processamento, em altas temperaturas, da reação do calcário com a sílica (SiO_2), presente no minério de ferro (MALAVOLTA, 1981). Desta forma, a alta concentração de silicatos de Ca(Mg)SiO_3 nas escórias, sugere sua utilização como corretivo de acidez do solo e como fonte de Ca e Mg . Além destes macronutrientes, este corretivo também fornece silício (Si) às plantas,

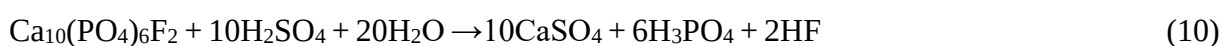
o qual é considerado um elemento benéfico para o crescimento e desenvolvimento dessas (QUAGGIO, 2000).

A maioria das pesquisas realizadas com a escória de siderurgia mostram que sua ação neutralizante na acidez do solo assemelha-se à do calcário. Contudo, a escória de siderurgia apresenta reação mais lenta e efeito residual prolongado no solo (PRADO; FERNANDES, 2000; PRADO et al., 2002). A reação mais lenta da escória pode ser decorrente da presença de impurezas, como o Al, que reduzem a solubilidade da escória, ou pela formação de uma película alcalina de oxidróxido de Fe e Al ao redor das partículas do corretivo no momento da hidrólise (GOMES, 1996; ANDO et al., 1998). Entretanto, a escória de siderurgia e o calcário diferem quanto à superfície específica e quanto ao poder de neutralização (PN). Deste modo, o poder corretivo das escórias pode ser superior à do calcário, conforme a maior superfície específica de suas partículas (RAMOS et al, 2006). De maneira sucinta, a ação neutralizante da escória e siderurgia pode ser demonstrada conforme as reações (ALCARDE, 1992):

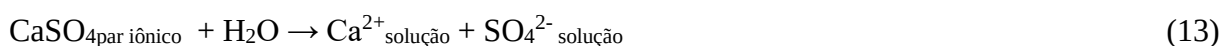


Embora esses corretivos apresentem distinção quanto a sua reação no solo, a dinâmica da correção da acidez é limitada as camadas mais superficiais do solo manejado sob SPD. Neste contexto, uma prática difundida como alternativa para a melhoria do ambiente radicular em subsuperfície, é a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (CAIRES et al. 2011a, 2011b, 2011c, FAGERIA; NASCENTE, 2014; COSTA; CRUSCIOL, 2016). Todavia, deve ser destacado que o gesso agrícola não é um corretivo da acidez do solo (VITTI et al., 2008). Porém, em relação ao calcário agrícola, por exemplo, sua solubilidade e deslocamento no perfil são maiores (QUAGGIO, 2000).

O gesso agrícola é um subproduto da acidulação, com ácido sulfúrico, de rochas fosfatadas para a produção de ácido fosfórico, conforme observa-se na reação 10. Genericamente, estima-se que para a produção de um Mg de ácido fosfórico sejam subproduzidas aproximadamente 10 Mg de gesso agrícola (CAIRES et al., 2003; van RAIJ et al., 2013).



Em subsuperfície, o gesso agrícola atua aumentando o suprimento de Ca^{2+} e a reduzindo a fitotoxidez do Al^{3+} (SUMNER, 1995). Shainberg et al. (1989) descrevem brevemente que melhoria do subsolo pelo gesso agrícola (reações não estequiométrizadas 11 a 14) deve-se pela dissolução do par iônico CaSO_4 , com conseqüente liberação de Ca^{2+} e SO_4^{2-} em solução, o qual participa na formação de espécies menos tóxicas de Al^{3+} (AlSO_4^+).



Como resultado dessa melhoria, as raízes são capazes de se desenvolver em maior profundidade, permitindo maior eficiência na absorção de água e nutrientes (CAIRES et al., 1998). Em associação a calagem, Caires, Feldhaus e Blum (2001) destacam que a calagem superficial, com calcário, e a aplicação de gesso agrícola no solo levam a modificações químicas no perfil que podem influenciar o crescimento de raízes das culturas anuais. Contudo, Caires et al. (2004) observaram que a aplicação de gesso agrícola em combinação com a calagem com calcário de rocha moída ocasionou acréscimos na produção de milho da ordem de 17 %, embora este aumento não tenha sido ocasionado por alterações no crescimento do sistema radicular da cultura, mas sim pelo aumento da saturação por Ca nas camadas superficiais do solo. Ressalta-se que os autores não avaliaram as possíveis melhorias que os tratamentos proporcionaram sobre os atributos físicos do solo.

3.4 EFEITOS DA CALAGEM E GESSAGEM EM ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLOS: O ESTADO DA ARTE ALIADO AO PROBLEMA DE PESQUISA

Comumentemente são reportados efeitos da calagem sobre atributos químicos do solo, como aumento do pH, dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução dos teores de Al^{3+} (CAIRES et al., 1998; 2003; 2004; ERNANI et al., 2004; CAIRES et al., 2006; 2008a; 2008b; 2011; BRIEDIS et al., 2012a; JORIS et al., 2013). Contudo, a calagem também tem efeitos sobre a estrutura do solo, visto que os cátions Al^{3+} e Ca^{2+} atuam como agentes de agregação, diretamente ou

indiretamente através de pontes catiônicas com a matéria orgânica do solo, entre as partículas de argila (BRONICK; LAL, 2005).

A calagem também pode atuar indiretamente sobre a estruturação do solo. Via de regra, a correção da acidez favorece o crescimento radicular das plantas (CAIRES et al., 2008a; JORIS et al., 2013). Assim, o maior crescimento de raízes aumentará a agregação do solo, visto que as raízes de plantas (principalmente poáceas) agem como agentes temporários de ligação no processo de agregação do solo (TISDALL; OADES, 1982; SIX et al., 2004).

Os resultados de pesquisas sobre a influência da correção da acidez do solo, por meio da aplicação de calcário, nos atributos físicos do solo são contrastantes, conforme já destacado por Auler et al. (2017a; 2017b). Em alguns trabalhos são reportados efeitos negativos da correção da acidez, como aumento da dispersão de argilas, redução da floclulação, da estabilidade de agregados e da infiltração de água no solo (GHANI et al., 1955; ROTH; PAVAN, 1991; HAYNES; NAYDU, 1998; ALBUQUERQUE et al., 2003 SIX et al., 2004). Em outros, são destacados os efeitos positivos, como aumento do armazenamento de água e da estabilidade dos agregados (CASTRO FILHO; LOGAN, 1991; CHAN; HEENAN, 1998; SIX et al., 2004; BRIEDIS et al., 2012a). Ainda, há trabalhos que demonstram que esta prática não exerce influência sobre os atributos físicos do solo (TORMENA et al., 1998; COSTA et al., 2004). Também é importante destacar que muitos destes trabalhos não foram realizados em campo, sendo baseados neste caso em experimentos de laboratório ou casa de vegetação, com amostras de solo com estrutura deformada, o que restringe a extrapolação dos resultados.

Tais divergências não permitem que se obtenha uma conclusão dos reais efeitos da calagem sobre os atributos físicos do solo. Paradelo et al. (2015), em pesquisa muito abrangente com metanálise de dados, encontraram um problema semelhante para o efeito líquido da calagem nos estoques de carbono orgânico (CO). Neste contexto, tais autores mencionam a importância de serem realizados estudos na área de física do solo, que analisem os efeitos de outros corretivos da acidez além do calcário, a dose aplicada, o método de aplicação, o tempo de reação, a camada de solo avaliada e as características de cada solo (teor e tipo de argila, por exemplo).

Para tentar demonstrar tais divergências, na Tabela 3.1 podem ser observados um resumo dos principais resultados encontrados em artigos publicados em periódicos de relevância, sobre os efeitos de corretivos da acidez, em diferentes condições de aplicação, sobre alguns atributos físicos de solos brasileiros.

Tabela 3.1 – Principais resultados observados em artigos científicos sobre os efeitos de corretivos da acidez em alguns atributos físicos do solo de solos brasileiros (continua).

Referência	Solo	Local	Clima	Manejo	Corretivo e método de aplicação	Doses (Mg ha ⁻¹)	Tempo de reação (meses)	Camada avaliada	Resultado observado
ALBUQUERQUE et al. (2003)	LATOSSOLO BRUNO Álico	Lages, SC	Subtropical úmido (Cfb)	SPC	Calcário incorporado com aração e gradagem (0,17 m de prof.)	0, 4,5 e 9	60	0-0,10	Aumento linear no DMP com o incremento das doses
ALBUQUERQUE et al. (2005)	LATOSSOLO BRUNO Aluminico (560 g kg ⁻¹ de argila)	Guarapuava, PR	Subtropical úmido (Cfb)	SPD	Calcário na superfície	0 e 4,5+3,0*	156+60	0-0,05 e 0,05-0,10	Redução do DPM em ambos os métodos/manejos na camada de 0,05-0,10 m e redução do DMP no SPD em relação ao SPC. Resultados não expressivos sobre a Ds, Pt, Ma e Mi
				SPC	Calcário incorporada com aração e gradagem (0,20 m de prof.)				
BORTOLUZZI et al. (2008)	ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico plântico (190 g kg ⁻¹ de argila)	Santa Maria, RS	Subtropical úmido (Cfb)	SPD	Calcário na superfície Calcário incorporada com aração e gradagem (0,20 m de prof.)	0, 2+2, 8,5 e 17	144	0-0,05 e 0,05-0,10	Não houve efeitos das doses nem dos métodos sobre a Ds em ambas as camadas de solo
CASTRO et al. (2011)	LATOSSOLO VERMELHO distroférico (440 g kg ⁻¹ de argila)	Botucatu, SP	Tropical de altitude (Cwa)	SPD	Calcário na superfície	0 e 3,8	60	0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40	Não verificaram efeitos dos corretivos da acidez sobre o DMP, Ds, Pt e Mi. Contudo, a aplicação de escória de siderurgia e calcário aumentou a Ma nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em relação ao tratamento controle, mas não houve distinção entre os corretivos.
					Escória de siderurgia na superfície	0 e 4,1			
BONINI; ALVES (2011)	LATOSSOLO VERMELHO distrófico (263 g kg ⁻¹ de argila)	Selvíria, MS	Tropical de altitude (Cwa)	Past.	Calcário incorporado com subsolagem, aração e gradagem (0,20 m de prof.)	0 e 2,85	144	-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40	Aumento no DMP das camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m com a aplicação de calcário + gesso em relação a aplicação isolada de calcário, porém ambos aumentaram o DMP em relação ao tratamento controle
					Calcário + gesso agrícola incorporados com subsolagem, aração e gradagem (0,20 m de prof.)	0 e 2,14+0,80			

Tabela 3.1 – Principais resultados observados em artigos científicos sobre os efeitos de corretivos da acidez em alguns atributos físicos do solo de solos brasileiros (continua).

Referência	Solo	Local	Clima	Manejo	Corretivo e método de aplicação	Doses (Mg ha ⁻¹)	Tempo de reação (meses)	Camada avaliada	Resultado observado
BRIEDIS et al. (2012a)	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (295 g kg ⁻¹ de argila)	Ponta Grossa, PR	Subtropical úmido (Cfb)	SPD	Calcário na superfície	0+0	180	0-0,025	Aumento linear no DPM de todas as camadas com o incremento das doses
						6+0	0,025-0,05		
						0+3	96	0,05-0,10	
						6+3	180+96	0,10-0,20	
CARDUCCI et al. (2015)	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (886 g kg ⁻¹ de argila)	São Roque de Minas, MG	Tropical de altitude (Cwa	SAC	Calcário + gesso agrícola incorporado por aração e gradagem (0,20 m de prof.) + subsolagem e spade tool (0,60 m de prof.)	12+1,92	39+39	0,20-0,34, 0,80-0,94 e 1,50-1,64	Não houve efeitos sobre a Ds e Mi, porém houve aumento na Ma com a maior dose de gesso em relação as menores.
						12+8,92	39+36		
						12+29,92			
FIDALSKI et al. (2015)	LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico (620 g kg ⁻¹ de argila)	Pato Branco, PR	Subtropical úmido (Cfa)	SPD	Calcário na superfície	1,7	1, 6, 12 e 20	0-0,10 e 0,10-0,20	Não verificaram efeitos sobre a Ds em nenhum período de avaliação em ambas as camadas de solo.
CARMEIS FILHO et al., (2016)	LATOSSOLO VERMELHO distrófico (350 g kg ⁻¹ de argila)	Botucatu, SP	Tropical de altitude (Cwa	SPD	Calcário na superfície	0 e 2,0	144	0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60	Não houve efeitos sobre a Ds, Pt e Mi na camada de 0-0,05 m, mas a Ma foi superior apenas com a aplicação isolada de gesso agrícola. Nas demais camadas, a aplicação de calcário isolada e calcário + gesso agrícola reduziram a Ds expressivamente em relação ao gesso agrícola. O DMP de todas as camadas aumentou com a aplicação de calcário + gesso agrícola.
					Gesso agrícola na superfície	0 e 2,1			
					Calcário + gesso agrícola na superfície	0 e 2,0+2,1			
CASTRO et al. (2017)	LATOSSOLO VERMELHO distroférrico (440 g kg ⁻¹ de argila)	Botucatu, SP	Tropical de altitude (Cwa)	SPD	Calcário na superfície	0 e 3,8	60	0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40	A escória de siderurgia e o calcário atuaram de maneira semelhante na redução da Ds e aumento da Ma na camada de 0-0,10 m, em relação ao tratamento controle. Nas demais camadas não foram verificados efeitos dos tratamentos.
					Escória de siderurgia na superfície	0 e 4,1			

Tabela 3.1 – Principais resultados observados em artigos científicos sobre os efeitos de corretivos da acidez em alguns atributos físicos do solo de solos brasileiros (continua).

Referência	Solo	Local	Clima	Manejo	Corretivo e método de aplicação	Doses (Mg ha ⁻¹)	Tempo de reação (meses)	Camada avaliada (m)	Resultado observado
AULER et al. (2017a)	CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico (489 g kg ⁻¹ de argila)	Irati, PR	Subtropical úmido (Cfb)	SPD	Calcário na superfície	0 e 15	18	0-0,10 e 0,10-0,20	Apenas quando aplicado na superfície do solo o calcário reduziu a Ds e a Ma, mas aumentou a Pt, a Mi e a retenção de água ao longo de toda a CRA na camada de 0-0,10 m. na camada de 0,10-0,20 m os resultados não foram expressivos.
					Calcário incorporado com aração e gradagem (0,25 m de prof.)				
					Calcário incorporado com subsolagem e gradagem (0,25 m de prof.)				
AULER et al. (2017 b)	CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico (489 g kg ⁻¹ de argila)	Irati, PR	Subtropical úmido (Cfb)	SPD	Calcário na superfície	0 e 15	18	0-0,10 e 0,10-0,20	A dispersão de argila não é influenciada por nenhum método de aplicação do calcário. Contudo, os parâmetros relacionados com a disponibilidade de água foram alterados, principalmente com a aplicação de calcário na superfície.
					Calcário incorporado com aração e gradagem (0,25 m de prof.)				
					Calcário incorporado com subsolagem e gradagem (0,25 m de prof.)				
NUNES et al. (2017)	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (390 g kg ⁻¹ de argila)	Bom Recreio, RS	Subtropical úmido (Cfa)	SPD	Calcário na superfície	5	60	0-0,05 e 0,10-0,15	Redução na estabilidade, maior dispersão de argila e menor percolação de água no perfil de todos os solos cultivados em relação a condição natural de vegetação.
	LATOSSOLO VERMELHO Distroférico (598 g kg ⁻¹ de argila)	Passo Fundo, RS	Subtropical úmido (Cfa)			3	36		
	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (694 g kg ⁻¹ de argila)	Ponta Grossa, PR	Subtropical úmido (Cfb)			3,5	48		

Tabela 3.1 – Principais resultados observados em artigos científicos sobre os efeitos de corretivos da acidez em alguns atributos físicos do solo de solos brasileiros.

Referência	Solo	Local	Clima	Manejo	Corretivo e método de aplicação	Doses (Mg ha ⁻¹)	Tempo de reação (meses)	Camada avaliada (m)	Resultado observado
MIRANDA et al. (2018)	NEOSSOLO FLÚVICO (290 g kg ⁻¹ de argila)	Custódia, PE	Semiárido (BSw'h')	Cultivo irrigado	Gesso agrícola aplicado na superfície	30	18	0-0,10 e 0,10-0,30	Em ambas as camadas de solo, a aplicação de gesso não alterou a Ds e a Pt, mas aumentou a Ma e a Ksat e reduziu a Mi.

Nota: Todas as informações para construção desta tabela foram advindas da interpretação da seção Material e Métodos dos artigos. Solos classificados de acordo com Santos et al. (2013). Clima de acordo com classificação climática de Köppen. Manejo representa o sistema de manejo do solo: plantio direto (SPD), plantio convencional (SPC), plantio de café semiadensado (SAC), pastagem (Past) ou cultivo irrigado. Tempo de reação reflete sobre a aplicação + reaplicação do corretivo e, ou gesso agrícola (*). DMP = diâmetro médio ponderado; Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; Ma = macroporosidade; Mi = microporosidade; Ksat = condutividade hidráulica do solo saturado.

Um aspecto importante a ser destacado, é que o predomínio de artigos referidos na área, não fazem distinção quanto ao tipo de calcário utilizado. Em sua maioria, faz-se o uso de calcários tradicionais, como o “dolomítico” ou “calcítico”. Assim, os resultados encontrados para tais corretivos podem ser distintos em relação ao calcário calcinado, por exemplo.

Os estudos que reportam o efeito de outros corretivos da acidez do solo sobre atributos físicos do solo são escassos, como pode-se verificar na Tabela 3.1. De um total de 14 artigos citados, apenas dois fazem menção ao uso de escória de siderurgia (reportados como silicato de cálcio e magnésio), e, ainda, são trabalhos do mesmo grupo de pesquisa (CASTRO et al., 2011; 2017). Entre os poucos resultados disponíveis em literatura, além dos citados na Tabela 3.1, Côrrea et al. (2009) concluíram que para um Latossolo Vermelho distrófico de textura média, manejado sob SPD, a presença de Ca^{2+} na composição de corretivos da acidez do solo, entre eles a escória de aciaria/siderurgia e calcário de rocha moída, permite o aumento da agregação do solo, na porosidade total e retenção de água, sendo essas alterações distintas para cada fonte, dose e profundidade de reação no solo.

Em solos salinos, sódicos e solódicos é notório o benefício do uso do gesso agrícola, como reportado por Miranda et al. (2018). Contudo, em solos não afetados por sais, o gesso agrícola também promove melhorias nos atributos físicos do solo, tais como: (i) aumento da condutividade hidráulica, (ii) redução da resistência a penetração e (iii) aumento da porosidade total do solo (van RAIJ, 2013; KUTTAH; SATO, 2015). Cremon et al. (2009) concluíram que a aplicação do gesso agrícola (2 Mg ha^{-1}) aumenta a área dos agregados em camadas mais profundas do solo. Assim, sendo, destaca-se que os efeitos do gesso agrícola sobre os atributos físicos do solo ainda não foram completamente elucidados, visto que a maioria dos trabalhos de pesquisa centram-se apenas em camadas mais superficiais do solo (Tabela 3.1).

Ainda fazendo uma sucinta análise sobre a Tabela 3.1, pode-se verificar que poucos são os trabalhos que analisem os efeitos conjunto da aplicação de corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola. E, dos trabalhos citados que fazem tal análise, o único corretivo utilizado foi o calcário de rocha moída.

Portando, considerando que os demais corretivos da acidez do solo, como a escória de siderurgia e o calcário calcinado, e o gesso agrícola possam proporcionar efeitos sinérgicos sobre os atributos físicos do solo, fazem-se necessário estudos que reportem tais interações.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Instalou-se o experimento em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) pertencente a classe textural argilo-arenosa (SANTOS et al., 2013), sob as coordenadas geográficas de 25°01' de latitude Sul, 50°09' de longitude Oeste e 880 m de altitude, localizado no Campo Demonstrativo Experimental (CDE) da Fundação ABC, na cidade de Ponta Grossa-PR. Os principais atributos físicos e químicos do solo, prévios à instalação do experimento são apresentados da Tabela 4.1. Segundo classificação de Köppen, o clima da região é tipo subtropical úmido (Cfb), com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C e ocorrência de geadas frequentes (mesotérmico), verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida. A precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 1.600 mm, sendo o mês de agosto o mais seco e o de janeiro o mais chuvoso (IAPAR, 2009).

Tabela 4.1 – Atributos físicos e químicos do solo prévios a instalação do experimento (agosto/2015).

Camada m	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	Dp kg dm ⁻³	Ds kg dm ⁻³	Pt	Ma	Mi	θ _{CC}	θ _{PMP}
0-0,05	497	116	387	2,50	1,22	0,52	0,13	0,39	0,35	0,23
0,05-0,10	500	93	407	2,51	1,30	0,48	0,13	0,35	0,33	0,16
0,10-0,20	488	105	407	2,51	1,28	0,49	0,16	0,33	0,31	0,15
0-0,20	493	105	402	2,51	1,27	0,50	0,15	0,35	0,33	0,17
0,20-0,40	474	104	422	2,53	1,34	0,47	0,13	0,34	0,32	0,18
0,40-0,60	451	90	459	2,53	1,24	0,51	0,15	0,36	0,34	0,17
pH em CaCl ₂	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC _(pH 7,0)	V	m	
0-0,05	5,1	5,0	0,18	1,90	0,50	0,46	2,86	7,86	36	6
0,05-0,10	4,4	6,0	0,58	1,20	0,20	0,28	1,68	7,68	22	26
0,10-0,20	4,5	5,6	0,56	0,80	0,20	0,18	1,18	6,78	17	32
0-0,20	4,6	5,6	0,47	1,18	0,30	0,28	1,73	7,28	23	24
0,20-0,40	4,4	4,6	0,62	0,50	0,10	0,12	0,72	5,32	14	46
0,40-0,60	4,6	4,0	0,36	0,50	0,10	0,10	0,70	4,70	15	34
CO g kg ⁻¹	P	S	B	Fe	Mn	Cu	Zn			
0-0,05	31,71	24	5	0,47	33	3,1	1,2	2,1		
0,05-0,10	24,92	19	4	0,42	33	1,0	1,6	1,5		
0,10-0,20	22,33	13	7	0,35	31	<0,5	1,4	0,4		
0-0,20	25,32	17	6	0,40	32	1,5	1,4	1,1		
0,20-0,40	20,42	4	32	0,26	27	ND	1,2	0,1		
0,40-0,60	14,75	3	100	0,16	59	<0,5	0,9	0,1		

Dp = densidade de partículas; Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; Ma = macroporosidade; Mi = microporosidade; θ_{CC} = umidade volumétrica na capacidade de campo (-10 kPa); θ_{PMP} = umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (-1500 kPa); pH = potencial hidrogeniônico em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; H+Al = acidez potencial; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; SB = soma de bases; CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; V e m = saturação por bases e por alumínio, respectivamente. CO = carbono orgânico (Walkley-Black); P, S, B, Fe, Mn, Cu e Zn = teores de fósforo (Melich-1), enxofre, boro, ferro, manganês, cobre e zinco disponíveis, respectivamente.

Durante o período de condução do experimento, foram medidas as precipitações e temperatura mínimas, máximas e médias diárias, entre o período de agosto de 2015 a novembro de 2017. Assim, com os dados diários pode-se inferir o somatório da precipitação mensal e as temperaturas médias mensais (Tabela 4.2).

A área onde foi instalado o experimento vem sendo conduzida sob SPD há mais de nove anos. A sequência de culturas implantada na área a partir do inverno de 2010 foi aveia preta, milho (verão 2010/11), trigo (inverno 2011), soja (verão de 2011/12), aveia preta (inverno 2012), soja (verão 2012/13), aveia preta (inverno 2013), soja (verão 2014/13), aveia preta (inverno 2014), milho (verão 2014/15) e aveia preta (inverno 2015). No verão de 2015/16 iniciou-se o presente estudo. Ressalta-se que neste período (a partir de 2010) não há histórico de calagem ou da aplicação de gesso agrícola na área.

Tabela 4.2 – Precipitação pluvial média e histórica e temperaturas médias e históricas ocorridas entre a instalação do experimento (agosto de 2015) e novembro de 2017.

Variáveis climáticas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2015												
Precipitação (mm) [§]	----	----	----	----	----	----	----	41,8	145,8	204,8	243,6	196,6
Precipitação histórica (mm) ^{§§}	----	----	----	----	----	----	----	78,9	135,5	152,7	119,2	151,0
Temperatura média (°C)	----	----	----	----	----	----	----	17,0	18,9	19,8	20,0	27,1
Temperatura média histórica (°C)	----	----	----	----	----	----	----	15,2	16,4	18,0	19,5	20,4
Temperatura mínima (°C)	----	----	----	----	----	----	----	10,7	13,4	15,7	16,5	18,1
Temperatura mínima histórica (°C)	----	----	----	----	----	----	----	10,2	11,8	13,5	14,8	16,3
Temperatura máxima (°C)	----	----	----	----	----	----	----	24,9	26,1	26,2	25,5	21,5
Temperatura máxima histórica (°C)	----	----	----	----	----	----	----	21,8	22,6	24,3	26,1	27,0
2016												
Precipitação (mm)	226,2	336,0	110,2	75,0	192,4	128,0	146,6	193,0	72,2	263,0	87,2	198,6
Precipitação histórica (mm)	186,5	161,0	137,8	101,3	116,3	117,7	95,8	78,9	135,5	152,7	119,2	151,0
Temperatura média (°C)	27,8	28,5	27,2	27,9	15,1	11,8	13,7	14,7	15,7	18,2	19,4	27,0
Temperatura média histórica (°C)	21,4	21,4	20,3	18,0	15,1	13,9	13,8	15,2	16,4	18,0	19,5	20,4
Temperatura mínima (°C)	17,7	18,8	16,2	16,2	11,4	7,2	8,1	9,3	10,0	14,1	14,8	16,4
Temperatura mínima histórica (°C)	17,2	17,4	16,2	13,8	10,5	9,2	9,1	10,2	11,8	13,5	14,8	16,3
Temperatura máxima (°C)	22,0	22,2	20,8	21,3	19,9	17,5	20,5	21,1	23,1	24,5	26,1	20,8
Temperatura máxima histórica (°C)	27,6	27,4	26,4	24,2	21,5	20,0	20,2	21,8	22,6	24,3	26,1	27,0
2017												
Precipitação (mm)	213,0	165,2	66,8	100,4	148,6	174,6	4,6	117,4	56,2	265,4	135,8	----
Precipitação histórica (mm)	186,5	161,0	137,8	101,3	116,3	117,7	95,8	78,9	135,5	152,7	119,2	----
Temperatura média (°C)	28,8	29,6	26,9	24,0	17,2	14,7	13,9	15,5	20,1	18,6	19,2	----
Temperatura média histórica (°C)	21,4	21,4	20,3	18,0	15,1	13,9	13,8	15,2	16,4	18,0	19,5	----
Temperatura mínima (°C)	17,9	17,9	16,7	14,0	13,5	10,0	8,3	10,8	13,8	14,0	14,0	----
Temperatura mínima histórica (°C)	17,2	17,4	16,2	13,8	10,5	9,2	9,1	10,2	11,8	13,5	14,8	----
Temperatura máxima (°C)	22,0	22,6	20,5	18,1	22,3	20,5	21,1	22,1	28,4	25,2	26,3	----
Temperatura máxima histórica (°C)	27,6	27,4	26,4	24,2	21,5	20,0	20,2	21,8	22,6	24,3	26,1	----

[§]Medidas disponibilizadas pelo departamento de Agrometeorologia da Fundação ABC. ^{§§}Médias históricas compreendidas no período de 1954 a 2001, para a região de Ponta Grossa (IAPAR, 2018).

4.2 DESIGN EXPERIMENTAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com os tratamentos em arranjo fatorial (4×2), com três repetições. Os tratamentos foram três corretivos da acidez do solo [calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)] mais um tratamento controle (sem correção da acidez), associados ou não ao gesso agrícola (GA), dispostos em parcelas de 32 m² de área total (6,4 × 5,0 m – comprimento e largura) e 21,6 m² de área útil (Figura 4.1). Todos os corretivos e o gesso agrícola são produtos comerciais, adquiridos no comércio regional. Todavia, por questões éticas, não será feita menção alguma as marcas dos produtos.

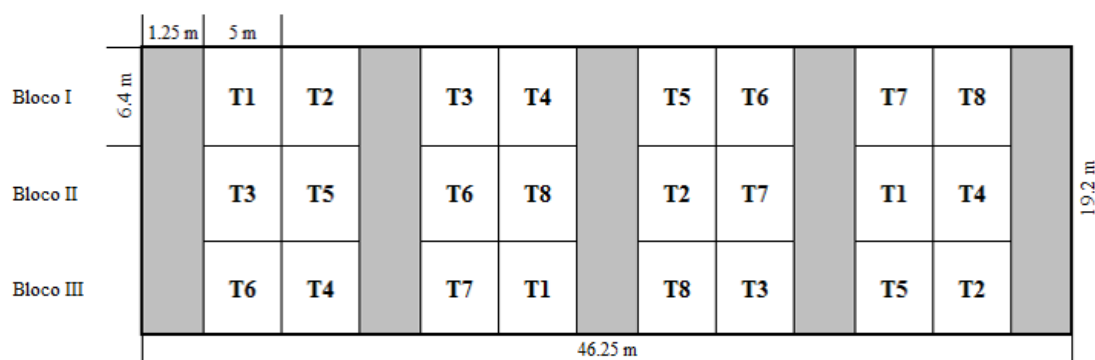


Figura 4.1 – Croqui do experimento instalado no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. T1 – sem correção da acidez e sem gesso agrícola (GA); T2 – GA; T3 – calcário de rocha moída (CRM); T4 – CRM associado ao GA; T5 – escória de siderurgia (ES); T6 – ES associado ao GA; T7 – calcário calcinado (CC); T8 – CC associado ao GA.

Os corretivos da acidez do solo e o gesso agrícola foram aplicados, superficialmente em área total (Figura 4.2), em 19 de agosto de 2015, sobre os restos culturais de aveia preta, dessecada previamente para a instalação do experimento com o herbicida glyphosate (3 L ha⁻¹). Nos tratamentos com associação dos corretivos e de gesso agrícola, primeiro foi aplicado o corretivo e imediatamente na sequência, o gesso agrícola. Foram utilizadas doses dos corretivos (3,8; 4,2 e 2,7 Mg ha⁻¹ de CRM, ES e CC, respectivamente) para elevar a saturação por bases da camada 0-0,20 m a 70 % (van RAIJ et al., 1996), com base em seus equivalentes carbonatos (ALCARDE; RODELLA, 1996). A dose de gesso agrícola (2,4 Mg ha⁻¹) foi calculada com base no teor de argila do solo (van RAIJ et al., 1996).



Figura 4.2 – Detalhes da aplicação superficial dos tratamentos sobre palhada de aveia-preta.

Após aplicados os corretivos, aguardou-se um tempo de dois meses para ser estabelecida a rotação de culturas milho-trigo-soja-aveia preta-feijão-trigo. Assim, em meados de outubro de 2015, a rotação iniciou-se com a cultura do milho (Tabela 4.2). A semeadura das culturas efetuada com o uso de semeadora-adubadora, equipada apenas com discos de corte liso para abertura do sulco, e disco duplo defasado para deposição de adubo e semente, seguida de conjunto compactador flutuante "V", visando o mínimo revolvimento do solo, seguindo os preceitos do SPD. Os tratamentos fitossanitários de cada cultura foram aplicados conforme a necessidade, visando isolar possíveis efeitos de matocompetição, ataque de pragas ou doenças.

Tabela 4.3 – Detalhamento da rotação de culturas utilizada no experimento.

Cultura	Híbrido/ Cultivar	Data semead ¹	Esp ² m	Pop ³ pl m ⁻²	Adub base ⁴ kg ha ⁻¹	Adub cobert ⁵	Data colh ⁶
Milho	P30F53YH	22/10/15	0,90	8	40 de N 90 de P ₂ O ₅ 3 de Zn	140 de N 90 de K ₂ O	21/03/16
Trigo	Tbio Sinuelo	02/06/16	0,17	300	30 de N 60 de P ₂ O ₅ 60 de K ₂ O	90 de N	10/11/16
Soja	M 5917IPRO	22/11/16	0,40	35	60 de P ₂ O ₅ 60 de K ₂ O	-----	10/04/17
Aveia-preta	Embrapa 29-Garoa	03/05/17	0,17	150	-----	-----	07/08/17
Feijão	IPR Campos Gerais	14/12/17	0,40	33	28 de N 68 de P ₂ O ₅	67,5 de N 60 de K ₂ O	-----

¹Data de semeadura; ²Espaçamento entre linhas; ³População final (plantas por m²); ⁴Adubação de base; ⁵Adubação de cobertura; ⁶Data da colheita ou da dessecação no caso da aveia-preta.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO E DO GESSO AGRÍCOLA

Para a caracterização dos corretivos da acidez e do gesso agrícola, foram sistematicamente coletadas alíquotas de diferentes sacos dos produtos, para compor uma amostra composta. Após a homogeneização e quarteamento das amostras compostas, uma fração das mesmas foi seca em estufa com circulação forçada de ar (105 °C / 24 h) para eliminação da umidade e posterior preparo para as análises específicas. Neste contexto, foram determinados: i) a densidade de partículas; (ii) a granulometria; (iii) o poder relativo de neutralização total; (iv) a composição elementar semi-quantitativa e (v) a composição mineralógica

Para as análises uma pequena alíquota da amostra seca (105° C) foi moída, em almofariz e pistilo de ágata, e peneirada em malha de 45 µm, até ser obtida um volume de amostra suficiente para encher um *ependorf* de 2 mL. Para a composição elementar, as medidas foram feitas em triplicatas, enquanto que a composição mineralógica foi realizada em uma única subamostra.

A determinação da densidade de partículas (Dp) dos corretivos e do gesso agrícola foi determinada por meio da picnometria a gás hélio (modelo MVP-D160, Quantachrome Instruments®), do mesmo modo como realizado para as amostras de solo (*vide seção 4.5.1*).

A granulometria, para determinação da reatividade, foi realizada por tamisamento a seco, utilizando as malhas de 2,0, 0,84 e 0,3 mm (EMBRAPA, 2009). Para essa determinação, triplicatas de 100 g foram passadas nas peneiras, em ordem decrescente, por meio de agitação manual. Na sequência, a massa retida em cada peneira foi aferida em balança analítica de precisão. Com os valores de massa, calculou-se o percentual de massa retido e, com base nesse, determinou-se a reatividade do corretivo.

O poder relativo de neutralização total (PRNT) foi determinado pela relação entre a reatividade e o poder de neutralização do corretivo. Neste contexto, a determinação do poder de neutralização, também foram utilizadas triplicatas da fração do corretivo passante pela peneira de 0,3 mm. Para isso, 1 g de cada corretivo (por triplicata) foram submetidos a um ataque ácido (HCl 0,5 M), com aquecimento externo. Na sequência, o excesso de ácido foi titulado com solução de NaOH 0,25 M (EMBRAPA, 2009). Ressalta-se que as análises da granulometria e do PRNT foram realizadas pelo Laboratório de Análises de Solos e Fertilizantes da Fundação ABC.

A composição elementar semi-quantitativa, por meio da técnica da fluorescência de raios-X – FRX com energia dispersiva pelo uso do equipamento modelo EDX-720 (Shimadzu®), equipado com um tubo de raios-X de Rh, foi realizada no Laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA) da UEPG. A voltagem do equipamento variou entre 5 a 50 kV e a corrente do tubo entre 1 a 1000 μ A. O sistema detector foi um semi-condutor Si(Li) refrigerado com N líquido a -196 °C. Para as medidas, as amostras preparadas conforme descrito acima, uma porção das amostras de aproximadamente 2 g foi alocada em porta amostras específicos do equipamento e foram cobertas com um filme de *mylar* (6 μ de espessura). O tempo de medida para cada amostra foi de 100 s, na região de energia de Na-Sc, com voltagem de 15 kV e 100 s na região de Ti-U com voltagem de 50 kV. As medidas foram realizadas a uma pressão de 30 Pa (PIRES et al., 2016).

A composição mineralógica foi realizada por meio da técnica da difração de raios-X – DRX (modelo Ultima IV, Rigaku®), pelo método do pó. Após o preparo supracitado, as quatro amostras (uma para cada corretivo e uma para o gesso agrícola) foram encaminhadas ao complexo de laboratórios multiusuários (C-LABMU) da UEPG para medidas de DRX no modo contínuo de escaneamento, com radiação $\text{CuK}\alpha$, voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. Os dados foram coletados no intervalo de $3^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$, com passo de $0,02^\circ$ em um tempo de contagem de 2 s por passo. Esses dados foram obtidos com as seguintes especificações, $1,0^\circ$ de divergência, 10 mm de divergência horizontal e 0,15 mm de recepção. Tais condições de medida são adaptações do apresentado por Pires et al. (2016).

Com os dados de DRX, foram construídos os difratogramas para a identificação dos principais minerais, com base nos bancos de dados da American Mineralogist Crystal Structure Database – AMCSD (DOWNS; HALL-WALLACE, 2003). Complementarmente, os minerais foram agrupados conforme o grupo químico principal e tiveram sua fórmula química descrita, de acordo com sistema de Dana, disponível em Mineralogy Database (2012).

O teor de umidade do gesso agrícola ($0,23 \text{ g kg}^{-1}$), foi determinado por gravimetria, pela diferença entre as massas de gesso antes e após a secagem em estufa com circulação forçada de ar ($105^\circ \text{C} / 24 \text{ h}$), de acordo com Embrapa (2009).

4.4 AMOSTRAGENS DE SOLO

Após a colheita do milho e do trigo, respectivamente aos 7 e aos 15 meses após a aplicação dos tratamentos, foram coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo. Foram coletadas amostras indeformadas de solo em (i) monólitos ($0,15 \times 0,10 \times 0,05$ m – largura, comprimento e espessura), nas camadas 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (144 monólitos ao total), com o auxílio de espátulas e pás de corte, para avaliação da agregação e da estabilidade de agregados (Figura 4.3); e em (ii) anéis volumétricos ($0,03-0,05 \times 0,05$ m – diâmetro e altura), nas camadas 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (240 anéis volumétricos ao total), com o auxílio de um amostrador de Uhland (Figura 4.4), para avaliação dos atributos estruturais e retenção de água no solo. Também foram coletadas amostras de solo deformadas, com o auxílio de trados caladores e holandeses, nas mesmas camadas de coleta dos anéis volumétricos, para determinação dos atributos químicos do solo.

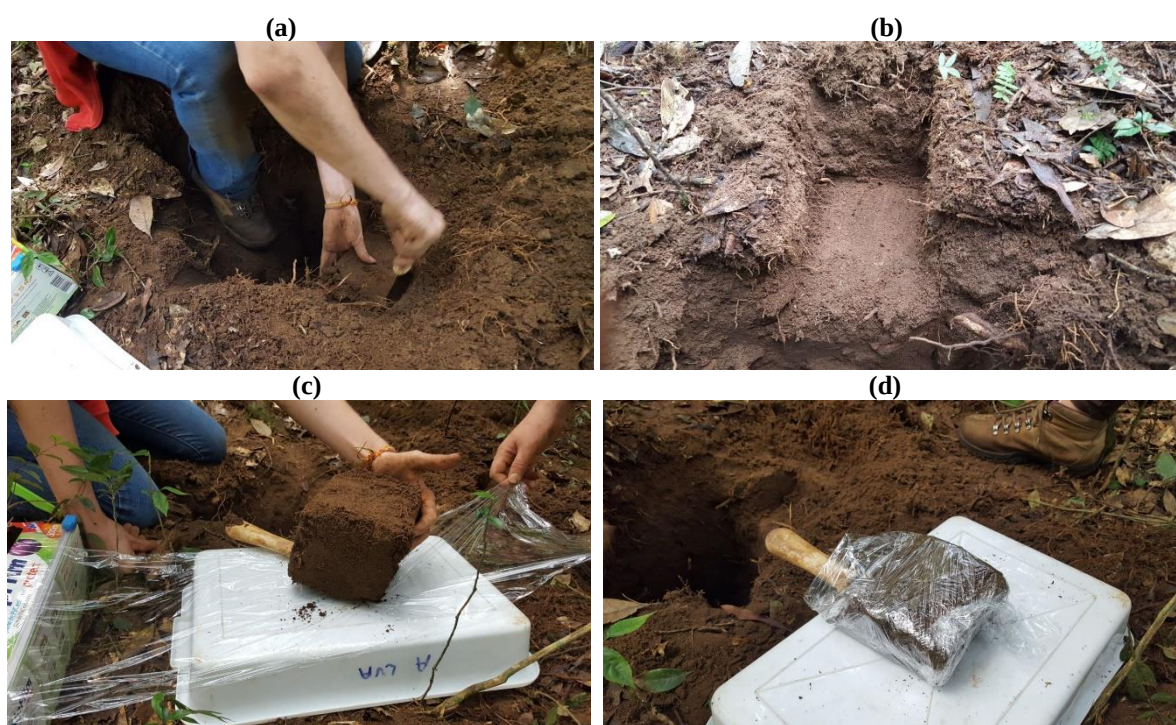


Figura 4.3 – Detalhes da coleta de monólitos de solo: (a) trincheira aberta para coleta dos monólitos em sua lateral; (b) aspecto da parede lateral da trincheira após a coleta do monólito na camada de 0–0,05 m; (c, d) processo de embalagem da amostra com filme plástico após a coleta.



Figura 4.4 – Representação esquemática da coleta de amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos: (a) preparo da superfície do solo para coleta das amostras na camada de 0-0,05 m; (b) coleta da amostra com detalhe do amostrador de Uhland adquirido com recursos do projeto; (c) aspecto do solo após a coleta da amostra; (d) detalhe da luva de coleta/proteção do anel volumétrico, na parte inferior do amostrador de Uhland; (e) detalhe do anel volumétrico após retirada da luva de coleta/proteção; (f) abertura de trincheira para coleta de amostras na camada de 0,05-0,10 m, com o auxílio de espátulas; (g) coleta de amostra na profundidade de 0,10-0,50 m; (h, i, j) detalhes da abertura da trincheira para coleta da amostra em profundidades maiores, com o auxílio de cavadeira (h) e espátula (i), com ênfase na medição lateral para determinação da profundidade média da camada (j).

4.5 AVALIAÇÕES E ANÁLISES

4.5.1 Análise granulométrica e densidade de partículas

Considerando o fato de que a textura e a densidade de partículas são características do solo inerentes ao manejo e ao tempo, a determinação dos teores de areia, silte e argila (g kg^{-1}) e a densidade de partículas (D_p , kg dm^{-3}) foram realizadas em amostras compostas. As amostras compostas foram provenientes da mistura de iguais proporções de solo (20 cm^3) das amostras deformadas coletadas aos 7 e aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

As análises iniciaram-se pela determinação da D_p , por picnometria a gás hélio (modelo MVP-D160, Quantachrome Instruments®). Para isso, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C por 24 h. Após atingir temperatura ambiente, uma massa conhecida de solo de cada amostra foi acondicionada no porta amostras do picnômetro. Na sequência, pela diferença entre a pressão da amostra e da célula de referência do equipamento, determinou-se o volume da amostra. Assim, pela relação entre a massa de solo e o volume de solo, pode-se inferir a D_p (DANE et al., 2012):

$$D_p = \frac{ms}{V_{pa} - \left\{ V_r \cdot \left[\left(\frac{P_{pa}}{P_r} \right) - 1 \right] \right\}} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que ms é a massa de solo, V_{pa} e V_r o volume do porta amostra e da célula de referência, respectivamente, P_{pa} e P_r a pressão de gás no interior do porta amostra (com a amostra) e da célula de referência, respectivamente.

Considerando que a picnometria a gás hélio é uma técnica não destrutiva, nas mesmas amostras determinaram-se os teores de areia, silte e argila. Para a análise granulométrica, realizou-se o tratamento preliminar com oxidação do CO com peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , 30 v v^{-1}), conforme adaptações do descrito por Tavares Filho e Ribon (2008).

Inicialmente aferiu-se uma massa de 20 g de solo e adicionaram-se 100 mL de dispersante químico [hidróxido de sódio (NaOH) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$] nas amostras. Posteriormente, as mesmas foram submetidas à dispersão mecânica mediante a agitação por 16 h, em mesa agitadora pendular à $120 \text{ oscilações min}^{-1}$. Após a agitação, a fração areia foi separada por tamisamento com peneira de $53 \mu\text{m}$, enquanto as frações silte e argila separadas pelo método

da pipeta com base no tempo de sedimentação calculado pela Lei de Stokes (DANE et al., 2002):

$$t = \frac{18 \eta h}{g (D_p - D_l) \phi^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que t é o tempo de sedimentação (s), η a viscosidade da água (g cm s^{-1}), h a altura de queda (sedimentação) das partículas (cm), g a aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}), D_p e D_l a densidade de partículas e a densidade da água (g cm^{-3}), ϕ o diâmetro do menor tamanho das partículas de silte (0,0053 cm).

4.5.2 Agregação e estabilidade de agregados em água

Em laboratório, ainda úmidos, os monólitos de solo foram manualmente desagregados, seguindo os planos de fraqueza do solo (BARRETO et al., 2009), e passados em peneira de 19 mm de abertura de malha. A separação das classes de agregados (8–19, 4–8, 2–4, 1–2, 0,5–1, 0,25–0,5 e 0,053–0,25 mm) foi realizada por tamisamento úmido, conforme metodologia proposta por YODER (1936) com as adaptações para solos tropicais propostas por CASTRO FILHO et al. (1998).

Previamente ao tamisamento, as amostras de cada triplicata (100 g) foram saturadas por ascensão capilar nas peneiras de 8 mm de malha, com o auxílio de papel mata borrão. O tempo de saturação foi de aproximadamente 10 min para cada amostra. Na sequência, as peneiras foram alocadas no aparelho de Yoder, que possuía volume de água até o nível do papel filtro. Então, removia-se o papel filtro e iniciava-se o peneiramento. O processo de peneiramento ocorreu pela agitação vertical das peneiras no equipamento, com uma altura de 5 cm a 30 oscilações por min, durante um tempo de 15 min.

Na sequência, as massas de solo retidas em cada peneira foram separadas em copos plásticos e submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar (60° C). Após a secagem, com as proporções de massas secas de cada classe de agregados, foi determinado o diâmetro médio ponderado (DMP, mm) (CASTRO FILHO et al., 1998):

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) \quad (\text{Eq. 3})$$

em que w_i representa a proporção de cada classe de agregado em relação ao total e x_i o diâmetro médio de cada classe.

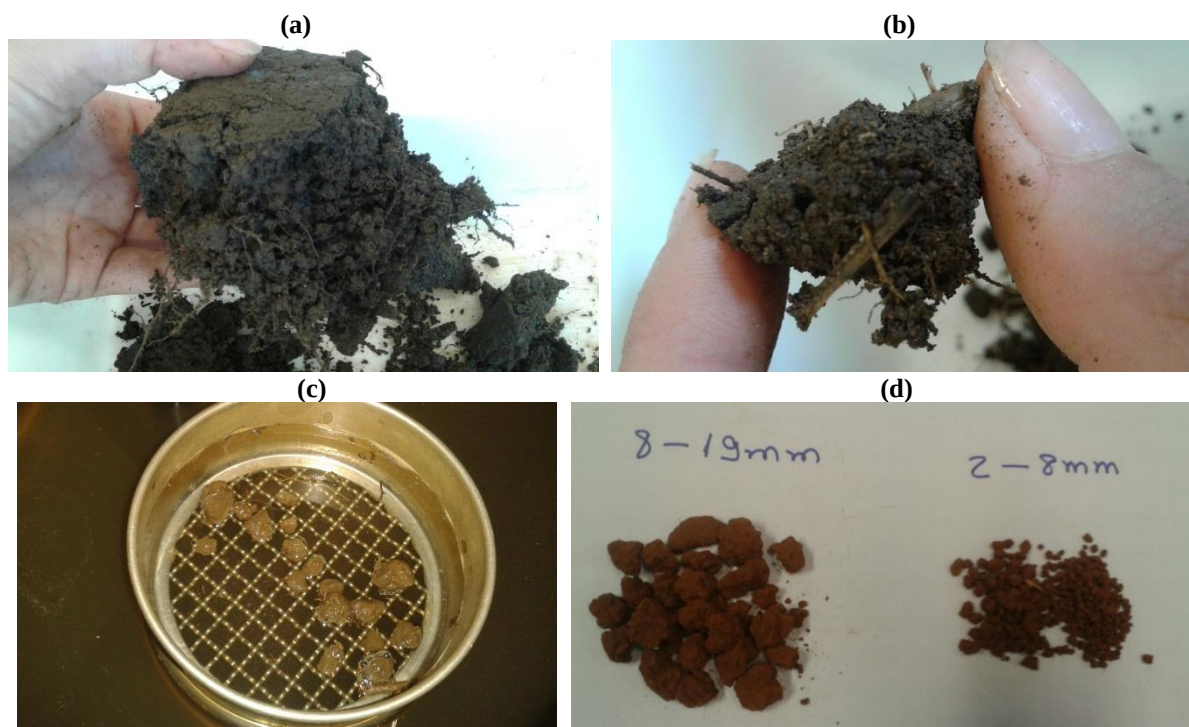


Figura 4.5 – Detalhes do processo de tamisamento: (a) separação dos agregados dos monólitos seguindo as linhas de fraqueza do solo; (b) detalhes de restos culturais e raízes que atuam como agentes cimentantes e induzem as linhas de fraqueza; (c) amostras no aparelho de Yoder durante o processo de tamisamento, e (d) amostras tamisadas após secagem em estufa.

Ainda, para o melhor detalhamento da agregação do solo, com as proporções das massas de solo tamisadas, foram determinadas as proporções das classes de macroagregados grandes (MAgg grandes) – 8–19 mm, macroagregados médios (MAgg médios) – 2–8 mm, macroagregados pequenos (MAgg pequenos) – 0,25–2 mm, e de microagregados – 0,053–0,25 mm, similarmente ao descrito por Ferreira et al. (2018).

4.5.3 Atributos estruturais e curvas de retenção de água no solo

Após o devido preparo, as amostras indeformadas foram saturadas pelo processo de ascensão capilar (KLUTE, 1986). Depois da saturação, aplicaram-se os seguintes potenciais mátricos (Ψ_m) de -1, -3, -6 e -10 kPa em mesa de tensão (modelo M1-0801, Eeijkamp[®]), após isto as amostras foram encaminhadas para o Pólo Experimental do IAPAR de Ponta Grossa, onde foram submetidas aos Ψ_m de -30, -60, -100, -400 e -700 kPa em câmaras de Richards (modelo 1500, SoilMoistureEquip. Corp.[®]).

Após ser aplicado o último Ψ_m nas amostras indeformadas, as mesmas foram secas em estufa com circulação forçada de ar (105 °C / 72 h), para determinação da densidade do solo (D_s) e umidade gravimétrica (U , g kg⁻¹) e, a partir da relação dessas, calcular-se-á a umidade volumétrica do solo (θ , dm³ dm⁻³) para cada Ψ_m aplicado (DANE et al., 2002). Também foi determinando: (i) a porosidade total (P_t), considerando a D_s e a D_p ; (ii) a microporosidade (M_i), considerando o Ψ_m de -6 kPa; e (iii) a macroporosidade (M_a) pela diferença entre a P_t e a M_i (EMBRAPA, 1997; DANE et al., 2002).

As curvas de retenção de água no solo (CRAs) foram ajustadas pelo modelo matemático de Genuchten (1980) (Eq. 1), com a restrição de Mualem (1976) [$m = 1 (1/n)$]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \times \Psi_m)^n]^m} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que θ_s e θ_r são os conteúdos de água (cm³ cm⁻³) de saturação e residual, respectivamente; Ψ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa); e, α , m e n parâmetros empíricos da equação de ajuste (Anexo A.1) determinados pelo software SWRC Fit (SEKI, 2007).

A partir dos dados ajustados, foram obtidos valores de diferença relativa (DR, %) (Eq. 5) – Anexos A.2, entre os valores de θ para os diferentes Ψ_m visando facilitar a análise das CRAs (PIRES et al. 2008; AULER et al. 2017b):

$$DR = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

em que θ_1 e θ_2 são os conteúdos de água com e sem gesso agrícola, por exemplo, 1 sem e 2 com gesso agrícola associado ao calcário calcinado.

4.5.4 Atributos químicos do solo

Após a coleta, as amostras deformadas foram secas em estufa com circulação forçada de ar (40 °C), destorroadas, moídas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca em estufa (TFSE).

Na sequência, foram determinados:

(i) Os componentes da acidez do solo: acidez ativa (pH), por potenciometria em solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) 0,01 mol L⁻¹ e relação solo:solução 1:2,5 (v/v); acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$, cmol_c dm⁻³), por potenciometria em solução tampão SMP e relação solo:solução 1:2,5 (v/v); e acidez trocável (Al^{3+} , cmol_c dm⁻³), com solução de cloreto de potássio (KCl) 1,0 mol L⁻¹, relação solo:solução 1:10 (v/v), por titulação com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L⁻¹ (PAVAN et al., 1992).

(ii) Os cátions básicos trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , cmol_c dm⁻³), Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos em solução de KCl 1,0 mol L⁻¹, relação solo:solução 1:10 (v/v), por determinação por espectrofotometria de absorção atômica (EAA); e K^+ em solução de Mehlich-1, relação solo:solução 1:10 (v/v), e leitura por espectrofotometria de emissão em chama (PAVAN et al., 1992).

(iii) O teor de carbono orgânico (CO, g kg⁻¹), pelo método colorimétrico. Para isso, mediu-se 1 cm³ de solo e foram adicionados 10 mL de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (0,667 mol L⁻¹) em ácido sulfúrico (5 mol L⁻¹). Na sequência, as amostras foram agitadas durante 10 min em agitador com movimento circular-horizontal a 250 rpm. Após repouso de uma hora, adicionaram-se 50 mL de água deionizada, deixando decantar durante 12 h. Após o tempo de repouso, pipetou-se uma alíquota de 3,8 mL do sobrenadante e realizou-se a leitura em espectrofotômetro com filtro de transmissão máxima de 650 nm. Acertou-se o zero do aparelho com a prova em branco. Os resultados foram calculados a partir da curva-padrão, preparada pelo método volumétrico (van RAIJ et al., 2001).

(iv) O teor de carbono lábil (C-OXP, g kg⁻¹) oxidado solução de permanganato de potássio (KMnO_4 , 0,033 mol L⁻¹), com adaptações da metodologia proposta por Tirol-Padre e Ladha (2004). Nessa determinação, 1,5 g de solo foram acondicionados em tubo de centrífuga de 10 mL seguidos da adição de 10 mL de água deionizada. Na sequência, as amostras foram mantidas em estufa a 80 °C por um período de 16 h. Após o tempo de estufa, os tubos foram centrifugados a 4000 r.p.m por 15 min. O sobrenadante foi descartado e foram adicionados 10 mL da solução de KMnO_4 . Posteriormente, as amostras foram agitadas em mesa agitadora

pendular à 120 oscilações min^{-1} por 30 min. Na sequência, as amostras foram novamente centrifugadas a 4000 r.p.m por 15 min. Foram coletados 2 mL do sobrenadante e transferidos para *erlenmeyers* de 125 mL, aos quais também foram adicionados 100 mL de água deionizada. Então, realizou-se a leitura em espectrofotômetro com filtro de absorção máxima de 565 nm. Acertou-se o zero do aparelho com água. Os resultados foram calculados a partir da curva-padrão preparada com concentrações crescentes de KMnO_4 .

4.6 AMOSTRAGENS E AVALIAÇÕES DE PLANTA

Após a maturação fisiológica da cultura do milho, foram colhidas duas linhas de quatro m do centro da área útil de cada parcela, com o auxílio de colhedoras de parcela, para determinação da produtividade da cultura. Para as culturas do trigo e da soja, também após a maturação fisiológica, foram colhidos 6 m^2 do centro da área útil da parcela, também com o auxílio de colhedoras de parcela. Na sequência, a massa de grãos trilhada teve sua massa aferida para a determinação da produtividade (kg ha^{-1}), com umidade corrigida para 130 g kg^{-1} (BRASIL, 2009).

Com base no rendimento acumulado, determinaram-se as eficiências agronômicas (kg kg^{-1}) dos corretivos da acidez do solo, associados ou não ao gesso agrícola (FAGERIA et al., 2003).

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Aos dados de cada camada de solo (tanto atributos físicos quanto químicos) e de produtividade (de cada cultura e produtividade acumulada) aplicou-se o modelo estatístico de experimento em blocos ao acaso, em arranjo fatorial (4×2) com três repetições (FISHER, 1966) – Anexos B. As pressuposições de normalidade dos resíduos e homocedasticidade foram verificadas através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett (BARTLETT, 1937; SHAPIRO; WILK, 1965). Quando necessário, a potência ótima de Box-Cox foi utilizada para a transformação dos dados (BOX; COX, 1964). Após verificadas as pressuposições, o teste F foi

aplicado. Em casos de interações significativas, foram realizadas análises de desdobramento. O teste Tukey foi aplicado para comparações múltiplas (TUKEY, 1959).

Complementarmente aos casos de F significativo, foram realizadas análises de correlações lineares de Pearson (PEARSON; FILON, 1898), para verificar o grau de dependência entre os atributos físicos do solo com os atributos químico. Para classificar as correlações, os coeficientes de correlação de Pearson (r) foram divididos em cinco intervalos: (i) $0,00 < r < 0,19$, muito fraca; (ii) $0,20 < r < 0,39$, fraca; (iii) $0,40 < r < 0,69$, moderada; (iv) $0,70 < r < 0,89$, forte; e (v) $0,90 < r < 1,00$, muito forte (GUJARATI, 2006).

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, versão 3.3.1 (R CORE TEAM, 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO E DO GESSO AGRÍCOLA

Ressalta-se que não foram realizadas análises estatísticas quanto a caracterização física, química e mineralógica dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola, por tratarem-se de medidas de composição elementar.

Os corretivos apresentaram distinção quanto ao seu poder de neutralização (PN), reatividade (RE), poder relativo de neutralização total (PRNT), composição elementar, principalmente quanto aos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si) e alumínio (Al), e densidade de partículas (Dp) (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Características físicas e químicas dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola.

Produto	PN	RE	PRNT	CaO	MgO	Ca	Mg	Si	Al	Fe	S	P	Dp
						%							g cm ⁻³
Calcário de rocha moída	113,95	77,88	88,74	27,97	19,28	70,18	25,99	1,92	0,90	0,33	0,69	--	2,83
Escória de siderurgia	23,57	98,39	23,19	4,55	2,33	18,35	11,36	57,97	8,58	1,16	1,26	--	2,79
Calcário calcinado	121,66	89,30	108,64	47,56	12,14	80,75	15,46	1,35	0,64	0,58	0,65	--	2,45
Gesso Agrícola	--	99,73	--	--	--	55,78	--	1,40	--	1,04	35,75	2,77	2,30

PN, RE e PRNT: poder de neutralização, reatividade e poder relativo de neutralização total, determinados conforme Embrapa (2009). Ca, Mg, Si, Al, Fe, S e P: teores de cálcio, magnésio, silício, alumínio, ferro, enxofre e fósforo, determinados via fluorescência de raios-X no modo semi-quantitativo. Dp: densidade de partículas determinada via picnometria a gás hélio.

O PN de ambos os calcários foi superior ao da ES, embora essa tenha tido uma RE máxima (Tabela 5.1). Tais resultados ocasionam menor PRNT à ES, que repercutirá em uma reação mais lenta no solo. Essa reação mais lenta pode ser influenciada pela presença de impurezas, como o alto teor de Al (Tabela 5.1), que reduzem a solubilidade da escória, ou pela formação de uma película alcalina de oxihidróxidos de Fe e Al ao redor das partículas do corretivo no momento da hidrólise (RAMOS et al., 2006).

Entre os calcários, o CC apresentou PN e RE superior ao calcário de rocha moída, logo superior PRNT (Tabela 5.1). Este resultado pode estar relacionado com o maior teor de óxidos no CC, bem como pela redução do diâmetro médio e relativo das partículas decorrentes do processo de calcinação (SOUZA; BRAGANÇA, 2013). Também, o processo de calcinação reduziu a Dp do corretivo (Tabela 5.1). Tal resultado pode ser atribuído as mudanças estruturais

do calcário durante o processo, em função da elevação da temperatura, com a qual o calcário originalmente compacto e denso é transformado em um material poroso e mais reativo pela liberação do CO₂ de sua estrutura interna (SOUZA; BRAGANÇA, 2013).

Considerando que o GA não é um corretivo da acidez, este não possui PN (van RAIJ, 2013). Contudo, sua RE é alta e sua Dp menor que de todos os corretivos (Tabela 5.1), evidenciando sua alta solubilidade.

Os corretivos da acidez do solo apresentaram ampla variação em sua composição mineralógica (Figuras 5.1a-5.1c). Entre os calcários, a dolomita (carbonato de cálcio e magnésio) (Tabela 5.2) foi o mineral predominante no CRM (Figura 5.1a). Tal resultado era esperado, em função de que a dolomita é a rocha utilizada como matéria-prima de tal corretivo (ALCARDE, 1992).

Para o CC, houve uma ampla ocorrência de minerais, principalmente carbonatos de cálcio (calcita) e de magnésio (nesqueonita, magnesita e hidrotalcita) (Figura 5.1b e Tabela 5.2). Nesse corretivo também foram identificados picos de silicatos de cálcio (anortita) e magnésio (talco). Ressalta-se que a diferença na composição de minerais entre os corretivos é importante, visto que as características de solubilidades dos minerais poderão permitir distinção quanto ao tempo de reação dos corretivos no solo (ALCARDE; RODELLA, 2003; RAMOS et al., 2006).

A ES foi o corretivo que apresentou a maior ocorrência de diferentes minerais, incluindo carbonatos (calcita, dolomita, monohidrocalcita e vaterita), porém, como esperava-se, com o predomínio de silicatos (quartzo, silhidrita, paligorsquita, albita, olivina e clinocrisotila) (Figura 5.1c e Tabela 5.2). Todavia, nem todos estes silicatos exercem efeito corretivo, como o quartzo e a silhidrita, o que pode limitar a reação deste corretivo em detrimento dos calcários. Ainda, os minerais com silicatos de cálcio e, ou magnésio presentes na ES apresentam elementos como o Fe (olivina) ou Al (paligorsquita), que não permitem a dissolução completa do corretivo (ANDO et al., 1998).

O GA apresentou em sua composição o predomínio de bassanita em relação a gipsita (Figura 5.1d e Tabela 5.2), resultado semelhante ao obtido por Canut (2006). Tal resultado pode influenciar sobre a solubilidade do corretivo, visto que sulfatos de cálcio semi-hidratados (bassanita) tendem a ter menor solubilidade que sulfatos de cálcio di-hidratados (gipsita) (STRYDOM; POTGIETER, 1999).

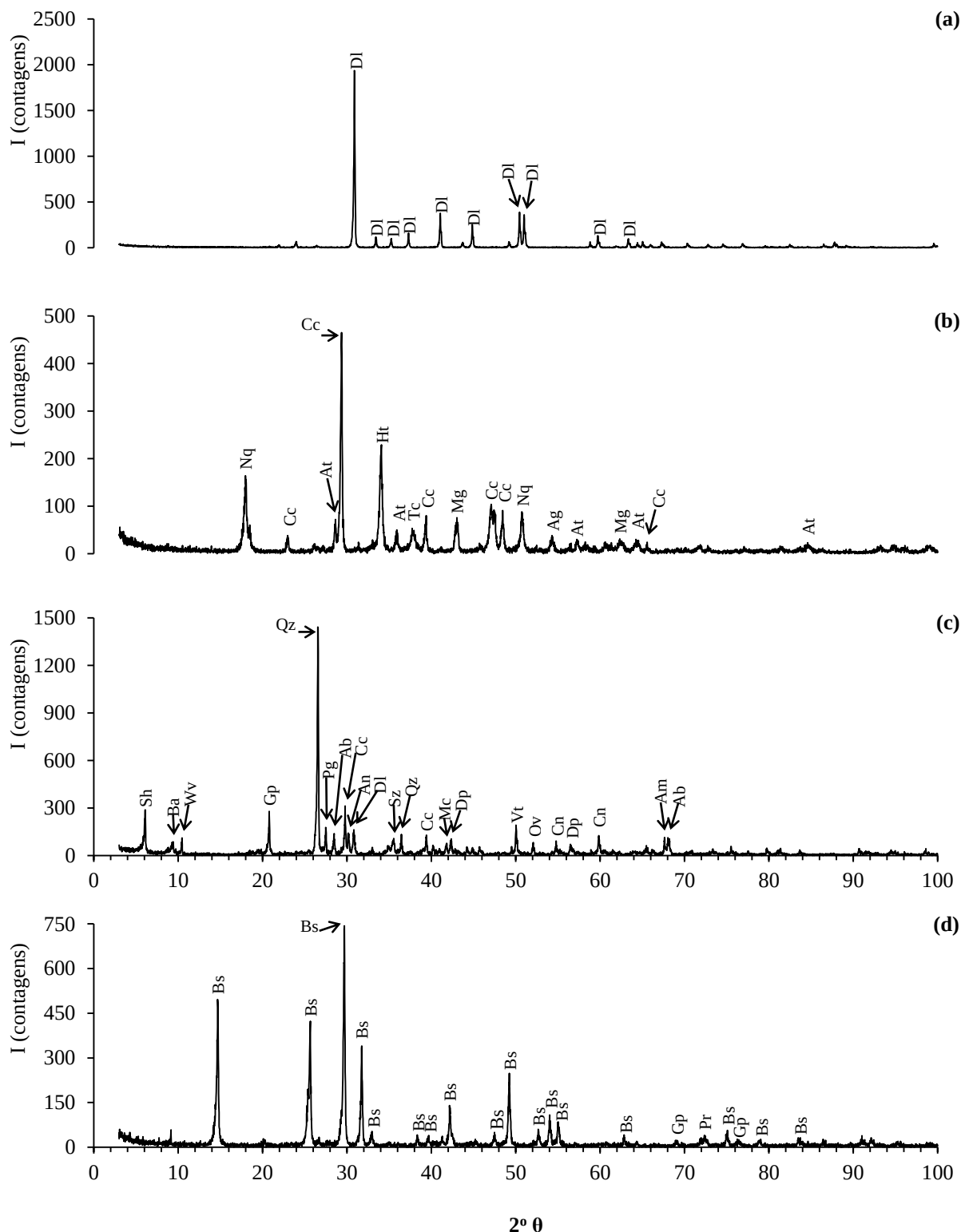


Figura 5.1 – Difrátogramas dos corretivos da acidez do solo: calcário de rocha moída (a), calcário calcinado (b) e escória de siderurgia (c); e do gesso agrícola (d). Ab = Albita. Am = Aluminita. An = Alunita. At = Anortita. Ap = Apatita-(CaOH). Ba = Basaluminita. Bs = Bassanita. Cc = Calcita. Cn = Clinocristotila. Dp = Diásporo. Dl = Dolomita. Gp = Gipsita. Ht = Hidrotalcita. Mg = Magnesita. Mc = Monohidrotalcita. Nq = Nesqueonita. Ov = Olivine. Pg Paligorsquita. Pr = Pirita. Qz = Quartzo. Sh = Silhidrita. Sz = Szomolnokita. Tc = Talco. Vt = Vaterita. Wv = Wavellita.

Tabela 5.2 – Classificação e fórmula química dos minerais identificados nos difratogramas dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola.

Grupo ¹	Mineral ²	Fórmula química ³	Abreviatura
Calcário de rocha moída			
Carbonatos	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dl
Calcário calcinado			
Carbonatos	Calcita	CaCO_3	Cc
	Hidrotalcita	$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	Ht
	Magnesita	MgCO_3	Mg
	Nesqueonita	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)(\text{OH}) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	Nq
Silicatos	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	At
	Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Tc
Outros	Apatita-(CaOH)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	Ap
Escória de siderurgia			
Carbonatos	Calcita	CaCO_3	Cc
	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dl
	Monohidrocalcita	$\text{Ca}(\text{CO}_3) \cdot (\text{H}_2\text{O})$	Mc
	Vaterita	CaCO_3	Vt
Silicatos	Albita	$\text{Na}_{0,5}\text{Ca}_{0,5}\text{Si}_3\text{AlO}_8$	Ab
	Clinocrisotila	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Cn
	Olivine	$\text{Mg}_{1,6}\text{Fe}^{2+}_{0,4}(\text{SiO}_4)$	Ov
	Paligorsquita	$(\text{Mg},\text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	Pg
	Quartzo	SiO_2	Qz
	Silhidrita	$3\text{SiO}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	Sh
	Aluminita	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$	Am
Sulfatos	Alunita	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	An
	Basaluminita	$\text{Al}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10} \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	Ba
	Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	Gp
	Szomolnokita	$\text{Fe}^{2+}(\text{SO}_4) \cdot (\text{H}_2\text{O})$	Sz
Outros	Diásporo	$\text{AlO}(\text{OH})$	Dp
	Wavellita	$\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH},\text{F})_3 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	Wv
Gesso agrícola			
Sulfatos	Bassanita	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5(\text{H}_2\text{O})$	Bs
	Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	Gp
Sulfetos	Pirita	FeS_2	Pr

¹Classificação de acordo com sistema de Dana – Mineralogy Database (<http://webmineral.com/>). ²Identificação de acordo com o American Mineralogist Crystal Structure Database - AMCSD (<http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>). ³De acordo com Mineralogy Database.

5.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

5.2.1 Componentes da acidez do solo

Aos 7 meses após aplicação dos tratamentos, houve efeitos isolados dos corretivos da acidez sobre a acidez ativa (pH), potencial ($H+Al$) e trocável (Al^{3+}) na camada de 0–0,05 m (Figura 5.2). Nesta camada, também houve efeitos isolados da aplicação de gesso agrícola sobre a acidez potencial e trocável do solo. Enquanto que, nas camadas de 0,05–0,10 m, 0,10–0,20 e 0,40–0,60 m houve interação entre os corretivos da acidez e o gesso agrícola sobre os todos os componentes da acidez do solo, com exceção para o teor de Al^{3+} na camada de 0,40–0,60 m. Na camada de 0,20–0,40 m, na qual apenas ocorreram efeitos isolados da aplicação de gesso agrícola sobre a acidez ativa do solo (Figura 5.2).

Na camada de 0–0,05 m, o pH do solo no tratamento CC foi superior ao controle, elevando o pH do solo em 15% (Tabela 5.3). Como consequência, efeitos opostos foram observados para a acidez potencial e trocável do solo, isto é, CC apresentou resultados inferiores ao tratamento controle. Enquanto que os tratamentos CRM e ES não diferiram dos demais tratamentos, tanto para o pH, quanto $H+Al$ e Al^{3+} (Tabela 5.3). Isto ocorreu devido ao processo de calcinação, que afeta fisicamente o calcário, tornando-o mais poroso e mais reativo, proporcionando ao CC reação mais rápida no solo (VELOSO et al., 1992; SOUZA; BRAGANÇA, 2013), principalmente em sua camada mais superficial (CAIRES et al., 2006; JORIS et al., 2016).

Quanto ao efeito do gesso agrícola na camada de 0–0,05 m, a aplicação do condicionador reduziu os teores de $H+Al$ e de Al^{3+} (Tabela 5.3). É válido ressaltar que os efeitos do gesso agrícola na amenização dos efeitos tóxicos do Al^{3+} no solo são amplamente reportados (CAIRES et al., 2011a; 2011b).

Na camada de 0,05–0,10 m, a aplicação isolada dos corretivos apresentou o mesmo comportamento sobre o pH do solo e o teor de Al^{3+} observado na camada subjacente (Tabela 5.3). Por sua vez, a acidez potencial seguiu a ordem $CC < CRM = ES < Controle$. Enquanto que, associado ao gesso agrícola, não houve distinção entre os corretivos para todos os componentes da acidez do solo avaliados. Entre os corretivos, o gesso agrícola influenciou a acidez do solo apenas em relação ao tratamento controle. Neste caso, houve redução dos teores de Al^{3+} e $H+Al$ e aumento do pH do solo (Tabela 5.3).

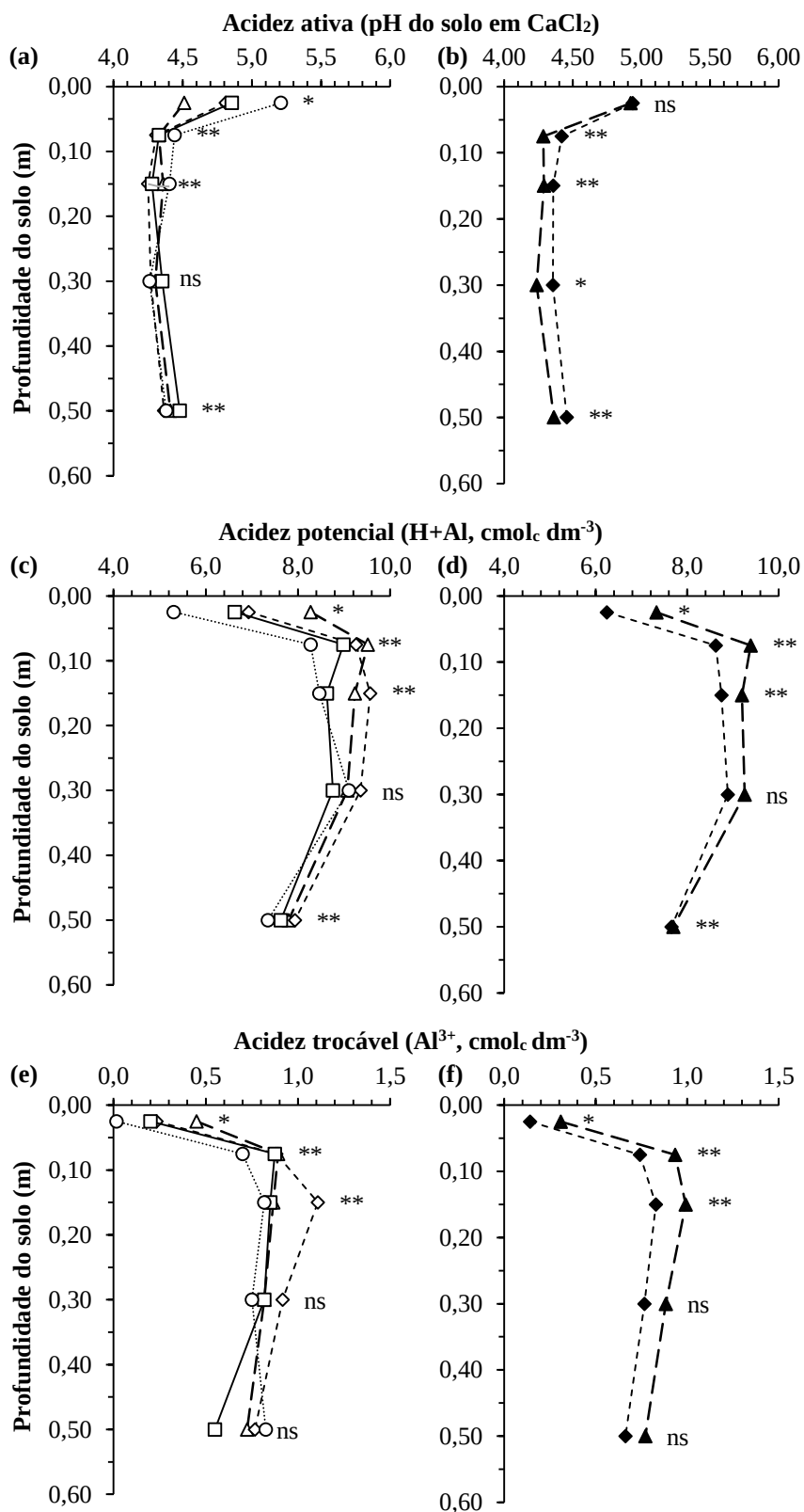


Figura 5.2 – Acidez ativa (pH em CaCl_2), potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e trocável (Al^{3+}) do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Tabela 5.3 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os componentes da acidez [acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al³⁺)] em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	pH (CaCl ₂)			H+Al (cmol _c dm ⁻³)			Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0–0,05 m</i>									
Controle	4,4	4,7	4,5 b	9,39	7,16	8,28 a	0,67	0,23	0,45 a
Calcário de rocha moída	4,8	4,9	4,8 ab	7,25	6,61	6,93 ab	0,33	0,13	0,23 ab
Escória de siderurgia	4,8	4,9	4,9 ab	7,13	6,13	6,63 ab	0,23	0,17	0,20 ab
Calcário calcinado	5,1	5,3	5,2 a	5,55	5,06	5,31 b	0,00	0,03	0,02 b
Média	4,8 A	4,9 A		7,33 A	6,24 B		0,31 A	0,14 B	
<i>0,05–0,10 m</i>									
Controle	4,1 Bb	4,6 Aa	4,3	11,06 Aa	7,97 Ba	9,51	1,35 Aa	0,43 Ba	0,89
Calcário de rocha moída	4,3 Aab	4,3 Aa	4,3	9,49 Ab	9,02 Aa	9,26	0,90 Aab	0,87 Aa	0,88
Escória de siderurgia	4,3 Aab	4,4 Aa	4,3	9,06 Ab	8,92 Aa	8,99	0,95 Aab	0,80 Aa	0,88
Calcário calcinado	4,5 Aa	4,4 Aa	4,4	7,96 Ac	8,59 Aa	8,27	0,53 Ab	0,87 Aa	0,70
Média	4,3	4,4		9,39	8,63		0,93	0,74	
<i>0,10–0,20 m</i>									
Controle	4,1 Bb	4,6 Aa	4,4	10,65 Aa	7,82 Ba	9,24	1,33 Aa	0,40 Ba	0,87
Calcário de rocha moída	4,2 Aab	4,3 Ab	4,3	9,61 Aab	9,53 Aa	9,57	1,17 Aa	1,05 Aa	1,11
Escória de siderurgia	4,4 Aab	4,2 Ab	4,3	8,53 Ab	8,73 Aa	8,63	0,80 Aa	0,90 Aa	0,85
Calcário calcinado	4,5 Aa	4,3 Aab	4,4	7,99 Ab	8,93 Aa	8,46	0,67 Aa	0,97 Aa	0,82
Média	4,3	4,4		9,19	8,75		0,99	0,83	
<i>0,20–0,40 m</i>									
Controle	4,2	4,4	4,3 a	9,61	8,53	9,07 a	1,07	0,75	0,91 a
Calcário de rocha moída	4,2	4,3	4,3 a	9,53	9,19	9,36 a	1,20	1,00	1,10 a
Escória de siderurgia	4,3	4,4	4,4 a	8,70	8,81	8,76 a	0,85	0,90	0,88 a
Calcário calcinado	4,2	4,3	4,3 a	9,18	9,03	9,11 a	1,00	0,95	0,98 a
Média	4,2 B	4,4 A		9,25 A	8,89 A		1,03 A	0,90 A	
<i>0,40–0,60 m</i>									
Controle	4,3 Ba	4,5 Aa	4,4	8,52 Aa	7,07 Bb	7,80	0,90	0,55	0,73 a
Calcário de rocha moída	4,4 Aa	4,4 Aa	4,4	7,63 Aab	8,25 Aa	7,94	0,73	0,80	0,77 a
Escória de siderurgia	4,4 Aa	4,5 Aa	4,5	7,58 Aab	7,69 Aab	7,63	0,50	0,60	0,55 a
Calcário calcinado	4,3 Aa	4,4 Aa	4,4	7,07 Ab	7,62 Aab	7,35	0,95	0,70	0,83 a
Média	4,4	4,5		7,70	7,66		0,77 A	0,66 A	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tais resultados do gesso agrícola sobre o pH do solo do tratamento controle também se repetiram nas camadas de 0,10–0,20 e 0,40–0,60 m. Enquanto que na camada de 0,20–0,40 m a aplicação de gesso agrícola elevou o pH do solo independentemente do corretivo da acidez (Tabela 5.3).

É importante destacar que embora o gesso agrícola não seja um corretivo da acidez do solo (ALCARDE, 1992), os seus efeitos na alteração na atividade de Al³⁺ ou mesmo pela redução do Al presente na H+Al (como observado), pela interação desse íon com o SO₄²⁻ presente no gesso agrícola, acabam por repercutir, levemente, sobre o pH do solo (PAULETTI et al., 2014; COSTA; CRUSCIOL., 2016). Caires et al. (2003) apontam que em profundidade o SO₄²⁻ desloca o OH⁻ dos coloides do solo (que apresentam relação direta com a acidez potencial) para a solução. Deste modo, o gesso agrícola pode acabar por ter um efeito indireto

na correção do pH do solo. Contudo, ressalta-se que esta é uma provável hipótese que explicar tal comportamento.

Na camada de 0,10 – 0,20 m, isoladamente o CC elevou o pH do solo e reduziu o H+Al em relação ao tratamento controle, enquanto que CRM e ES foram similares entre si e os demais tratamentos (Tabela 5.3). Quanto ao Al^{3+} , não houve distinção entre os corretivos tanto quando aplicados isoladamente como quando em associação ao gesso agrícola. Referindo ao gesso agrícola, a sua aplicação isolada elevou o pH do solo em 0,3 e 0,4 unidades em relação a sua aplicação associada ao CRM e à ES, respectivamente, enquanto que o CC apresentou valores de pH similares aos demais tratamentos (Tabela 5.3).

Na camada de 0,40–0,60 m, os efeitos dos tratamentos foram mais expressivos sobre a acidez potencial que em relação a acidez ativa, enquanto que não foram verificados efeitos dos tratamentos sobre a acidez trocável (Tabela 5.3). Sem a aplicação de gesso agrícola, CC reduziu os teores de H+Al em relação ao tratamento controle, enquanto CRM e ES foram similares entre si e aos demais corretivos. Porém, com a aplicação de gesso agrícola, CRM apresentou maior acidez potencial que o tratamento controle (aplicação isolada de gesso agrícola), e CC e ES não diferiram dos demais tratamentos (Tabela 5.3).

Aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, a dinâmica da correção da acidez ativa e potencial foi mais estável e limitada as camadas mais superficiais do solo (0–0,20 m), em relação a avaliação aos 7 meses após aplicação dos tratamentos (Figura 5.3). Neste caso, apenas foram verificados efeitos isolados dos corretivos sobre a acidez ativa nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m. Quanto a acidez potencial, houve interação entre os corretivos e a aplicação de gesso agrícola apenas na camada de 0–0,05 m, e efeitos isolados dos corretivos nas camadas de 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m (Figura 5.3a a 5.3 d).

Contudo, a acidez trocável mostrou-se muito mais dinâmica quanto ao tempo de reação dos corretivos e do gesso agrícola no solo. Deste modo, os teores de Al^{3+} foram influenciados pela interação dos corretivos com o gesso da superfície do solo até a camada de 0,20–0,40 m, e isoladamente pelos corretivos e pelo gesso agrícola na camada de 0,40 – 0,60 m (Figura 5.3e e 5.3 f).

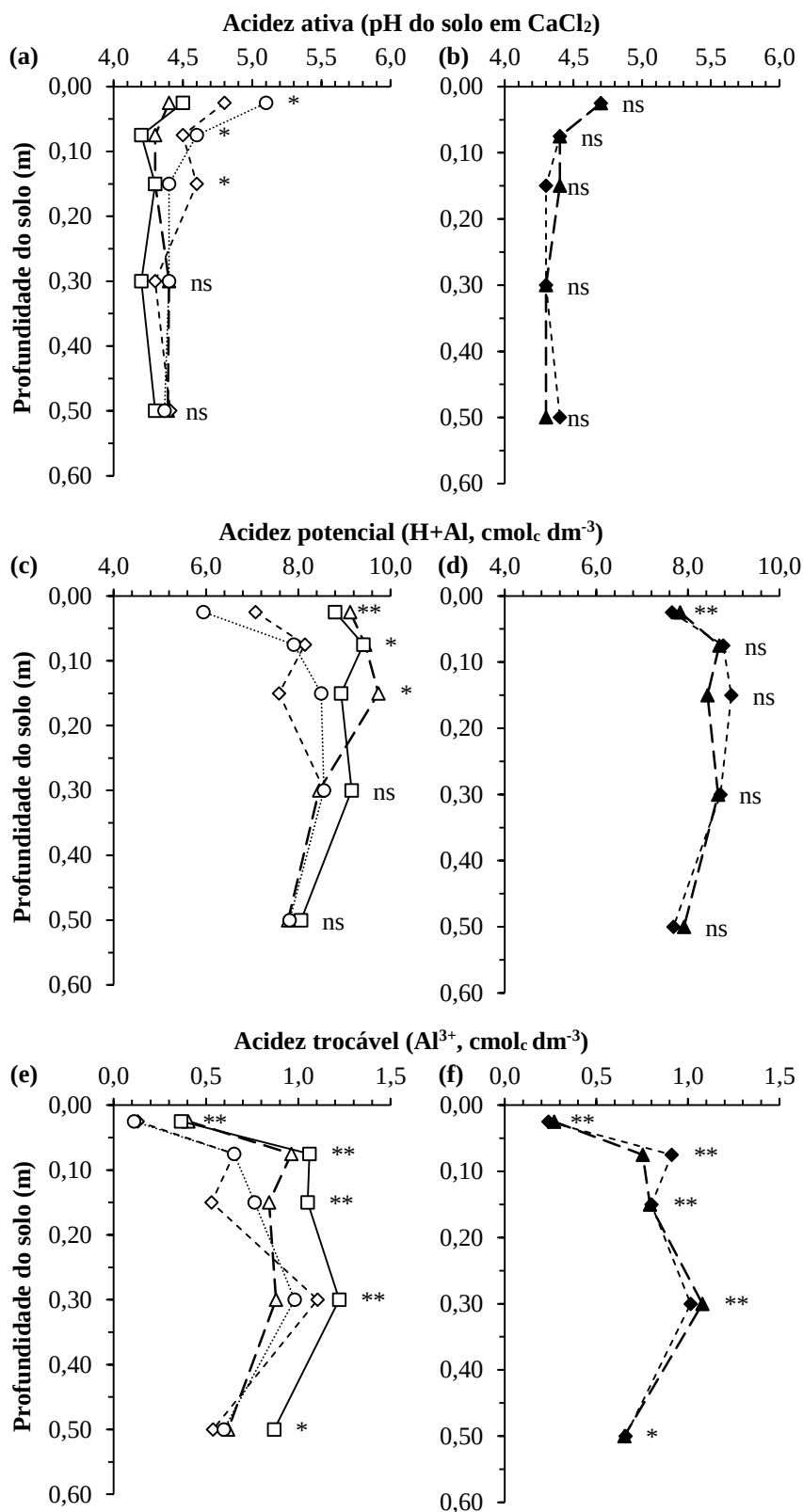


Figura 5.3 – Acidez ativa (pH em CaCl_2), potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e trocável (Al^{3+}) do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Na camada de 0–0,05 m, aos 15 meses após aplicação, CC continuo sendo o corretivo mais eficiente em elevar o pH do solo, em relação ao tratamento controle. Porém, CC também foi mais eficiente que a ES para amenizar a acidez ativa do solo. Ainda, o CRM apresentou comportamento similar ao CC e a ES, porém superior ao tratamento controle (Tabela 5.4). É valido ressaltar que a variação entre as os valores médios de pH do solo entre os 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos, embora não tenham sido comparadas estatisticamente, foram pouco expressivas (Tabelas 5.3 e 5.4).

Tabela 5.4 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os componentes da acidez [acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al³⁺)] em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	pH (CaCl ₂)			H+Al (cmol _c dm ⁻³)			Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0–0,05 m</i>									
Controle	4,3	4,6	4,4 c	9,97 Aa	8,27 Ba	9,12	0,54 Aa	0,27 Bab	0,41
Calcário de rocha moída	5,0	4,6	4,8 ab	6,29 Bb	7,86 Aab	7,08	0,04 Bc	0,22 Aab	0,13
Escoria de siderurgia	4,5	4,5	4,5 bc	9,15 Aa	8,45 Aa	8,80	0,34 Aab	0,40 Aa	0,37
Calcário calcinado	5,1	5,0	5,1 a	5,89 Ab	6,00 Ab	5,95	0,16 Abc	0,06 Ab	0,11
Média	4,7 A	4,7 A		7,83,	7,65		0,27	0,24	
<i>0,05–0,10 m</i>									
Controle	4,3	4,4	4,3 ab	9,9	9,0	9,45 a	1,11 Aa	0,82 Aa	0,96
Calcário de rocha moída	4,5	4,5	4,5 ab	8,2	8,1	8,14 ab	0,48 Ab	0,83 Aa	0,65
Escoria de siderurgia	4,3	4,2	4,2 b	9,7	9,1	9,41 a	1,01 Aa	1,11 Aa	1,06
Calcário calcinado	4,8	4,5	4,6 a	7,0	8,8	7,90 b	0,42 Bb	0,89 Aa	0,65
Média	4,4 A	4,4 A		8,68 A	8,77 A		0,75	0,91	
<i>0,10–0,20 m</i>									
Controle	4,2	4,4	4,3 b	10,08	9,41	9,74 a	1,12 Aa	0,57 Bb	0,84
Calcário de rocha moída	4,6	4,5	4,6 a	7,06	8,11	7,58 b	0,39 Ac	0,67 Aab	0,53
Escoria de siderurgia	4,3	4,2	4,3 b	8,50	9,36	8,93 ab	1,03 Aab	1,07 Aa	1,05
Calcário calcinado	4,4	4,3	4,4 ab	8,06	8,93	8,50 ab	0,64 Abc	0,89 Aab	0,76
Média	4,4 A	4,3 A		8,42 A	8,95 A		0,79	0,80	
<i>0,20–0,40 m</i>									
Controle	4,3	4,4	4,4 a	8,71	8,19	8,45 a	0,91 Aa	0,86 Ab	0,88
Calcário de rocha moída	4,3	4,3	4,3 a	8,49	8,64	8,56 a	1,06 Aa	1,15 Aab	1,11
Escoria de siderurgia	4,3	4,1	4,2 a	8,48	9,83	9,16 a	1,03 Ba	1,42 Aa	1,22
Calcário calcinado	4,3	4,4	4,4 a	8,94	8,18	8,56 a	1,33 Aa	0,64 Bb	0,98
Média	4,3 A	4,3 A		8,66 A	8,71 A		1,08	1,02	
<i>0,40–0,60 m</i>									
Controle	4,3	4,5	4,4 a	8,47	7,09	7,78 a	0,57 Ab	0,68 Ab	0,62
Calcário de rocha moída	4,3	4,5	4,4 a	7,88	7,22	7,55 a	0,57 Ab	0,51 Ac	0,54
Escoria de siderurgia	4,3	4,3	4,3 a	7,52	8,59	8,06 a	0,80 Ba	0,94 Aa	0,87
Calcário calcinado	4,3	4,4	4,4 a	7,79	7,84	7,81 a	0,68 Aab	0,51 Bc	0,60
Média	4,3 A	4,4 A		7,91 A	7,69 A		0,65	0,66	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey (p< 0,05).

Referindo-se a acidez potencial da camada de 0–0,05 m, sem a aplicação de gesso agrícola, ambos os calcários reduziram de maneira semelhante entre si os teores de H+Al do solo em relação ao tratamento controle e a ES, os quais não diferiram entre si (Tabela 5.4).

Entretanto, associados ao gesso agrícola, a distinção dos teores de H+Al pelo CC em relação tratamento controle e a ES foi a mesma observada para a aplicação isolada dos corretivos, a exceção nesse caso foi o CRM, que apresentou comportamento similar aos demais corretivos quanto a sua potencialidade em minimizar os efeitos da acidez potencial do solo. Entre os corretivos, o gesso agrícola reduziu a acidez potencial do solo apenas em relação ao tratamento controle, isto é, a aplicação isolada de gesso agrícola amenizou a acidez potencial do solo. Contudo, quando associado ao CRM, a aplicação de gesso elevou a acidez potencial do solo na camada de 0–0,05 m (Tabela 5.4).

Sem a aplicação de gesso agrícola, a acidez trocável na camada de 0–0,05 m apresentou a mesma tendência que a acidez potencial, a única diferença observada foi que os teores de Al^{3+} do CC foram similares a ES, porém inferiores em relação ao tratamento controle (Tabela 5.4). Com a aplicação de gesso agrícola, CC foi o corretivo mais eficiente em minimizar os efeitos do Al^{3+} em relação a ES, enquanto que CRM e o tratamento controle foram similares entre si e em relação ao CC e à ES. Entre os corretivos, os resultados observados para os teores de Al^{3+} foram os mesmos que os observados para os teores de H+Al (Tabela 5.4).

Os resultados obtidos para a camada de 0–0,05 m aos 15 meses após aplicação dos tratamentos novamente reforçam o respaldado em literatura quanto aos efeitos da composição dos corretivos sobre o pH do solo (VELOSO et al., 1992), e do gesso agrícola em relação a amenização dos efeitos do Al^{3+} (SUMNER, 1995, CAIRES et al., 2011a, 2011b). Contudo, os efeitos observados pela aplicação associada do CRM e do gesso agrícola não são comumente reportados em literatura. Uma das explicações que podem estar relacionadas é que, geralmente, a aplicação de gesso agrícola é posterior a aplicação de calcário (CAIRES et al., 1998, 2001, 2003, 2004, 2011a, 2011b, 2011c; PAULETTI et al., 2014; CARDUCCI et al., 2015).

Assim, a aplicação conjunta desses materiais pode interferir em sua reação no solo. Wadt (2000) analisando os efeitos da adição isolada e conjunta de carbonato e sulfato de cálcio (p. a.) sobre as propriedades eletroquímicas de um LVA, com teores de argila similares ao do presente estudo, principalmente no que se refere às reações envolvendo o SO_4^{2-} , verificou que havendo predomínio de superfícies com potencial eletropositivo (menores valores de pH), o SO_4^{2-} tende a ser preferencialmente adsorvido por estas superfícies, mas havendo predomínio de superfícies com potencial eletronegativo (maiores valores de pH proporcionados pelo CaCO_3) e elevados teores de Al^{3+} , a principal reação do SO_4^{2-} passa a ser de precipitação com o Al^{3+} . Definitivamente, tal comportamento não foi observado para a aplicação conjunta do CRM com o gesso agrícola.

Então, possivelmente, considerando que a aplicação isolada de CRM elevou os teores de Mg^{2+} , mas associado ao gesso agrícola os teores desse elemento reduziram no solo (*vide seção 5.2.2*), sugere-se que o SO_4^{2-} teve preferência por reagir com o Mg^{2+} na camada de 0–0,05 m em relação ao Al^{3+} , principalmente pela concentração e atividade de Mg^{2+} ser 4,22 vezes maior que de Al^{3+} nessa camada ($0,22 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} em relação a $0,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Mg^{2+}).

Na camada de 0,05–0,10 m, o pH do solo com a aplicação de CC foi superior em relação à ES, enquanto que CRM e o tratamento controle não diferiram entre si e foram similares aos demais corretivos (Tabela 5.4). Já para a acidez potencial, CC foi o corretivo que proporcionou o menor teor de H^+Al , inferior ao tratamento controle e a ES, os quais foram similares entre si. Por sua vez, a acidez potencial do solo com a aplicação de CRM foi similar ao tratamento controle e a aplicação de CC e ES (Tabela 5.4).

Quanto a acidez trocável, não houve distinção entre os corretivos da acidez do solo tanto quando aplicados isoladamente ou quando aplicados em associação ao gesso agrícola. Contudo, entre os corretivos, o gesso agrícola aumentou os teores de Al^{3+} na camada de 0,05–0,10 m quando aplicado associado ao CC (Tabela 5.4). Tal resultado também pode estar associado a relação do SO_4^{2-} com o Mg^{2+} preferencialmente ao Al^{3+} em camadas mais superficiais do solo, uma vez que os teores de Mg^{2+} no CC sem gesso foi de $0,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e no CC com gesso agrícola de $0,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Na camada de 0,10–0,20 m, CRM foi o corretivo que apresentou o maior valor de pH do solo, superior ao tratamento controle e a ES, enquanto que o pH do solo pela aplicação de CC foi similar a todos os demais tratamentos (Tabela 5.4). Resultados similares foram observados para a acidez potencial, porém inversos, isto é, CRM reduziu os teores de H^+Al em relação ao tratamento controle, enquanto que CC e ES não diferiram entre si e entre os demais tratamentos (Tabela 5.4).

A acidez trocável na camada de 0,10–0,20 m, sem a aplicação de gesso agrícola foi menor com a aplicação de ambos os calcários, os quais não diferiram entre si, em relação ao tratamento controle; contudo, a ES foi similar ao CC e ao tratamento controle (Tabela 5.4). Com a aplicação de gesso agrícola, a aplicação isolada deste condicionador apresentou menor acidez trocável em comparação a aplicação de gesso associada a ES, mas a aplicação associada do gesso com CRM e CC sobre os teores de Al^{3+} foram similares entre si, entre a ES e a aplicação isolada do condicionador. Ainda, a aplicação de gesso agrícola influenciou os teores de Al^{3+} apenas quando aplicada isoladamente em relação ao tratamento controle (Tabela 5.4).

Na camada de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m apenas ocorreram efeitos dos tratamentos sobre a acidez trocável do solo (Tabela 5.4). Na camada de 0,20–0,40 m, houve distinção entre os corretivos apenas quando estes foram aplicados associados ao gesso agrícola. Neste caso, a aplicação isolada de gesso e associado ao CC proporcionou menores níveis de Al^{3+} em relação à ES associada ao gesso, enquanto que CRM associado ao gesso apresentou teores de Al^{3+} similares aos demais tratamentos. Tanto na camada de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, entre os corretivos, a aplicação de gesso agrícola elevou a acidez trocável quando associado à ES e reduziu quando associado ao CC (Tabela 5.4).

Por sua vez, na camada de 0,40–0,60 m, sem a aplicação de gesso o teor de Al^{3+} do solo pela aplicação da ES foi superior ao tratamento controle e ao CRM, os quais não diferiram entre si; enquanto que o CC foi similar a todos os tratamentos. Com a aplicação de gesso agrícola foi observada a seguinte ordem de distinção entre os corretivos: $\text{CC} = \text{CRM} < \text{controle} < \text{ES}$, demonstrando novamente que a ES elevou os teores de Al^{3+} no solo (Tabela 5.4).

O comportamento da acidez do solo, principalmente trocável, em profundidade, pela aplicação de gesso agrícola quanto associada aos corretivos é amplamente discutida. Neste caso, ao se dissociar em superfície, o SO_4^{2-} desloca-se no perfil do solo através de pares iônicos CaSO_4^0 ou MgSO_4^0 ou K_2SO_4^0 , o que de fato ocorreu (*vide seção 5.2.2*). E, ao encontrar regiões com maior concentração e atividade de Al^{3+} , tais pares iônicos se dissociam e o SO_4^{2-} acaba por se ligar como Al^{3+} , formando o complexo AlSO_4^+ . Com isso, ocorre a redução da acidez trocável do solo em profundidade e eleva os teores de cátions básicos (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES et al., 2011a, 2011b, 2011c; COSTA; CRUSCIOL, 2016).

Entretanto, deve-se ressaltar que todos os resultados obtidos com a ES no presente trabalho não corroboram com o reportado em literatura, tanto quando aplicados isoladamente (CASTRO; CRUSCIOL, 2013; CRUSCIOL et al., 2016) quanto em associação ao gesso agrícola (CRUSCIOL et al., 2014; 2016). Todavia, é válido ressaltar que em nenhum desses trabalhos foi feito, ao menos não foi apresentada, a caracterização química e mineralógica da ES. Deste modo, tal divergência encontrada pode estar diretamente relacionada a composição química e mineralógica da ES utilizada no presente trabalho.

Pode-se observar que a ES utilizada no presente trabalho, amplamente comercializada, apresentava em sua composição uma quantidade expressiva de quartzo (Figura 5.1c). Logo, tal material não exerce efeito algum sobre as reações que ocorrem no solo (LASSO et al. 2013), o que justifica a baixa reatividade e efeitos sobre os componentes da acidez, principalmente a acidez ativa. Lasso et al. (2013) em seu trabalho visavam caracterizar e avaliar a potencialidade do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo,

verificaram que tais materiais são compostos por cerca de 80 % de quartzo. Neste caso, os autores destacam que no futuro, sejam investigados e testados processos simples de separação e retirada do quartzo, visando à concentração da parte mais reativa do material, pois embora tenham alta quantidade de quartzo, tais resíduos evidenciaram bom potencial de uso agrícola como corretivo da acidez do solo. Deste modo, para a ES utilizada no presente trabalho, também seriam necessários o emprego de tais métodos de refinamento, objetivando elevar o seu poder de neutralização.

Ressalta-se ainda que a distinção da ES utilizada nesse trabalho em relação as utilizadas nos trabalhos de Castro e Crusciol (2013), Crusciol et al. (2014) e Crusciol et al. (2016) são amplamente aceitáveis, uma vez que a ES é um subproduto da indústria de aço, podem ocorrer diversas composições químicas entre as ES, dependendo do processo siderúrgico aplicado (PRADO et al., 2001; 2002; 2004).

Por outro lado, também por uma questão de composição química, observou-se que 8,58 % da composição da ES é de alumínio (Tabela 5.1), e que a maior parte deste alumínio está associada a sulfatos (Tabela 5.2). Considerando as características de alta solubilidade em água de sulfatos em relação a silicatos e fosfatos, por exemplo, que são descritas por Vale e Alcarde (2002) para alguns fertilizantes agrícolas, estima-se que os primeiros compostos a serem solubilizados da ES são justamente os sulfatos de alumínio: aluminita, alunita e basaluminita (Tabela 5.2).

Com isso, poderia ocorrer o aumento nos teores de Al^{3+} ou mesmo de alguma outra espécie de alumínio, principalmente na superfície do solo. Porém, considerando que com o gesso agrícola houve migração do Al^{3+} no perfil, quando o condicionador foi aplicado conjuntamente à ES, ao que tudo indica, ocorreu a movimentação desse alumínio solubilizado no perfil. Todavia, para descrever como ocorreu essa movimentação seriam necessários estudos de especiação iônica da solução do solo. Porém, para respaldar a hipótese apresentada, destaca-se que Pelegrina et al. (2008) observaram em colunas de lixiviação que a aplicação de gesso agrícola reduziu a atividade das espécies de Al^{3+} , AlOH^{2+} e Al(OH)_2^+ no horizonte Ap, mas aumentou a atividade de Al^{3+} , AlSO_4^+ , $\text{Al(SO}_4)_2^-$ e AlF^{2+} no horizonte AB, demonstrando assim que pode ocorrer a movimentação de alumínio no solo pela aplicação de gesso agrícola.

5.2.2 Cátions básicos trocáveis

Aos 7 meses após aplicação dos tratamentos, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram influenciados pela interação entre os corretivos da acidez e o gesso agrícola em todas as camadas de solo (Figuras 5.4a a 5.4d). Ainda, foram verificados efeitos isolados do gesso agrícola nas camadas de 0–0,05 e 0,05–0,10 m, dos corretivos e do gesso em 0,10–0,20 m e da interação entre os tratamentos nas camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m sobre os teores de K^+ (Figuras 5.4e e 5.4f).

Sem o gesso agrícola, na camada de 0–0,05 m, os teores de Ca^{2+} no solo pela aplicação do CC e da ES foram similares entre si e superiores ao tratamento controle e ao CRM, os quais também não diferiram (Tabela 5.5). Porém, não houve distinção entre os corretivos com a aplicação de gesso agrícola. Entre os corretivos, a aplicação de gesso elevou os teores de Ca^{2+} apenas quando associado ao CRM e em relação ao tratamento controle, isto é, a aplicação isolada de gesso agrícola (Tabela 5.5).

Contudo, os teores de Mg^{2+} na camada de 0–0,05 m apresentaram maiores distinções que o Ca^{2+} , principalmente com a aplicação de gesso agrícola (Tabela 5.5). Isoladamente, todos os corretivos aumentaram o teor de Mg^{2+} em relação ao tratamento controle. Entretanto, associados ao gesso agrícola, ambos os calcários proporcionaram ao solo teores de Mg^{2+} similares entre si e superiores a ES e à aplicação isolada de gesso agrícola. Porém, o resultado mais notório foi que, com a aplicação de gesso agrícola, independente do corretivo da acidez, houve redução dos teores de Mg^{2+} no solo. Também houve redução nos teores de K^+ nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m com a aplicação de gesso agrícola (Tabela 5.5), demonstrando assim o efeito do gesso em lixiviar Mg^{2+} e K^+ no perfil (Figuras 5.4d e 5.4f) (CAIRES et al., 1998; 2004; 20011c; PAULETTI et al., 2014).

Nas camadas de 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, apenas o CC incrementou o teor de Ca^{2+} no solo em relação aos demais corretivos quando, aplicados isoladamente, e ao tratamento controle (Tabela 5.5). Quando associados ao gesso agrícola, nenhum dos corretivos foi tão eficiente em elevar os teores de Ca^{2+} nessa camada quando a aplicação isolada do gesso. Entre os corretivos, o teor de Ca^{2+} no solo foi indiferente quanto a aplicação isolada de ES ou associada ao gesso agrícola, mas quando associados, o gesso agrícola e o CRM aumentaram o teor de Ca^{2+} em relação à aplicação isolada de CRM, do mesmo modo para a aplicação isolada de gesso em relação ao tratamento controle. Entretanto, resultado oposto foi observado para o CC quando associado ao gesso agrícola (Tabela 5.5).

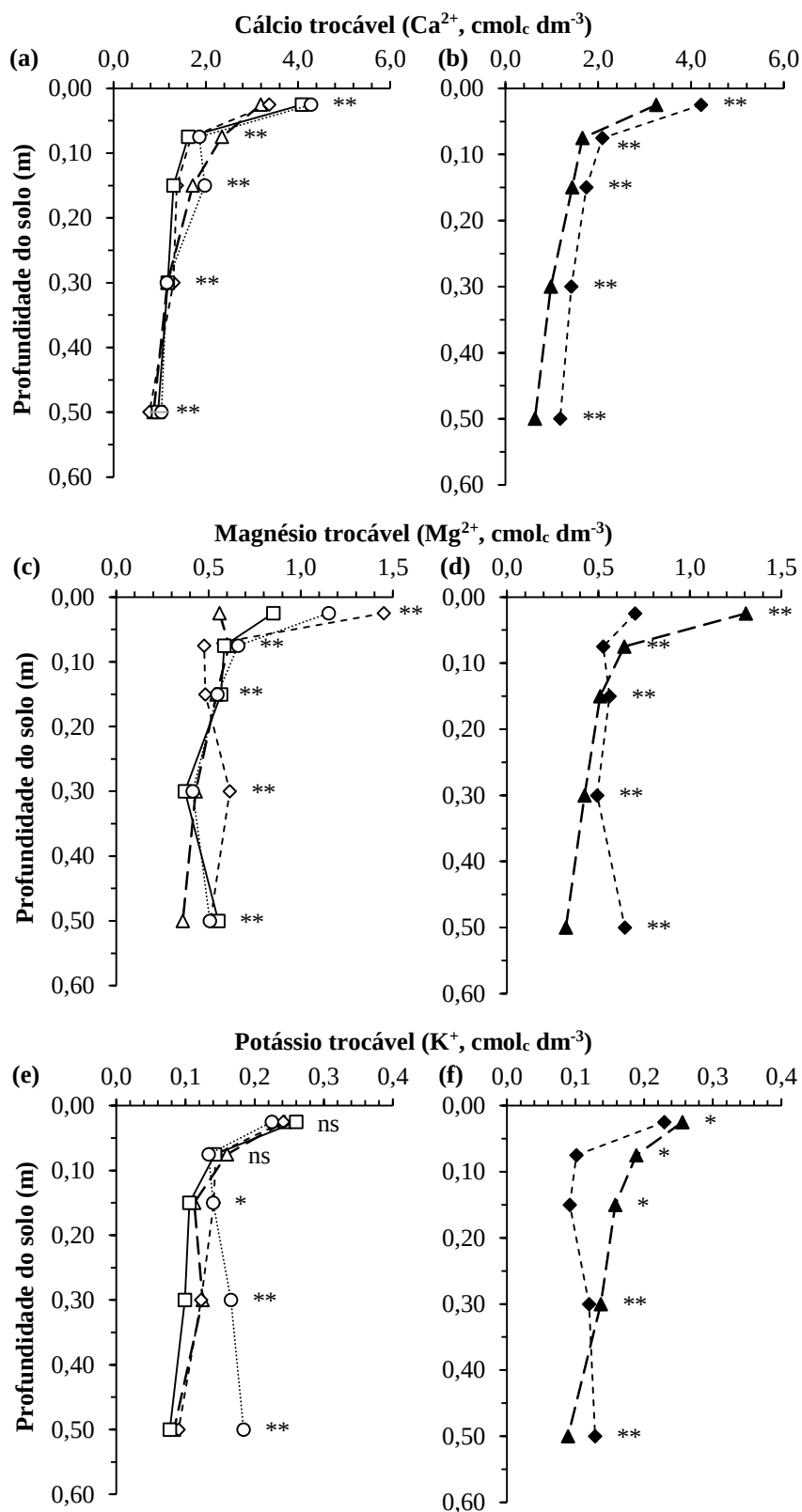


Figura 5.4 – Teores de cálcio, magnésio e potássio trocável do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Tabela 5.5 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os teores de cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	Ca^{2+} (cmol _c dm ⁻³)			Mg^{2+} (cmol _c dm ⁻³)			K^+ (cmol _c dm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0–0,05 m</i>									
Controle	2,13 Bb	4,26 Aa	3,19	0,72 Ab	0,40 Bb	0,56	0,26	0,23	0,24 a
Calcário de rocha moída	2,90 Bb	3,84 Aa	3,37	1,70 Aa	1,20 Ba	1,45	0,25	0,23	0,24 a
Escória de siderurgia	3,93 Aa	4,24 Aa	4,09	1,35 Aa	0,36 Bb	0,85	0,26	0,26	0,26 a
Calcário calcinado	4,04 Aa	4,53 Aa	4,28	1,46 Aa	0,85 Ba	1,15	0,25	0,20	0,23 a
Média	3,25	4,22		1,31	0,70		0,26 A	0,23 B	
<i>0,05–0,10 m</i>									
Controle	1,40 Bb	3,30 Aa	2,35	0,52 Bbc	0,71 Aa	0,61	0,21	0,11	0,16 a
Calcário de rocha moída	1,43 Bb	1,94 Ab	1,68	0,46 Ac	0,49 Aab	0,48	0,18	0,11	0,14 a
Escória de siderurgia	1,50 Ab	1,74 Ab	1,62	0,90 Aa	0,28 Bb	0,59	0,19	0,10	0,14 a
Calcário calcinado	2,33 Aa	1,39 Bb	1,86	0,69 Aab	0,63 Aa	0,66	0,17	0,09	0,13 a
Média	1,66	2,09		0,64	0,53		0,19 A	0,10 B	
<i>0,10–0,20 m</i>									
Controle	0,70 Bb	2,73 Aa	1,72	0,42 Bb	0,67 Aa	0,54	0,14	0,09	0,12 ab
Calcário de rocha moída	1,25 Ab	1,49 Ab	1,37	0,39 Bb	0,58 Aab	0,48	0,17	0,12	0,14 a
Escória de siderurgia	1,29 Ab	1,31 Ab	1,30	0,74 Aa	0,40 Bb	0,57	0,15	0,07	0,11 b
Calcário calcinado	2,52 Aa	1,44 Bb	1,98	0,50 Ab	0,60 Aab	0,55	0,18	0,10	0,14 a
Média	1,44	1,74		0,51	0,56		0,16 A	0,09 B	
<i>0,20–0,40 m</i>									
Controle	0,49 Ba	1,85 Aa	1,17	0,26 Bb	0,61 Aa	0,43	0,08 Bb	0,18 Aa	0,13
Calcário de rocha moída	1,14 Aa	1,46 Aa	1,30	0,62 Aa	0,61 Aa	0,62	0,19 Aa	0,06 Bc	0,12
Escória de siderurgia	1,06 Aa	1,29 Aa	1,18	0,39 Aab	0,36 Aa	0,37	0,10 Ab	0,10 Abc	0,10
Calcário calcinado	1,22 Aa	1,09 Aa	1,16	0,43 Aab	0,40 Aa	0,41	0,19 Aa	0,15 Bab	0,17
Média	0,98	1,42		0,42	0,49		0,14	0,12	
<i>0,40–0,60 m</i>									
Controle	0,39 Bb	1,34 Aa	0,87	0,21 Bb	0,51 Ab	0,36	0,04 Ba	0,13 Ab	0,08
Calcário de rocha moída	0,58 Bab	0,97 Aa	0,78	0,47 Aa	0,55 Aab	0,51	0,12 Aa	0,07 Ab	0,09
Escória de siderurgia	0,73 Bab	1,20 Aa	0,97	0,31 Bab	0,74 Aab	0,55	0,07 Aa	0,09 Ab	0,08
Calcário calcinado	0,85 Ba	1,22 Aa	1,04	0,24 Bab	0,78 Aa	0,51	0,13 Ba	0,24 Aa	0,18
Média	0,64	1,18		0,32	0,64		0,09	0,13	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores de Mg^{2+} na camada de 0,05–0,10 m apresentaram grande variação tanto pela isolada dos corretivos da acidez quanto associada ao gesso agrícola (Tabela 5.5). Sem o gesso, a ES foi o corretivo que proporcionou os maiores de teores de Mg^{2+} nessa camada, superiores ao CRM e ao tratamento controle, os quais não diferiram entre si, enquanto que o CC condicionou teor de Mg^{2+} similar à ES e ao tratamento controle, porém superior ao CRM. Com o gesso agrícola, a ES foi justamente o corretivo que ocasionou o menor teor de Mg^{2+} , inferior inclusive a aplicação isolada de gesso agrícola e aplicação associada de gesso agrícola com CC; ainda, nesta condição, o teor de Mg^{2+} no solo pela aplicação CRM foi similar ao CC e à aplicação isolada de gesso. Entre os corretivos, diferente do observado na camada de 0–0,05 m, apenas quando associado a ES o gesso agrícola reduziu o teor de Mg^{2+} no solo, enquanto que sua aplicação isolada elevou o teor do nutriente, em relação ao tratamento controle (Tabela 5.5).

Na camada de 0,10–0,20 m, sem a aplicação de gesso agrícola, novamente a ES proporcionou o maior teor de Mg^{2+} , como reportado para a camada de solo subjacente, em

relação ao CRM, CC e o tratamento controle, os quais não diferiram entre si (Tabela 5.5). Também, a ES associada ao gesso reduziu o teor de Mg^{2+} em relação a aplicação isolada de gesso agrícola, e os ambos os calcários apresentaram resultados similares entre si e à ES e à aplicação isolada de gesso. Entre os corretivos, associado à ES o gesso agrícola reduziu o teor de Mg^{2+} , porém sua aplicação isolada ou associada ao CRM aumentou a disponibilidade do nutriente no solo, quanto que o CC foi indiferente a aplicação de gesso (Tabela 5.5).

Na camada de 0,10–0,20 m, também foram verificados efeitos isolados dos corretivos da acidez sobre o teor de K^+ (Figura 5.4). Neste caso, a ES foi o corretivo com o menor teor de K^+ , inferior a ambos os calcários, mas similar ao tratamento controle (Tabela 5.5).

Na camada de 0,20–0,40 m, não houve distinção entre os teores de Ca^{2+} pelos corretivos da acidez tanto quando aplicados isoladamente quando associados ao gesso agrícola. Contudo, entre os corretivos, apenas a aplicação isolada do gesso aumentou o teor de Ca^{2+} no solo em relação ao tratamento controle (Tabela 5.5).

Já os teores de Mg^{2+} nessa camada foram influenciados pelos corretivos apenas quando esses foram aplicados isoladamente (Tabela 5.5). Neste caso, CRM aumentou o teor de Mg^{2+} em relação ao tratamento controle, enquanto que CC e ES foram similares entre si e os demais tratamentos. Entre os corretivos, o mesmo comportamento observado para o Ca^{2+} foi observado para o Mg^{2+} , isto é, aplicação isolada de gesso agrícola aumentou a disponibilidade do nutriente no solo (Tabela 5.5).

Quanto ao K^+ , na camada de 0,20–0,40 m foi verificada a primeira interação entre os corretivos e o gesso agrícola (Tabela 5.5). Sem o gesso agrícola, o teor de K^+ no solo decorrente da aplicação de ambos os calcários foi superior ES e ao tratamento controle, os quais não diferiram entre si. Porém, a aplicação isolada de gesso aumentou a disponibilidade de K^+ no solo em níveis superiores a ES e o CRM, os quais assemelharam-se quanto a disponibilidade de K^+ ; quanto ao CC, verificou-se que a disponibilidade de K^+ com a aplicação desse corretivo associado ao gesso foi similar a aplicação isolada de gesso e associada à ES, porém superior ao CRM. Entre os corretivos, a aplicação de gesso reduziu a disponibilidade de K^+ em ambos os calcários, porém elevou o teor do nutriente quando aplicado isoladamente (Tabela 5.5).

Na camada de 0,40–0,60 m, o teor de Ca^{2+} pela aplicação isolada de CC foi superior ao tratamento controle, enquanto que CRM e ES foram intermediários e similares aos demais tratamentos (Tabela 5.5). Associados ao gesso agrícola, não houve distinção entre os corretivos. Mas, verificou-se que a aplicação de gesso elevou a disponibilidade de Ca^{2+} da camada mais profunda avaliada, independente do corretivo associado ou mesmo da aplicação isolada do gesso agrícola (Tabela 5.5).

Novamente o Mg^{2+} mostrou-se mais dinâmico que o Ca^{2+} em uma mesma camada de solo, pela aplicação dos corretivos e do gesso agrícola. Neste caso, na camada de 0,40–0,60 m, os resultados do teor de Mg^{2+} no solo pela aplicação isolada dos corretivos foram os mesmos que os observados na camada de 0,20–0,40 m (Tabela 5.5). Entretanto, com associados ao gesso, o teor de Mg^{2+} no solo foi superior com a aplicação do CC em relação ao tratamento controle, enquanto que CRM e ES foram similares entre si e aos demais tratamentos. Entre os corretivos, com exceção do CRM, a aplicação de gesso elevou os teores de Mg^{2+} no solo em relação a sua aplicação isolada, incluindo o tratamento controle (Tabela 5.5)

Para finalizar a avaliação de solo aos 7 meses após aplicação os tratamentos, o teor de K^+ na camada de 0,40 – 0,60 m apenas foi influenciado pelos corretivos quando esses foram associados ao gesso agrícola, sendo que nesse caso CC proporcionou a maior disponibilidade do nutriente em relação aos demais tratamentos, os quais assemelharam-se. Ainda, entre os corretivos, apenas a aplicação isolada de gesso e associada ao CC elevaram o teor de K^+ na camada mais profunda do solo que foi avaliada (Tabela 5.5).

Aos 15 meses após aplicação, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram influenciados pela interação entre os corretivos e o gesso agrícola nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m. Na camada de 0,40–0,60 m, os teores desses nutrientes foram influenciados isoladamente pela aplicação de gesso para o Ca^{2+} e pelos corretivos e o gesso para Mg^{2+} (Figuras 5.5a a 5.5d). Quanto ao K^+ , ocorreram efeitos isolados dos corretivos e do gesso agrícola nas camadas de 0–0,05 e 0,20–0,40 m e interações entre os tratamentos nas demais camadas (Figuras 5.5e e 5.5f).

Na camada de 0–0,05 m, o teor de Ca^{2+} no solo pela aplicação isolada de CC foi superior ao tratamento controle, enquanto que CRM e ES assemelharam-se a todos os tratamentos (Tabela 5.6). Quando associados a aplicação de gesso, novamente CC proporcionou o maior teor de Ca^{2+} no solo, superior a todos os demais tratamentos. Por sua vez, entre os corretivos da acidez, apenas a aplicação isolada de gesso e a associada com o CC elevaram os teores de Ca^{2+} no solo (Tabela 5.6).

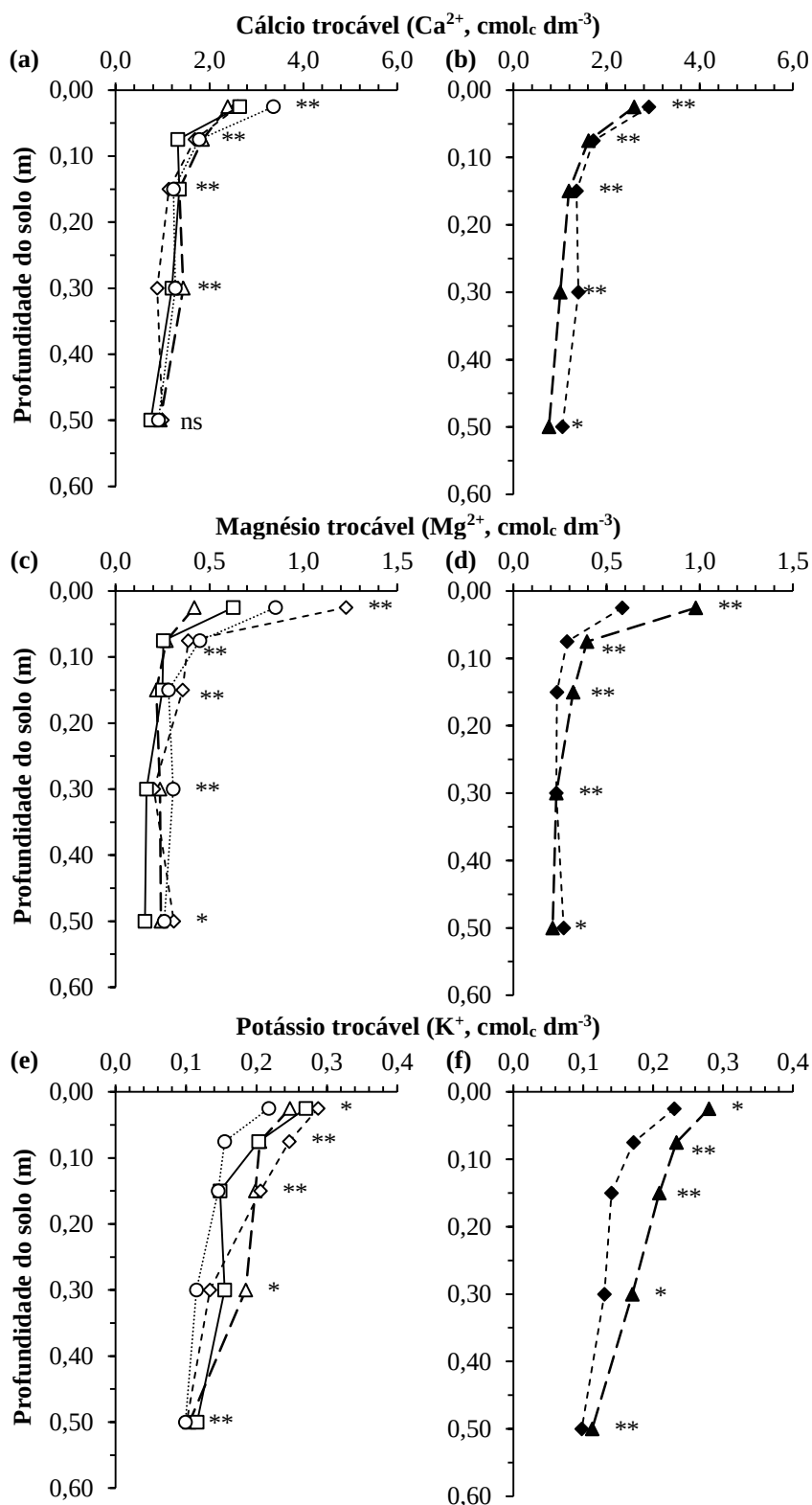


Figura 5.5 – Teores de cálcio, magnésio e potássio trocável do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Tabela 5.6 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre os teores de cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	Ca^{2+} (cmol _c dm ⁻³)			Mg^{2+} (cmol _c dm ⁻³)			K^+ (cmol _c dm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0-0,05 m</i>									
Controle	2,08 Bb	2,70 Ab	2,39	0,56 Ac	0,27 Bc	0,42	0,28	0,22	0,25 ab
Calcário de rocha moída	2,57 Aab	2,64 Ab	2,61	1,52 Aa	0,93 Ba	1,23	0,33	0,25	0,29 a
Escoria de siderurgia	2,79 Aab	2,50 Ab	2,65	0,85 Ab	0,41 Bc	0,63	0,28	0,26	0,27 ab
Calcário calcinado	2,93 Ba	3,79 Aa	3,36	0,98 Ab	0,73 Bb	0,85	0,23	0,21	0,22 b
Média	2,59	2,91		0,98	0,58		0,28 A	0,23 B	
<i>0,05-0,10 m</i>									
Controle	1,25 Bb	2,45 Aa	1,85	0,24 Ab	0,30 Aab	0,27	0,26 Aa	0,15 Ba	0,21
Calcário de rocha moída	2,00 Aa	1,38 Bb	1,69	0,40 Aab	0,37 Aa	0,39	0,30 Aa	0,19 Ba	0,25
Escoria de siderurgia	1,11 Bb	1,54 Ab	1,33	0,30 Ab	0,21 Bb	0,25	0,24 Aa	0,17 Aa	0,20
Calcário calcinado	2,07 Aa	1,50 Bb	1,78	0,63 Aa	0,27 Bab	0,45	0,14 Ab	0,17 Aa	0,16
Média	1,61	1,72		0,39	0,29		0,23	0,17	
<i>0,10-0,20 m</i>									
Controle	0,99 Bb	1,74 Aa	1,36	0,19 Ab	0,26 Aa	0,22	0,27 Aa	0,13 Bb	0,20
Calcário de rocha moída	1,32 Aa	0,96 Bc	1,14	0,47 Aa	0,25 Ba	0,36	0,23 Aa	0,19 Aa	0,21
Escoria de siderurgia	1,37 Aa	1,36 Ab	1,36	0,31 Ab	0,19 Ba	0,25	0,17 Ab	0,12 Bb	0,15
Calcário calcinado	1,09 Bab	1,37 Ab	1,23	0,31 Ab	0,26 Aa	0,28	0,17 Ab	0,13 Ab	0,15
Média	1,19	1,35		0,32	0,23		0,21	0,14	
<i>0,20-0,40 m</i>									
Controle	1,08 Bb	1,81 Aa	1,44	0,24 Aa	0,23 Ab	0,24	0,23	0,14	0,19 a
Calcário de rocha moída	0,59 Bd	1,19 Ab	0,89	0,23 Aa	0,18 Abc	0,20	0,15	0,12	0,14 ab
Escoria de siderurgia	1,47 Aa	0,94 Bc	1,20	0,21 Aa	0,12 Bc	0,17	0,17	0,14	0,16 ab
Calcário calcinado	0,89 Bc	1,66 Aa	1,27	0,23 Ba	0,38 Aa	0,31	0,13	0,10	0,12 b
Média	1,00	1,40		0,23	0,23		0,17 A	0,13 B	
<i>0,40-0,60 m</i>									
Controle	0,82	1,09	0,95 a	0,19	0,29	0,24 ab	0,14 Aa	0,08 Bb	0,11
Calcário de rocha moída	0,88	1,12	1,00 a	0,30	0,32	0,31 a	0,11 Aa	0,10 Aab	0,10
Escoria de siderurgia	0,55	0,94	0,75 a	0,14	0,17	0,16 b	0,10 Ba	0,14 Aa	0,12
Calcário calcinado	0,78	1,05	0,91 a	0,22	0,30	0,26 ab	0,11 Aa	0,09 Aab	0,10
Média	0,76 B	1,05 A		0,21 B	0,27 A		0,11	0,10	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quanto ao teor de Mg^{2+} da camada de 0–0,05 m a distinção entre os tratamentos foi mais pronunciada aos 15 meses em relação aos 7 meses após aplicação. Neste caso, sem a aplicação de gesso agrícola, a ordem entre os tratamentos foi CRM > CC = ES > controle, enquanto que associados ao gesso agrícola a ordem foi CRM > CC = controle (aplicação isolada de gesso) > ES (Tabela 5.6). Entre os corretivos, assim como observado aos 7 meses após aplicação (Tabela 5.5), a aplicação de gesso reduziu a disponibilidade de Mg^{2+} na camada mais superficial do solo em todos os corretivos (Tabela 5.6).

Com relação ao K^+ da camada de 0–0,05 m houve distinção entre os calcários, sendo CRM superior ao CC, enquanto que o tratamento controle e a ES foram similares entre si e a ambos os calcários (Tabela 5.6). Contudo, também como reportado aos 7 meses (Tabela 5.5), a aplicação de gesso reduziu a disponibilidade do nutriente nessa camada (Tabela 5.6).

Na camada de 0,05–0,10 m, sem a aplicação de gesso, os ambos os calcários foram os corretivos que proporcionaram maiores teores de Ca^{2+} no solo, similares entre si e superiores a

ES e ao tratamento controle, os quais também não diferiram (Tabela 5.6). Porém, associados ao gesso agrícola, o teor de Ca^{2+} proporcionado por todos os corretivos assemelharam-se e foram inferiores à aplicação isolada de gesso. Entre os corretivos, a aplicação isolada de gesso e associada a ES elevou os teores de Ca^{2+} no solo, mas quando associado ao CRM e ao CC reduziu a disponibilidade do nutriente (Tabela 5.6).

Nessa camada, sem a aplicação de gesso, o teor de Mg^{2+} foi similar entre a ES e o tratamento controle, mas inferior ao CC, enquanto que o CRM foi similar aos demais tratamentos (Tabela 5.6). Por sua vez, com a aplicação de gesso, o teor de Mg^{2+} no solo decorrente da aplicação de CRM foi superior apenas à ES, visto que CC e a aplicação isolada de gesso agrícola não diferiram dos demais tratamentos. Entre os corretivos, a aplicação de gesso reduziu a disponibilidade Mg^{2+} apenas quando aplicado conjuntamente com o CC e a ES (Tabela 5.6).

Tais resultados observados para o Mg^{2+} apresentam uma relação como K^+ desta camada. Como reportado, a aplicação conjunta de CRM e gesso e ES e gesso reduziu a disponibilidade de Mg^{2+} e foi indiferente para o CC e a ES associados ao gesso. Todavia, a aplicação isolada de gesso e desse associado ao CRM reduziu a disponibilidade de K^+ no solo, mas foi indiferente para a aplicação associada com CC e ES (Tabela 5.6). Deste modo, estes resultados são importantes pois demonstram que entre os corretivos pode haver uma preferência de lixiviação entre Mg^{2+} e K^+ no solo pela aplicação de gesso agrícola. Também se ressalta que na camada de 0,05 – 0,10 m apenas verificou-se o menor teor de K^+ no solo pela aplicação de CC isolado em relação aos demais corretivos (Tabela 5.6).

Na camada de 0,10–0,20 m, os teores de Ca^{2+} decorrentes da aplicação isolada de CRM e ES foram similares e superiores ao tratamento controle, enquanto que o CC não diferiu dos demais tratamentos (Tabela 5.6). Com a aplicação de gesso, observou-se a seguinte ordem na disponibilidade do nutriente: controle (gesso isolado) > ES = CC > CRM. A aplicação de gesso também reduziu a disponibilidade de Ca^{2+} nessa camada quando esse foi associado ao CRM em relação a aplicação isolada do CRM, mas aumentou os teores do nutriente quando associado ao CC e em relação ao tratamento controle (Tabela 5.6).

Quanto ao teor de Mg^{2+} , pode-se observar que ele não foi tão influenciado pelos tratamentos quanto o teor de Ca^{2+} na camada de 0,10–0,20 m. Sem a aplicação do gesso, a disponibilidade de Mg^{2+} nessa camada com CC e ES foram similares ao tratamento controle e inferiores ao CRM (Tabela 5.6). Enquanto que, com a aplicação de gesso não houve distinção entre os corretivos da acidez sobre o teor de Mg^{2+} no solo. Nesta camada, um resultado que deve ser destacado foi que o teor de Mg^{2+} pela aplicação isolada de gesso não diferiu do

tratamento controle, assim como a aplicação associada de CC com gesso em relação à aplicação isolada do CC. Mas, tanto para o CRM quanto para a ES a aplicação de gesso reduziu a disponibilidade do nutriente no solo em relação ao uso isolado desses corretivos (Tabela 5.6).

Nessa camada, o teor de K^+ no solo pela aplicação isolada de CC novamente foi inferior ao CRM e ao tratamento controle, como ocorrido na camada subjacente (Tabela 5.6). Contudo, a diferença observada na camada de 0,10–0,20 m, foi que o teor de K^+ no solo pela aplicação isolada da ES também foi inferior ao CRM e ao tratamento controle, e similar ao CC. Também, com a aplicação de gesso, CRM foi o corretivo que proporcionou o maior teor de K^+ no solo, superior aos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si. Entre os corretivos, novamente observou-se que aplicação isolada de gesso aumentou o teor de K^+ no solo em relação ao tratamento controle, resultado também observado para a aplicação de gesso conjuntamente com a ES em relação a ES isolada (Tabela 5.6).

Quanto a camada de 0,20–0,40 m, a ordem entre os teores de Ca^{2+} no solo entre os corretivos, sem a aplicação de gesso, foi $ES > controle > CC > CRM$ (Tabela 5.6). Todavia, ressalta-se que tais resultados são controversos, completamente distintos dos observados na avaliação do solo aos 7 meses, principalmente para o CRM (Tabela 5.5.). Sendo assim, ainda não é possível compreender o mecanismo envolvido com tais resultados.

Com a aplicação de gesso, o teor de Ca^{2+} nessa camada obedeceu a ordem controle (gesso isolado) = $CC > CRM > ES$ (Tabela 5.6). E, entre os corretivos, a aplicação de gesso aumentou a disponibilidade de Ca^{2+} no solo quando o condicionador foi aplicado isoladamente e associado ao CC e ao CRM, mas reduziu a disponibilidade do nutriente quando associado à ES (Tabela 5.6).

O teor de Mg^{2+} dessa camada de solo foi influenciado pelos corretivos apenas quando esses foram aplicados em associação ao gesso agrícola (Tabela 5.6). Nesse caso, o teor de Mg^{2+} no solo com a aplicação de CC e gesso foi superior ao gesso aplicado isolado, que foi superior a ES com gesso, enquanto que o CRM com gesso se assemelhou ao gesso aplicado isolado e a ES com gesso, porém foi inferior ao CC com gesso. Entre os corretivos, a aplicação de gesso associada a ES novamente reduziu a disponibilidade de Mg^{2+} quando comparada a aplicação isolada da ES, conforme também observado em todas as camadas superiores. No entanto, quanto associado ao CC, aplicação do condicionador elevou o teor de Mg^{2+} no solo (Tabela 5.6).

O teor de K^+ da camada de 0,20–0,40 m, de modo geral, reduziu com a aplicação de gesso. E, entre os corretivos o CC foi o tratamento que proporcionou menores teores de K^+ no

solo, inferiores ao tratamento controle; enquanto que os corretivos CRM e ES foram similares ao demais tratamentos (Tabela 5.6).

Na camada de 0,40–0,60 m, tanto o teor de Ca^{2+} quanto de Mg^{2+} aumentaram com a aplicação de gesso, independentemente dos corretivos da acidez (Tabela 5.6). Quanto ao Mg^{2+} , também foi verificado que, independente da aplicação de gesso, a disponibilidade do nutriente pela aplicação CRM foi superior à ES, enquanto que CC e o tratamento controle foram similares aos entre si e ao CRM e à ES (Tabela 5.6).

Por sua vez, finalizando a análise dos cátions básicos trocáveis do solo aos 15 meses, não houve distinção entre os corretivos para o teor de K^+ no solo, quando esses foram aplicados isolados (Tabela 5.6). Contudo, associados ao gesso agrícola, o teor do K^+ no solo decorrente da ES foi superior ao da aplicação isolada de gesso, porém ambos os calcários se assemelharam aos demais tratamentos. Entre os corretivos, a aplicação isolada de gesso em relação ao tratamento controle demonstram que a lixiviação de K^+ no solo foi e tão intensa que o íon foi lixiviado para camadas abaixo de 0,60 m de profundidade. Também, pode-se observar que em relação a ES aplicada isoladamente, a sua associação com o gesso agrícola aumentou o teor de K^+ na camada mais profunda do solo (Tabela 5.6).

Os resultados mais imediatos e expressivos do CC sobre os teores de Ca^{2+} , principalmente, e Mg^{2+} devem-se a maior presença de CaO na composição do corretivo (Tabela 5.1), demonstrando assim sua potencialidade em elevar os teores do nutriente no solo, conforme amplamente abordado em literatura (ALCARDE, 1983, ALCARDE; VELOSO et al., 1992; RODELLA, 1996; BOLAN et al., 2003). Do mesmo modo, a persistência dos maiores efeitos do CRM, tanto quando aplicado isolado ou quando associado ao gesso agrícola, sobre os teores de Mg^{2+} são devidos a maior composição de MgO no corretivo (Tabela 5.1)

Os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas de 0,05–0,10 até 0,40–0,60 m pela aplicação isolada do gesso agrícola em relação ao tratamento controle, tanto aos 7 quanto aos 15 meses após aplicação, são completamente preditivas, uma vez que ocorreu a adição de cálcio com a solubilização do gesso na superfície do solo e a lixiviação de Ca^{2+} e Mg^{2+} da camada de 0–0,05 m (Tabelas 5.5 e 5.6). Tais resultados são amplamente reportados em literatura, e conforme supracitado, são decorrentes das reações de troca dos pares iônicos CaSO_4^0 ou MgSO_4^0 com o Al^{3+} , formando o complexo AlSO_4^+ que reduz acidez trocável do solo em profundidade (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES et al., 2011a, 2011b, 2011c; COSTA; CRUSCIOL, 2016)

Quanto a intensa lixiviação de Mg^{2+} nas camadas de 0–0,05 até 0,10–0,20 m pela aplicação conjunta de gesso agrícola à ES, em ambos os períodos de avaliação (Tabelas 5.5 e

5.6), tais resultados podem estar relacionados a baixa concentração do elemento Mg em sua composição (Tabela 5.1). Ressalta-se que resultados similares foram observados por Crusciol et al. (2016), que também estudaram o efeito da aplicação associada de gesso agrícola (3 Mg ha⁻¹) com calcário de rocha moída (2,1 Mg ha⁻¹) e escória de siderurgia (2,2 Mg ha⁻¹), sobre os teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ do solo aos três e 12 meses após aplicação dos tratamentos. Deste modo, evidencia-se a ES tem maior suscetibilidade a lixiviação de Mg²⁺ no solo com a aplicação de gesso agrícola.

5.2.3 Carbono orgânico lábil e “total”

Tanto aos 7 quanto aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, o conteúdo de carbono orgânico lábil, oxidado por permanganato de potássio, e “total”¹ do solo não foram influenciados pelos corretivos da acidez do solo ou pelo gesso agrícola, tanto isoladamente quanto pela interação, em nenhuma camada de solo (Figuras 5.6 e 5.7). Apenas, notoriamente, pode-se observar a redução dos teores de carbono orgânico no solo em profundidade, conforme amplamente reportado.

Paradelo et al. (2015) discorrem sobre a complexidade de se estudar os reais efeitos da calagem sobre a dinâmica do carbono (C) no solo, devido à complexidade de processos que podem ocorrer que ao mesmo tempo podem reduzir (aumento atividade microbiana por exemplo) como aumentar (proteção química em agregados pela formação de pontes catiônicas) a concentração do elemento. Estes autores também destacam a importância de estudos referentes a dinâmica do C no solo com a aplicação de outros corretivos da acidez, além do calcário.

Complementarmente, Aye et al. (2016) destacam que a dinâmica do C no solo pela calagem (calcário nas doses de 0, 3, 12,5 e 25 Mg ha⁻¹) é fortemente influenciada pelas adições iniciais de C ao solo (5 anos após a calagem), que seguidas a calagem devem ter capacidade de compensar as perdas de C pelo aumento na mineralização e na respiração do solo decorrentes do aumento do pH.

¹Os valores aqui apresentados não se referem ao conteúdo de carbono orgânico total do solo, uma vez que foram determinados pelo método colorimétrico e não através da oxidação seca, com o uso de um analisador elementar de C e N (TIVET et al., 2012).

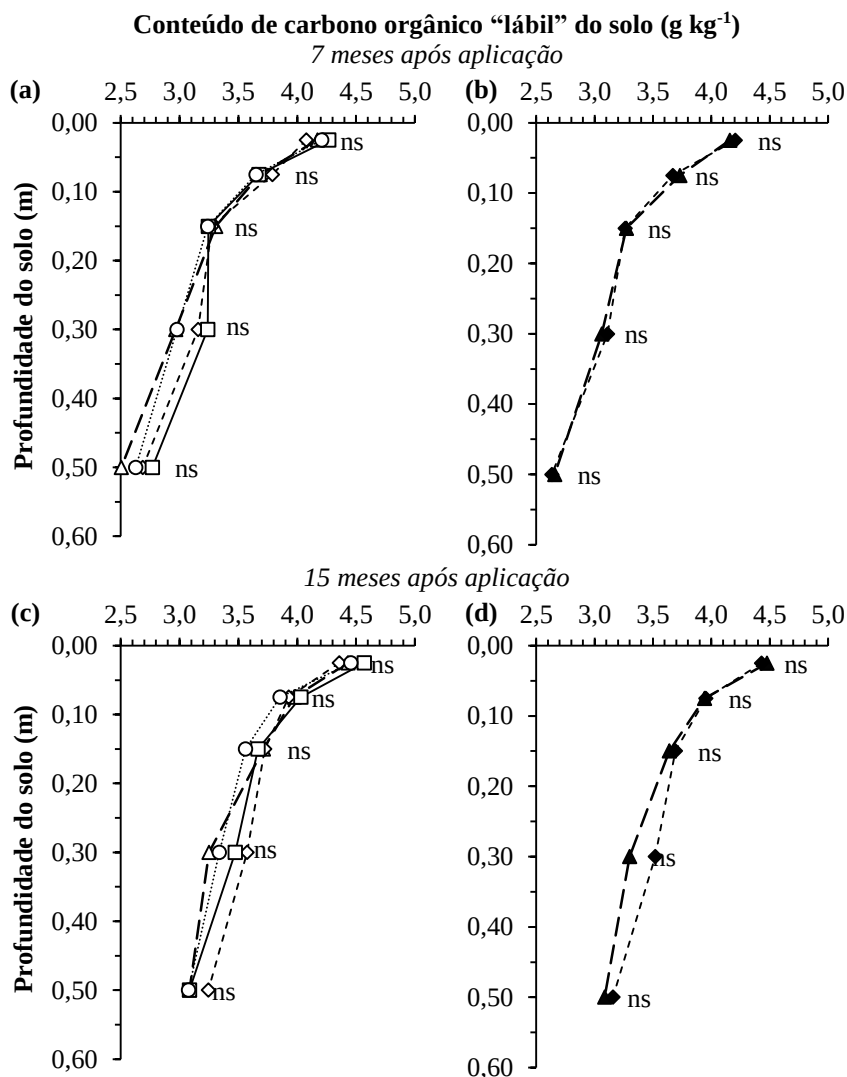


Figura 5.6 – Conteúdo de carbono orgânico “lábil” do solo (g kg^{-1}), oxidado por permanganato de potássio, em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d), aos 7 (acima) e 15 meses (abaixo) após aplicação dos tratamentos. ^{ns}Não significativo ao teste F ($p < 0,05$).

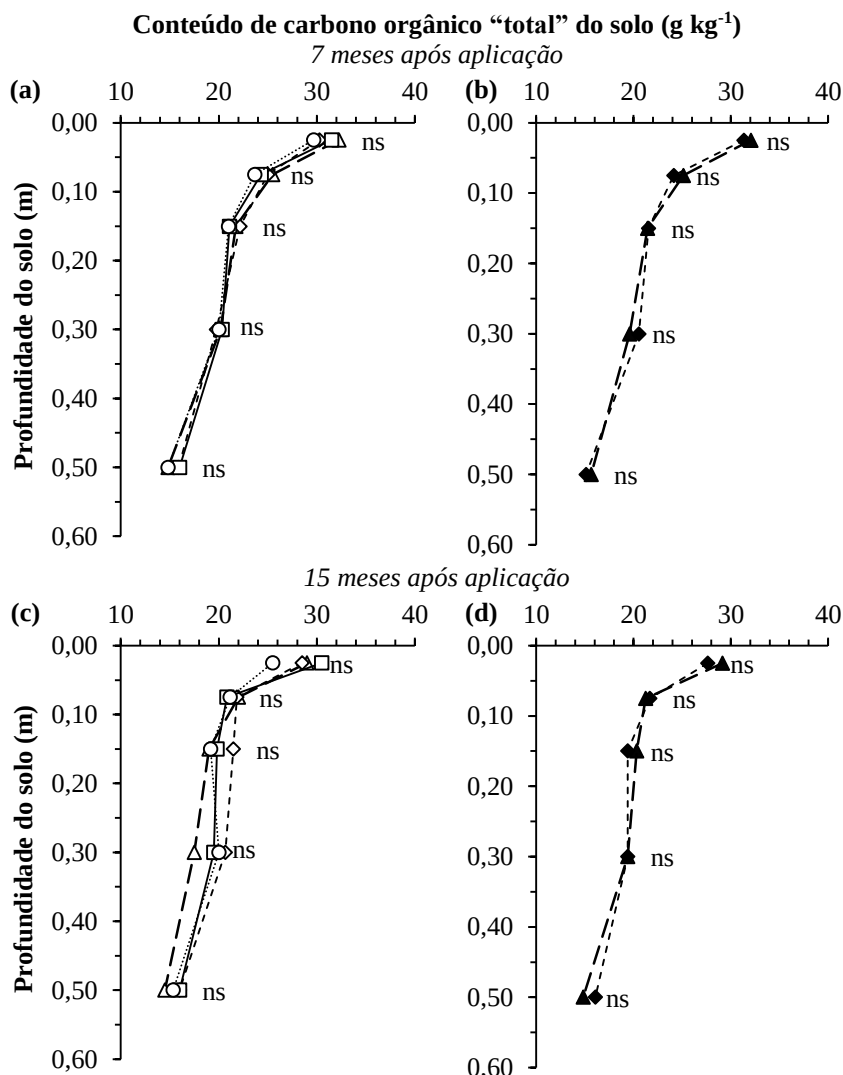


Figura 5.7 – Conteúdo de carbono orgânico “total” do solo (g kg^{-1}) em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d), aos 7 (acima) e 15 meses (abaixo) após aplicação dos tratamentos. ^{ns}Não significativo ao teste F ($p < 0,05$).

Assim sendo, uma possível explicação para a ausência de efeitos, tanto sobre o carbono lábil quanto o “total”, é o pouco tempo decorrido entre a aplicação e as avaliações (7 e 15 meses). Tais resultados corroboram com o observado por Briedis et al. (2012a, 2012b, 2012 c), que avaliaram a dinâmica do C após 15 anos da aplicação e reaplicação de CRM em um Latossolo Vermelho distrófico (465 g kg^{-1} de argila) sob SPD em Ponta Grossa; Inagaki et al. (2016; 2017) que avaliaram a dinâmica do C aos efeitos da aplicação de CRM associado a doses de gesso agrícola, também após 15 anos de aplicação, em outro Latossolo Vermelho distrófico (610 g kg^{-1} de argila) sob SPD de Ponta Grossa; e Carneis Filho et al. (2017; 2018) para Latossolos de Botucatu, também sob SPD, também com avaliações de longo prazo, referindo-se a aplicação isolada de calcário, de gesso e a combinação desses tratamentos.

5.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

5.3.1 Agregação e estabilidade de agregados

Aos 7 e aos 15 meses foram verificados apenas efeitos isolados dos corretivos da acidez e do gesso agrícola sobre o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados do solo (Tabela 5.7). Contudo, deve-se ressaltar que aos 7 meses os efeitos foram restritos a camada de 0–0,05 m, enquanto que aos 15 meses as alterações foram percebidas nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m (Tabela 5.7), confirmando assim que os efeitos dos corretivos e do gesso agrícola são dependentes do tempo reação no solo.

Tabela 5.7 – Efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola (sem e com) sobre o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP, mm), em camadas de solo, aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Camadas de solo	Corretivos da acidez				Gesso agrícola	
	Controle	Calcário de rocha moída	Escória de siderurgia	Calcário calcinado	Sem	Com
<i>7 meses após aplicação</i>						
0–0,05 m	9,51 a	9,58 a	8,60 b	9,69 a	9,62 A	9,07 B
0,05–0,10 m	8,42 a	9,35 a	8,43 a	8,26 a	8,38 A	8,86 A
0,10–0,20 m	8,63 a	9,27 a	9,01 a	8,41 a	8,80 A	8,87 A
<i>15 meses após aplicação</i>						
0–0,05 m	6,86 b	7,82 a	7,20 ab	7,70 a	7,19 B	7,60 A
0,05–0,10 m	7,08 b	7,03 b	7,45 ab	7,77 a	7,12 B	7,55 A
0,10–0,20 m	6,21 b	6,34 ab	6,07 b	7,01 a	6,59 A	6,23 A

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez e maiúscula para aplicação de gesso agrícola não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Aos 7 meses após aplicação, a ES reduziu o DMP em relação aos calcários e ao tratamento controle, os quais não diferiram entre si. Também, a aplicação de gesso agrícola reduziu o DMP (Tabela 5.7). Realizada a análise de correlação entre o DMP com os atributos químicos do solo (Tabela 5.8), verificou-se a dependência do teor do DMP em relação ao teor de Mg^{2+} no solo, embora seja uma correlação positiva moderada (GUJARATI, 2006). Deste modo, conforme demonstrado, a intensa lixiviação de Mg^{2+} na camada de 0–0,05 m, no tratamento ES com a aplicação de gesso, e mesmo a baixa disponibilidade do nutriente com a aplicação isolada desse corretivo (Tabela 5.5), são as explicações para a redução do DMP, tanto referindo-se aos efeitos isolados do gesso quanto aos efeitos da ES em relação aos demais corretivos (Tabela 5.7).

Tabela 5.8 – Correlações lineares (Pearson) entre os atributos relacionados com a agregação e estabilidade de agregados e os atributos químicos do solo.

Variáveis	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	COXP	CO
<i>7 meses após aplicação – camada de 0–0,05 m</i>								
DMP	-0,06	0,11	0,14	-0,28	0,47*	0,05	-0,22	-0,16
MAgg grandes	-0,04	0,09	0,10	-0,30	0,46*	0,06	-0,21	-0,23
MAgg médios	0,04	-0,07	-0,05	0,27	-0,29	-0,04	0,17	0,27
MAgg pequenos	0,01	-0,05	-0,12	0,23	-0,45*	-0,02	0,27	0,19
Microagregados	0,03	-0,08	-0,08	0,12	-0,37	-0,13	-0,13	-0,12
<i>15 meses após aplicação – camada de 0–0,05 m</i>								
DMP	0,59**	-0,61**	-0,71**	0,34	0,36	0,15	0,03	-0,14
MAgg grandes	0,56**	-0,59**	-0,62**	0,27	0,33	0,14	0,02	-0,12
MAgg médios	-0,44*	0,50**	0,35	-0,17	-0,15	-0,10	-0,08	0,07
MAgg pequenos	-0,44*	0,48*	0,66**	-0,26	-0,35	-0,13	0,09	0,15
Microagregados	-0,46*	0,41*	0,62**	-0,25	-0,52**	-0,10	-0,11	0,02
<i>15 meses após aplicação – camada de 0,05–0,10 m</i>								
DMP	0,15	-0,13	-0,02	-0,02	0,02	-0,42*	0,15	-0,13
MAgg grandes	0,20	-0,15	-0,01	0,04	0,03	-0,36	0,38	-0,14
MAgg médios	-0,23	0,16	0,02	-0,10	-0,17	-0,01	-0,43*	-0,01
MAgg pequenos	-0,04	0,03	-0,05	0,07	0,17	0,56**	-0,13	0,35
Microagregados	-0,06	0,08	0,13	-0,10	-0,04	0,14	0,07	-0,43*
<i>15 meses após aplicação – camada de 0,10–0,20 m</i>								
DMP	0,16	-0,28	-0,31	-0,12	0,28	-0,02	-0,10	0,15
MAgg grandes	0,14	-0,26	-0,29	-0,15	0,22	0,09	-0,20	0,06
MAgg médios	-0,02	0,04	0,03	0,04	0,05	0,21	0,38	0,27
MAgg pequenos	-0,12	0,23	0,25	0,12	-0,24	-0,01	-0,11	-0,27
Microagregados	-0,14	0,16	0,29	0,04	-0,30	-0,04	0,17	-0,10

DMP = diâmetro médio ponderado, MAgg = macroagregados; pH = acidez ativa em CaCl₂; H+Al = acidez potencial (cmol_c dm⁻³); Al³⁺ = acidez trocável ((cmol_c dm⁻³); Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = teores de cálcio, magnésio e potássio trocáveis (cmol_c dm⁻³), respectivamente; COXP = carbono lábil, oxidado por permanganato de potássio; CO = carbono orgânico “total”, determinado por colorimetria. * e **Significativo aos níveis de 5 % ($p < 0,05$) e 1 % ($p < 0,01$) de probabilidade, respectivamente.

Similarmente ao observado para o DMP aos 7 meses após aplicação, a proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes = 8–19 mm) também foi influenciada isoladamente pelos corretivos da acidez e pelo gesso agrícola, apenas na camada de 0–0,05 m (Figuras 5.8 e 5.9). Tal classe de agregados apresentou o mesmo comportamento que o DMP da camada mais superficial do solo, ES diferindo dos demais tratamentos com a menor proporção de MAgg grandes (Figura 5.8a), assim como a aplicação de gesso também reduziu tal proporção (Figura 5.9). Do mesmo modo, verificou-se uma correlação positiva moderada entre o teor de Mg²⁺ com a proporção de MAgg grandes (Tabela 5.8).

Contudo, a redução de MAgg grandes com a aplicação de ES aumentou a proporção de macroagregados médios (MAgg médios = 2–8 mm) em relação aos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si (Figura 5.8a). Por outro lado, não houve distinção da aplicação de gesso sobre esta classe de agregados (Figura 5.9) e correlações com os atributos químicos do solo (Tabela 5.8).

Referindo-se as classes de macroagregados pequenos (MAgg pequenos = 0,25–2 mm) e microagregados, verificou-se que essas não foram afetadas pela aplicação dos corretivos na

camada de 0–0,05 m (Figura 5.8a). Com isso, pode-se inferir que inicialmente os efeitos da correção da acidez do solo, com diferentes corretivos aplicados na superfície, são limitados a macroestrutura da camada mais superficial do solo.

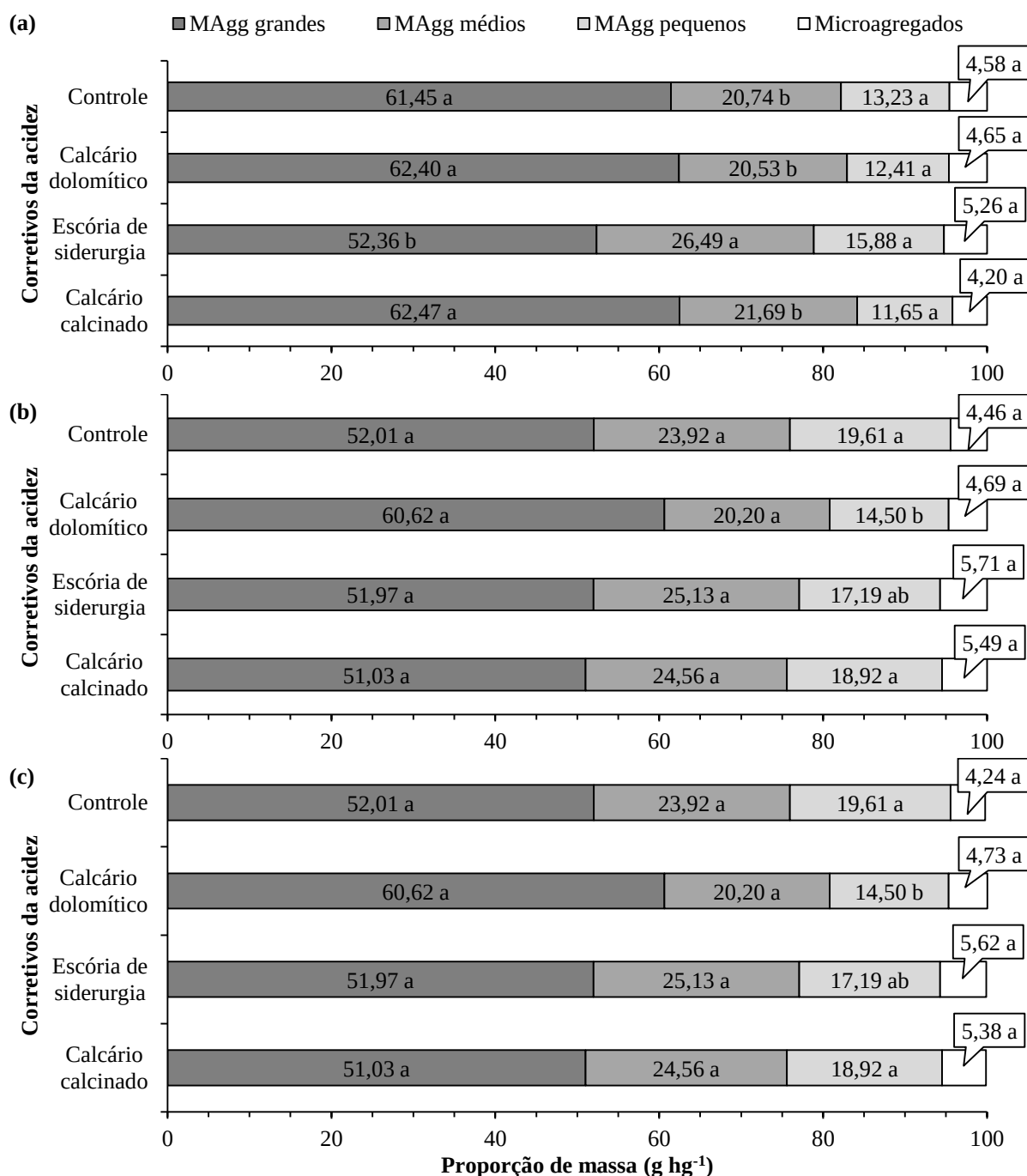


Figura 5.8 – Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05 (a), 0,05–0,10 (b) e 0,10–0,20 m (c) aos 7 meses após a aplicação de corretivos da acidez do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

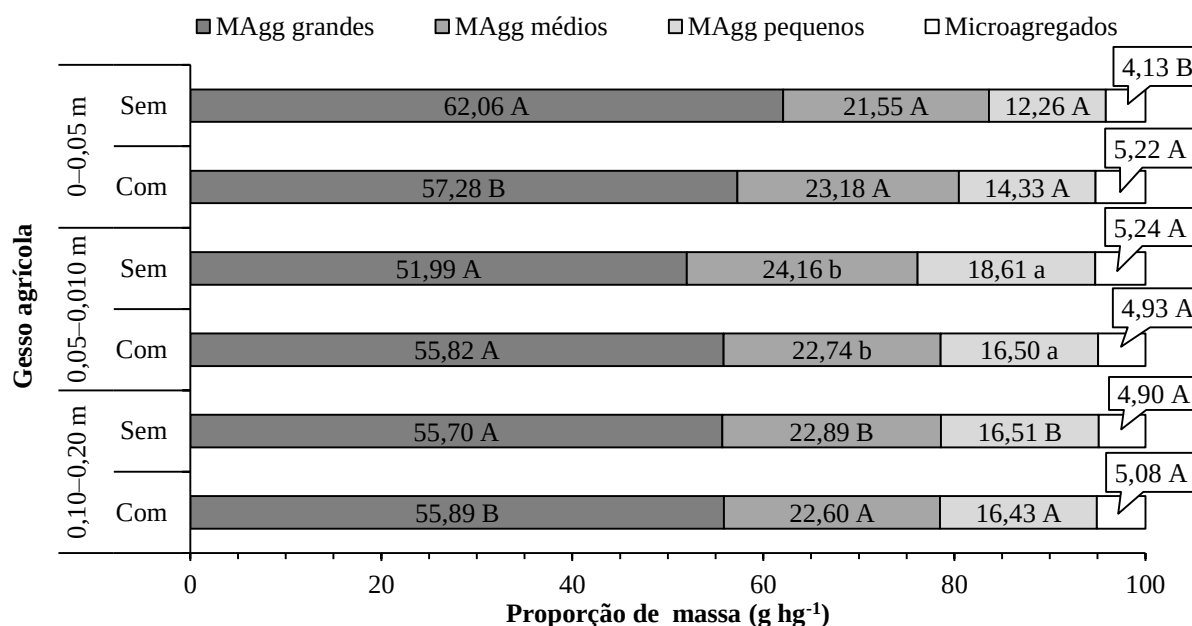


Figura 5.9 – Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m aos 7 meses após a aplicação de gesso agrícola. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Todavia, a classe de microagregados na camada de 0–0,05 m foi influenciada pela aplicação de gesso agrícola (Figura 5.9). Porém, não foram observadas correlações significativas entre essa classe de agregados com os atributos químicos do solo (Tabela 5.8).

Aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, o DMP da camada de 0–0,05 m com a aplicação de ambos os calcários foi similar entre si e superior ao tratamento controle, enquanto que com a aplicação de ES, o DMP não diferiu dos demais tratamentos (Tabela 5.7). Quanto ao gesso agrícola, diferentemente do ocorrido aos 7 meses, houve aumento no DMP com a aplicação do condicionador aos 15 meses (Tabela 5.7). Neste caso, verificou-se que as alterações sobre o DMP aos 15 meses foram mediadas principalmente pelas alterações na acidez ativa (correlação positiva moderada), potencial (correlação negativa moderada) e trocável (correlação negativa forte), visto que não foram observadas correlações significativas entre o DMP com os cátions básicos trocáveis e os teores de carbono, tanto lábil quanto “total” (Tabela 5.8).

Quanto a proporção de MAgg grandes na camada de 0–0,05 m aos 15 meses (Figura 5.10a), observou-se a mesma distinção entre os corretivos para o DMP e as mesmas correlações

com o pH, teor de H^+Al e Al^{3+} (Tabela 5.8). Contudo, não houve distinção entre a aplicação de gesso agrícola para essa classe de agregados nesse período de avaliação (Figura 5.11).

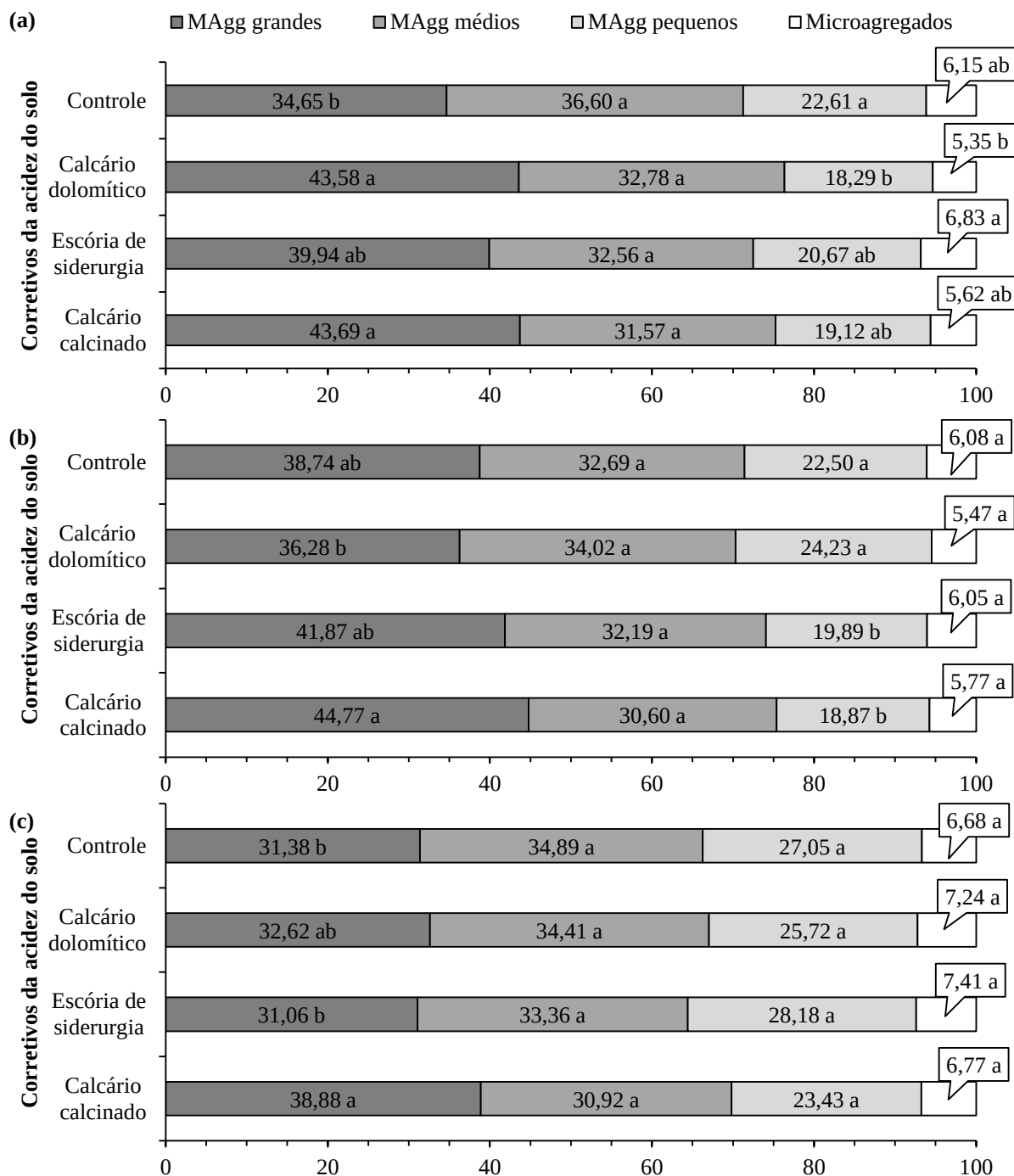


Figura 5.10 – Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05 (a), 0,05–0,10 (b) e 0,10–0,20 m (c) aos 15 meses após a aplicação de corretivos da acidez do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

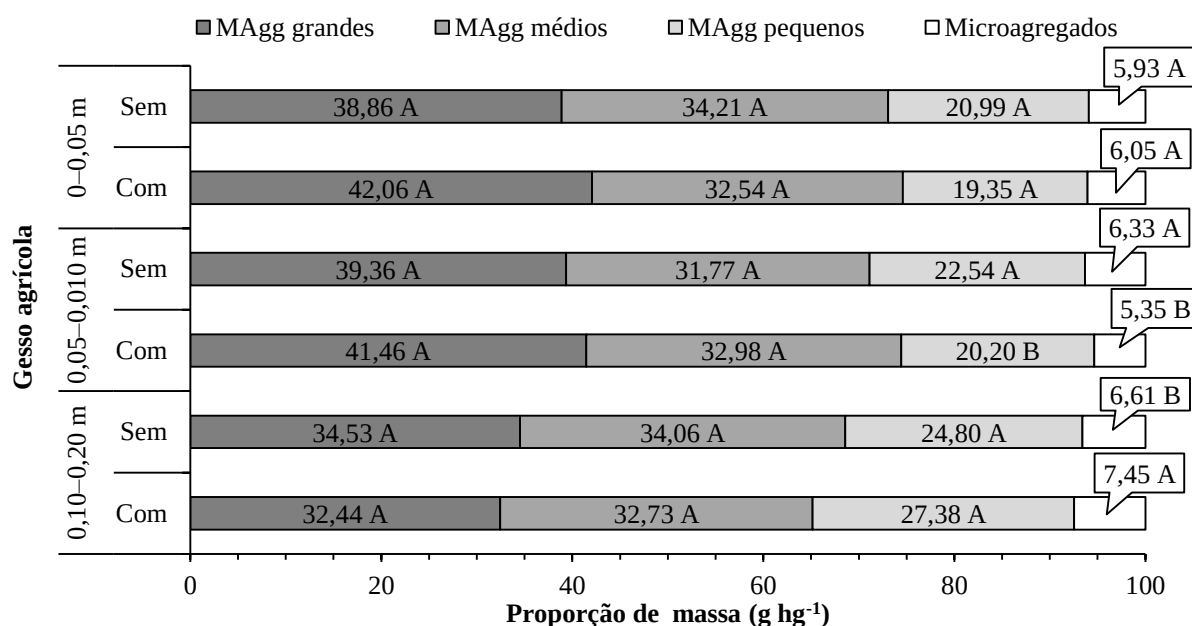


Figura 5.11 – Proporção de macroagregados grandes (MAgg grandes: 8–19 mm), médios (MAgg médios: 2–8 mm) e pequenos (MAgg pequenos: 0,25–2 mm) e microagregados (0,053–0,25 mm), obtidos por tamisamento úmido, das camadas de 0–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m aos 15 meses após a aplicação de gesso agrícola. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de uma mesma classe de agregados não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A classe de MAgg médios da camada de 0–0,05 m aos 15 meses não foi influenciada nem pelos corretivos da acidez nem pelo gesso agrícola, diferentemente da classe de MAgg pequenos, que foi influenciada apenas pelos corretivos da acidez (Figuras 5.10a e 5.11). Neste caso, notoriamente observa-se que aplicação de CRM, que havia aumentado a proporção de MAgg grandes, reduziu a proporção MAgg pequenos na mesma intensidade em relação ao tratamento controle, enquanto que CC e ES não diferiram dos demais tratamentos (Figura 5.10a). Assim sendo, verificou-se que quanto menor a acidez ativa e maior a acidez potencial e trocável, maior a proporção de MAgg pequenos, justamente o oposto do observado para os MAgg grandes e médios (Tabela 5.8).

Os microagregados da camada de 0–0,05 m também foram influenciados apenas pelos corretivos da acidez. Neste caso, CRM apresentou a menor proporção de microagregados em relação à ES, enquanto que o tratamento controle e o CC não diferiram dos demais tratamentos (Figura 5.10a). As correlações entre a proporção de microagregados com os componentes da acidez do solo foram similares as observadas para os MAgg pequenos. Contudo, para os microagregados também se observou que a redução dos teores de Mg^{2+} aumentaram a desagregação da macroestrutura do solo, isto é, aumentaram a proporção de microagregados (Tabela 5.8).

Na camada de 0,05–0,10 m, o DMP com a aplicação de CC foi superior ao CRM e o tratamento controle, os quais não diferiram entre si, enquanto que a ES foi similar aos demais tratamentos. Assim como observado na camada subjacente, a aplicação de gesso agrícola aumentou o DMP do solo (Tabela 5.7). Tais resultados do DMP apresentaram uma correlação distinta do observado (Tabela 5.8). Neste caso, não foram verificadas correlações significativas entre o DMP da camada com seus componentes da acidez, teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , carbono lábil e “total”. Porém, os menores teores de K^+ nessa camada, com a aplicação de CC e de gesso agrícola (Tabela 5.6), foram as explicações para o maior DMP desses tratamentos (Tabela 5.8).

A proporção de MAgg grandes apresentou comportamento similar ao DMP na camada de 0–0,05 m. Neste caso, a distinção da proporção de MAgg grandes em relação ao DMP foi que o tratamento controle não diferiu do CC (Figura 5.10b) e que a aplicação de gesso agrícola reduziu a proporção da maior classe de agregados (Figura 5.11). Contudo, para tal classe de agregados não foram observadas correlações significativas com nenhum atributo químico do solo (Tabela 5.8).

Quanto a proporção de MAgg médio na camada de 0,05–0,10 m, assim como observado para as camadas de 0–0,05 e 0,10–0,20 m, não houve influência da aplicação dos corretivos da acidez ou do gesso agrícola (Figuras 5.10 e 5.11). Porém, a redução de carbono lábil (COXP) na camada de 0,05–0,10 m tendeu a aumentar a proporção de MAgg médio (Tabela 5.8).

Também na camada de 0,05–0,10 m, a proporção de MAgg pequenos com a aplicação de CRM foi superior ao CC e à ES, mas similar ao tratamento controle, como uma consequência direta da redução da proporção de MAgg grandes proporcionada por esse corretivo (Figura 5.10b). Enquanto que, a aplicação de gesso agrícola reduziu a proporção de MAgg pequenos (Figura 5.11). Assim, para essa classe de agregados, em oposição ao observado para o DMP, o maior teor de K^+ no solo decorrente da aplicação de CRM foi o responsável por aumentar a proporção de MAgg pequenos (Tabela 5.8).

Por sua vez, a proporção de microagregados dessa camada de solo não foi influenciada pelos corretivos da acidez (Figura 5.10b), mas a aplicação de gesso agrícola reduziu a proporção de microagregados, como também ocorreu para o MAgg pequenos (Figura 5.11). Deste modo, isoladamente pode-se verificar que o gesso agrícola favorece a agregação do solo, formando agregados maiores. A única correlação observada para os microagregados na camada de 0,05–0,10 m foi com relação ao carbono orgânico “total”, na qual a redução do conteúdo de carbono aumentou a desagregação do solo, favorecendo o aumento de microagregados (Tabela 5.8).

Na camada de 0,10 – 0,20 m o DMP e, apenas, os MAgg grandes foram influenciados pelos corretivos da acidez. Neste caso, novamente o CC foi o corretivo que proporcionou o

maior DMP (Tabela 5.7) e maior proporção de MAgg grandes (Figura 5.10c) em relação ao tratamento controle e a ES, enquanto que o CRM apresentou resultados similares aos demais tratamentos. Entretanto, não houve correlações significativas entre o DMP, e todas as proporções de agregados, com os atributos químicos nessa camada do solo (Tabela 5.8).

Um aspecto importante a ser destacado é que aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, houve uma leve redução do DMP de todos os tratamentos em todas as camadas de solo, em relação aos 7 meses (Tabela 5.7). Esse aspecto não está diretamente relacionado aos tratamentos, mas sim a rotação de culturas no sistema. A avaliação aos 7 meses foi realizada após a colheita da cultura do milho, semeada com espaçamento de 0,90 m. enquanto que a avaliação aos 15 meses foi realizada após a colheita do trigo, semeado com espaçamento de 0,20 m (Tabela 4.2). Assim, atribui-se essa redução geral no DMP ao cultivo de trigo, pois considerando que o revolvimento do solo tende a romper os macroagregados e que com o cultivo de trigo há maior mobilização das camadas mais superficiais do solo em relação ao cultivo de milho, mesmo que em SPD (MUNKHOLM et al., 2013; CONGREVES, et al., 2015; BORGES et al. 2016).

Por outro lado, referindo-se aos efeitos dos tratamentos, em literatura é reportado que em solos tropicais de carga variável há o aumento da dispersão de argilas, que tende a reduzir o DMP do solo, devido ao aumento do pH pela calagem (CASTRO FILHO; LOGAN, 1991; ROTH; PAVAN, 1991). O aumento no pH do solo de cargas variáveis gera aumento de cargas negativas no solo (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008), e com o predomínio de cargas negativas no solo ocorre a dispersão de argilas (SUMNER, 1992; SIX et al., 2004). Todavia, estes efeitos são limitados a um curto espaço de tempo após a aplicação do corretivo. Com o passar do tempo, pode ocorrer nova floculação das partículas, pois a alta concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} , a precipitação de hidróxidos amorfos de Al carregados positivamente $[\text{Al}(\text{OH})^{2+}]$ e a alta força iônica da solução do solo, proporcionados pela calagem, podem comprimir a dupla camada difusa, resultando na diminuição da repulsão entre as partículas de argila, o que promove aumento da floculação e da estabilidade da estrutura do solo (ROTH; PAVAN, 1991; BALDOCK et al., 1994; CHAN; HEENAN, 1998; HAYNES; NAIDU, 1998; ALBUQUERQUE et al., 2003; SIX et al., 2004; BRIEDIS et al., 2012).

Ainda, o papel do Ca^{2+} é amplamente discutido em literatura quanto ao seu potencial em favorecer a agregação do solo (HAYNES; NAIDU, 1998; BRONICK; LAL, 2005), principalmente quando associado aos conteúdos de carbono orgânico, pela formação de pontes catiônicas entre partículas de argila e entre MAgg grandes (BRIEDIS et al., 2012a).

Contudo, poucos são os estudos em solos tropicais de cargas variáveis que se referem aos efeitos específicos do Mg^{2+} sobre a agregação do solo. Dontsova e Norton (2002) indicam que o Mg^{2+} é menos eficiente que Ca^{2+} em flocular argilas e, conseqüentemente, em melhorar a agregação do solo. Tais autores atribuem tal raciocínio às diferenças dos íons, como o menor raio iônico do Mg^{2+} (0,65 Å) e, conseqüentemente, maior raio hidratado em relação ao Ca^{2+} (0,99 Å), que tende a alargar a dupla camada difusa, dificultando a floculação de partículas. Também, como consequência do maior raio hidratado do Mg^{2+} em relação ao Ca^{2+} , as pontes catiônicas entre o Mg^{2+} com complexos orgânicos, principalmente ácidos húmicos, tendem a ser mediados por complexos de esfera-externa mais fracos. Assim, com a fraca ligação do ácido húmico com partículas de argila, o processo hierárquico de formação de agregados é comprometido, principalmente no que se refere ao revestimento de partículas de areia por microagregados de argila (FALSONE et al., 2007; 2016).

Analogamente, Auler et al. (2017a) também observaram que existe uma relação estreita entre o teor de Mg^{2+} e de Ca^{2+} do solo com o grau de floculação. Tais autores observaram uma forte correlação negativa entre o teor desses íons com o grau de floculação para um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico (479 g kg⁻¹ de argila) com elevada acidez (79% de saturação por Al na camada de 0–0,20 m).

Entretanto, no presente trabalho, nos primeiros meses após aplicação dos tratamentos, o aumento nos teores de Mg^{2+} repercutiram no aumento do DMP, como consequência do aumento principalmente da proporção de MAgg grandes e a redução de MAgg pequenos (Tabela 5.8), contrariando a literatura científica sobre os efeitos desse elemento no processo de agregação.

Porém, com o maior tempo de reação dos corretivos da acidez e do gesso agrícola no solo, os efeitos do Mg^{2+} em controlar a agregação do solo deixaram de ser expressivos, limitando-se apenas a classe de microagregados na camada de 0–0,05 m; de tal modo que o processo passou a ter efeitos dos componentes da acidez do solo, nesta camada mais superficial, e do teor de K⁺ e de carbono orgânico na camada de 0,05–0,10 m (Tabela 5.8).

Neste caso, aos 15 meses após avaliação os maiores teores de Mg^{2+} aumentaram a proporção de microagregados, o que repercutiu na redução do DMP, corroborando com o comumente reportado em literatura. Assim, os mecanismos supracitados passaram a ocorrer no solo com o passar do tempo. Por outro lado, evidencia-se que ainda são necessários estudos envolvendo a química coloidal do Mg^{2+} no solo decorrente dos corretivos da acidez sobre a sua agregação, nos estágios iniciais das reações do solo.

Estreitas relações entre os íons Mg^{2+} e Al^{3+} pela aplicação dos tratamentos, principalmente no que se refere ao gesso agrícola, foram observadas (Tabelas 5.3 a 5.6).

Referindo-se aos microagregados da camada de 0–0,05 m aos 15 meses após aplicação dos tratamentos, pode-se verificar que tais relações influenciaram inclusive a agregação do solo. No caso, a substituição do Al^{3+} por Mg^{2+} no complexo de troca aumentou a proporção de microagregados (Tabela 5.8), assim como a elevação do pH e a redução dos teores de Al^{3+} reduziram a proporção de MAgg e aumentaram de MAgg médios e pequenos, o que culminou na redução do DMP (Tabela 5.8). Tais resultados corroboram com encontrado na literatura, demonstrando que os efeitos da elevação das cargas negativas na dispersão do solo e a alta valência o Al^{3+} , o torna mais resistente a dispersão em relação ao que ocorre com cátions divalentes, como o Mg^{2+} (RUSSEL, 1973; RENGASAMY et al., 1986; AULER et al., 2017a).

O aumento de MAgg pequenos, com consequente redução do DMP, pelo aumento dos teores de K^+ na camada de 0,05–0,10 m (Tabela 5.8), é um reflexo direto do efeito dispersivo do K^+ no solo, similarmente ao reportado para o sódio (Na^+) porém em menor intensidade, por se tratarem de cátions monovalentes (RENGASAMY; MARCHUK, 2011; MARCHUK; RENGASAMY, 2011). Todavia, deve-se ressaltar que tal efeito dispersivo não foi expressivo a ponto de comprometer a agregação e a estrutura do solo. Neste contexto, Levy e Torrento (1995) destacam que os efeitos dispersivos do K^+ são dependentes da concentração do íon no solo. Neste caso, os autores observaram que a elevação entre 1,0 e 1,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em relação ao teor inicial, do nutriente no solo não reduziu a agregação ou propriedades hidráulicas do solo, como a condutividade hidráulica, condição esta que não foi observada no trabalho (Tabela 5.7).

Quanto a ausência dos efeitos do Ca^{2+} sobre a agregação do solo, uma provável explicação é que todos os tratamentos proporcionaram aumento nos teores de Ca^{2+} , na camada de 0–0,05 m, superiores a 3,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ considerando as médias gerais entre os corretivos da acidez e a aplicação de gesso (Tabela 5.5). De acordo com Cremon et al. (2009) e Rosa Junior et al. (2006), quando os teores de Ca^{2+} no solo são superiores a 3,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, decorrentes da aplicação de calcário e gesso agrícola, ocorre aumento na área e na proporção de agregados maiores, o que favorece a agregação e a estrutura do solo, com o aumento de poros estruturais (entre agregados) e texturais (intra-agregados) (CARDUCCI et al., 2015).

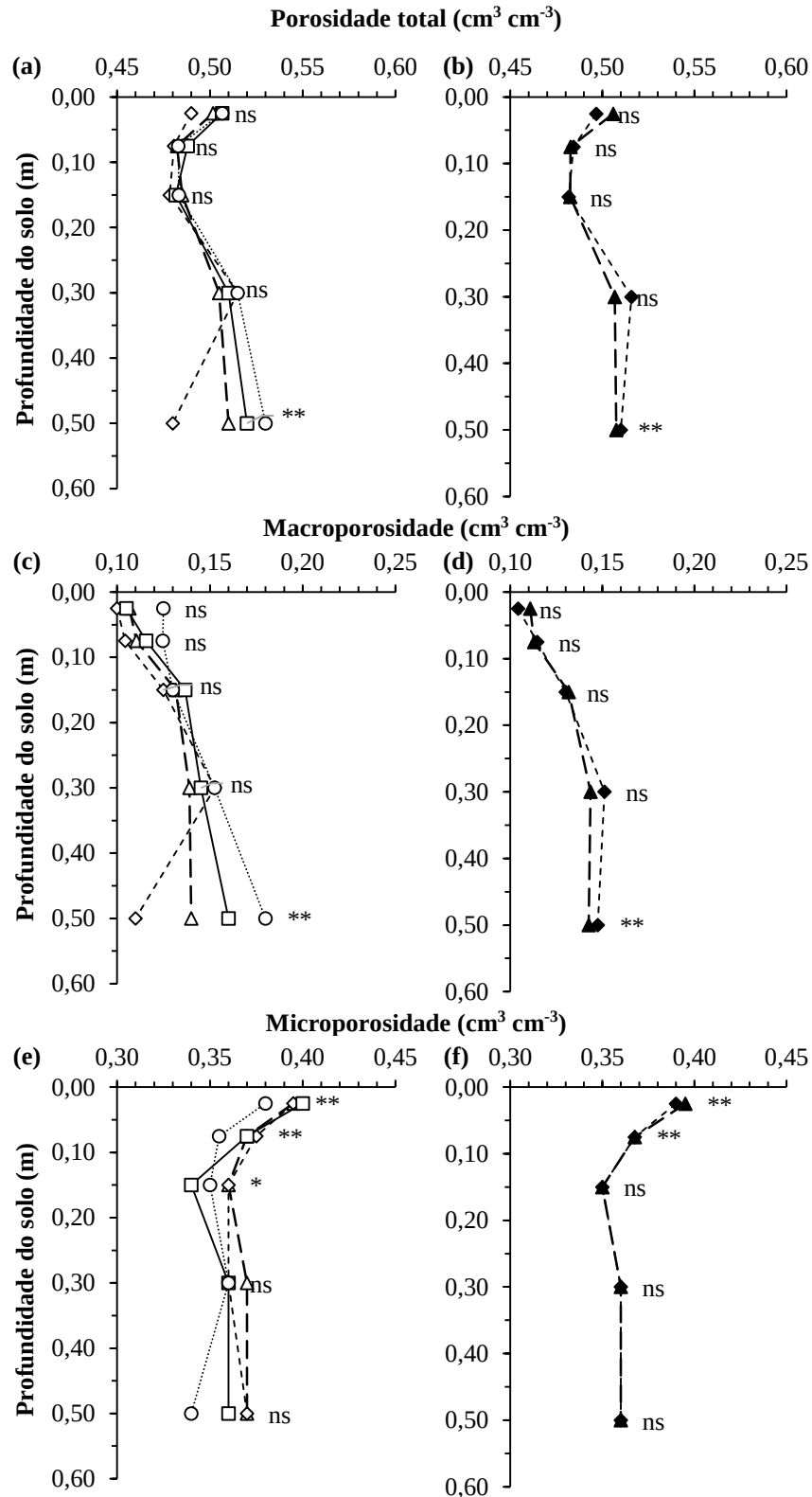


Figura 5.13 – Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Na camada de 0,40–0,60 m, para a Ds, Pt e Ma não houve distinção entre os corretivos da acidez quando esses foram aplicados isoladamente, isto é, sem gesso agrícola (Tabela 5.9). Contudo, associados ao gesso agrícola, CC e ES foram os corretivos que proporcionaram menores Ds e maiores Pt e Ma, não diferindo entre si, mas distinguindo-se do CRM; enquanto que esses os três atributos físicos o tratamento controle não diferiu dos demais tratamentos. Entre os corretivos, a aplicação de gesso agrícola reduziu a Ds e aumentou a Pt e a Ma apenas para a ES (Tabela 5.9). Todavia, não houve correlação entre esses atributos físicos estruturais com os atributos químicos do solo (Tabela 5.10).

Para a Mi, na camada de 0–0,05 m, sem a aplicação de gesso agrícola, a ES foi superior ao CC, enquanto que CRM e o tratamento controle assemelharam entre si e aos demais tratamentos (Tabela 5.9). Com a aplicação de gesso, CC novamente apresentou a menor Mi, porém, agora, em relação ao tratamento controle, visto que CRM e ES não diferiram dos demais. Entre os corretivos, a aplicação de gesso agrícola reduziu a Mi apenas quando associado a ES (Tabela 5.9). Realizadas as análises de correlação, verificou-se que tais alterações foram mediadas pelo carbono orgânico “total” do solo, o qual não foi afetado pelos tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 5.7).

Na camada de 0,05–0,10 m, apenas houve distinção entre os corretivos da acidez quando estes foram aplicados associados ao gesso agrícola (Tabela 5.9). Neste caso, CC apresentou a menor Mi em relação ao CRM, à ES e à aplicação isolada de gesso (tratamento controle). Entre os corretivos, a aplicação de gesso reduziu a Mi quando associado ao CC. Contudo, diferente do observado na camada subjacente, em 0,05–0,10 m, a aplicação da ES associada ao gesso aumentou a Mi em relação a aplicação isolada do corretivo (Tabela 5.9). Nesta camada, também se verificou que as alterações na Mi foram devidas as mudanças no conteúdo de carbono orgânico “total” do solo (Tabela 5.10).

Na camada de 0,10–0,20 m, a Mi do solo para o tratamento controle e com o CRM foi superior à ES, enquanto que o CC não diferiu dos demais tratamentos (Tabela 5.9). Entretanto, não houve correlações significativas entre a Mi e os atributos químicos nessa camada (Tabela 5.10).

Tabela 5.9 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) em camadas de solo aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	Ds (g cm ⁻³)			Pt (cm ³ cm ⁻³)			Ma (cm ³ cm ⁻³)			Mi (cm ³ cm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0–0,05 m</i>												
Controle	1,24	1,24	1,24 a	0,50	0,50	0,50 a	0,11	0,10	0,11 a	0,39 Aab	0,40 Aa	0,40
Calcário de rocha moída	1,26	1,29	1,28 a	0,50	0,48	0,49 a	0,10	0,09	0,09 a	0,40 Aab	0,39 Aab	0,40
Escória de siderurgia	1,25	1,22	1,24 a	0,50	0,51	0,51 a	0,09	0,12	0,11 a	0,41 Aa	0,39 Bab	0,40
Calcário calcinado	1,17	1,29	1,23 a	0,53	0,49	0,51 a	0,14	0,11	0,13 a	0,38 Ab	0,38 Ab	0,38
Média	1,23 A	1,26 A		0,51 A	0,50 A		0,11 A	0,10 A		0,40	0,39	
<i>0,05–0,10 m</i>												
Controle	1,28	1,31	1,30 a	0,48	0,48	0,48 a	0,11	0,11	0,11 a	0,37 Aa	0,37 Aa	0,37
Calcário de rocha moída	1,31	1,30	1,31 a	0,48	0,49	0,48 a	0,10	0,11	0,10 a	0,37 Aa	0,38 Aa	0,38
Escória de siderurgia	1,32	1,26	1,29 a	0,48	0,50	0,49 a	0,11	0,12	0,12 a	0,36 Ba	0,38 Aa	0,37
Calcário calcinado	1,27	1,34	1,30 a	0,49	0,47	0,48 a	0,12	0,13	0,12 a	0,37 Aa	0,34 Bb	0,36
Média	1,30 A	1,30 A		0,48 A	0,48 A		0,11 A	0,11 A		0,37	0,37	
<i>0,10–0,20 m</i>												
Controle	1,28	1,30	1,29 a	0,49	0,48	0,49 a	0,13	0,13	0,13 a	0,36	0,36	0,36 a
Calcário de rocha moída	1,30	1,32	1,31 a	0,48	0,47	0,48 a	0,13	0,12	0,13 a	0,36	0,36	0,36 a
Escória de siderurgia	1,31	1,30	1,31 a	0,48	0,48	0,48 a	0,14	0,13	0,14 a	0,34	0,34	0,34 b
Calcário calcinado	1,32	1,29	1,31 a	0,48	0,49	0,48 a	0,13	0,13	0,13 a	0,35	0,36	0,35 ab
Média	1,30 A	1,30 A		0,48 A	0,48 A		0,13 A	0,13 A		0,35 A	0,35 A	
<i>0,20–0,40 m</i>												
Controle	1,22	1,27	1,24 a	0,52	0,49	0,51 a	0,15	0,13	0,14 a	0,37	0,37	0,37 a
Calcário de rocha moída	1,26	1,21	1,23 a	0,51	0,52	0,52 a	0,14	0,17	0,15 a	0,37	0,35	0,36 a
Escória de siderurgia	1,29	1,20	1,24 a	0,49	0,53	0,51 a	0,13	0,16	0,15 a	0,36	0,36	0,36 a
Calcário calcinado	1,24	1,21	1,23 a	0,51	0,52	0,52 a	0,16	0,15	0,15 a	0,35	0,37	0,36 a
Média	1,25 A	1,22 A		0,51 A	0,52 A		0,14 A	0,15 A		0,363 A	0,364 A	
<i>0,40–0,60 m</i>												
Controle	1,20 Aa	1,26 Aab	1,23	0,52 Aa	0,50 Aab	0,51	0,15 Aa	0,13 Aab	0,14	0,37	0,37	0,37 a
Calcário de rocha moída	1,30 Aa	1,34 Aa	1,32	0,49 Aa	0,47 Ab	0,48	0,12 Aa	0,09 Ab	0,11	0,37	0,37	0,37 a
Escória de siderurgia	1,26 Aa	1,16 Bb	1,21	0,50 Ba	0,54 Aa	0,52	0,13 Ba	0,19 Aa	0,16	0,37	0,36	0,36 a
Calcário calcinado	1,23 Aa	1,20 Ab	1,22	0,52 Aa	0,53 Aa	0,53	0,17 Aa	0,18 Aa	0,18	0,34	0,34	0,34 a
Média	1,25	1,24		0,51	0,51		0,14	0,15		0,36 A	0,36 A	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey (p< 0,05).

Tabela 5.10 – Correlações lineares (Pearson) entre os atributos físicos estruturais e os atributos químicos do solo.

Variáveis	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	COXP	CO
<i>7 meses após aplicação – camada de 0–0,05 m</i>								
Mi	-0,24	0,23	0,20	-0,03	0,05	0,08	0,30	0,55**
<i>7 meses após aplicação – camada de 0,05–0,10 m</i>								
Mi	0,16	-0,11	-0,14	0,25	-0,27	-0,03	-0,16	0,44*
<i>7 meses após aplicação – camada de 0,10–0,20 m</i>								
Mi	-0,16	0,34	0,21	-0,06	0,03	0,03	-0,16	0,09
<i>7 meses após aplicação – camada de 0,40–0,60 m</i>								
Ds	-0,01	0,14	0,09	-0,13	-0,06	-0,05	0,03	-0,20
Pt	0,03	-0,16	-0,08	0,16	0,07	0,09	-0,04	-0,22
Ma	-0,05	-0,02	-0,03	0,21	0,17	0,21	0,18	-0,32
<i>15 meses após aplicação – camada de 0–0,05 m</i>								
Ds	0,35	-0,36	-0,28	0,30	0,29	-0,06	0,15	-0,13
Pt	-0,38	0,37	0,30	-0,25	-0,33	0,09	-0,10	0,14
Ma	-0,16	0,12	0,12	-0,11	-0,30	-0,03	-0,17	0,05
Mi	-0,22	0,28	0,13	-0,09	0,09	0,12	0,13	0,04
<i>15 meses após aplicação – camada de 0,10–0,20 m</i>								
Ds	-0,39	0,30	0,35	0,46*	-0,18	-0,30	0,01	-0,14
Pt	0,40	-0,31	-0,37	-0,47*	0,19	0,28	-0,03	0,14
Ma	0,34	-0,29	-0,30	-0,33	0,17	0,14	-0,04	0,17
<i>15 meses após aplicação – camada de 0,40–0,60 m</i>								
Ds	0,22	-0,38	0,16	-0,18	-0,06	-0,54**	-0,39	-0,55**
Pt	-0,20	0,33	-0,14	0,19	0,07	0,56**	0,33	0,49*
Ma	0,05	0,07	-0,24	0,01	0,10	0,24	-0,03	0,26

Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; Ma = macroporosidade; Mi = microporosidade; pH = acidez ativa em CaCl₂; H+Al = acidez potencial (cmol_c dm⁻³); Al³⁺ = acidez trocável ((cmol_c dm⁻³); Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = teores de cálcio, magnésio e potássio trocáveis (cmol_c dm⁻³), respectivamente; COXP = carbono lábil, oxidado por permanganato de potássio; CO = carbono orgânico “total”, determinado por colorimetria. * e **Significativo aos níveis de 5 % ($p < 0,05$) e 1 % ($p < 0,01$) de probabilidade, respectivamente.

Aos 15 meses após aplicação, ocorreram maiores alterações na estrutura do solo pela aplicação dos tratamentos (Figuras 5.12 e 5.14). Neste período de avaliação, a Ds e a Pt da camada 0–0,05 m foram influenciadas isoladamente pelos corretivos da acidez, a Ma isoladamente pelo gesso agrícola e a Mi pela interação entre os corretivos e o gesso. Nas camadas de 0,05–0,10 e 0,20–0,40 m não houve efeitos dos tratamentos sobre os atributos físicos estruturais. Porém, nas camadas de 0,10–0,20 e 0,40–0,60 m a interação entre os corretivos e gesso alteraram a Ds, a Pt e a Ma (Figuras 5.12 e 5.14).

Na camada de 0–0,05 m, CC e ES aumentaram a Ds e reduziram a Pt em relação ao tratamento controle, enquanto que o CRM não diferiu de nenhum tratamento (Tabela 5.11). Em relação ao gesso agrícola, a aplicação do condicionar aumentou a Ma na camada mais superficial; enquanto que a Mi dessa camada, sem a aplicação de gesso, foi superior com a ES em relação ao tratamento controle, e ambos os calcários foram similares tanto à ES quanto ao controle. Porém, com a aplicação de gesso, não houve distinção da Mi entre os corretivos, mas a associação da ES com o gesso reduziu a Mi do solo em relação a aplicação isolada de ES (Tabela 5.11), conforme também observado aos 7 meses (Tabela 5.10). Os atributos químicos

dessa camada não se correlacionaram com nenhum dos atributos físicos estruturais (Tabela 5.10).

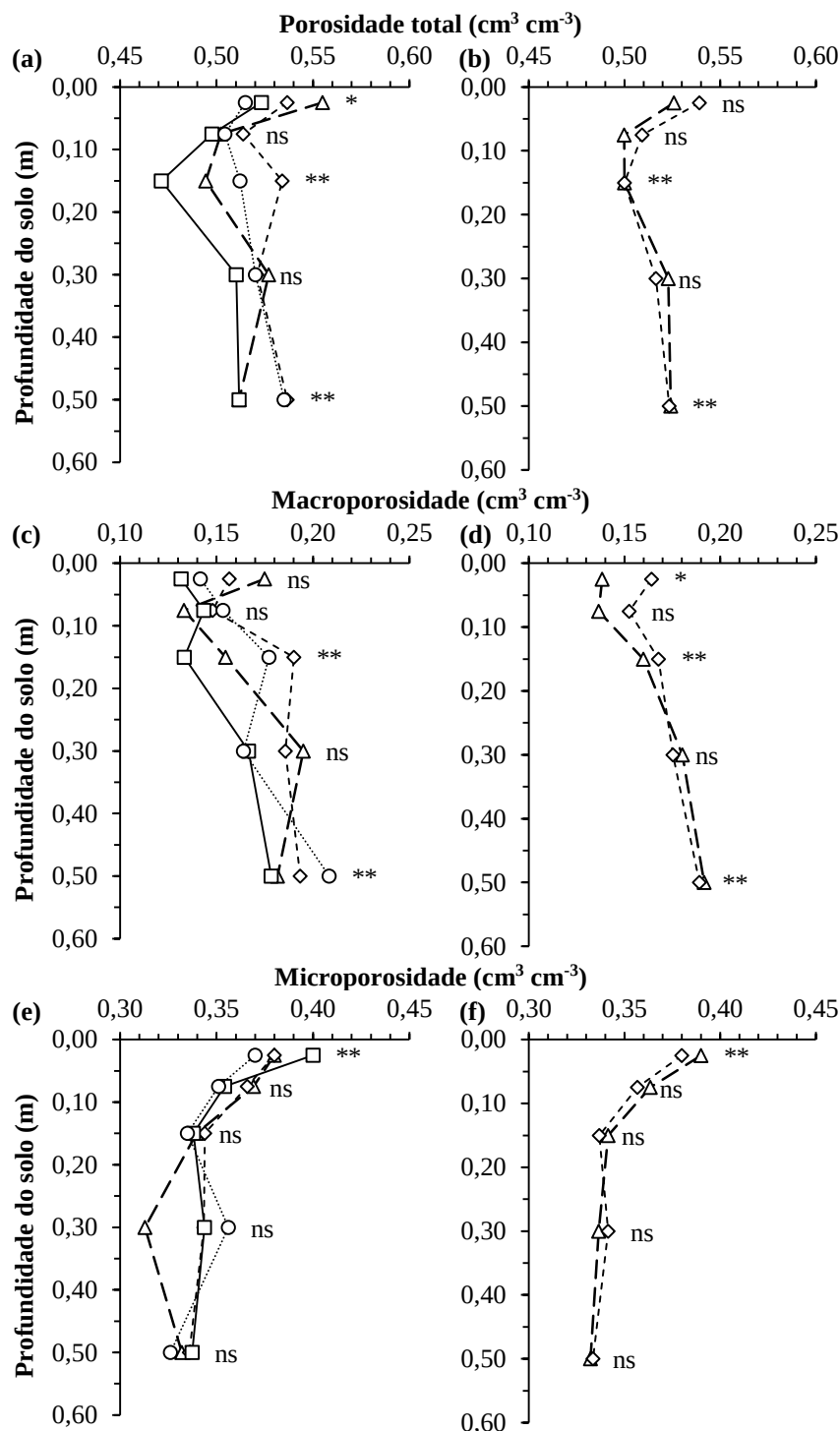


Figura 5.14 – Porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo em função da aplicação de corretivos da acidez [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), calcário calcinado ($\circ$) e escória de siderurgia ($\square$)] (a, c, e) e de gesso agrícola [sem ($\blacktriangle$) e com ($\blacklozenge$)] (b, d, f), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos. *Efeito isolado significativo ao teste F ($p < 0,05$); **Interação significativa; ^{ns}Não significativo.

Tabela 5.11 – Interações e efeitos isolados da aplicação de corretivos da acidez associados ou não ao gesso agrícola (Sem e Com) sobre a densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) em camadas de solo aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Corretivos da acidez	Ds (g cm ⁻³)			Pt (cm ³ cm ⁻³)			Ma (cm ³ cm ⁻³)			Mi (cm ³ cm ⁻³)		
	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média	Sem	Com	Média
<i>0–0,05 m</i>												
Controle	1,10	1,13	1,11 b	0,56	0,55	0,56 a	0,19	0,16	0,18 a	0,37 Ab	0,39 Aa	0,38
Calcário de rocha moída	1,21	1,11	1,16 ab	0,52	0,56	0,54 ab	0,13	0,18	0,16 a	0,38 Aab	0,37 Aa	0,38
Escória de siderurgia	1,19	1,20	1,20 a	0,53	0,52	0,52 b	0,12	0,14	0,13 a	0,41 Aa	0,38 Ba	0,40
Calcário calcinado	1,23	1,19	1,21 a	0,50	0,53	0,52 b	0,11	0,17	0,14 a	0,38 Aab	0,36 Aa	0,37
Média	1,18 A	1,16 A		0,53 A	0,54 A		0,14 B	0,16 A		0,39	0,38	
<i>0,05–0,10 m</i>												
Controle	1,22	1,27	1,25 a	0,51	0,50	0,50 a	0,14	0,13	0,13 a	0,37	0,37	0,37 a
Calcário de rocha moída	1,30	1,14	1,22a	0,48	0,55	0,51 a	0,10	0,19	0,15 a	0,38	0,36	0,37 a
Escória de siderurgia	1,23	1,30	1,26 a	0,51	0,48	0,50 a	0,16	0,13	0,14 a	0,36	0,35	0,35 a
Calcário calcinado	1,26	1,24	1,25 a	0,50	0,51	0,50 a	0,15	0,16	0,15 a	0,35	0,35	0,35 a
Média	1,25 A	1,24 A		0,50 A	0,51 A		0,14 A	0,15 A		0,36 A	0,36 A	
<i>0,10–0,20 m</i>												
Controle	1,25 Aab	1,29 Ab	1,27	0,50 Aab	0,49 Ac	0,49	0,15	0,16	0,15 bc	0,35	0,33	0,34 a
Calcário de rocha moída	1,21 Ab	1,13 Bd	1,17	0,52 Ba	0,55 Aa	0,53	0,17	0,21	0,19 a	0,35	0,34	0,34 a
Escória de siderurgia	1,30 Ba	1,35 Aa	1,33	0,48 Ab	0,46 Bd	0,47	0,14	0,12	0,13 c	0,34	0,34	0,34 a
Calcário calcinado	1,25 Aab	1,21 Bbc	1,23	0,50 Aab	0,52 Ab	0,51	0,17	0,18	0,18 ab	0,33	0,34	0,33 a
Média	1,26	1,25		0,50	0,50		0,16 A	0,17 A		0,34 A	0,34 A	
<i>0,20–0,40 m</i>												
Controle	1,19	1,21	1,20 a	0,53	0,52	0,53 a	0,22	0,17	0,20,a	0,29	0,34	0,31 a
Calcário de rocha moída	1,19	1,24	1,19 a	0,53	0,51	0,52 a	0,18	0,19	0,19 a	0,35	0,33	0,34 a
Escória de siderurgia	1,24	1,24	1,24 a	0,51	0,51	0,51 a	0,17	0,17	0,17 a	0,35	0,34	0,34 a
Calcário calcinado	1,23	1,20	1,21 a	0,51	0,53	0,52 a	0,15	0,17	0,16 a	0,36	0,35	0,36 a
Média	1,21 A	1,21 A		0,52 A	0,52 A		0,18 A	0,18 A		0,34 A	0,34 A	
<i>0,40–0,60 m</i>												
Controle	1,17 Ba	1,29 Aa	1,23	0,53 Aa	0,49 Bb	0,51	0,21 Aa	0,16 Bb	0,18	0,33	0,33	0,33 a
Calcário de rocha moída	1,19 Aa	1,20 Aab	1,20	0,53 Aa	0,52 Aab	0,54	0,19 Aa	0,20 Aab	0,19	0,34	0,33	0,34 a
Escória de siderurgia	1,25 Aa	1,17 Bb	1,21	0,50 Ba	0,54 Aa	0,51	0,17 Ba	0,19 Aab	0,18	0,34	0,34	0,34 a
Calcário calcinado	1,20 Aa	1,16 Ab	1,18	0,53 Aa	0,54 Aa	0,54	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21	0,32	0,33	0,33 a
Média	1,20	1,21		0,52	0,52		0,19	0,19		0,33 A	0,33 A	

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez (coluna) e maiúscula para aplicação de gesso agrícola (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey (p< 0,05).

Na camada de 0,10–0,20 m, com a aplicação isolada dos corretivos, a Ds e a Pt do ES diferiram do CRM (Tabela 5.11), sendo o calcário melhor para a estrutura da camada. Nesta condição em gesso, o tratamento controle e o CC não diferiram entre si e dos demais tratamentos, tanto para a Ds quanto para a Pt. Entre os corretivos, a associação com gesso agrícola aumentou a Ds para a ES e reduziu para os calcários, enquanto que a aplicação isolada do condicionador não diferiu do tratamento controle. Para a Pt relação inversa foi observada para a ES e o CRM, isto é, a associação com gesso reduziu a Pt de ES e aumentou do CRM. Porém, tanto a aplicação isolada de gesso, em relação ao tratamento controle, como sua associação ao CC não influenciaram a Pt dessa camada (Tabela 5.11). A explicação para tais alterações são os efeitos de tais corretivos e do gesso sobre os teores de Ca^{2+} nessa camada de solo. De maneira geral, o aumento no teor de Ca^{2+} resultou na redução da Ds e aumento da Pt em 0,10–0,20 m (Tabela 5.10), favorecendo a melhoria da qualidade estrutural do solo.

Para a Ma da camada de 0,10–0,20 m, o CRM foi superior ao tratamento controle e a ES, os quais não diferiram entre si; enquanto que o CC assemelhou-se ao CRM e ao tratamento controle, porém diferiu da ES (Tabela 5.11). Entretanto, não foram verificadas correlações significativas da Ma com nenhum atributo químico do solo (Tabela 5.10).

Na camada de 0,40–0,60 m, sem a aplicação de gesso agrícola, não houve distinção entre os corretivos da acidez para a Ds, Pt e Ma (Tabela 5.11). Contudo, com a aplicação de gesso, CC e ES tiveram menores Ds e maiores Pt e Ma que a aplicação isolada de gesso agrícola (controle), enquanto que para os três atributos o CRM não diferiu dos demais tratamentos. Entre os corretivos, a aplicação associada da ES e de gesso reduziu a Ds e aumentou a Pt e a Ma, mas a aplicação isolada de gesso aumentou a Ds e reduziu a Pt e a Ma, em relação tratamento controle. Já para ambos os calcários a Ds, Pt e Ma não foram afetadas pela sua aplicação isolada ou associada ao gesso agrícola (Tabela 5.11).

A Ds e Pt na camada mais profunda no solo apresentou correlações moderadas com os teores de K^+ e carbono orgânico total (Tabela 5.10). Neste caso, como consequência de um provável efeito dispersivo, o aumento nos teores de K^+ pela intensa lixiviação do íon nas camadas mais superficiais, conforme descrito na seção 5.5.2, acabou por reduzir a Ds e aumentar a Pt em profundidade, melhorando a qualidade do solo ao crescimento radicular.

Por outro lado, tais resultados mostram quão complexa é a relação entre a fertilidade, química e física do solo. A lixiviação de um nutriente primário como o K^+ é um grave problema ao desenvolvimento vegetal, principalmente em solos com baixos teores do elemento (BRUNETTO et al., 2005; WERLE et al., 2008; JAISWAL et al., 2016). Porém, o aumento da

Pt e redução da Ds favorecem o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas (BERGAMIN et al., 2010; MAZURANA et al., 2011).

Quanto aos efeitos do carbono orgânico sobre a Ds e a Pt, é amplamente reportado que o acúmulo de matéria orgânica no solo melhora a qualidade de sua estrutura, aumentando sua Pt e reduzindo sua Ds (BARRAL et al., 1998; MARCHINI et al., 2015; REGELINK et al., 2015; YAZDANPANA, 2016). Todavia, tais efeitos são relatados principalmente nas camadas mais superficiais do solo (0–0,10 m). Porém, no presente trabalho, pode-se observar que a maior presença de carbono orgânico reduziu a Ds e elevou a Pt na camada mais profunda avaliada (0,40–0,60 m). Tais resultados demonstram nitidamente a importância do adequado desenvolvimento do sistema radicular das culturas nessas camadas mais profundas de solo, visto que a adição de carbono nestes casos é devida praticamente a decomposição de raízes (JOBÁGY; JACKSON, 2000; CLEMMENSEN et al., 2013).

5.3.3 Retenção de água no solo

Aos 7 meses após aplicação dos tratamentos, os corretivos de acidez influenciaram na retenção de água no solo principalmente na camada de 0–0,05 m, com menores efeitos nas demais camadas (Figura 5.15). Sem a aplicação de gesso, em relação ao tratamento controle (Apêndice A), entre os potenciais mátricos (Ψ_m) que regulam a disponibilidade de água no solo (-10 e -1500 kPa), CRM e ES aumentaram a retenção na camada de 0–0,05 m, sendo que o aumento mais expressivo para o CRM ocorreu entre -10 e -100 kPa, enquanto que para a ES ocorreu em Ψ_m muito baixos (-200 a -1500 kPa) (Figura 15a). Com isso, pode-se inferir que a aplicação isolada de CRM foi mais favorável ao processo de retenção de água do que a aplicação isolada de ES, pois em baixos potenciais as plantas passam a sofrer estresse hídrico (KIRKHAM, 2005), uma vez que a retenção possui maior influência da adsorção que da capilaridade (LIBARDI, 2012; AULER et al., 2017a, 2017b). Contudo, diferentemente da ES e do CRM, o CC reduziu a retenção de água em relação ao tratamento controle, na camada de 0–0,05 m, principalmente em Ψ_m menores que -50 kPa (Figura 15a).

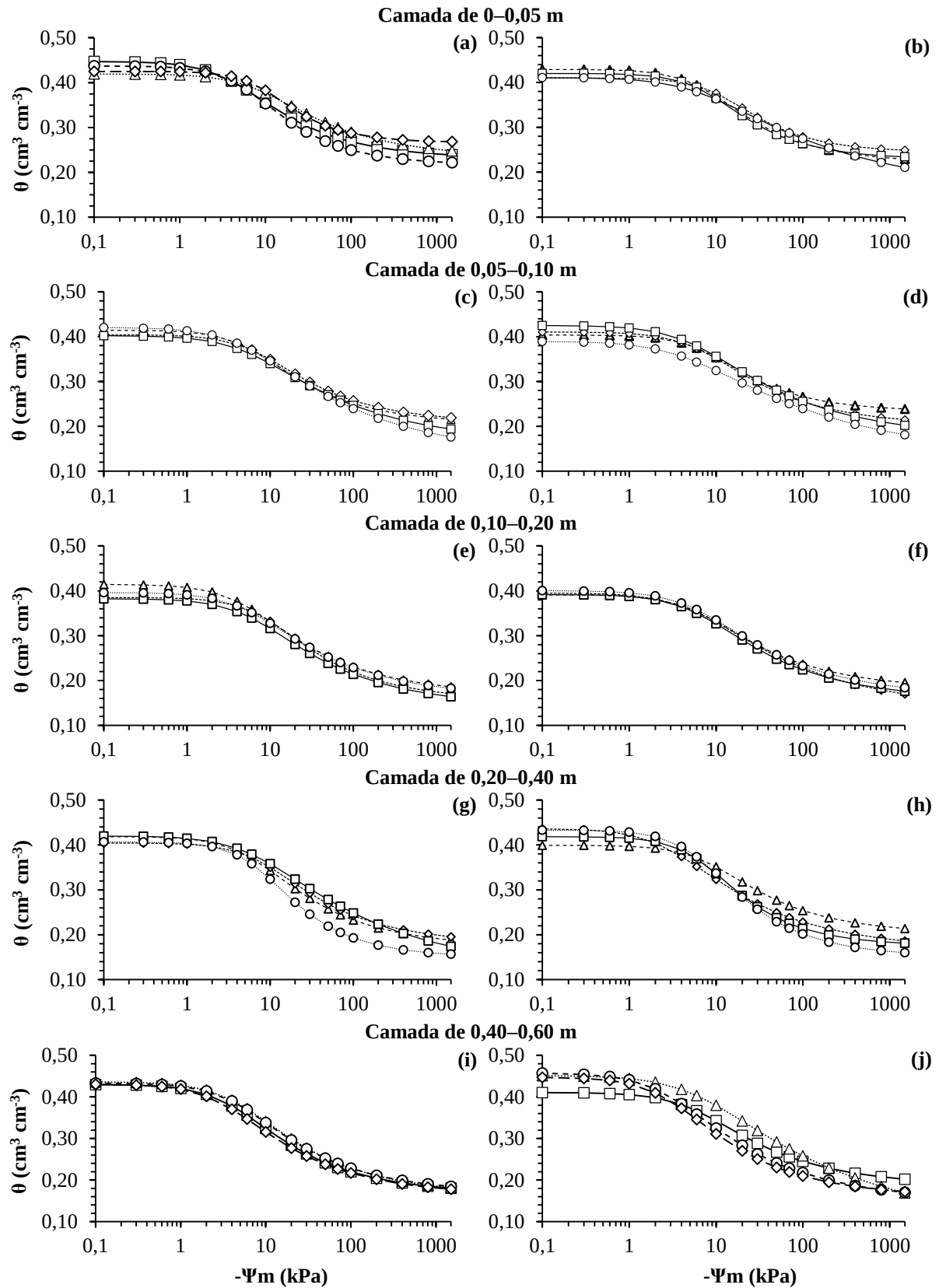


Figura 5.15 – Curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Com a aplicação de gesso agrícola, os efeitos dos corretivos sobre a retenção de água no solo foram menos pronunciados na camada de 0–0,05 m. Neste caso o gesso agrícola tendeu a uniformizar a retenção (Figura 5.15b). Entretanto a aplicação isolada de gesso agrícola e associada a CRM e à ES reduziu a retenção de água no solo nesta camada. Porém, quando CC foi aplicado associado ao gesso (Figuras 5.15a 5.15b, Apêndice A.2), houve redução na retenção em Ψ_m próximos a saturação (-1 até -6 kPa) e aumento na retenção em Ψ_m que estão diretamente relacionados a fácil disponibilidade de água (-20 a -100 kPa) (BERNARDI et al., 2012).

Na camada de 0,05–0,10 m, em altos Ψ_m , a aplicação isolada dos corretivos da acidez não apresentou grandes distinções em relação ao tratamento controle quanto a retenção de água. Contudo, em menores Ψ_m (inferiores a -200 kPa), o CC reduziu a retenção de água em relação ao tratamento controle, o que também foi observado para a ES, porém em menor intensidade (Figura 5.15c). Com a aplicação de gesso agrícola, CRM e ES aumentaram a retenção de água até -20 kPa, porém apenas em ES esse comportamento foi mais expressivo, em relação a aplicação isolada de gesso. A partir de -20 kPa, ambos os corretivos reduziram a retenção de água no solo quando associados ao gesso. Porém, o principal resultado a ser destacado nesse caso é que com a aplicação de CC associado ao gesso agrícola, a retenção foi reduzida ao longo de toda a CRA, assumindo distinções de até 24% para o Ψ_m de -1500 kPa (Figura 5.15d). Contudo, em relação ao tratamento controle, a aplicação isolada de gesso agrícola aumentou a retenção de água (Figuras 5.15c e 5.15d).

Na camada de 0,10–0,20 m, tanto isoladamente ou quando associado ao gesso agrícola, não houve grandes distinções entre os corretivos da acidez sobre as CRAs. Os comportamentos observados nesse caso foram similares aos relatados na camada subjacente (0,05–0,10 m), porém menos expressivos (Figuras 5.15e e 5.15f).

Nas camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, sem a aplicação de gesso agrícola (Figuras 5.15g e 5.15i), praticamente não houve distinção entre as CRAs para os corretivos entre si em relação ao tratamento controle, exceto para o CC na camada de 0,20–0,40 m, que apresentou menor retenção entre os Ψ_m de -10 a -1500 kPa (Figura 5.15g). Contudo, com a aplicação de gesso (Figuras 5.15h e 5.15j) grandes distinções nas CRAs foram observadas para os corretivos, principalmente na camada de 0,40–0,60 m.

Em ambas as camadas, houve aumento na retenção de água em Ψ_m próximos a saturação (até -4 kPa) com a associação de todos os corretivos em relação a aplicação isolada do gesso agrícola (Figuras 5.15h e 5.15 j), o que não assume grande importância em termos de disponibilidade de água às plantas. Contudo, em Ψ_m menores que -10 até -1500 kPa, houve

redução na retenção de água pela associação dos corretivos com gesso agrícola em relação ao uso isolado do gesso. Entre os corretivos, apenas em relação ao CC observou-se que a aplicação isolada do corretivo proporcionou maiores valores de θ em relação a aplicação de CC e gesso na camada de 0,20–0,40 m (Figuras 5.15h e 5.15j).

Aos 15 meses após aplicação, também pode-se observar que os efeitos dos corretivos foram mais pronunciados sobre a retenção de água no solo quando associados ao gesso agrícola, principalmente nas camadas mais profundas (Figura 5.16). Diferentemente do ocorrido aos 7 meses, ambos os calcários aumentaram a retenção de água na camada de 0–0,05 m quando foram aplicados em relação ao tratamento controle, principalmente entre os potenciais de -10 e -100 kPa. Nesta condição, a ES também aumentou a retenção, porém de maneira mais sutil que a observada para os calcários (Figura 5.16a). Também, a associação de todos os corretivos proporcionou maior retenção de água em comparação a aplicação isolada de gesso (Figura 5.16b). Contudo, tais resultados foram mais expressivos para o CC, por terem ocorrido entre -10 e -1500 kPa em relação a -70 e -100 kPa para o CRM e a ES. Para os maiores Ψ_m , todos os corretivos associados ao gesso reduziram a retenção em relação ao uso isolado do gesso (Figura 5.16b), o que pode estar relacionado as alterações na macroporosidade (embora não significativas) e microporosidade do solo (Tabela 5.11).

Entre os corretivos, a retenção de água na camada de 0–0,05 m entre -10 e -100 kPa foi maior quando o CC e a ES foram associadas ao gesso agrícola em relação a sua aplicação isolada, enquanto que para o CRM houve leve redução na retenção entre esses Ψ_m em relação aplicação de CRM e gesso (Figuras 5.16a e 5.16b). Porém, em Ψ_m menores que -100 kPa, a retenção de água no solo pela aplicação de CRM e ES associados ao gesso agrícola aumentou expressivamente, em relação a aplicação isolada desses corretivos, de maneira linear com a redução do Ψ_m . Para o CC também foi reportado esse aumento com a aplicação de CC e gesso, porém menos pronunciada. Por sua vez, a aplicação isolada de gesso reduzir a retenção de água, em relação ao tratamento controle, nesses baixos Ψ_m . Porém em Ψ_m maiores que -100 kPa houve aumento na retenção pela aplicação isolada do condicionador (Figuras 5.16a e 5.16b).

Na camada de 0,05–0,10 m (Figuras 5.16c e 5.16d), o resultado mais expressivo foi a redução da retenção, principalmente entre os Ψ_m de -20 e -200 kPa, quando o CRM foi aplicado ao em associação ao gesso agrícola em comparação a aplicação isolada de gesso, do mesmo modo como o CRM com gesso também reduziu a retenção em relação ao CRM aplicado isoladamente (Figura 5.16d).

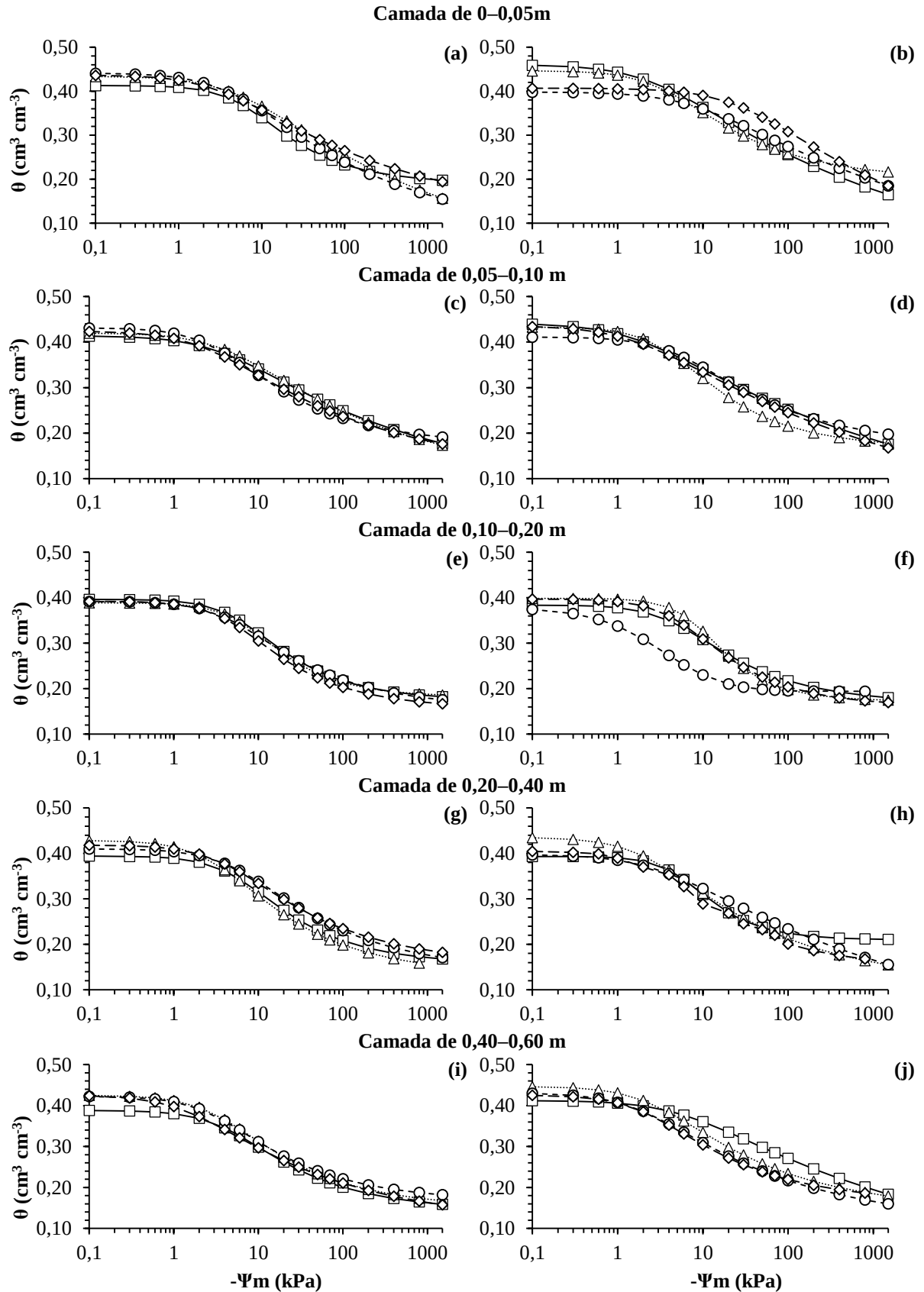


Figura 5.16 – Curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Na camada de 0,10–0,20 m, com associados a aplicação de gesso agrícola, o comportamento de ambos os calcários foi muito similar ao observado na camada de 0,05–0,10 m (Figura 5.16f). Entretanto, a ES associada ao gesso reduziu a retenção entre os Ψ_m de -1 e -50 kPa em relação à aplicação isolada de gesso, do mesmo modo como a aplicação de ES com gesso reduziu a retenção nesses mesmos Ψ_m em relação a ES isolada (Figura 5.16f).

Nas camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m a aplicação isolada de gesso agrícola aumentou a retenção de água em baixos potenciais em relação a aplicação isolada dos corretivos e dos corretivos associados ao gesso (Figuras 5.16g a 5.16j). Na camada de 0,20–0,40 m o uso isolado do gesso em relação a sua aplicação associada a todos os corretivos e em relação ao tratamento controle elevou acima de 20% a retenção de água em Ψ_m acima de -800 kPa (Figuras 5.16g e 5.16h), região está em que a retenção é governada principalmente por fenômenos de adsorção (LIBARDI et al., 2012).

Por outro lado, na camada de 0,40–0,60 m (Figuras 5.16i e 5.16j) tais resultados não foram tão expressivos, de tal modo que apenas a aplicação de gesso agrícola isolada elevou a retenção em relação ao tratamento controle, sendo o aumento ao longo de toda a CRA e não restrito a um intervalo de Ψ_m . Em relação aos corretivos, a sua aplicação associada ao gesso apresentou menor retenção de água no solo em comparação ao uso exclusivo do gesso agrícola, principalmente entre os Ψ_m de -10 e -400 kPa (Figura 5.16j).

Outro resultado a ser destacado é que, tanto na camada de 0,20–0,40 como de 0,40–0,60 m, a aplicação isolada da ES aumentou a retenção em relação ao tratamento controle, principalmente entre os Ψ_m -20 a -100 kPa na camada de 0,20–0,40 m e -100 a -1500 kPa na camada de 0,40–0,60 m (Figuras 5.16g e 5.16i).

O comportamento da retenção de água no solo como um todo, mas principalmente nas camadas mais profunda seguiu a mesma tendência do apresentado para os cátions básicos trocáveis, principalmente o Mg^{2+} , e a acidez trocável (Al^{3+}). Neste caso, com a aplicação de gesso agrícola houve intensa lixiviação de Mg^{2+} no perfil, principalmente aos 7 meses após aplicação dos tratamentos (Tabelas 5.5 e 5.6). Ainda, aos 15 meses, com a aplicação da ES houve aumento nos teores de Al^{3+} abaixo de 0,20 m (Tabela 5.4).

Auler et al. (2017b) demonstra a importância dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} na retenção de água no solo ao longo de toda a CRA. Os autores, discorrem que a substituição do Al^{3+} por Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca aumentaram significativamente a retenção de água no solo aos 18 meses após aplicação de calcário (15 Mg ha^{-1}), sendo que tais efeitos se devem principalmente as melhorias da calagem na estrutura do solo, principalmente a microporosidade, e ao aumento da adsorção de água pelos íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Como a correção da acidez e, principalmente, a aplicação de gesso agrícola, elevaram os teores de cátions básicos em profundidade, em especial o Mg^{2+} , estima-se que essas também são as explicações para o aumento de retenção de água em profundidade. Tal hipótese fundamenta-se no princípio de que para a adsorção Ca^{2+} e Mg^{2+} é necessária à formação de complexos de esfera externa. Neste tipo de adsorção, a ligação entre os cátions e as partículas de argila são mediadas por moléculas de água (SPOSITO, 2008). Assim, conforme constatado neste trabalho, quanto maior a adsorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} maior a retenção de água no solo, possivelmente pela formação de complexos de esfera externa.

Também deve ser ressaltado que o Ca^{2+} e o Mg^{2+} apresentam reduzido raio iônico, logo um grande raio hidratado (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008). Um grande raio hidratado significa que há grande quantidade de moléculas de água em torno do íon. Deste modo, o aumento da retenção pelo aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo também pode ser atribuído ao maior raio hidratado destes cátions. Sendo o raio hidratado do Mg^{2+} maior que do Ca^{2+} (DONTSOVA; NORTON, 2002), o que reforça a hipótese de que os maiores efeitos foram devidos ao Mg^{2+} e não ao Ca^{2+} .

Também ressalta-se que ocorreu intensa lixiviação de K^+ no solo (Tabelas 5.5 e 5.6). Contudo, os efeitos do K^+ sobre a retenção de água são limitados (Auler et al., 2017b). Este comportamento pode ser atribuído à menor afinidade de adsorção, em comparação ao Ca^{2+} e ao Mg^{2+} , e ao menor raio hidratado deste íon (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008). Estes autores mencionam que, com base em sua valência e raio iônico, na série liotrópica, o K^+ é o primeiro cátion a ser deslocado da fase sólida do solo na troca iônica, em comparação ao Ca^{2+} , ao Mg^{2+} e ao Al^{3+} . Logo, menor seria sua capacidade de adsorção.

5.4 PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS CORRETIVOS DA ACIDEZ E DO GESSO AGRÍCOLA

A produtividade das culturas do milho e da soja foram influenciados isoladamente pelos corretivos da acidez do solo (Tabela 5.12). A produtividade do milho também foi influenciada isoladamente pela aplicação de gesso agrícola. No entanto, a produtividade do trigo e o acúmulo de massa seca da aveia preta não foram afetados pelos tratamentos. A produtividade acumulada apresentou a mesma tendência observada para a cultura do milho (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Produtividade (kg ha^{-1}) das culturas do milho, trigo e soja, acúmulo de massa seca de aveia-preta e produtividade acumulada das culturas após a aplicação de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola.

Produtividade (kg ha^{-1})	Corretivos da acidez				Gesso agrícola	
	Controle	CRM	ES	CC	Sem	Com
Milho (2015/16)	10.065,16 c	11.048,77 ab	11.195,97 bc	10.489,11 a	10.454,69 B	10.944,82 A
Trigo (2016)	5.277,93 a	5.577,82 a	5.575,81 a	5.532,84 a	5.428,37 A	5.553,83 A
Soja (2016/17)	4.351,95 b	4.770,72 a	4.755,78 a	4.691,73 a	4.624,54 A	4.660,56 A
Aveia-preta (2017)	3.983,39 a	3.875,40	4.030,71 a	4.228,08 a	3.934,95 A	4.123,84 A
Produtividade acumulada	23.678,43 b	25.272,71 a	24.744,38 ab	23.755,65 a	24.442,55 B	25.283,04 A

Médias seguidas de mesma letra minúscula para corretivos da acidez e maiúscula para aplicação de gesso agrícola não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A produtividade do milho foi superior com a aplicação de CC em relação à ES e o tratamento controle, enquanto que o CRM apresentou rendimento similar ao CC e a ES, porém superior ao tratamento controle (Tabela 5.12). Tais resultados podem ser atribuídos a mais rápida reação do CC em relação aos demais corretivos (Tabelas 5.3 a 5.6), que podem ter favorecido a produção da cultura do milho, visto que cultura foi semeada 3 meses após aplicação dos tratamentos.

Castro e Crusciol (2013) observaram comportamento similar para a produção de milho entre a aplicação de ES e de CRM, entre si e o em relação ao tratamento controle. Contudo, o tempo de reação decorrido entre a aplicação e a semeadura da cultura foi de aproximadamente 14 meses.

Do mesmo modo, a aplicação de gesso agrícola aumentou a produtividade da cultura do milho (Tabela 5.12), o que também pode ser relacionado (i) a melhor distribuição de cátions básicos trocáveis, (ii) a redução da fitotoxidez de Al^{3+} na camada mais superficial do solo (0 – 0.20 m) e (iii) ao aumento no teor de enxofre no solo (dados não apresentados) (CAIRES et al., 2011c; PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015).

A produtividade da cultura do trigo não foi afetada pelos tratamentos, o que pode estar relacionado as ótimas condições meteorológicas durante o cultivo (Tabela 4.2), considerando as altas médias de produtividade, superiores a 5.000 kg ha⁻¹ (Tabela 5.12). Visto que os efeitos da correção da acidez do solo são mais pronunciados sobre condições de déficit hídrico (JORIS et al., 2013), ou mesmo em que as precipitações não sejam tão regulares.

Apenas o houve distinção do tratamento controle em relação aos corretivos da acidez para a produtividade da soja (Tabela 5.12). Tal comportamento pode estar diretamente relacionado ao aumento nos teores de Ca²⁺ na camada mais superficial do solo (0–0,20 m) (CAIRES et al., 2011c; CASTRO; CRUSCIOL, 2013). A ausência de efeitos do gesso sobre a cultura da soja pode estar relacionada a maior tolerância dessa cultura a acidez do solo e a baixa disponibilidade de Ca²⁺ (FAGERIA et al., 2014), visto que o gesso agrícola não foi tão eficiente quanto os corretivos da acidez em elevar os teores de Ca²⁺ no solo, além de reduzir os teores de Mg²⁺ (Tabela 5.6). Caires et al. (2011c) também destacam que plantas de milho são menos eficientes de plantas de soja em absorver Ca²⁺. Com isso, plantas de milho são mais responsivas a aplicações de corretivos da acidez e ao gesso agrícola.

Com a produtividades de cada cultura calculou-se a produtividade acumulada (Tabela 5.12). E, a partir da produtividade acumulada foi determinada a eficiência agronomia (EA) dos corretivos e do gesso agrícola (Tabela 5.13). Tanto com a aplicação isolada dos corretivos, como quando associados ao gesso agrícola, as EA seguiram a ordem CC > CRM > ES. Neste caso, a maior EA observada foi para o CC quando associado ao gesso, na qual para cada quilograma de CC aplicado houve um aumento de 1,07 kg na produtividade das culturas (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 – Eficiência agrônômica (EA), expressa em quilogramas de grãos produzidos por kg de produto aplicado, de corretivos da acidez do solo, associados ou não ao gesso agrícola, e EA do gesso sobre a produtividade acumulada de grãos de milho, trigo, soja e massa seca de aveia-preta.

Eficiências Agrônômicas (EA, kg kg ⁻¹)	Corretivos da acidez			
	Controle	Calcário de rocha moída	Escória de siderurgia	Calcário calcinado
EA dos corretivos quando aplicados isoladamente (sem gesso)	-----	0,49	0,27	0,92
EA dos corretivos quando associados ao gesso (com gesso)	-----	0,35	0,24	1,07
EA do gesso entre os corretivos	0,50	0,28	0,44	0,17

Em relação à EA do gesso agrícola, pode-se verificar que em relação ao tratamento controle (sem correção da acidez) a aplicação de gesso proporcionou incrementos de 0,5 kg na produtividade por quilograma de gesso aplicado. Neste caso, a segunda maior EA foi da ES e as menores para ambos os calcários, sendo o CC menor que o CRM (Tabela 5.13).

Assim, pode-se inferir que as maiores EA dos corretivos e do gesso agrícola estão relacionados ao incremento nos teores de Ca^{2+} ao longo de todo o perfil do solo (Tabelas 5.5 e 5.6), conforme amplamente discutido em literatura (CAIRES et al. 2006; 2011a; 2011b; 2011c; JORIS et al., 2016).

6 CONCLUSÕES

Ambos os calcários foram os melhores corretivos da acidez do solo, principalmente quando aplicados isoladamente. Todavia, as reações do calcário calcinado no solo são mais rápidas em relação ao calcário de rocha moída, pela sua maior reatividade.

A aplicação de gesso juntamente com calcário de rocha moída ou calcário calcinado não é recomendada, visto que embora eles aumentem o teor de Mg^{2+} e K^+ nas camadas superficiais do solo, o gesso agrícola promove intensa lixiviação dos íons no perfil.

A escoria de siderurgia não foi um corretivo da acidez eficiente, tanto em reduzir a acidez do solo, como aumentar a disponibilidade de cátions básicos no solo ou aumentar a produtividade das culturas. E, quando aliada ao gesso agrícola promove intensa lixiviação de Mg^{2+} e K^+ no solo, além de aumentar os teores de Al^{3+} em profundidade.

A dinâmica dos íons no solo pela correção da acidez e aplicação de gesso agrícola influencia os atributos físicos do solo, tanto em superfície como em profundidade. Via de regra, o aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e a redução do Al^{3+} melhora a estrutura do solo, reduzindo sua densidade e aumentando sua porosidade.

O aumento no tempo de reação dos corretivos da acidez do solo reduziu a agregação do solo em sua camada mais superficial (0–0,20 m). Porém, tais alterações não foram deletérias a estrutura do solo.

A substituição de Al^{3+} por Mg^{2+} no complexo de troca do solo, decorrentes da aplicação da ES e do gesso agrícola influencia a retenção de água no solo. Sendo que a maior concentração do Mg^{2+} favorece a retenção.

Os efeitos da correção da acidez do solo, independentemente do corretivo, e do gesso agrícola sobre a produtividade das culturas ocorre de maneira independente. Também, as culturas respondem de maneira distinta a correção da acidez e a gessagem. Todavia, o calcário calcinado foi o corretivo com maior eficiência agrônômica, tanto quando aplicado isoladamente como quando associado ao gesso agrícola.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; PASSOS, J. F. M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 963–975, 2005.
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 799–806, 2003.
- ALCARDE, J. C. Características de qualidade dos corretivos da acidez do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE ACIDEZ E CALAGEM, REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: SBCS, 1983, p.10–31.
- ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. Boletim Técnico, 6. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992.
- ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. O equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. **Scientia Agricola**, v. 53, p. 204–210, 1996.
- ANDO, J.; OWA, N.; ASANO, M. Studies on structure, solubility and agronomic response of industrial slag: Effects of aluminium on solubility and agronomic response of slags. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 59, p. 27–32, 1998.
- AULER, A. C.; PIRES, L. F.; CAIRES, E. F. Surface and incorporated liming effects on clay dispersion, water availability, and aeration capacity of a Dystrudept soil. **Bragantia**, v. 76, p.433–446, 2017a.
- AULER, A. C.; PIRES, L. F.; SANTOS, J. A. B.; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use and Management**, v. 33, p. 129–140, 2017b.
- ÁVILA, I.; CRNKOVIC, P. M.; MILIOLI, F. E. Determinação dos parâmetros de Arrhenius da reação de sorção do dióxido de enxofre por calcário. **Química Nova**, v. 30, p. 1275–1281, 2007.
- AYE, N. S.; SALE, P. W. G.; TANG, C. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 52, p. 697–709, 2016.
- BARRAL, M. T.; ARIASA, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 46, p. 261–272, 1998.
- BARRETO, r.; MADARI, B.; MADDOCK, J. E. L.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E. FRANCHINI, J.; COSTA, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 132, p. 243–251, 2009.
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 160, p. 268–282, 1937.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681–691, 2010.

BERNARDI, A. C. C.; MENDONÇA, F. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; MONTE, M. B. M. Disponibilidade de água e produção de arroz em função das doses de concentrado zeolítico. **Irriga**, v. 14, p. 123–134, 2009.

BLEVINS, R. L.; THOMAS, G. W.; SMITH, M. S.; FRYE, W. W.; CORNELIUS, P. L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil and Tillage Research**, v. 3, p. 135–146, 1983.

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

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C. Estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho degradado em recuperação com adubos verdes, calcário e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1263–1270, 2011.

BORGES, W. L. B.; SOUZA, I. M. D.; SÁ, M. E. ALVES, M. C. Estabilidade de agregados em Latossolos sob plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, p. 156–162, 2016.

BORTOLUZZI, E. C.; GARBOZZA, L.; GUARESCHI, C.; RHEINHEIMER, D. S. Efeito da calagem na relação entre solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2621–2628, 2008.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 26, p. 211–252, 1964.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; QUADROS NETO, C.; FERREIRA, A. O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, p. 80–88, 2012a.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1007–1014, 2012b.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; FERREIRA, A. O.; QUADROS NETO, C.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 151–160, 2012c.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3–22, 2005.

BRUNETTO, G.; GATIBONI, L. C.; SANTOS, D. R.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 565–571, 2005.

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

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicado na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 27–34, 1998.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, p. 213–223, 2001.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, p. 57–64, 2008a.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1804–1814, 2011a.

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

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 125–136, 2004.

CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**, v. 68, p. 209–216, 2011c.

CAIRES, E. F.; PEREIRA FILHO, P. R. S.; ZARDO FILHO, R.; FELDHAUS, I. C. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 302–309, 2008b.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275–286, 2003.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; CARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 171–180, 2015.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; MOONEY, S. J. Impact of amendments on the physical properties of soil under tropical long-term no till conditions. **PLoS ONE**, v. 11, p. e0167564, 2016.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; PENN, C. J.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 241, p. 11–23, 2017.

CARMEIS FILHO, A. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; COSTA, C. H. M. Changes in soil physical properties and carbon protection mechanisms by surface application of lime in a tropical no-tillage system. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, p. 56–65, 2018.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, v. 55, p. 1407–1413, 1991.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527–538, 1998.

CASTRO, G. S. A.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1690–1698, 2011.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195/196, p. 234–242, 2013.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; BRYE, K. R. Surface lime and silicate application and crop production system effects on physical characteristics of a Brazilian Oxisol. **Soil Research**, v. 55, p. 778–787, 2017.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. Effect of lime (CaCO_3) application on soil structural stability of a red earth. **Australian Journal of Soil Research**, v. 36, p. 73–86, 1998.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1055–1064, 2002.

CLEMMENSEN, K. E.; BAHR, A.; OVASKAINEN, O.; DAHLBERG, A.; EKBLAD, A.; WALLANDER, H.; STENLID, J.; FINLAY, R. D.; WARDLE, D. A.; LINDAHL, B. D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. **Science**, v. 339, p. 1615–1618, 2013.

CONGREVES, K. A.; HAYES, A.; VERHALLEN, E. A.; VAN EERD, L. L. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 17–28, 2015.

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 263–272, 2009.

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**, v. 74, p. 119–132, 2016.

CREGAN, P. D.; HIRTH, J. R.; CONYERS, M. K. Amelioration of soil acidity by liming and other amendments. In: ROBSON, A.D. (Ed.). **Soil acidity and plant growth**. Sydney: Academic Press, 1989. Cap. 6, p. 204–264.

CREMON, C.; ROSA JÚNIOR, E. J.; SERAFIM, M. E.; ONO, F. B. Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, p. 139–146, 2009.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, v. 137, p. 87–99, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; McCRAY, J. M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1843–1854, 2014.

DANE, J.H.; TOPP, C.G.; CAMPBELL, G.S. (Eds). **Methods of soil analysis: Part 4 – Physical methods**. 3. Ed. Madison: SSSA, 2002.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v. 107, p. 315–321, 1995.

DONTSOVA, K. M.; NORTON, L. D. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. **Soil Science**, v. 167, p. 184–193, 2002.

DOWNS, R. T.; HALL-WALLACE, M. The American Mineralogist Crystal Structure Database. **American Mineralogist**, v. 88, p. 247–250, 2003. Disponível em: < <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php> >. Acesso em: Agosto de 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. Ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

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**, v. 35, p. 889–901, 2004.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; MORAES, M. F. Influence of lime and gypsum on yield and yield components of soybean and changes in soil chemical properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 45, p. 271–283, 2014.

FAGERIA, N. K.; SLATON, N. A.; BALIGAR, V. C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 80, p. 63–152, 2003.

FALSONE, G.; CELI, L.; BONIFACIO, E. Aggregate formation in chloritic and serpentinitic alpine soils. **Soil Science**, v. 172, p. 1019–1030, 2007.

FALSONE, G.; CELI, L.; STANCHI, S.; BONIFACIO, E. Relative importance of mineralogy and organic matter characteristics on macroaggregate and colloid dynamics in Mg-silicate dominated soils. **Land Degradation and Development**, v. 27, p. 1700–1708, 2016.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1559–1567, 2018.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em Latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1483–1489, 2015.

FISHER, R. A. **The design of the experiments**. 8. Ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1966.

GHANI, M. O.; HASAN, K. A.; KHAN, M. F. A. Effect of liming on aggregation, non capillary pore space and permeability of a lateritic soil. **Soil Science**, v. 80, p. 469–478, 1955.

GOMES, M. F. A. Influência de ferro e alumínio amorfos do solo na reatividade de quatro corretivos de acidez. **Ceres**, v. 43, p. 444–453, 1996.

GUJARATI, D. **Econometria básica**. 4.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

HAYNES, R.J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 51, p. 123–137, 1998.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática – segundo Köppen**. CRM-ROM. 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. Médias históricas de Ponta Grossa. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm>. Acesso em: 12 abr. 2018.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 523–532, 2017.

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

JAISWAL, D. K.; VERMA, J. P.; PRAKASH, S.; MEENA, V. S.; MEENA, R. S. Potassium as an important plant nutrient in sustainable agriculture: A state of the art. In: MEENA, V. S.; MAURYA, B.; VERMA, J. P.; MEENA, R. S. (Eds). **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer, 2016. Cap. 2, p. 21–29.

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION. **Ecological Applications**, v. 10, p. 423–436, 2000.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, p. 409–424, 2013.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, A. R.; HALISKI, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 68–77, 2016.

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. Manhatam: Elsevier, 2005.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. 2. Ed. Madison: SSSA, 1986. 1358 p. p. 635–662.

KUTTAH, D.; SATO, K. Review on the effect of gypsum content on soil behavior. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 28–37, 2015

LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, C. R.; BACCHI, O. O. S. Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1659–1668, 2013.

LEVY G. J.; TORRENTO, J. R Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Science**, v. 160. p. 352–358, 1995.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. Ed. São Paulo: EDUSP, São Paulo, 2012.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. Ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

MARCHINI, D. C.; LING, T. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 574–580, 2015.

MARCHUK, A.; RENGASAMY, P. Clay behaviour in suspension is related to the ionicity of clay–cation bonds. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 754–759, 2011.

MATTIELLO, L.; KIRST, M.; SILVA, F. R.; JORGE, R. A.; MENOSSI, M. Transcriptional profile of maize roots under acid soil growth. **BMC Plant Biology**, v. 10, p. 196–110, 2010.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1197–1206, 2011.

Mineralogy Database, 2012. Disponível em: <<http://webmineral.com/>>. Acesso em: Agosto de 2016.

MIRANDA, M. F. A.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, A. G.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M. Improvement of degraded physical attributes of a saline-sodic soil as influenced by phytoremediation and soil conditioners. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2018. *No prelo*.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p. 411–416, 1993.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: SSSA, 1986. p. 799–823.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85–91, 2013.

NUNES, M. R.; SILVA, A. P.; DENARDIN, J. E.; GIAROLA, N. F. B.; VAZ, C. M. P.; VAN, H. M.; SILVA, A. R. Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under a no-till cropping system. **Soil Research**, v. 55, p. 819–831, 2017.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 202, p. 98–107, 2015.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Circular Técnica 76. Londrina: IAPAR, 1992. 39 p.

PEARSON, K.; FILON, L. N. G. Mathematical contributions to the theory of evolution. IV. On the probable errors of frequency constants and on the influence of random selection on variation and correlation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 191, p. 229–311, 1898.

PEREGRINA, F.; MARISCAL, I.; ESPEJO, R. Agronomic implications of the application of lime plus gypsum by-products to a Hyperdistic Acrisol from Western Spain. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 2080–2101, 2008.

PIRES, L. F.; BRINATTI, A. M.; PRANDEL, L. V.; SAAB, S. C. Mineralogical composition of hardsetting soils and its effect on the radiation attenuation characteristics. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, p. 1059–1068, 2016.

PRADO, R. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 539–546, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 739–744, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; FERNANDES, F. M.; CORRÊA, M. C. M. Reatividade de uma escória de siderurgia em um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 197–205, 2004.

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

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 849–857, 2006.

REGELINK, I. C.; STOOF, C. R.; ROUSSEVA, S.; WENG, L.; LAIR, G. J.; KRAM, P.; NIKOLAIDIS, N. P.; KERCHEVA, M.; BANWART, S.; COMANS, R. N. J. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. **Geoderma**, v. 247–248, p. 24–37, 2015.

RENGASAMY, P.; GREENE, R. S. B.; FORD, G. W. Influence of magnesium on aggregate stability in sodic Red-Brown earths. **Australian Journal of Soil Research**, v. 24, p. 229–237, 1986.

RENGASAMY, P.; MARCHUK, A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). **Soil Research**, v. 49, p. 280–285, 2011.

ROSA JÚNIOR, E.; MARTINS, R. M. G.; ROSA, Y. B. C. J.; CREMON, C. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de Cerrado sob três sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, p. 37–44, 2006.

ROTH, C.; PAVAN, M. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, p. 351–361, 1991.

RUSSEL, E. W. Soil conditions and plant growth. London: Longman, 1973.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, p. 407–437, 2007.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P.; FARINA, M. P. W.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soils: A review. **Advances in Soil Science**, v. 9, p. 1–111, 1989.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 7–31, 2004.

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

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 205–274.

SOUZA, F.; BRAGANÇA, S. R. Caracterização tecnológica de um calcário de rocha moída *in natura*, calcinado e sulfatado como meio dessulfurante. **Cerâmica**, v. 59, p. 331–337, 2013.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2. Ed. San Diego: Elsevier Science, 2003.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. Ed. New York: Oxford University, 2008.

STRYDOM, C. A.; POTGIETER, J. H. Dehydration behaviour of a natural gypsum and a phosphogypsum during milling. **Thermochimica Acta**, v. 332, p. 89–96, 1999.

SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N.S.; STEWART, B.A. (Eds). **Subsoil management techniques**. Advances in soil science. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. p.147-185.

SUN, P.; TIAN, Q. Y.; ZHAO, M. G.; HUANG, J. H.; LI, L. H.; ZHANG, W. H. Aluminum induced ethylene production is associated with inhibition of root elongation in *Lotus japonicus* L. **Plant and Cell Physiology**, v. 48, p. 1229–1235, 2007.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 487-494, 2008.

TIROL-PADRE, A.; LADHA, J. K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 969–978, 2004.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141–163, 1982.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; BORSZOWSKI, P. R.; LETOURMY, P.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. O.; SANTOS, J. B.; INAGAKI, T.M. Soil carbon inventory by wet oxidation and dry combustion methods: effects of land use, soil texture gradients and sampling depth on the linear model of C-equivalent correction factor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 1048-1059, 2012.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 301–309, 1998.

TUKEY, J.W. A Quick, compact, two-sample test to Duckworth's specifications. **Technometrics**, v. 1, p. 31–48, 1959.

VALE, F.; ALCARDE, J. C. Extratores para avaliar a disponibilidade do zinco em fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 655-662, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN RAIJ, B. **Gesso na agricultura**. Campinas: IAC, 2013.

VAN RAIJ, B.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. Ed. Campinas: IAC, 1996.

VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agricola**, v. 49, p. 123–128, 1992.

VITTI, C. G.; LUZ, L. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 2008.

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

WADT, P. G. S. Alterações eletroquímicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com carbonato e sulfato de cálcio. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 519-524, 2000.

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

YAZDANPANA, N.; MAHMOODABAD, M.; CERDÀ, A. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. **Geoderma**, v. 266, p. 58–65, 2016.

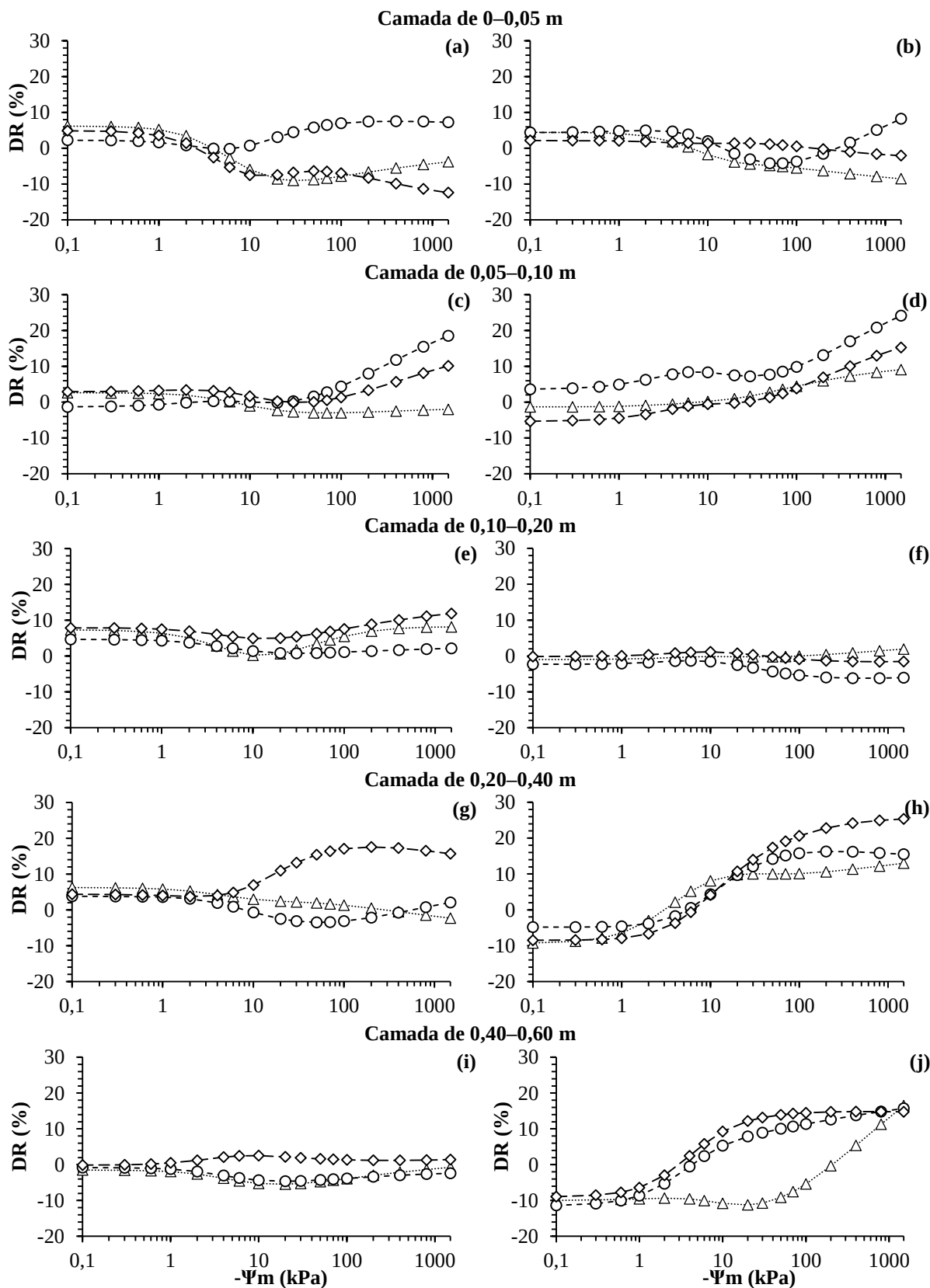
YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society of Agronomy**, v. 28, p. 337–351, 1936.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 128–137, 2015.

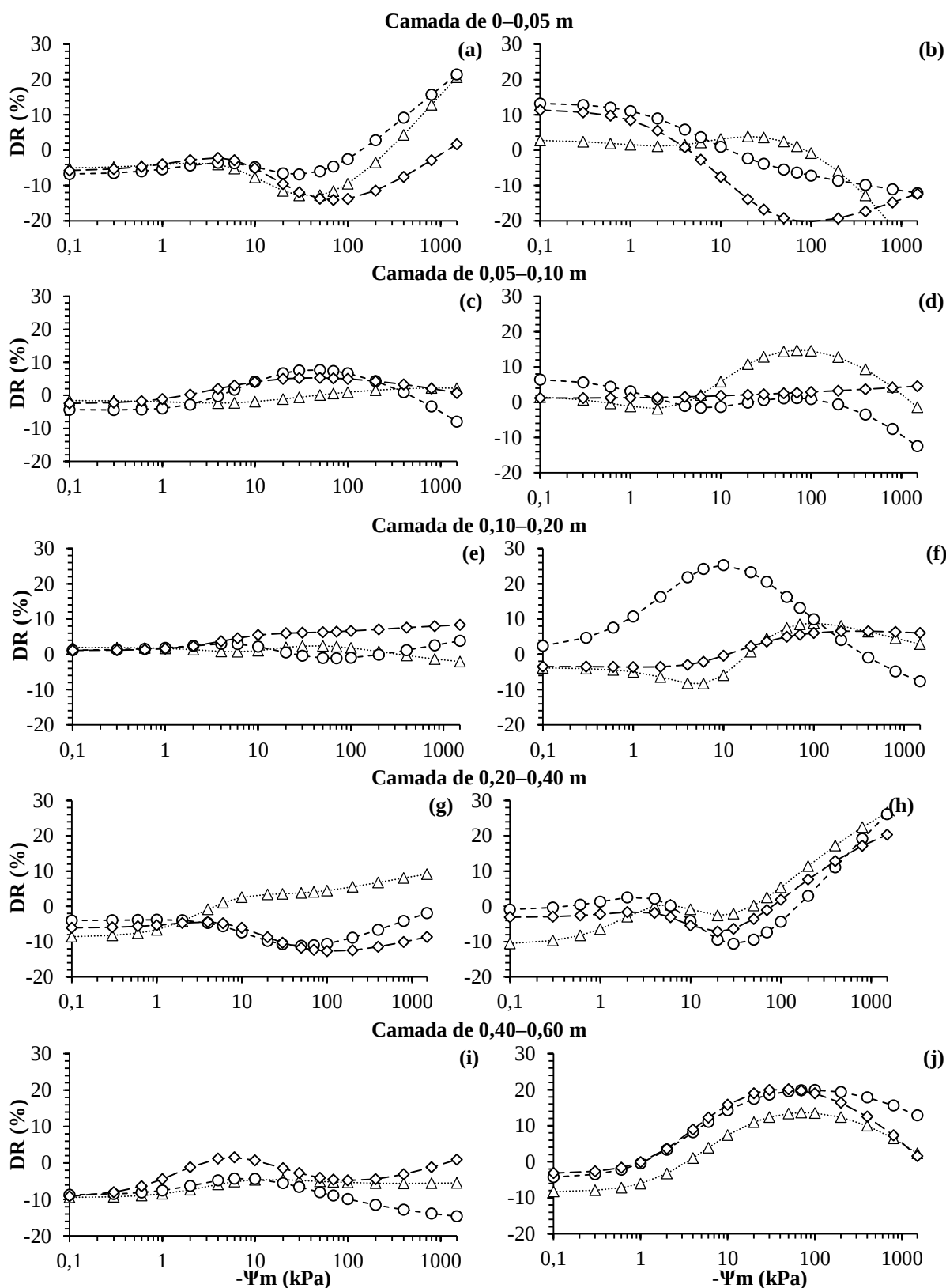
APÊNDICE A.1 – Parâmetros empíricos do ajuste das curvas de retenção de água pelo modelo de van Genuchten (1980), aos 7 e aos 15 meses após aplicação de corretivos da acidez, associados ou não ao gesso agrícola em camadas de solo.

Corretivos da acidez	Gesso agrícola	7 meses após aplicação						15 meses após aplicação					
		θs	θr	α	n	m	R²	θs	θr	α	n	m	R²
		cm³	cm³	kPa⁻¹				cm³	cm³	kPa⁻¹			
0–0,05 m													
Controle	Sem	0,447	0,230	0,229	1,555	0,357	0,94	0,413	0,190	0,147	1,608	0,378	0,97
	Com	0,429	0,221	0,124	1,622	0,384	0,86	0,460	0,000	0,357	1,163	0,140	0,96
Calcário de rocha moída	Sem	0,419	0,232	0,112	1,491	0,329	0,95	0,434	0,000	0,183	1,181	0,153	0,97
	Com	0,410	0,244	0,082	1,733	0,423	0,91	0,446	0,198	0,258	1,434	0,303	0,92
Escória de siderurgia	Sem	0,425	0,266	0,096	1,903	0,474	0,94	0,441	0,073	0,213	1,259	0,206	0,98
	Com	0,420	0,229	0,117	1,697	0,411	0,93	0,398	0,000	0,116	1,148	0,129	0,95
Calcário calcinado	Sem	0,437	0,216	0,163	1,672	0,402	0,98	0,437	0,104	0,299	1,213	0,176	0,95
	Com	0,411	0,155	0,141	1,284	0,221	0,98	0,407	0,000	0,034	1,200	0,166	0,91
0,05–0,10 m													
Controle	Sem	0,415	0,205	0,160	1,552	0,356	0,99	0,414	0,081	0,259	1,208	0,172	0,95
	Com	0,404	0,234	0,121	1,665	0,400	0,95	0,441	0,008	0,605	1,139	0,122	0,95
Calcário de rocha moída	Sem	0,404	0,207	0,136	1,519	0,342	0,94	0,420	0,096	0,212	1,248	0,199	0,99
	Com	0,409	0,208	0,124	1,579	0,367	0,99	0,433	0,166	0,243	1,530	0,346	0,98
Escória de siderurgia	Sem	0,402	0,161	0,173	1,360	0,265	0,97	0,431	0,173	0,286	1,435	0,303	0,96
	Com	0,425	0,174	0,173	1,393	0,282	0,95	0,411	0,167	0,179	1,372	0,271	0,95
Calcário calcinado	Sem	0,420	0,132	0,186	1,337	0,252	0,98	0,424	0,113	0,386	1,251	0,201	0,99
	Com	0,390	0,126	0,225	1,269	0,212	0,98	0,436	0,000	0,598	1,141	0,123	0,94
0,10–0,20 m													
Controle	Sem	0,415	0,168	0,197	1,454	0,312	0,99	0,397	0,174	0,151	1,602	0,376	0,97
	Com	0,391	0,157	0,130	1,499	0,333	0,97	0,384	0,167	0,193	1,494	0,331	0,94
Calcário de rocha moída	Sem	0,385	0,157	0,107	1,548	0,354	0,98	0,389	0,182	0,134	1,723	0,420	0,99
	Com	0,395	0,150	0,139	1,465	0,318	0,98	0,399	0,173	0,112	1,905	0,475	0,95
Escória de siderurgia	Sem	0,382	0,142	0,155	1,440	0,305	0,99	0,392	0,157	0,192	1,446	0,309	0,97
	Com	0,392	0,157	0,150	1,466	0,318	0,99	0,380	0,194	0,167	1,660	0,397	0,99
Calcário calcinado	Sem	0,396	0,163	0,165	1,447	0,309	0,99	0,392	0,157	0,187	1,557	0,358	0,97
	Com	0,400	0,163	0,154	1,442	0,307	0,98	0,397	0,160	0,178	1,586	0,370	0,97
0,20–0,40 m													
Controle	Sem	0,436	0,171	0,169	1,461	0,316	0,99	0,394	0,155	0,166	1,536	0,349	0,99
	Com	0,399	0,202	0,112	1,551	0,355	0,96	0,393	0,209	0,165	1,894	0,472	0,94
Calcário de rocha moída	Sem	0,408	0,182	0,137	1,522	0,343	0,98	0,428	0,133	0,285	1,446	0,308	0,99
	Com	0,437	0,167	0,318	1,427	0,299	0,99	0,436	0,112	0,406	1,316	0,240	0,99
Escória de siderurgia	Sem	0,419	0,152	0,141	1,375	0,273	0,99	0,410	0,138	0,166	1,385	0,278	0,99
	Com	0,419	0,175	0,139	1,694	0,410	0,98	0,398	0,000	0,324	1,152	0,132	0,99
Calcário calcinado	Sem	0,417	0,153	0,141	1,641	0,391	0,99	0,418	0,153	0,222	1,380	0,276	0,95
	Com	0,433	0,150	0,150	1,631	0,387	0,99	0,406	0,143	0,181	1,423	0,297	0,99
0,40–0,60 m													
Controle	Sem	0,430	0,167	0,235	1,507	0,337	0,95	0,388	0,142	0,221	1,464	0,317	0,92
	Com	0,410	0,186	0,162	1,478	0,323	0,90	0,413	0,002	0,172	1,147	0,128	0,83
Calcário de rocha moída	Sem	0,436	0,164	0,198	1,483	0,326	0,97	0,425	0,149	0,285	1,442	0,307	0,90
	Com	0,452	0,083	0,160	1,267	0,210	0,96	0,447	0,142	0,346	1,336	0,252	0,99
Escória de siderurgia	Sem	0,433	0,169	0,200	1,499	0,333	0,97	0,422	0,166	0,312	1,450	0,310	0,88
	Com	0,458	0,149	0,328	1,433	0,302	0,98	0,431	0,109	0,498	1,279	0,218	0,99
Calcário calcinado	Sem	0,431	0,163	0,281	1,481	0,325	0,98	0,426	0,111	0,618	1,278	0,218	0,96
	Com	0,447	0,159	0,322	1,503	0,335	0,99	0,388	0,142	0,221	1,464	0,317	0,92

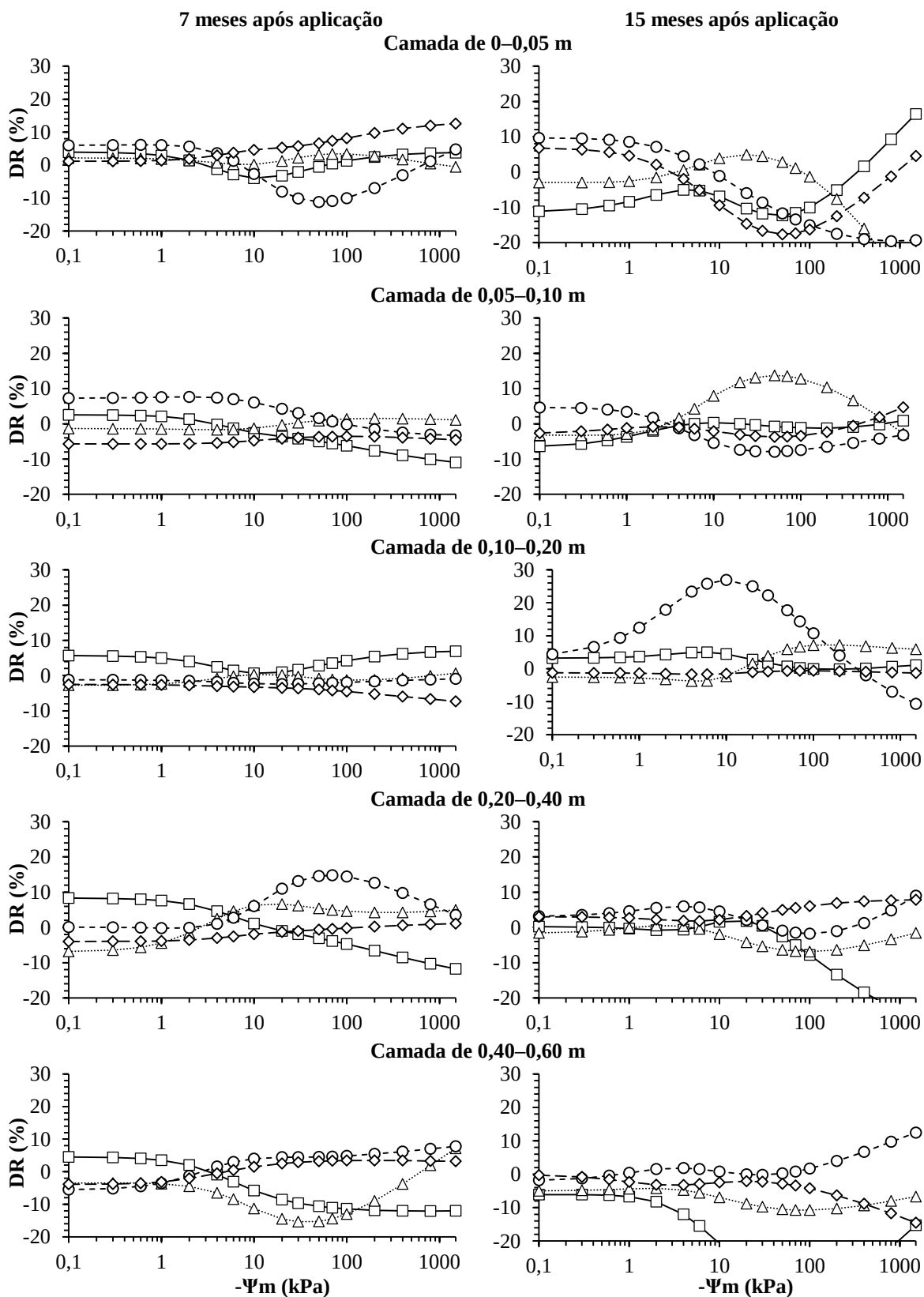
Apêndice A.2 – Diferenças relativas (DR) das curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, em relação ao tratamento controle (considerado como referência), aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.



APÊNDICE A.3 – Diferenças relativas (DR) das curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de corretivos da acidez do solo [calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], sem (a, c, g, e, i) e com (b, d, f, h, j) gesso agrícola, em relação ao tratamento controle (considerado como referência), aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.



Apêndice A.4 – Diferenças relativas (DR) das curvas de retenção de água no solo em função da aplicação de gesso agrícola associado aos diferentes corretivos da acidez do solo [controle (Δ), calcário de rocha moída ($\diamond$), escória de siderurgia ($\square$) e calcário calcinado ($\circ$)], considerando a aplicação isolada do corretivos como referência, aos 7 (à esquerda) e aos 15 meses (à direita) após aplicação dos tratamentos.



APÊNDICE B.1 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) dos componentes da acidez [acidez ativa (pH em CaCl_2), potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e trocável (Al^{3+})] de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	pH (CaCl ₂)		H+Al		Al ³⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0–0,05 m							
Bloco	2	0,008	0,889	0,361	0,766	0,009	0,756
Corretivos	3	0,491	0,004	8,900	0,005	0,189	0,007
Gesso	1	0,193	0,118	7,063	0,037	0,167	0,035
Interação	3	0,013	0,901	0,932	0,566	0,061	0,161
Resíduos	14	0,069		1,325		0,031	
CV (%)		5,43		16,96		77,82	
B ₀		13,450	0,062	---	---	---	---
W		0,971	0,680	0,960	0,435	0,957	0,373
0,05–0,10 m							
Bloco	2	0,017	0,333	0,742	0,125	0,053	0,520
Corretivos	3	0,022	0,246	1,718	0,010	0,051	0,595
Gesso	1	0,106	0,016	3,519	0,004	0,220	0,115
Interação	3	0,096	0,005	3,892	<0,001	0,414	0,012
Resíduos	14	0,014		0,306		0,078	
CV (%)		2,74		6,71		33,31	
B ₀		5,891	0,553	10,959	0,140	2,334	0,939
W		0,906	0,864	0,965	0,538	0,935	0,129
0,10–0,20 m							
Bloco	2	1,80E-03	0,916	0,015	0,980	0,020	0,836
Corretivos	3	3,01E-02	0,263	1,598	0,137	0,107	0,436
Gesso	1	2,77E-02	0,263	1,173	0,227	0,158	0,252
Interação	3	1,55E-01	0,003	4,082	0,010	0,440	0,031
Resíduos	14	2,03E-02		0,735		0,111	
CV (%)		3,30		9,56		36,57	
B ₀		20,749	0,004	8,345	0,303	11,494	0,119
W		0,933	0,111	0,952	0,304	0,967	0,584
0,20–0,40 m							
Bloco	2	1,41E-03	0,714	0,70	0,13	0,016	0,658
Corretivos	3	1,04E-02	0,099	0,37	0,33	0,059	0,228
Gesso	1	8,55E-02	<0,001	0,79	0,12	0,100	0,120
Interação	3	2,02E-03	0,694	0,39	0,31	0,039	0,390
Resíduos	14	4,10E-03		0,29		0,036	
CV (%)		1,49		5,98		19,79	
B ₀		12,696	0,080	6,393	0,495	5,882	0,554
W		0,949	0,262	0,962	0,482	0,953	0,319
0,40–0,60 m							
Bloco	2	7,71E-03	0,278	0,643	0,069	0,043	0,298
Corretivos	3	1,11E-02	0,156	0,323	0,226	0,084	0,093
Gesso	1	6,15E-02	0,005	0,011	0,816	0,070	0,162
Interação	3	1,84E-02	0,049	1,460	0,003	0,076	0,115
Resíduos	14	5,48E-03		0,197		0,032	
CV (%)		1,68		5,78		25,06	
B ₀		25,018	0,001	4,632	0,041	5,566	0,591
W		0,886	0,242	0,927	0,083	0,976	0,813

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.2 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) dos componentes da acidez [acidez ativa (pH em CaCl_2), potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e trocável (Al^{3+})] de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	pH (CaCl ₂)		H+Al		Al ³⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0-0,05 m							
Bloco	2	0,239	0,011	3,734	0,023	0,015	0,286
Corretivos	3	0,501	<0,001	13,397	<0,001	0,140	<0,001
Gesso	1	1,00E-04	0,959	0,194	0,617	0,006	0,479
Interação	3	0,106	0,080	2,867	0,033	0,059	0,011
Resíduos	14	0,038		0,742		0,011	
CV (%)		4,15		11,14		41,49	
B ₀		6,768	0,453	15,696	0,028	6,761	0,454
W		0,963	0,503	0,955	0,348	0,967	0,592
0,05-0,10 m							
Bloco	2	0,139	0,093	1,897	0,130	0,065	0,243
Corretivos	3	0,172	0,044	4,028	0,014	0,266	0,006
Gesso	1	0,030	0,447	0,046	0,813	0,150	0,077
Interação	3	0,043	0,477	2,140	0,088	0,167	0,029
Resíduos	14	0,049		0,800		0,041	
CV (%)		5,03		10,25		24,45	
B ₀		17,145	0,052	20,660	0,004	18,887	0,009
W		0,979	0,867	0,911	0,425	0,947	0,233
0,10-0,20 m							
Bloco	2	0,016	0,481	1,046	0,257	0,047	0,255
Corretivos	3	0,114	0,010	4,849	0,004	0,277	0,001
Gesso	1	0,007	0,576	1,662	0,145	0,000	0,909
Interação	3	0,037	0,193	0,965	0,289	0,222	0,004
Resíduos	14	0,020		0,698		0,031	
CV (%)		3,28		9,62		22,05	
B ₀		4,071	0,772	4,882	0,674	10,573	0,158
W		0,953	0,320	0,971	0,686	0,954	0,324
0,20-0,40m							
Bloco	2	0,028	0,375	0,793	0,417	0,049	0,387
Corretivos	3	0,019	0,552	0,619	0,553	0,133	0,080
Gesso	1	0,010	0,541	0,017	0,889	0,024	0,490
Interação	3	0,045	0,214	1,337	0,241	0,312	0,005
Resíduos	14	0,026		0,851		0,048	
CV (%)		3,73		10,63		20,84	
B ₀		4,272	0,748	2,617	0,918	10,969	0,140
W		0,958	0,396	0,960	0,431	0,931	0,103
0,40-0,60 m							
Bloco	2	0,011	0,625	0,905	0,483	0,031	0,008
Corretivos	3	0,014	0,615	0,259	0,881	0,129	<0,001
Gesso	1	0,070	0,096	0,313	0,615	0,000	0,788
Interação	3	0,022	0,416	1,641	0,287	0,033	0,003
Resíduos	14	0,022		1,180		0,004	
CV (%)		3,70		13,93		10,20	
B ₀		7,560	0,373	3,495	0,836	6,383	0,496
W		0,967	0,592	0,963	0,498	0,982	0,931

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.3 – Desdobramento da interação entre os corretivos da acidez [controle, calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)] e do gesso agrícola (sem e com gesso) dos componentes da acidez [acidez ativa (pH em CaCl₂), potencial (H+Al) e trocável (Al³⁺)] de camadas de solo, aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.

pH e trocação (pH) de camadas de solo, aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.							
Fontes de variação	GL	pH CaCl ₂		H+Al		Al ³⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
7 meses após aplicação: 0,05–0,10 m							
Gesso em controle	1	0,358	<0,001	4,940	<0,001	0,335	0,024
Gesso em CRM	1	0,005	0,570	0,670	0,135	0,130	0,220
Gesso em ES	1	0,014	0,338	14,245	<0,001	1,260	0,001
Gesso em CC	1	0,018	0,278	0,331	0,316	0,002	0,886
Corretivos sem gesso	3	0,085	0,008	0,029	0,764	0,034	0,521
Corretivos com gesso	3	0,033	0,117	0,589	0,187	0,167	0,166
Resíduo	14	0,014		0,306		0,078	
7 meses após aplicação: 0,10–0,20 m							
Gesso em controle	1	0,419	0,001	12,013	0,001	1,307	0,004
Gesso em CRM	1	0,004	0,704	0,010	0,909	0,020	0,674
Gesso em ES	1	0,000	0,937	0,060	0,779	0,015	0,718
Gesso em CC	1	0,038	0,220	1,335	0,199	0,135	0,288
Corretivos sem gesso	3	0,083	0,042	4,181	0,009	0,290	0,092
Corretivos com gesso	3	0,073	0,060	1,500	0,155	0,257	0,120
Resíduo	14	0,023		0,735		0,111	
7 meses após aplicação: 0,40–0,60 m							
Gesso em controle	1	0,101	0,001	3,154	0,001	-----	-----
Gesso em CRM	1	0,000	0,871	0,670	0,086	-----	-----
Gesso em ES	1	0,003	0,469	0,567	0,112	-----	-----
Gesso em CC	1	0,012	0,159	0,000	0,989	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	0,013	0,109	1,090	0,010	-----	-----
Corretivos com gesso	3	0,016	0,068	0,692	0,044	-----	-----
Resíduo	14	0,005		0,197		-----	-----
15 meses após aplicação							
Fontes de variação	GL	H + Al 0–0,05 m		Al ³⁺ 0–0,05 m		Al ³⁺ 0,05–0,10 m	
		QM	p	QM	p	QM	p
Gesso em controle	1	4,352	0,030	0,111	0,007	0,123	0,107
Gesso em CRM	1	3,697	0,043	0,051	0,048	0,187	0,052
Gesso em ES	1	0,728	0,339	0,005	0,493	0,015	0,557
Gesso em CC	1	0,018	0,878	0,014	0,276	0,327	0,014
Corretivos sem gesso	3	12,460	<0,001	0,142	<0,001	0,378	0,001
Corretivos com gesso	3	3,805	0,013	0,056	0,013	0,055	0,305
Resíduo	14	0,742		0,011		0,041	
		Al ³⁺ 0,10–0,20 m		Al ³⁺ 0,20–0,40 m		Al ³⁺ 0,40–0,60 m	
		QM	p	QM	p	QM	p
Gesso em controle	1	0,446	0,002	0,004	0,784	0,018	0,064
Gesso em CRM	1	0,118	0,071	0,012	0,622	0,005	0,331
Gesso em ES	1	0,002	0,784	0,234	0,044	0,033	0,017
Gesso em CC	1	0,100	0,093	0,711	0,002	0,045	0,007
Corretivos sem gesso	3	0,347	0,001	0,094	0,165	0,037	0,002
Corretivos com gesso	3	0,151	0,016	0,351	0,003	0,126	<0,001
Resíduo	14	0,031		0,048		0,004	

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.4 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) dos cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] em camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0–0,05 m							
Bloco	2	0,126	0,514	0,009	0,727	3,15E-03	0,010
Corretivos	3	1,700	< 0,001	0,883	< 0,001	1,23E-03	0,101
Gesso	1	5,616	< 0,001	2,202	< 0,001	4,27E-03	0,010
Interação	3	0,996	< 0,001	0,120	0,027	6,56E-04	0,300
Resíduos	14	0,181		0,029		4,88E-04	
CV (%)		11,39		16,91		9,11	
B ₀		15,890	0,026	13,189	0,068	8,780	0,269
W		0,929	0,095	0,955	0,339	0,963	0,511
0,05–0,10 m							
Bloco	2	0,075	0,290	0,011	0,323	3,57E-04	0,567
Corretivos	3	0,652	< 0,001	0,036	0,026	7,40E-04	0,338
Gesso	1	1,097	< 0,001	0,080	< 0,001	4,55E-02	< 0,001
Interação	3	2,054	< 0,001	0,185	< 0,001	4,57E-04	0,538
Resíduos	14	0,055		0,009		6,05E-04	
CV (%)		12,52		15,90		16,99	
B ₀		4,492	0,722	8,964	0,255	3,579	0,827
W		0,963	0,494	0,964	0,534	0,953	0,307
0,10–0,20 m							
Bloco	2	0,079	0,606	0,029	0,060	6,35E-05	0,810
Corretivos	3	0,594	0,032	0,008	0,444	2,00E-03	0,005
Gesso	1	0,548	0,079	0,016	0,183	2,63E-02	< 0,001
Interação	3	2,488	< 0,001	0,105	< 0,001	3,37E-04	0,369
Resíduos	14	0,152		0,008		2,97E-04	
CV (%)		24,5		17,03		13,81	
B ₀		17,927	0,012	13,372	0,064	6,613	0,470
W		0,917	0,692	0,950	0,277	0,967	0,597
0,20–0,40 m							
Bloco	2	0,056	0,665	0,012	0,441	2,84E-04	0,531
Corretivos	3	0,027	0,895	0,069	0,014	4,60E-03	0,001
Gesso	1	1,173	0,010	0,028	0,173	1,75E-03	0,063
Interação	3	0,608	0,020	0,052	0,035	1,44E-02	< 0,001
Resíduos	14	0,133		0,014		4,30E-04	
CV (%)		30,36		25,59		16,18	
B ₀		22,973	0,002	7,592	0,370	11,581	0,115
W		0,929	0,092	0,972	0,708	0,943	0,190
0,40–0,60 m							
Bloco	2	0,076	0,119	0,007	0,528	2,53E-03	0,262
Corretivos	3	0,076	0,101	0,043	0,028	1,53E-02	0,001
Gesso	1	1,790	< 0,001	0,624	< 0,001	9,20E-03	0,036
Interação	3	0,109	0,042	0,054	0,013	7,56E-03	0,022
Resíduos	14	0,030		0,010		1,72E-03	
CV (%)		19,22		21,14		38,10	
B ₀		7,348	0,394	17,530	0,014	11,551	0,116
W		7,348	0,818	0,907	0,077	0,894	0,143

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.5 – Desdobramento da interação entre os corretivos da acidez [controle, calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)] e do gesso agrícola (sem e com gesso) dos cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] de camadas de solo, aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0–0,05 m							
Gesso em controle	1	6,773	<0,001	0,154	0,037	-----	-----
Gesso em CRM	1	1,316	0,017	0,375	0,003	-----	-----
Gesso em ES	1	0,147	0,382	1,465	<0,001	-----	-----
Gesso em CC	1	0,368	0,176	0,567	<0,001	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	2,453	<0,001	0,524	<0,001	-----	-----
Corretivos com gesso	3	0,242	0,301	0,479	<0,001	-----	-----
Resíduo	14	0,181		0,029		-----	-----
0,05–0,10 m							
Gesso em controle	1	5,444 [§]	<0,001	0,051 ^{§§}	0,029	-----	-----
Gesso em CRM	1	0,390	0,019	0,002	0,667	-----	-----
Gesso em ES	1	0,086	0,232	0,577	<0,001	-----	-----
Gesso em CC	1	1,340	<0,001	0,005	0,442	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	0,599	0,001	0,114	<0,001	-----	-----
Corretivos com gesso	3	2,107	<0,001	0,107	<0,001	-----	-----
Resíduo	14	0,055		0,009		-----	-----
0,10–0,20 m							
Gesso em controle	1	6,181	<0,001	0,090	0,005	-----	-----
Gesso em CRM	1	0,084	0,470	0,056	0,021	-----	-----
Gesso em ES	1	0,001	0,951	0,168	0,001	-----	-----
Gesso em CC	1	1,744	0,004	0,017	0,180	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	1,756	<0,001	0,074	0,002	-----	-----
Corretivos com gesso	3	1,326	0,002	0,039	0,019	-----	-----
Resíduo	14	0,152		0,008		-----	-----
0,20–0,40 m							
Gesso em controle	1	2,741	0,001	0,182	0,003	1,50E-02	<0,001
Gesso em CRM	1	0,150	0,305	0,000	0,918	2,73E-02	<0,001
Gesso em ES	1	0,079	0,452	0,001	0,798	1,00E-04	0,630
Gesso em CC	1	0,025	0,669	0,002	0,695	2,60E-03	0,027
Corretivos sem gesso	3	0,326	0,106	0,068	0,015	1,09E-02	<0,001
Corretivos com gesso	3	0,308	0,120	0,054	0,032	8,15E-03	<0,001
Resíduo	14	0,133		0,014		4,30E-04	
0,40–0,60 m							
Gesso em controle	1	1,340	<0,001	0,135	0,003	1,13E-02	0,023
Gesso em CRM	1	0,228	0,016	0,010	0,353	3,75E-03	0,162
Gesso em ES	1	0,338	0,005	0,211	0,001	3,40E-04	0,664
Gesso em CC	1	0,211	0,020	0,429	<0,001	1,65E-02	0,008
Corretivos sem gesso	3	0,115	0,035	0,043	0,027	1,76E-02	0,001
Corretivos com gesso	3	0,070	0,122	0,053	0,014	5,26E-03	0,063
Resíduo	14	0,030		0,010		1,72E-03	

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação. [§]Valores de Ca^{2+} na camada de 0,05–0,10 m foram transformados pela função $y = [(\text{Ca} + 1)^{-1,3}]/-1,3$; ^{§§}Valores de Mg^{2+} da camada de 0,05–0,10 m foram transformados pela função $y = (\text{Mg}^{-1})/-1$.

APÊNDICE B.6 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) dos cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] em camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Análise de variância dos teores após aplicação dos tratamentos:							
Fontes de variação	GL	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0-0,05 m							
Bloco	2	0,141	0,251	0,006	0,297	6,99E-03	0,013
Corretivos	3	1,072	4,32E-04	0,718	<0,001	5,48E-03	0,018
Gesso	1	0,606	0,023	0,934	<0,001	1,53E-02	0,003
Interação	3	0,409	0,022	0,037	0,002	1,31E-03	0,373
Resíduos	14	0,092		0,004		1,16E-03	
CV (%)		11,05		8,57		13,35	
B ₀		24,968	0,001	8,336	0,304	16,604	0,020
W		0,903	0,193	0,960	0,440	0,952	0,300
0,05-0,10 m							
Bloco	2	1,13E-03	0,189 ^s	0,144	0,675 ^{ss}	3,29E-04	0,817
Corretivos	3	3,44E-03	0,009	2,622	0,003	0,008	0,012
Gesso	1	1,63E-03	0,121	2,504	0,019	0,022	0,003
Interação	3	1,07E-02	<0,001	2,263	0,006	0,006	0,035
Resíduos	14	5,98E-04		0,356		0,002	
CV (%)		4,50		26,50		19,71	
B ₀		19,898	0,006	9,120	0,244	11,652	0,113
W		0,918	0,263	0,954	0,336	0,926	0,078
0,10-0,20 m							
Bloco	2	0,013	0,501	2,03E-03	0,533	1,18E-03	0,211
Corretivos	3	0,071	0,030	2,04E-02	0,005	6,11E-03	0,001
Gesso	1	0,161	0,009	4,64E-02	0,002	2,80E-02	<0,001
Interação	3	0,333	<0,001	2,21E-02	0,004	3,79E-03	0,010
Resíduos	14	0,018		3,09E-03		6,77E-04	
CV (%)		10,46		20,07		14,90	
B ₀		7,086	0,420	12,614	0,082	10,984	0,139
W		0,970	0,677	0,948	0,250	0,974	0,754
0,20-0,40m							
Bloco	2	0,007	0,283	0,011	0,013	6,65E-03	0,021
Corretivos	3	0,323	<0,001	0,022	<0,001	5,35E-03	0,027
Gesso	1	0,930	<0,001	0,000	0,962	1,22E-02	0,008
Interação	3	0,571	<0,001	0,016	0,001	1,39E-03	0,392
Resíduos	14	0,005		0,002		1,30E-03	
CV (%)		5,96		18,41		24,42	
B ₀		9,881	0,195	6,946	0,435	8,136	0,321
W		0,964	0,517	0,978	0,854	0,954	0,337
0,40-0,60 m							
Bloco	2	0,008	0,740	0,007	0,221	3,29E-04	0,542
Corretivos	3	0,071	0,076	0,024	0,008	3,37E-04	0,592
Gesso	1	0,511	<0,001	0,020	0,046	1,28E-03	0,137
Interação	3	0,006	0,855	0,003	0,546	2,71E-03	0,012
Resíduos	14	0,025		0,004		5,14E-04	
CV (%)		17,57		26,45		21,54	
B ₀		8,183	0,317	15,061	0,035	1,781	0,971
W		0,966	0,561	0,929	0,091	0,936	0,136

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação. ^sValores de Ca^{2+} na camada de 0,05–0,10 m foram transformados pela função $y = [(\text{Ca} + 1)^{-1,3}]/-1,3$; ^{ss}Valores de Mg^{2+} da camada de 0,05–0,10 m foram transformados pela função $y = (\text{Mg}^{-1})/-1$.

APÊNDICE B.7 – Desdobramento da interação entre os corretivos da acidez [controle, calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)] e do gesso agrícola (sem e com gesso) dos cátions básicos trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+)] de camadas de solo, aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Classe (F ₁) de canudais de solo, aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.							
Fontes de variação	GL	Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺	
		QM	p	QM	p	QM	p
0-0,05 m							
Gesso em controle	1	0,574	0,026	0,126	<0,001	-----	-----
Gesso em CRM	1	0,007	0,785	0,532	<0,001	-----	-----
Gesso em ES	1	0,121	0,271	0,291	<0,001	-----	-----
Gesso em CC	1	1,132	0,004	0,095	<0,001	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	0,415	0,021	0,488	<0,001	-----	-----
Corretivos com gesso	3	1,066	<0,001	0,267	<0,001	-----	-----
Resíduo	14	0,092		0,004		-----	-----
0,05-0,10 m							
Gesso em controle	1	0,019	<0,001	0,875	0,139	0,01602	0,006
Gesso em CRM	1	0,006	0,006	0,002	0,947	0,01707	0,005
Gesso em ES	1	0,006	0,008	3,008	0,011	0,00667	0,058
Gesso em CC	1	0,003	0,047	5,408	0,002	0,00135	0,369
Corretivos sem gesso	3	0,009	<0,001	2,742	0,003	0,00081	0,676
Corretivos com gesso	3	0,005	0,002	2,143	0,007	0,01371	0,002
Resíduo	14	0,001		0,356		0,00156	
0,10-0,20 m							
Gesso em controle	1	0,844	<0,001	0,006	0,174	0,031	<0,001
Gesso em CRM	1	0,200	0,005	0,076	<0,001	0,003	0,070
Gesso em ES	1	0,000	0,928	0,024	0,014	0,004	0,034
Gesso em CC	1	0,118	0,022	0,006	0,174	0,002	0,093
Corretivos sem gesso	3	0,305	<0,001	0,040	<0,001	0,003	0,032
Corretivos com gesso	3	0,100	0,010	0,003	0,445	0,007	0,001
Resíduo	14	0,018		0,003		0,001	
0,20-0,40 m							
Gesso em controle	1	0,799	<0,001	0,000	0,849	-----	-----
Gesso em CRM	1	0,540	<0,001	0,003	0,195	-----	-----
Gesso em ES	1	0,413	<0,001	0,012	0,020	-----	-----
Gesso em CC	1	0,889	<0,001	0,032	0,001	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	0,407	<0,001	0,001	0,837	-----	-----
Corretivos com gesso	3	0,487	<0,001	0,037	<0,001	-----	-----
Resíduo	14	0,005		0,002		-----	-----
0,40-0,60 m							
Gesso em controle	1	-----	-----	-----	-----	5,40E-03	0,006
Gesso em CRM	1	-----	-----	-----	-----	2,00E-04	0,539
Gesso em ES	1	-----	-----	-----	-----	2,60E-03	0,041
Gesso em CC	1	-----	-----	-----	-----	1,20E-03	0,148
Corretivos sem gesso	3	-----	-----	-----	-----	8,50E-04	0,223
Corretivos com gesso	3	-----	-----	-----	-----	2,20E-03	0,024
Resíduo	14	-----	-----	-----	-----	5,10E-04	

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.8 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) dos teores de carbono lábil, oxidado por permanganato de potássio (COXP), e “total” (CO) em camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.

		7 meses após				15 meses após			
Fontes de variação	GL	CO		COXP		CO		COXP	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
Camada de 0-0,05 m									
Bloco	2	4,8854	0,28597	0,030	0,293	9,656	0,286	0,153	0,014
Corretivos	3	8,25	0,12027	0,038	0,215	26,375	0,036	0,046	0,192
Gesso	1	1,0417	0,59726	0,014	0,441	13,500	0,188	0,013	0,492
Interação	3	6,625	0,18296	0,033	0,270	13,500	0,174	0,030	0,357
Resíduos	14	3,564		0,022		7,049		0,026	
CV (%)		6,11		3,58		9,36		3,60	
B ₀		8,893	0,260	6,219	0,515	11,433	0,121	4,219	0,754
W		0,986	0,975	0,972	0,722	0,929	0,091	0,931	0,101
Camada de 0,05-0,10 m									
Bloco	2	2,625	0,173	0,204	0,012	16,167	0,012	0,164	0,106
Corretivos	3	3,819	0,072	0,023	0,579	1,819	0,574	0,033	0,671
Gesso	1	6,000	0,051	0,022	0,431	1,042	0,540	0,001	0,910
Interação	3	3,000	0,124	0,029	0,486	3,375	0,321	0,038	0,624
Resíduos	14	1,316		0,033		2,643		0,062	
CV (%)		4,66		4,93		7,58		6,32	
B ₀		4,271	0,748	2,909	0,893	---	---	5,494	0,600
W		0,968	0,629	0,970	0,664	0,951	0,280	0,980	0,887
Camada de 0,10-0,20 m									
Bloco	2	2,531	0,153	0,034	0,163	8,375	0,184	0,031	0,212
Corretivos	3	1,861	0,237	0,006	0,795	7,819	0,196	0,033	0,186
Gesso	1	0,042	0,853	0,001	0,839	5,042	0,301	0,017	0,354
Interação	3	2,458	0,147	0,053	0,055	4,708	0,391	0,055	0,063
Resíduos	14	1,174		0,016		4,375		0,018	
CV (%)		5,04		3,93		10,52		3,66	
B ₀		8,589	0,284	15,462	0,031	3,788	0,804	4,141	0,763
W		0,935	0,125	0,914	0,421	0,967	0,596	0,979	0,867
Camada de 0,20-0,40 m									
Bloco	2	0,6563	0,72983	0,260	0,025	0,542	0,911	0,061	0,294
Corretivos	3	0,3715	0,9066	0,110	0,152	11,167	0,171	0,124	0,083
Gesso	1	5,5104	0,1223	0,014	0,621	0,000	1,000	0,284	0,066
Interação	3	1,8993	0,45104	0,175	0,053	3,444	0,628	0,021	0,720
Resíduos	14	2,0372		0,053		5,780		0,046	
CV (%)		7,11		7,48		12,38		6,26	
B ₀		6,674	0,464	5,166	0,640	6,263	0,509	11,072	0,136
W		0,968	0,629	0,987	0,984	0,975	0,785	0,949	0,255
Camada de 0,40-0,60 m									
Bloco	2	1,448	0,658	0,172	0,007	1,792	0,760	0,024	0,800
Corretivos	3	2,538	0,537	0,073	0,062	3,042	0,705	0,040	0,767
Gesso	1	1,760	0,481	0,004	0,695	9,375	0,247	0,030	0,602
Interação	3	3,760	0,374	0,047	0,163	18,042	0,078	0,055	0,673
Resíduos	14	3,353		0,024		6,411		0,106	
CV (%)		11,89		5,83		16,38		10,41	
B ₀		11,504	0,118	4,568	0,713	5,442	0,606	7,153	0,413
W		0,925	0,077	0,961	0,458	0,969	0,647	0,985	0,968

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.9 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) do diâmetro médio ponderado (DMP) e das proporções de magroagregados grandes (MAgg grandes), médios (MAgg médios) e pequenos (MAgg pequenos) e microagregados de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	DMP		MAgg grandes		MAgg médios		MAgg pequenos		Microagregados	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
Camada de 0-0,05 m											
Bloco	2	0,135	0,638	9,922	0,669	3,037	0,879	5,106	0,552	0,733	0,563
Corretivos	3	1,478	0,007	153,824	0,003	60,34	0,024	16,290	0,122	1,174	0,370
Gesso	1	1,721	0,018	112,802	0,029	6,397	0,506	29,683	0,060	6,988	0,022
Interação	3	0,739	0,060	54,669	0,074	7,359	0,664	13,768	0,168	1,423	0,292
Resíduos	14	0,233		18,716		13,657		6,986		1,030	
CV (%)		5,16		7,25		16,53		19,88		21,72	
B ₀		5,369	0,615	6,700	0,461	3,351	0,851	14,817	0,038	7,029	0,426
W		0,975	0,788	0,968	0,619	0,980	0,893	0,964	0,524	0,979	0,867
Camada de 0,05-0,10 m											
Bloco	2	2,040	0,044	141,501	0,071	14,407	0,400	54,696	0,015	2,389	0,048
Corretivos	3	1,416	0,107	111,699	0,120	25,640	0,182	39,707	0,041	1,443	0,152
Gesso	1	0,534	0,350	32,864	0,421	7,917	0,459	6,806	0,441	0,104	0,705
Interação	3	0,332	0,637	26,146	0,658	2,540	0,904	11,274	0,405	0,391	0,647
Resíduos	14	0,570		47,630		13,614		10,781		0,692	
CV (%)		8,76		12,80		15,73		18,70		16,35	
B ₀		7,145	0,414	5,238	0,631	3,113	0,874	16,114	0,024	8,485	0,292
W		0,974	0,773	0,987	0,984	0,942	0,177	0,955	0,352	0,968	0,610
Camada de 0,10-0,20 m											
Bloco	2	0,902	0,252	67,224	0,238	5,031	0,701	32,229	0,076	0,982	0,482
Corretivos	3	0,812	0,292	68,780	0,230	18,746	0,198	29,054	0,097	2,739	0,112
Gesso	1	0,140	0,633	5,612	0,721	2,448	0,637	1,020	0,767	0,042	0,851
Interação	3	1,121	0,178	86,766	0,155	10,813	0,410	22,961	0,156	1,985	0,205
Resíduos	14	0,587		42,122		10,454		11,192		1,130	
CV (%)		8,67		8,63		14,21		20,31		21,30	
B ₀		17,660	0,014	7,151	0,413	1,175	0,992	20,793	0,004	4,321	0,742
W		0,958	0,393	0,955	0,342	0,942	0,185	0,952	0,303	0,932	0,105

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.10 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) do diâmetro médio ponderado (DMP) e das proporções de magroagregados grandes (MAgg grandes), médios (MAgg médios) e pequenos (MAgg pequenos) e microagregados de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Soro associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.											
Fontes de variação	GL	DMP		MAgg grandes		MAgg médios		MAgg pequenos		Microagregados	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
0-0,05 m											
Bloco	2	1,524	0,007	178,824	0,003	88,438	0,007	24,133	0,048	0,687	0,130
Corretivos	3	1,206	0,009	108,490	0,011	29,359	0,109	21,641	0,048	2,568	0,002
Gesso	1	0,974	0,050	61,424	0,102	16,834	0,258	16,212	0,133	0,083	0,602
Interação	3	0,600	0,076	32,847	0,226	2,653	0,881	15,160	0,113	1,245	0,242
Resíduos	14	0,212		20,080		12,089		6,361		0,291	
CV (%)		6,22		11,07		10,42		12,50		9,01	
B ₀		6,732	0,457	4,935	0,668	12,432	0,087	6,492	0,484	6,310	0,504
W		0,966	0,566	0,942	0,183	0,954	0,329	0,974	0,759	0,981	0,919
0,05-0,10 m											
Bloco	2	0,142	0,439	24,762	0,353	4,326	0,812	11,176	0,057	1,830	0,040
Corretivos	3	0,715	0,022	82,033	0,037	12,007	0,635	35,862	<0,001	0,493	0,381
Gesso	1	1,129	0,020	26,460	0,292	8,894	0,521	32,748	0,006	5,792	0,003
Interação	3	0,239	0,266	11,939	0,662	2,196	0,955	8,060	0,097	0,087	0,899
Resíduos	14	0,162		22,041		20,516		3,159		0,447	
CV (%)		5,50		11,62		13,99		8,32		11,45	
B ₀		22,473	0,002	21,164	0,004	5,787	0,565	2,330	0,939	4,065	0,772
W		0,940	0,164	0,935	0,126	0,985	0,970	0,953	0,307	0,952	0,304
0,10-0,20 m											
Bloco	2	0,438	0,173	42,061	0,098	13,224	0,436	7,543	0,675	0,367	0,323
Corretivos	3	1,032	0,018	80,361	0,012	18,821	0,328	24,988	0,301	0,754	0,100
Gesso	1	0,770	0,082	26,104	0,212	10,653	0,414	39,913	0,166	4,208	0,002
Interação	3	0,536	0,107	22,531	0,263	8,120	0,662	41,168	0,132	0,245	0,505
Resíduos	14	0,219		15,25		15,010		18,647		0,299	
CV (%)		7,31		7,65		11,60		16,55		7,79	
B ₀		16,840	0,018	20,399	0,005	3,565	0,828	8,341	0,304	14,747	0,039
W		0,967	0,595	0,963	0,497	0,960	0,433	0,954	0,329	0,952	0,302

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.11 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 7 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	Ds		Pt		Ma		Mi	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
Camada de 0-0,05 m									
Bloco	2	3,00E-03	0,388	6,13E-04	0,312	1,01E-03	0,193	1,63E-04	0,079
Corretivos	3	2,22E-03	0,541	3,71E-04	0,532	1,03E-03	0,179	4,28E-04	0,002
Gesso	1	6,34E-03	0,166	5,04E-04	0,325	2,67E-04	0,496	1,50E-04	0,115
Interação	3	6,62E-03	0,129	8,15E-04	0,216	1,14E-03	0,147	2,50E-04	0,018
Resíduos	14	2,96E-03		4,84E-04		5,46E-04		5,30E-05	
CV (%)		4,36		4,39		21,73		1,85	
B ₀		8,905	0,260	---	---	8,645	0,279	---	---
W		0,975	0,785	0,976	0,812	0,981	0,907	0,944	0,197
Camada de 0,05-0,10 m									
Bloco	2	8,56E-04	0,653	1,33E-04	0,658	8,23E-04	0,070	5,46E-04	0,029
Corretivos	3	4,36E-04	0,878	5,86E-05	0,902	4,46E-04	0,203	3,73E-04	0,058
Gesso	1	6,98E-05	0,852	1,55E-05	0,826	1,69E-05	0,800	3,00E-08	0,987
Interação	3	4,67E-03	0,111	4,63E-04	0,258	3,49E-05	0,936	6,11E-04	0,013
Resíduos	14	1,95E-03		3,09E-04		2,55E-04		1,18E-04	
CV (%)		3,40		3,64		14,04		2,94	
B ₀		6,550	0,477	6,587	0,473	1,741	0,973	6,820	0,448
W		0,969	0,631	0,970	0,664	0,939	0,153	0,979	0,878
Camada de 0,10-0,20 m									
Bloco	2	6,00E-04	0,818	5,42E-05	0,894	7,92E-05	0,841	1,63E-04	0,141
Corretivos	3	4,28E-04	0,931	4,86E-05	0,958	1,39E-04	0,819	3,17E-04	0,022
Gesso	1	1,67E-05	0,941	4,17E-06	0,927	1,67E-05	0,850	6,67E-05	0,352
Interação	3	6,94E-04	0,870	8,19E-05	0,914	2,78E-05	0,979	3,33E-05	0,713
Resíduos	14	2,95E-03		4,78E-04		4,51E-04		7,20E-05	
CV (%)		4,17		4,54		16,22		2,41	
B ₀		6,728	0,458	6,717	0,459	6,793	0,451	---	---
W		0,976	0,814	0,983	0,944	0,973	0,733	0,904	0,214
Camada de 0,20-0,40 m									
Bloco	2	2,13E-03	0,597	3,88E-04	0,569	4,98E-04	0,362	1,50E-04	0,720
Corretivos	3	4,94E-04	0,944	1,38E-04	0,889	2,59E-04	0,645	1,15E-04	0,854
Gesso	1	4,82E-03	0,290	5,04E-04	0,396	3,49E-04	0,396	4,17E-06	0,924
Interação	3	5,69E-03	0,276	8,49E-04	0,317	1,10E-03	0,109	2,26E-04	0,683
Resíduos	14	3,98E-03		6,59E-04		4,55E-04		4,45E-04	
CV (%)		5,11		5,02		14,48		5,80	
B ₀		5,636	0,583	5,642	0,582	2,163	0,950	5,794	0,564
W		0,975	0,799	0,970	0,658	0,929	0,095	0,951	0,281
Camada de 0,40-0,60 m									
Bloco	2	2,23E-03	0,413	3,50E-04	0,412	6,43E-04	0,371	7,17E-04	0,182
Corretivos	3	1,54E-02	0,006	2,67E-03	0,004	5,30E-03	0,002	9,28E-04	0,102
Gesso	1	1,59E-04	0,799	3,86E-05	0,752	3,41E-05	0,815	1,40E-07	0,985
Interação	3	7,62E-03	0,050	1,40E-03	0,035	2,30E-03	0,034	1,12E-04	0,824
Resíduos	14	2,36E-03		3,70E-04		6,03E-04		3,72E-04	
CV (%)		3,91		3,79		16,73		5,33	
B ₀		11,568	0,116	11,620	0,114	4,948	0,666	2,485	0,928
W		0,980	0,891	0,980	0,896	0,970	0,674	0,970	0,677

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.12 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) de camadas de solo em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	Ds		Pt		Ma		Mi	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
0-0,05 m									
Bloco	2	2,18E-03	0,388	3,13E-04	0,408	1,14E-03	0,246	2,04E-04	0,458
Corretivos	3	1,17E-02	0,011	1,83E-03	0,010	2,14E-03	0,071	4,94E-04	0,160
Gesso	1	3,27E-03	0,238	1,07E-03	0,092	4,00E-03	0,035	8,17E-04	0,090
Interação	3	4,92E-03	0,123	9,67E-04	0,069	1,90E-03	0,094	8,06E-04	0,053
Resíduos	14	2,15E-03		3,27E-04		7,33E-04		2,47E-04	
CV (%)		3,97		3,39		17,90		4,13	
B ₀		8,351	0,303	7,476	0,381	7,473	0,381	113,540	2,20E-16
W		0,978	0,851	0,952	0,306	0,958	0,403	0,937	0,141
0,05-0,10 m									
Bloco	2	3,78E-03	0,573	6,01E-04	0,572	5,04E-04	0,679	6,18E-06	0,962
Corretivos	3	1,71E-03	0,851	2,82E-04	0,844	4,45E-04	0,789	4,68E-04	0,071
Gesso	1	1,59E-03	0,629	5,13E-04	0,493	1,53E-03	0,290	2,73E-04	0,213
Interação	3	1,70E-02	0,092	2,85E-03	0,081	3,87E-03	0,064	1,64E-04	0,414
Resíduos	14	6,51E-03		1,03E-03		0,001		1,61E-04	
CV (%)		6,48		6,37		24,65		3,52	
B ₀		17,813	0,013	17,853	0,013	5,747	0,570	9,735	0,204
W		0,960	0,437	0,960	0,434	0,977	0,839	0,969	0,636
0,10-0,20 m									
Bloco	2	1,08E-03	0,215	1,70E-04	0,215	5,75E-04	0,208	1,78E-04	0,364
Corretivos	3	2,70E-02	<0,001	4,25E-03	<0,001	3,76E-03	<0,001	8,27E-05	0,685
Gesso	1	5,39E-04	0,370	7,29E-05	0,405	3,82E-04	0,298	1,21E-04	0,404
Interação	3	6,23E-03	0,001	9,68E-04	0,001	8,75E-04	0,087	1,19E-04	0,553
Resíduos	14	6,28E-04		9,90E-05		3,27E-04		1,64E-04	
CV (%)		2,00		1,98		11,03		3,77	
B ₀		7,462	0,382	7,431	0,386	6,362	0,498	14,593	0,042
W		0,981	0,906	0,980	0,900	0,974	0,777	0,919	0,683
0,20-0,40 m									
Bloco	2	7,40E-03	0,054	4,63E-04	0,223	2,72E-03	0,031	1,15E-03	0,243
Corretivos	3	3,30E-03	0,229	2,78E-04	0,420	1,56E-03	0,096	2,05E-03	0,079
Gesso	1	3,75E-05	0,894	2,67E-04	0,343	1,04E-04	0,685	1,04E-04	0,712
Interação	3	9,26E-04	0,718	3,00E-04	0,388	1,56E-03	0,096	1,52E-03	0,152
Resíduos	14	2,04E-03		2,77E-04		6,07E-04		7,35E-04	
CV (%)		3,73		3,20		13,85		8,02	
B ₀		8,568	0,285	7,131	0,415	3,182	0,868	10,404	0,167
W		0,967	0,598	0,972	0,712	0,947	0,232	0,981	0,918
0,40-0,60 m									
Bloco	2	2,45E-03	0,294	3,13E-04	0,304	5,70E-03	<0,001	3,53E-03	0,006
Corretivos	3	3,13E-03	0,212	6,15E-04	0,097	9,04E-04	0,096	1,67E-04	0,788
Gesso	1	6,67E-05	0,852	4,17E-06	0,897	3,75E-05	0,749	0,00E+00	1,000
Interação	3	1,18E-02	0,006	1,84E-03	0,003	1,80E-03	0,013	1,22E-04	0,854
Resíduos	14	1,84E-03		2,41E-04		3,52E-04		4,72E-04	
CV (%)		3,56		2,96		9,85		6,52	
B ₀		18,030	0,012	---	---	3,960	0,784	6,156	0,522
W		0,906	0,288	0,909	0,221	0,957	0,384	0,954	0,328

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.13 – Desdobramento da interação entre os corretivos da acidez [controle, calcário de rocha moída (CRM), escória de siderurgia (ES) e calcário calcinado (CC)] e do gesso agrícola (sem e com gesso) d da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) de camadas de solo, aos 7 e 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Análise dos tratamentos							
Fontes de variação	GL	Ds		Pt		Ma	
		QM	p	QM	p	QM	p
7 meses após aplicação: camada de 0,40–0,60 m							
Gesso em controle	1	4,59E-03	0,185	4,70E-04	0,281	8,00E-04	0,268
Gesso em CRM	1	3,29E-03	0,258	8,20E-04	0,159	1,49E-03	0,139
Gesso em ES	1	1,42E-02	0,028	2,87E-03	0,015	4,52E-03	0,016
Gesso em CC	1	9,80E-04	0,530	8,00E-05	0,645	1,30E-04	0,652
Corretivos sem gesso	3	4,76E-03	0,158	7,80E-04	0,147	1,54E-03	0,097
Corretivos com gesso	3	1,82E-02	0,003	3,29E-03	0,002	6,05E-03	0,001
Resíduo	14	2,36E-03		7,90E-04		6,00E-04	
15 meses após aplicação: camada de 0,10–0,20 m							
Gesso em controle	1	1,67E-03	0,125	1,80E-04	0,203	-----	-----
Gesso em CRM	1	1,00E-02	0,001	1,69E-03	0,001	-----	-----
Gesso em ES	1	4,55E-03	0,018	8,00E-04	0,013	-----	-----
Gesso em CC	1	2,98E-03	0,047	3,10E-04	0,098	-----	-----
Corretivos sem gesso	3	4,14E-03	0,005	6,10E-04	0,007	-----	-----
Corretivos com gesso	3	2,91E-02	0,000	4,60E-03	<0,001	-----	-----
Resíduo	14	6,30E-04		1,00E-04		-----	-----
15 meses após aplicação: camada de 0,40–0,60 m							
Gesso em controle	1	2,28E-02	0,003	2,82E-03	0,004	3,75E-03	0,006
Gesso em CRM	1	1,50E-04	0,779	1,50E-04	0,443	2,00E-05	0,831
Gesso em ES	1	1,04E-02	0,032	2,40E-03	0,007	1,67E-03	0,047
Gesso em CC	1	2,02E-03	0,312	1,50E-04	0,443	2,00E-05	0,831
Corretivos sem gesso	3	3,83E-03	0,148	7,90E-04	0,054	1,10E-03	0,060
Corretivos com gesso	3	1,11E-02	0,007	1,67E-03	0,004	1,61E-03	0,020
Resíduo	14	1,84E-03		2,40E-04		3,50E-04	
7 meses após aplicação							
		Mi 0–0,05 m		Mi 0,05–0,10 m		15 meses após aplicação	
		QM	p	QM	p	QM	p
Gesso em controle	1	7,00E-05	0,281	1,00E-05	0,836	6,00E-04	0,141
Gesso em CRM	1	2,00E-05	0,584	7,00E-05	0,454	1,50E-04	0,449
Gesso em ES	1	8,20E-04	0,002	5,60E-04	0,048	1,67E-03	0,021
Gesso em CC	1	0,00E+00	1,000	1,20E-03	0,007	8,20E-04	0,091
Corretivos sem gesso	3	4,60E-04	0,002	7,00E-05	0,634	8,40E-04	0,047
Corretivos com gesso	3	2,20E-04	0,026	9,10E-04	0,003	4,60E-04	0,186
Resíduo	14	5,00E-05		1,20E-04		2,50E-04	

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.

APÊNDICE B.14 – Resumos dos quadros de análise de variância, incluindo os testes de homocedasticidade de Bartlett (B_0) e normalidade de Shapiro-Wilk (W) da produtividade de milho, trigo e soja, acúmulo de massa seca de aveia-preta e produtividade acumulada de todas as culturas em função da aplicação isolada ou em conjunto de corretivos da acidez do solo associados ou não ao gesso agrícola aos 15 meses após aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	GL	Produtividade milho		Produtividade trigo		Produtividade soja	
		QM	<i>p</i>	QM	<i>p</i>	QM	<i>p</i>
Bloco	2	234859	0,205	193055	0,159	51137	0,155
Corretivo	3	1630233	< 0,001	123758	0,299	232239	0,001
Gesso	1	1441340	0,005	94448	0,328	7782	0,577
Interação	3	21790	0,918	6061	0,977	2386	0,959
Resíduos	14	131854		91901		23914	
CV (%)		3,39		5,52		3,33	
B_0		13,786	0,055	7,586	0,371	4,954	0,666
W		0,947	0,235	0,975	0,789	0,954	0,334
		Massa seca aveia		Produtividade acumulada			
		QM	<i>p</i>	QM	<i>p</i>		
Bloco	2	113768	0,451	248375	0,676		
Corretivo	3	130618	0,435	4763924	0,003		
Gesso	1	214077	0,228	4238570	0,020		
Interação	3	145384	0,390	195394	0,813		
Resíduos	14	134843		616596			
CV (%)		9,11		3,16			
B_0		7,0276	0,426	5,602	0,587		
W		0,979	0,884	0,975	0,778		

GL = graus de liberdade; QM = quadrado médio; *p* = probabilidade; CV (%) = coeficiente de variação.