

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA
VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM
CAMBISSOLO EM FUNÇÃO DE CALCÁRIO E
GESSO COM OU SEM INCORPORAÇÃO**

DELICIO RUDINEI BORTOLANZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, março de 2015

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA
VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM
CAMBISSOLO EM FUNÇÃO DE CALCÁRIO E
GESSO COM OU SEM INCORPORAÇÃO**

DELICIO RUDINEI BORTOLANZA

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, março de 2015



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

**“ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM CAMBISSOLO EM FUNÇÃO DE
CALCÁRIO E GESSO COM OU SEM INCORPORAÇÃO”**

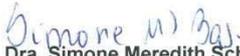
Elaborada por

Delcio Rudinei Bortolanza

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Produção Vegetal

Aprovada em: 30/03/2015
Pela Comissão Examinadora


Dr. Wilson Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador


Dra. Simone Meredith Scheffer Basso
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia


Dr. Getúlio Coutinho Figueiredo
IAC – Campinas


Dr. Hélio Carlos Rocha
Diretor FAMV


Dr. Sirio Wietholter
Embrapa Trigo

CIP – Catalogação na Publicação

B739a Bortolanza, Delcio Rudinei
Atributos químicos e físicos de um cambissolo em
função de calcário e gesso com ou sem incorporação /
Delcio Rudnei Bortolanza . – 2015.
103 f. : il., color. ; 25 cm.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade
de Passo Fundo, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.

1. Solos. 2. Química do solo. 3. Solos - umidade. I.
Klein, Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU: 631.41

Agradecimentos

Ao privilégio da vida, pela oportunidade de estar completando mais esta etapa;

Aos colegas estagiários do Laboratório de Física e Água do Solo: Rafael, Diógenes, Eduardo, André, Tiago, Felipe e Victor pela parceria e disposição em ajudar e contribuir;

Aos colegas da pós-graduação Gilvan, Cláudia, Flávia e Djulia pelo companheirismo e trabalhos desenvolvidos em parceria;

Às funcionárias do laboratório, Franciele e Manuelli, pela convivência amistosa e ajuda nas tarefas;

Ao professor Vilson A. Klein, pelo exemplo como profissional, conhecimento transmitido e companheirismo. Agradeço ainda, pela confiança depositada em mim quando aceitou minha orientação;

À família, pelo apoio moral e financeiro, contribuindo para que este tudo fosse possível;

À namorada Janaine, pelo amor e compreensão;

Aos grandes mestres professores da UPF, pelos ensinamentos e troca de experiências;

À família Arns, que nos recepcionou e gentilmente cedeu a área experimental para a coleta de amostras;

À UPF e à Capes, pelo apoio financeiro concedendo bolsa de estudos;

À Fapergs, pelo financiamento do projeto (2115/13-4).

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SIGLAS	xv
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Química do solo.....	7
2.1.1 Acidez do solo.....	7
2.1.2 Calcário agrícola.....	8
2.1.3 Gesso agrícola.....	10
2.1.4 Calcário versus gesso.....	11
2.1.5 Matéria orgânica do solo (MOS)	13
2.2 Física do solo.....	14
2.2.1 Textura do solo.....	14
2.2.2 Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF).....	15
2.2.3 Compactação.....	17
2.2.4 Porosidade do solo.....	18
2.2.5 Preparo do solo versus semeadura direta	20
2.2.6 Retenção hídrica.....	22
2.2.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	24
2.2.8 Estabilidade dos agregados.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Local, clima e solo.....	28
3.2 Histórico e implantação do experimento.....	28
3.3 Análise de atributos químicos.....	29
3.4 Análise de atributos físicos.....	30
3.4.1 Textura do solo, argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF).....	30
3.4.2 Densidade do solo (DS) e densidade de sólidos do solo.....	30
3.4.3 Ensaio de Proctor e densidade relativa (DR).....	30
3.4.4 Porosidade total (PT).....	31

	Página
3.4.5 Distribuição do diâmetro dos poros.....	31
3.4.6 Retenção hídrica.....	32
3.4.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	32
3.4.8 Estabilidade de agregados em água.....	34
3.4.9 Análises estatísticas.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Avaliações dos atributos químicos.....	39
4.1.1 pH, saturação por bases, saturação por Al e teor de Al.....	39
4.1.2 Ca, Mg, K, P e CTC efetiva.....	44
4.1.3 Matéria orgânica do solo (MOS).....	52
4.2 Avaliações físicas do solo.....	54
4.2.1 Textura do solo.....	54
4.2.2 Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF).....	57
4.2.3 Avaliação de compactação do solo.....	59
4.2.4 Porosidade total (PT) e distribuição do diâmetro dos poros.....	63
4.2.5 Retenção hídrica.....	68
4.2.6 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	75
4.2.7 Estabilidade de agregados em água.....	84
5 CONCLUSÃO.....	87
6 REFERÊNCIAS.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Correlação de Pearson entre algumas das variáveis analisadas (n=120). **Significativo pelo teste t ($p \leq 0,01$); * Significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$)	37
2	Água disponível às plantas pela equação de van Genuchten (1980), considerando-se a diferença entre a umidade volumétrica (θ) na capacidade de campo ($\Psi -6$ kPa) e o ponto de murcha permanente ($\Psi -1500$ kPa), a partir das curvas de retenção hídrica. Bom Jesus, 2013.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos valores de pH em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância..... 39
2	Efeito do manejo de aplicação de calcário na saturação por bases em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013..... 41
3	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de Al ³⁺ em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013..... 43
4	Efeito do manejo de aplicação de calcário na saturação por Al em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013. 43
5	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de Ca ²⁺ em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013. 45
6	Efeito das doses de gesso nos teores de Mg ²⁺ em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013..... 46
7	Teores de K ⁺ em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013..... 47

Figura	Página	
8	Efeito das doses de gesso nos teores de P em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	50
9	Efeito do manejo de aplicação de doses de calcário na CTC efetiva em um Cambissolo Húmico alumínico. As barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	51
10	CTC efetiva em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	52
11	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de matéria orgânica do solo em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	53
12	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores argila em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	55
13	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores silte em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	56
14	Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores areia em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	56

Figura	Página
15 Argila dispersa em água de um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	57
16 Índice de floculação da argila do solo de um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	58
17 Curva normal de Proctor da densidade do solo (DS) em função da umidade gravimétrica (UG). ** Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.....	60
18 Densidade relativa do solo em função do manejo de aplicação das doses de calcário em um Cambissolo Húmico aluminico. As barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	61
19 Densidade relativa em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	62
20 Histograma e curva estimada de distribuição normal da densidade relativa do solo ($n=120$). Bom Jesus, 2013.....	63
21 Efeito das doses de gesso na porosidade total em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	64
22 Macroporos (água retida no solo em Ψ superiores a -6 kPa) em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	65

Figura	Página	
23	Efeito do manejo de aplicação de calcário para os microporos do solo (água retida entre Ψ -6 a -1500 kPa) teores areia em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	66
24	Criptoporos (água retida no solo em Ψ inferiores a -1500 kPa) em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	67
25	Porosidade do solo sob aplicação superficial (a) e incorporada de calcário (b) em um Cambissolo Húmico alumínico. Bom Jesus, 2013.....	68
26	Umidade gravimétrica em função do potencial do solo (Ψ) no ponto de orvalho no psicrômetro WP4 de amostras aleatorizadas para um Cambissolo Húmico alumínico. ** Significativo pelo teste F ($p < 0,01$). Bom Jesus, 2013.....	69
27	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 0 Mg ha ⁻¹ de calcário e 0 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.....	70
28	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 0 Mg ha ⁻¹ de calcário e 6 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.....	70

Figura	Página	
29	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 8 Mg ha ⁻¹ de calcário e 0 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	71
30	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 8 Mg ha ⁻¹ de calcário e 6 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	71
31	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 16 Mg ha ⁻¹ de calcário e 0 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	72
32	Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 16 Mg ha ⁻¹ de calcário e 6 Mg ha ⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	72
33	Resistência mecânica à penetração (RP) estimada pelo modelo de Busscher em função da umidade (θ) e densidade do solo. Aplicação de calcário em superfície (a) e com incorporação ao solo (b). ** Significativo pelo teste F (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	76
34	Resistência mecânica à penetração (RP) observada e estimada pela equação de Busscher (1990) em Cambissolo Húmico alumínico não revolvido (a) e revolvido (b) e linha referencial 1:1. **significativo pelo teste t (p <0,001). Bom Jesus, 2013.....	78

Figura	Página
35 Umidade volumétrica (θ) na qual ocorre resistência mecânica à penetração de 2 MPa para dois manejos empregados em um Cambissolo Húmico alumínico. Bom Jesus, 2013.....	79
36 Intervalo hídrico ótimo para aplicação superficial (a) e incorporada de calcário (b). Área hachurada representa a faixa de umidade volumétrica (θ), delimitada pelos limites superior e inferior para cada densidade do solo considerada. As linhas pontilhadas representam mínima e máxima densidade do solo no campo. PMP: ponto de murcha permanente; CC: capacidade de campo; PA: porosidade de aeração; RP: resistência mecânica à penetração. Bom Jesus, 2013.....	81
37 Intervalo hídrico ótimo (IHO) para dois manejos de aplicação de calcário em um Cambissolo Húmico alumínico. Bom Jesus, 2013.....	83
38 Figura 38 - Efeito do manejo de aplicação de calcário no diâmetro médio ponderado de agregados em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	84
39 Figura 39 - Efeito do manejo de aplicação de calcário no diâmetro médio geométrico de agregados em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.....	86

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS E UNIDADES

ADA: argila dispersa em água (g kg^{-1})

DMG: diâmetro médio ponderado de agregados (mm)

DMP: diâmetro médio geométrico de agregados (mm)

DR: densidade relativa

DS: densidade do solo (Mg m^{-3})

IF: índice de flocculação da argila (%)

IHO: intervalo hídrico ótimo

MOS: matéria orgânica do solo (%)

PA: porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

PMP: ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

PT: porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

RP: resistência mecânica à penetração (MPa)

UOC: umidade ótima de compactação (g g^{-1})

UG: Umidade gravimétrica do solo (g g^{-1})

θ : Umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Ψ : potencial solo (kPa)

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM CAMBISSOLO EM FUNÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO COM OU SEM INCORPORAÇÃO

DELICIO RUDINEI BORTOLANZA¹

RESUMO – O calcário é eficiente para corrigir a acidez do solo, mas, quando aplicado em superfície, sua ação se restringe à camada superficial devido à baixa solubilidade. Em função disso, a incorporação em certas situações é recomendável, podendo, em consequência, modificar alguns atributos físicos do solo. O gesso aplicado em superfície, pela maior solubilidade, pode ser uma alternativa para aumentar os teores de Ca e diminuir os efeitos negativos do Al na subsuperfície do solo. Para avaliar os atributos químicos e físicos do solo em função da aplicação de calcário em superfície e incorporado e gesso em superfície, foi instalado um experimento na Região dos Campos de Cima da Serra no município de Bom Jesus – RS, em um Cambissolo Húmico alumínico típico no ano de 2010 e amostras de solo foram coletadas em 2013. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, arranjo de parcelas subdivididas com duas repetições. A parcela principal recebeu doses de 0, 8 e 16 Mg ha⁻¹ calcário em superfície e incorporado com arado de discos e posterior gradagem leve. As subparcelas receberam as doses de 0 e 6 Mg ha⁻¹ de gesso. Nas subsubparcelas foi alocado o fator camadas amostradas de 5 cm, até 25 cm de profundidade. Os resultados da saturação por bases, pH, Ca, Al, saturação por alumínio, matéria orgânica do solo, argila,

¹ Eng. Agr., mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal.

silte, areia, microporos, diâmetro médio geométrico de agregados e o diâmetro médio ponderado de agregados indicaram ter havido interação entre formas de aplicação das doses de calcário e profundidade de coleta das amostras do solo. Os teores de Mg, P e a porosidade total, obtidos em diferentes profundidades, foram influenciados pelas doses de gesso aplicadas. Os valores do teor de K, macroporos, criptoporos, argila dispersa em água, índice de floculação e capacidade de troca de cátions efetiva, densidade relativa do solo foram influenciados pelas profundidades avaliadas. As curvas de retenção hídrica do solo não foram, na grande maioria, afetadas pelos tratamentos empregados. O intervalo hídrico ótimo foi semelhante para o solo mantido sob sistema de plantio direto e o solo revolvido para aplicação de calcário incorporado. Conclui-se que, a aplicação de calcário com revolvimento do solo proporciona maior uniformidade de distribuição dos atributos químicos no perfil do solo; na dose utilizada, gesso não melhora os atributos químicos da subsuperfície de solos com elevada capacidade de tamponamento; o revolvimento do solo diminui a estabilidade dos agregados e o teor de matéria orgânica em camadas superficiais do solo; a utilização agrícola de Cambissolos Húmicos alumínicos típicos não acarreta problemas compactação; revolvimento do solo, doses de calcário e doses de gesso não são determinantes em alterar a retenção hídrica deste solo; o intervalo hídrico ótimo indica não haver limitações hídricas para o solo.

Palavras-chave: perfil do solo, intervalo hídrico ótimo, retenção hídrica, densidade relativa, subsuperfície do solo.

**PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF AN
INCEPTISOL REGARDING THE LIMESTONE AND GYPSUM
WITH OR WITHOUT INCORPORATION**

ABSTRACT – Limestone is efficient to correct the soil acidity, however when applied on the surface, its action is restricted to the surface due to its low solubility. As a result, in some situations the incorporation is recommended, being able consequently, modify some physical soil attributes. Gypsum applied on the surface, due its greater solubility, can be an alternative to increase the Ca levels and decrease the negative effects of Al in the subsurface. To evaluate the physical-chemistry soil attributes regarding the limestone application on the surface and its incorporation in the soil and the gypsum on the surface, it was installed a field experiment in the region of Campos de Cima da Serra, city of Bom Jesus – RS, on an Inceptisol in 2010 and the soil samples were collected in 2013. The experimental design was in blocks at random, arrangement of subdivided plots with two repetitions. The main plots received doses of 0, 8 e 16 Mg ha⁻¹ limestone on the surface and incorporated in the soil through disc plow and subsequent disc harrowing. The subplots received doses of 0 e 6 Mg ha⁻¹ of gypsum. In the sub-subplots was allocated the layer sampled factor from of 5 cm, until 25 cm of profundity. The results of base saturation, pH, Ca, Al, aluminium saturation, soil organic matter, clay, silt, sand, micropores, mean weighted geometric diameter and the weighted mean diameter aggregate have indicated the relation between the ways of limestone dose application and the profundity of soil samples collection. The levels of Mg, P and total porosity obtained in different profundities were influenced by the gypsum dose applied. The values of K,

macropores, cryptoporus, water dispersible clay, level of flocculation and cation exchange capacity effective, relative soil bulk density were influenced by the profundity evaluated. The curves of soil water retention were not, in great majority, affected by the treatments applied. The least limiting water range was similar to the soil kept under no-tillage system and the soil tillage to the limestone incorporation. It concludes that the limestone application under soil tillage, provides greater uniformity of chemical attributes distribution in the soil profile; in the correct dose, gypsum does not improve the chemical attributes in the soil subsurface with high buffering capacity; the soil tillage decreases the soil aggregate stability and level of soil organic matter in the soil surface layers; the agricultural use of Inceptisol does not involve compaction problems; soil tillage, limestone dose and gypsum dose are not determinants to modify the water retention of this soil; the least limiting water range does not indicate hydric limitations to this soil.

Key words: soil profile, least limiting water range, water retention, relative bulk density, subsurface soil.

1 INTRODUÇÃO

Os campos de cima da serra do RS são utilizados principalmente para a exploração agropecuária nas pastagem nativa. Essas áreas, em razão da elevada acidez natural, apresentam baixíssimos índices de produtividade. Dessa forma, produtores estão iniciando a exploração comercial com culturas anuais produtoras de grãos, constituindo-se em uma nova fronteira agrícola do estado do Rio Grande do Sul. Para que se obtenha produtividades satisfatórias, no entanto, a acidez do solo deve ser corrigida.

O calcário é o insumo utilizado para a correção da acidez do solo. Porém, quando aplicado em superfície sua ação limita-se às camadas superficiais, devido à baixa solubilidade e conseqüente baixa mobilidade no perfil do solo. Dessa forma, a maneira recomendada de corrigir a elevada acidez potencial em subsuperfície é a incorporação de calcário. Porém, essa prática nem sempre é bem aceita pelos produtores, pois temem prejuízos à qualidade física do solo.

Em meio a definições ainda não bem estabelecidas pela pesquisa, tem-se utilizado o gesso agrícola para minimizar problemas causados pelo alumínio tóxico em subsuperfície, aplicando esse insumo em superfície, por apresentar maior mobilidade vertical no solo quando comparado ao calcário.

A questão de pesquisa foi definir se o gesso aplicado em superfície é capaz de resolver os problemas químicos de solos com alta acidez potencial, ou se um preparo de solo ocasional, para a incorporação de calcário é necessário. A incorporação de calcário poderia alterar atributos físicos do solo, para isso, foram avaliados

alguns indicadores de qualidade física como nível de compactação, agregação, disponibilidade hídrica, resistência à penetração de raízes, arranjo das partículas sólidas e os poros a elas associados.

A hipótese para o trabalho é de que o calcário melhore as características químicas do solo mas que sua reduzida mobilidade faça com que sua ação se restrinja nas camadas superficiais, sendo a incorporação necessária para a ação em subsuperfície. Que o gesso atue melhorando as condições químicas da subsuperfície, principalmente, diminuindo os teores de alumínio trocável e aumentando os teores de cálcio. A incorporação de calcário ao solo modifique a geometria porosa ocasionando algumas alterações físicas para o solo.

Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os atributos químicos e físicos no perfil de um Cambissolo Húmico alumínico típico, após ter recebido doses superficiais e incorporadas de calcário e doses superficiais de gesso.

Os objetivos específicos foram avaliar, até a profundidade de 25 cm, a contribuição do calcário em aplicação superficial e incorporada e gesso em superfície sobre o $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$, saturação do solo por bases, Ca, Al trocável, saturação por Al, MOS, Mg, P, K e CTC efetiva. Também foram avaliados os atributos físicos indicadores de qualidade do solo, medidos através dos agregados estáveis em água, dispersão e floculação da argila, compactação do solo, porosidade, intervalo de disponibilidade hídrica em que não há restrições ao crescimento de plantas, denominado IHO, e retenção hídrica do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Química do solo

2.1.1 Acidez do solo

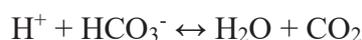
Os solos com pastagens naturais, de modo geral, apresentam elevada acidez, com a presença de alumínio e manganês trocáveis em quantidades prejudiciais às plantas, bem como teores de fósforo deficientes, havendo necessidade da adição de insumos para minimizar estes problemas (RHEINHEIMER et al., 2000). A correção do pH do solo é realizada por meio da aplicação de corretivos de acidez, sendo o calcário o mais eficiente trazendo como mudança a elevação do pH, fornecimento de Ca e Mg, como nutrientes, eliminação dos efeitos tóxicos do Al, Mn e Fe, redução na fixação do P, aumento da disponibilização do N, P, K, Ca, Mg, S, B e Mo no solo (OLIVEIRA et al., 2005).

Grande parte dos solos do Brasil apresentam excesso de acidez subsuperficial (RAMPIM et al., 2011). A origem da acidez do solo inclui diversos fatores, como a decomposição da matéria orgânica e de restos vegetais, óxidos de Fe e Al, Al trocável, sais solúveis e CO₂, sendo que os solos podem ser naturalmente ácidos pela pobreza em bases do material de origem, ou por processos pedogenéticos que favoreceram as perdas dos cátions de reação básica do solo, como K, Ca e Mg (MALAVOLTA, 1981). A caracterização de Cambissolo Húmico alumínico típico (STRECK et al., 2008), remete à dificuldade de correção dessas áreas devido a elevada concentração de alumínio nesses solos.

A correção da acidez do solo é considerada como uma das práticas que mais contribui para o aumento da eficiência dos adubos e, conseqüentemente, da produtividade e da rentabilidade agropecuária (OLIVEIRA et al., 2005), e por isso, deve ser realizada tanto em sistema de plantio direto quanto no cultivo convencional (RHEINHEIMER et al., 2000).

2.1.2 Calcário agrícola

O material corretivo mais utilizado na neutralização da acidez dos solos é o calcário, constituído de carbonato de Ca e de Mg. A reação do CaCO_3 , com o solo dá-se da seguinte maneira:



A hidroxila reage com o íon H^+ da solução do solo, resultando em água. O bicarbonato reage também com o H^+ , originando CO_2 . A reação tende para a direita enquanto existirem íons de H^+ na solução e o pH da solução fica em equilíbrio com a acidez total. Ao ser elevado o pH, o Al^{3+} é precipitado na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (RAIJ, 2011).

Os corretivos da acidez do solo têm diferentes capacidades de neutralização de ácidos. Esta capacidade é chamada de poder de neutralização (PN), e é expressa em relação ao CaCO_3 puro, ao qual é atribuído o valor de 100% (CQFS-RS/SC, 2004). Para o calcário agrícola, a legislação permite a comercialização de materiais com um PN de no mínimo 68% (BRASIL, 2004).

O calcário agrícola é material pouco solúvel, portanto deve ser finamente moído para aumentar a superfície de contato entre as partículas e o solo (CQFS-RS/SC, 2004). Partículas com diâmetro menor que 0,30 mm reagem completamente; partículas entre 0,30 e 0,84 mm, têm eficiência reativa de 60%; partículas entre 0,84 e 2,00 mm têm eficiência reativa de 20%; e partículas maiores que 2,00 mm de diâmetro não reagem no solo (BRASIL, 2004). Quanto a granulometria do calcário agrícola, a legislação prevê que 100% do material passe em peneira de 2 mm, com tolerância de 5% (mínimo de 95% de partículas menores que 2 mm); 70% passe em peneira de 0,84 mm (com tolerância de 5%) e 50% passe em peneira de 0,30 mm (BRASIL, 2004).

Em decorrência da baixa solubilidade do calcário ($0,014 \text{ g L}^{-1}$) e do lento movimento descendente de Ca^{2+} e de Mg^{2+} no perfil, quando a aplicação é realizada sem incorporação ao solo, os efeitos da calagem observados e relatados na literatura geralmente se limitam às camadas superficiais do solo (CAIRES et al., 2003; RAIJ, 2011; VERONESE et al., 2012; PAULETTI et al., 2014), e sua ação neutralizante depende da superfície de contato e do tempo de reação com o solo (ARAÚJO et al., 2009).

A correção uniforme do volume de solo da camada arável é alcançada com a incorporação de corretivos. Porém, a qualidade física do solo pode ser afetada com a aração e a gradagem, alterando o arranjo dos agregados e poros do solo e com isso reduzir a disponibilidade de ar, água e nutrientes necessários à produção de biomassa (GUIMARÃES et al., 2013).

Todavia, a correção do subsolo pela calagem superficial em sistema de plantio direto pode ocorrer em razão da lessivagem de

partículas finas de calcário por meio da porosidade contínua no perfil, da formação de par iônico entre o sulfato ou nitrato e o Ca e o Mg do corretivo, ou ainda pela formação de complexos entre esses cátions e os compostos orgânicos solúveis liberados pela decomposição da biomassa vegetal depositada na superfície do solo (PAULETTI et al., 2014).

2.1.3 Gesso agrícola

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto da indústria de ácido fosfórico. É composto por sulfato de cálcio e pequenas concentrações de P e F, sendo largamente disponível em muitas partes do mundo (CAIRES et al., 2003; CQFS-RS/SC, 2004).

O gesso é comumente utilizado na agricultura como fonte de Ca e de S. Pela legislação, é definido como corretivo de sodicidade e condicionador de solo (BRASIL, 2004). Estas características, associadas à elevada solubilidade e mobilidade do íon sulfato permitem que, quando aplicado na superfície do solo, seja solubilizado pela percolação da água, potencializando, assim, seu uso agrícola por diminuir a atividade do alumínio e elevar os teores de Ca e S das camadas subsuperficiais (SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012; SOUZA et al., 2012).

O íon Ca^{2+} reage no complexo de troca do solo, deslocando Al^{3+} , K^+ e Mg^{2+} para a solução do solo, os quais podem, por sua vez, reagir com o SO_4^{2-} , formando AlSO_4^+ (menos tóxico às plantas) e os pares iônicos neutros K_2SO_4^0 e MgSO_4^0 , além do CaSO_4^0 , que apresentam mobilidade no perfil (RAMPIM et al., 2011; DIAS, 1992).

Dessa forma, o íon SO_4^{2-} pode provocar lixiviação de magnésio e de potássio das camadas mais superficiais do solo, expondo as plantas a eventuais deficiências (SILVA et al., 1997; DIAS, 1992). A lixiviação de cátions básicos à zonas profundas e fora do alcance das raízes pode ser importante em solos com baixo teor de argila (CAIRES et al., 1998).

Outro efeito indireto esperado de aplicações de gesso é aumentar a disponibilidade hídrica para as culturas ao melhorar os atributos químicos do perfil subsuperficial do solo (SUMNER, 1995), proporcionando condições favoráveis ao desenvolvimento de raízes e, dessa forma, aumentar o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

2.1.4 Calcário *versus* gesso

Como o calcário é produto de baixa solubilidade, a sua incorporação geralmente aumenta a eficiência da prática da calagem. A reação do calcário é limitada à camada de incorporação. Quando isso não ocorre, tem-se menor contato entre as partículas do corretivo e os colóides da subsuperfície do solo, fazendo com que a calagem em superfície tenha efeito lento na diminuição da acidez do subsolo (SORATTO et al., 2010). Devido a esta restrição do uso do calcário, o gesso pode ser uma alternativa para aplicação sem incorporação, já que apresenta maior solubilidade. A solubilidade do gesso é $2,5 \text{ g L}^{-1}$ (OLIVEIRA et al., 2005), enquanto que a do CaCO_3 presente no calcário agrícola, a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, é de apenas $0,014 \text{ g L}^{-1}$ (ALCARDE, 2005), ou seja, uma diferença de 180 vezes.

A calagem é a prática menos dispendiosa e efetiva na correção da acidez e fornece Ca e Mg (ARAÚJO et al., 2009), mas sua incorporação encontra resistência por parte dos produtores devido aos possíveis problemas erosivos (SCHICK et al., 2000), além dos custos para o revolvimento do solo. Nesse cenário em que a aplicação superficial é preferida pelos produtores, o gesso mostra-se como uma alternativa para diminuir os efeitos deletérios do alumínio em camadas mais profundas quando comparada ao calcário agrícola aplicado em superfície, embora o gesso agrícola não seja capaz de elevar o pH do solo (NAVA et al., 2012; SANTOS et al., 2012).

A gessagem pode ser utilizada também como prática complementar em solos ácidos para melhorar as características químicas, principalmente na subsuperfície do solo, como fonte de Ca^{2+} e SO_4^{2-} , reduzindo os teores de Al^{3+} e aumentando os teores de Ca^{2+} (RAMPIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012).

A aplicação de calcário juntamente com gesso agrícola pode compensar o efeito do calcário restrito ao local de aplicação, pois o gesso agrícola poderá atuar no subsolo, nos primeiros anos de cultivo, sem necessidade de incorporação prévia (CAIRES et al., 2003). Ao calcário reagir e neutralizar os óxidos de Fe e Al, proporciona condições para que, em seguida, o Ca e Mg presentes no calcário e mais o Ca do gesso tenham a possibilidade de serem arrastados pelo perfil do solo com a formação de pares iônicos com o íon sulfato, sem residual de cargas (MARKET et al., 1987). É importante constatar se isso ocorre em todos os solos, o que poderia ocasionalmente dispensar a incorporação de calcário quando a camada de interesse é a subsuperficial.

Raij et al. (1994) observaram que na cultura da soja, o efeito do calcário predominou nas camadas mais superficiais de um Latossolo Roxo enquanto o gesso afetou também o subsolo. Bilibio et al. (2010), com o propósito de avaliarem alterações em propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho distrófico, concluíram que a correção do Al é mais eficiente no sistema convencional, devido à incorporação do calcário, independente da aplicação de gesso agrícola. Mesmo assim, segundo Carvalho & Raij (1997), o sulfato de cálcio presente no gesso é tão eficaz quanto o carbonato de cálcio presente no calcário para promover condições químicas adequadas para o crescimento de raízes quando estudaram a cultura do milho.

2.1.5 Matéria orgânica do solo (MOS)

A MOS tem origem na decomposição de biomassa vegetal formada no processo de fotossíntese, realizada pelas plantas. Também há aporte de resíduos orgânicos animais. Ela não é oriunda do material mineral de origem dos solos, mas é formada a partir de diversas reações, inclusive com a ação de organismos, e é composta de C, N, H, O, S e P. Para fins práticos, assume-se que a MOS tem 58% de carbono, em média (RAIJ, 2011). Com base nisso, para obter MOS a partir de carbono basta multiplicar pelo fator de van Bemmelen (1,724).

O não revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos das culturas na superfície do solo em plantio direto desencadeia inúmeros processos físicos, químicos e biológicos fortemente interrelacionados, geralmente sinérgicos entre si, como é o caso dos processos que levam ao aumento da estabilidade dos agregados e dos

estoques de matéria orgânica no solo (COSTA et al., 2004). O maior teor de carbono orgânico no solo determina maior estabilidade de agregados, e esta, por sua vez, maior proteção física da matéria orgânica.

O preparo, em geral, promove um intenso revolvimento do solo na camada superficial, o que pode favorecer a decomposição da matéria orgânica, e por vezes, ocasiona considerável efeito prejudicial à qualidade estrutural do solo (BERTOL et al., 2001).

O incremento de matéria orgânica ao solo pela palhada através do sistema de plantio direto e pelo uso de fertilizantes orgânicos tem sido adotado como prática para aumentar a disponibilidade de P por diminuir a fixação com os óxidos de Fe e Al, já que podem competir pelos mesmos sítios de adsorção (RAMPIM et al., 2013) e isso ocorre mais em superfície pelos maiores teores de MOS e menores teores de óxidos.

Altas produtividades na ausência de correção do solo com calcário podem ser atribuídas ao menor efeito tóxico do Al, em consequência de menor concentração de formas tóxicas (Al^{3+} e $AlOH^{2+}$) e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos ou à disponibilidade suficiente de Ca e Mg trocáveis, dada a elevada capacidade de troca de cátions decorrente do alto teor de matéria orgânica (CAIRES et al., 2003).

2.2 Física do solo

2.2.1 Textura do solo

Textura é um termo empregado para designar a proporção

relativa das frações minerais argila, silte e areia do solo. Estes constituintes se diferenciam entre si pelo tamanho de suas partículas. A textura do solo é importante parâmetro de caracterização de solos agrícolas, interferindo na retenção de água. O seu conhecimento é de fundamental importância para a determinação da área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo, responsável em grande parte pela distribuição do diâmetro dos poros (REICHARDT & TIMM, 2004).

Os teores relativos das partículas do solo influenciam na taxa de infiltração, retenção de água (ALMEIDA NETO, 2007), na aeração, na disponibilidade de nutrientes (FERRARESI et al., 2012) e a sua determinação no solo permite fazer uso mais racional e eficiente dos fertilizantes (SANTOS et al., 2010).

Quando os solos possuem textura arenosa são caracterizados por apresentarem uma baixa capacidade de retenção de água, alta suscetibilidade aos processos de erosão, além de baixa estruturação física do solo (COSTA, 2007). Além disso, a textura do solo interfere diretamente no desgaste de implementos e na potência requerida por máquinas em operações agrícolas em que ocorre mobilização de solo, pois segundo Ferraresi et al. (2012), a textura do solo determina em grande parte, o grau de coesão e adesão entre as partículas do solo.

2.2.2 Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF)

A dispersão da fração coloidal do solo pode ocorrer naturalmente ou pela ação antrópica, mas a resposta do solo à ação de forças desagregantes depende, em grande parte, das suas características

químicas, físicas e mineralógicas (ALMEIDA NETO, 2007; SILVA et al., 2009). Outra relação que pode ser feita é entre o pH e o ponto de carga zero (PCZ), sendo que quanto maior a diferença entre eles, maior será a repulsão entre as partículas e, conseqüentemente, maior a dispersão do solo (MARCOLAN, 2002). Residual de cargas líquidas negativas ou positivas, resulta em forças repulsivas que são suficientemente grandes para manter a argila dispersa (FERREIRA et al., 2010).

Além das alterações químicas proporcionadas pela utilização do gesso e calcário, alguns autores citam, também, alterações de atributos físicos do solo (ALBUQUERQUE et al., 2003; SPERA et al., 2008; FAVARETTO et al., 2006). Segundo Spera et al. (2008), a dispersão de argila aumentou com a calagem, pois a correção do pH do solo precipita o Al^{3+} , tornando-o insolúvel. Esse cátion, por ser trivalente, atua como um contra-íon na solução do solo e, quando ocorre elevação da concentração de eletrólitos, ocorre diminuição da espessura da dupla camada elétrica difusa, junto à superfície das partículas coloidais o que torna a argila menos propensa à dispersão.

A aplicação de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ ao solo neutraliza o Al^{3+} e aumenta a quantidade de cargas negativas do solo, e estas são repelidas entre si, podendo assim aumentar a dispersão da argila (CHAVES et al., 1997). Por outro lado, o uso do gesso em solos sódicos como fonte de Ca na solução permite substituir o sódio no complexo de troca e promove a lixiviação do sulfato de sódio na água de drenagem, resultando em maior floculação da argila e aumento da permeabilidade do solo (OLIVEIRA et al., 2005).

Os efeitos dispersivos da calagem estão ligados à alteração

na espessura da dupla camada elétrica do solo (ALBUQUERQUE et al., 2000; ALBURQUERQUE et al., 2003), sendo a magnitude dessa alteração o resultado de efeitos antagônicos provocados pela calagem: substitui o Al^{3+} pelo Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca, ocorrendo assim a diminuição na atividade de Al^{3+} e H^+ na solução do solo (que são os principais agentes flocculantes em solos ácidos) e isso tende a aumentar a dupla camada elétrica. Por outro lado, o aumento da força iônica da solução e da adsorção específica de Ca e Mg atua no sentido inverso (SILVA et al., 1998; ALBUQUERQUE et al., 2000).

Menores valores de ADA proporcionam, conseqüentemente, maiores valores de IF, sendo que a matéria orgânica apresenta correlações significativas com o IF, comprovando seu efeito na flocculação das argilas (BEUTLER et al., 2001).

2.2.3 Compactação

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (RICHART et al., 2005). A compactação do solo acarreta a redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos, o que afeta as propriedades físico-hídricas (KLEIN & LIBARDI, 2002), mas poderia ser benéfica em termos de retenção de água, pela transformação de parte dos macroporos em microporos (OLIVEIRA et al., 2004).

A densidade do solo (DS), por si só, não é muito informativa para caracterizar a compactação do solo. Em função disso,

a densidade relativa (DR) tem sido utilizada para avaliar compactação do solo (KLEIN, 2006). A DR é obtida realizando-se o ensaio de Proctor, ensaio este em que se determina a máxima compactação para cada tipo de solo e a umidade do solo ótima para compactação. Esta umidade deveria ser evitada para realizar operações mecanizadas, pois é a condição em que o solo é mais passível de compactação. Vieira & Klein (2007), alertam para problemas de compactação dos solos agrícolas e atribuem esse problema às operações mecanizadas realizadas sem considerar a umidade ideal do solo. A pressão originária das forças de tração e do próprio peso do trator com implementos aliada ao tráfego excessivo realizado indiscriminadamente sob condições de umidade do solo inadequada é o principal responsável pela compactação (BELTRAME & TAYLOR, 1980).

Apesar dos benefícios do sistema plantio direto, há situações em que o solo cultivado nesse sistema apresenta problemas de compactação (MARCOLAN, 2002) devido à mobilização do solo restrita à linha de semeadura e concentração das cargas, acumulativas ao longo dos anos, na camada superficial dos solos e a própria acomodação natural das partículas (ABREU et al., 2004). Mas operações de preparo de solo e demais operações agrícolas geralmente trazem efeitos negativos ao solo, como a deterioração de sua estrutura (MAGALHÃES, 1992).

2.2.4 Porosidade do solo

Segundo Hatano et al. (1988), existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular, com maior

desenvolvimento de raízes maior onde há continuidade macroporos. Já solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes por causa do menor contato solo/raiz, provocando também menor desenvolvimento das plantas (HÂKANSSON, 1990; BEUTLER & CENTURION, 2003).

O arranjo e a geometria das partículas do solo determina a quantidade e a natureza dos poros existentes, sendo importantes assim para determinar a retenção hídrica específica de cada solo. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura, tortuosidade e outras características (LIBARDI, 2005). A distribuição do diâmetro dos poros é afetada por muitos fatores, sendo o principal deles a textura (REICHARDT, 1987).

A porosidade total (PT), água disponível, DS, macro e microporos, não mostraram diferença entre doses de calcário, fertilizantes e húmus em Argissolo Amarelo Distrófico típico, de textura franco arenosa (TEIXEIRA et al., 2006). Por outro lado, aplicações incorporadas de corretivos, por vezes são necessárias, mas alteram a porosidade do solo. Em um estudo com plantio direto seguido anualmente de um preparo com arado, plantio direto seguido bianualmente de preparo com arado, plantio direto seguido trienalmente de preparo com arado e plantio direto contínuo, Silveira et al. (2008) verificaram que o plantio direto contínuo apresentou valores de DS mais elevados e menores valores de macroporosidade e de porosidade total em relação aos demais tratamentos.

A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (DIAS JR. & PIERCE, 1996). De forma geral esta propriedade funciona como indicador de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas.

2.2.5 Preparo do solo *versus* semeadura direta

A ocupação do solo pelo homem provoca alterações sobre os atributos do solo associadas a práticas de manejo em graus variados. Dessa forma, a manutenção da qualidade dos solos é fundamental para o desenvolvimento de culturas e a garantia de níveis satisfatórios de produção (LIMA et al., 2013).

Na região sul do Brasil tem aumentado o interesse pela busca de alternativas para o estabelecimento de culturas no sistema plantio direto sem revolver o solo. As vantagens desse procedimento estão relacionadas à manutenção de atributos químicos e estruturais do solo, maior controle da erosão e economia nas operações de incorporação de calcário e preparo do solo (CAIRES et al., 2003).

O revolvimento do solo ocasiona desestruturação dos agregados naturais (WENDLING et al., 2005; SILVA et al., 2006), favorece a oxidação da matéria orgânica (BAYER & BERTOL, 1999), altera o arranjo entre as partículas do solo, mudando sua DS, e predispõe o solo a processos erosivos (BERTOL et al., 2001). Estas modificações na estrutura do solo alteram o grau de compactação além de mudar a dinâmica da água no solo e, conseqüentemente, a retenção hídrica (MACHADO et al., 2008). Por outro lado, a semeadura direta é um sistema de manejo conservacionista, pois a ausência de preparo

mantém os resíduos vegetais e aumenta o teor de matéria orgânica na superfície, apesar de aumentar a DS e diminuir a porosidade superficial do solo (BERTOL et al., 2001).

Os sistemas de preparo do solo promovem modificações nas propriedades físicas, como seu estado de agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), DS e na porosidade do solo (DEMARIA et al., 1999). Segundo Vieira & Klein (2007), o preparo do solo é a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na sua estrutura. Além das modificações na porosidade e DS, o manejo provoca alterações na estrutura do solo, que, em conjunto, afetam a retenção de água e a resistência mecânica à penetração de raízes.

Os implementos usados no preparo do solo provocam alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas (FALLEIRO et al., 2003). As operações de preparo podem predispor o solo à erosão hídrica, alterando o microrrelevo e a cobertura por resíduos vegetais e promovendo a exposição da superfície do solo à ação da chuva e da enxurrada (PANACHUKI et al., 2011). Em solos com perfil raso, como os Cambissolos, as perdas de solo por erosão podem ser restritivas ao seu uso com culturas anuais.

A semeadura direta adotado no sul do Brasil, em substituição ao preparo com arado e grade, refletiu-se positivamente na dinâmica da MOS, ocorrendo aumento na adição de resíduos vegetais e redução na perda de matéria orgânica por erosão (ANDRADE et al., 2012). Por outro lado, este sistema, com a ausência de revolvimento do solo, aliada ao tráfego de máquinas, promove a compactação excessiva

do solo nas camadas superficiais e é um processo de difícil reversão, especialmente em solos argilosos (GIRARDELLO et al., 2011).

Eltz et al. (1989) observaram que a produtividade de milho (*Zea mays* L.) em sistema plantio direto é superior ao sistema de manejo convencional, concluindo que isso provavelmente seja devido a maior conservação da água no perfil, maior fertilidade na camada explorada pelas raízes e menor perda de solo. Assim, o preparo do solo por provocar uma reorganização das partículas, pode interferir na retenção hídrica do solo.

A mobilização do solo, após longos períodos de cultivo no sistema de plantio direto, pode ser responsável por perdas nas características favoráveis criadas pelo plantio direto, destacando-se o teor de matéria orgânica, a estabilidade de agregados, a continuidade de poros e a presença de canais ou galerias de elevada atividade biológica (MARCOLAN, 2002).

Porém, alterações positivas também podem ser criadas pelo preparo do solo. Klein (2011), avaliando propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico húmico concluiu que após uma escarificação esporádica, a DS, a DR e a resistência mecânica à penetração (RP) diminuíram, a porosidade total, e em especial, os macroporos, aumentaram.

2.2.6 Retenção hídrica

A curva de retenção de água pelo solo é expressa pela relação entre o potencial matricial e a umidade do solo. A retenção de água na matriz do solo é governada por duas forças principais, as

capilares e as de adsorção, as quais são denominadas de forças mátricas, dando origem ao termo potencial mátrico da água no solo (VIEIRA, 2006; KLEIN, 1998). Para Aguiar (2007), o conteúdo de água é um índice que diz a quantidade de água presente no solo e o potencial mátrico é uma medida da energia de retenção da água pela matriz do solo.

O solo, o reservatório de água para as plantas, é afetado pelo manejo e práticas culturais, alterando a dinâmica e a retenção de água nos seus poros (KLEIN, 1998). Indiretamente, a adequada disponibilidade hídrica proporciona maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, pois para que estes sejam absorvidos devem estar na solução do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002).

O conteúdo de água retido no solo em determinada tensão é característica específica de cada solo e é resultado da ação conjunta e complexa de vários fatores, dependendo do teor e mineralogia da fração argila, do teor de matéria orgânica, das diferenças da microestrutura e da compactação do solo (BEUTLER et al., 2002). A distribuição do diâmetro dos poros condiciona o seu comportamento físico-hídrico (KLEIN & LIBARDI, 2002).

Os efeitos do gesso agrícola na floculação das partículas do solo refletem em melhoria na sua agregação ao fornecer cálcio ao complexo de troca comprimindo a dupla camada elétrica difusa, além do potencial do gesso em aumentar a infiltração e reduzir o escoamento superficial, por diminuir a impermeabilização da superfície e a formação de crostas. Estes efeitos contribuem para o aumento da capacidade de retenção de água do solo (SERAFIM et al., 2012).

2.2.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

O IHO é definido como o intervalo do conteúdo de água no solo no qual limitações para o crescimento das plantas associado com potencial de água, aeração e resistência do solo à penetração de raízes são mínimas e, assim, o conteúdo de água é determinado experimentalmente para cada uma destas condições em função da DS (TORMENA et al., 1999; BEUTLER et al., 2004).

O limite superior do IHO é o menor valor entre o conteúdo de água retida na tensão da capacidade de campo ou quando a porosidade de aeração (PA) é de 10%. O limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água retida na tensão equivalente ao ponto de murcha permanente (PMP) ou a resistência à penetração limitante (BEUTLER et al., 2004).

O IHO diminui com o aumento da DS, podendo atingir o valor zero quando os limites superior e inferior são numericamente iguais. Nesta condição, a DS é denominada de densidade do solo crítica ao crescimento das plantas (BEUTLER et al., 2004; LIMA et al., 2012).

A DS é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros. Essas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes como a PA, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (KLEIN, 1998). Esses importantes atributos físicos podem ser avaliados mediante a construção do IHO. As complexas e dinâmicas interações entre RP, aeração e disponibilidade de água alteram diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas (LIMA et al., 2012).

Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicial (IIJIMA & KONO, 1991). Dessa forma, a resistência do solo à penetração é fundamental para a avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do solo para o crescimento das plantas, sendo dependente da umidade do solo e DS.

2.2.8 Estabilidade dos agregados

Agregado é um elemento estrutural formado pelo agrupamento de partículas primárias de areia, silte e argila (YODER, 1936). As forças que fazem com que as partículas permaneçam agregadas ou se separem denominam-se coesão. Segundo Souza & Souza (2009), as interações dessas partículas com a água e o ar são devidas às forças de adesão, e o conhecimento da intensidade de ocorrência dessas forças definem o estado de consistência do solo para entender a formação e a estabilidade da estrutura do solo.

Boa estrutura para crescimento de culturas depende da presença de agregados de solo, partículas de 1 a 10 mm de diâmetro que se mantenham estáveis quando umedecidos. Tais agregados estáveis em água devem ser porosos (poros > 0,075 mm diâmetro), de modo que permaneçam aerados, e ainda possuir um número suficiente de poros de 0,030 a 0,0002 mm de diâmetro para reter água para o crescimento de plantas. Os poros entre os agregados devem ser suficientemente grandes para permitir a infiltração rápida e drenagem (TISDALL & OADES, 1982).

A estabilidade de agregados tem sido estudada como indicador de qualidade física do solo, pois é sensível às alterações, conforme o manejo adotado. Para Imhoff (2002), uma maior agregação do solo, indiretamente, afeta as demais características físicas como DS, porosidade, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo.

A formação de agregados no solo está submetida a uma série de fatores e condições como agentes cimentantes, mineralogia do solo, processo de formação e manejo agrícola. Os agregados são as unidades formadoras da estrutura do solo e são classificados quanto à forma, resistência e tamanho (PEREIRA et al., 2009). Os compostos orgânicos participam das ligações entre partículas individuais do solo, atuando como agentes cimentantes das unidades estruturais pelas suas diversas características de superfície (LIMA et al., 2003) e segundo Garcia & Rosolem (2010), a matéria orgânica, proveniente do crescimento radicular e o constante aporte de palha na superfície, tem papel fundamental na melhoria das propriedades físicas do solo.

A quantidade de matéria orgânica exerce influência direta na estrutura do solo, pois interfere na estabilidade dos agregados que formam (MANFRÉ et al., 2011). A utilização de calcário e gesso melhora as condições químicas de solos com problemas de acidez e Al tóxico, tornando-o mais produtivo e, dessa forma, há maior aporte de matéria seca vegetal, podendo elevar o teor de MOS e propiciando maior estabilidade de agregados. Esta situação foi verificada por Bonini & Alves (2011), trabalhando com um Latossolo Vermelho degradado, que a 17 anos recebeu os tratamentos de adubos verdes, calcário, gesso e braquiária, no qual, a recuperação dos atributos físicos do solo, dentre

eles, a estabilidade de agregados, foi mais pronunciada nos tratamentos que continham calcário e gesso, auxiliados também pelos maiores teores de MOS.

Para entender os efeitos do manejo sobre a matéria orgânica e outros atributos químicos do solo deve-se considerar como um sistema aberto, em que a adição de energia se dá pela quantidade de carbono produzida pelas plantas e a saída de energia depende do consumo pelos microorganismos, liberada na forma de CO₂ (ANDRADE et al., 2012).

Os sistemas de manejo que mantêm o solo sem cobertura vegetal diminuem a estabilidade de agregados, causando selamento superficial, reduzindo assim a infiltração de água e, em razão disso, provocando enxurrada e erosão (ROTH et al., 1991). Já, o sistema plantio direto ao manter os resíduos culturais na superfície, poderia aumentar a matéria orgânica e melhorar a agregação do solo em relação ao preparo convencional (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990). Assim, espera-se que nesse sistema, a camada superficial, por possuir teor geralmente mais elevado de matéria orgânica, possua maior agregação das partículas em relação à camada subsuperficial do solo.

A estabilidade de agregados pode ser avaliada pelo DMP e pelo DMG, e cada um deles apresenta um princípio diferente: o DMP é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores e o DMG representa uma estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência (CASTRO FILHO et al., 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, clima e solo

O trabalho foi realizado em área agrícola no município de Bom Jesus, RS, localizada a 50° 37' W e 28° 28' S, com altitude de 1100 m, em solo classificado como Cambissolo Húmico alumínico típico (STRECK et al., 2008), horizonte B incipiente. O clima é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köpen, caracterizado como clima temperado úmido com verão quente, e pluviosidade média anual de 1724 mm (dados dos anos de 1961 a 1990) e precipitações bem distribuídas durante os meses do ano (RIO GRANDE DO SUL, 2010).

3.2 Histórico e implantação do experimento

A área do experimento encontrava-se sob pastagem natural, e foi pastejada até 2002, quando passou então a ser cultivada com culturas anuais, para produção de grãos, sob sistema de plantio direto. Devido à necessidade de correção do solo, foi utilizado, na ocasião do início das atividades em 2002, 6 Mg ha⁻¹; em 2005, 4 Mg ha⁻¹; e em 2009, 3 Mg ha⁻¹ de calcário, totalizando 13 Mg ha⁻¹, sempre aplicado em superfície, sem qualquer tipo de incorporação.

Em 2010 foi implantado o experimento pela família Arns, proprietários da área, em meio à área de lavoura. As culturas implantadas e as doses de fertilizantes utilizadas foram as mesmas do restante da área, na ocasião da semeadura da lavoura. As culturas implantadas entre a instalação do experimento e a coleta das amostras foram milho, trigo (*Triticum aestivum* L.), soja (*Glicine max* (L.) Merrill), aveia branca (*Avena sativa* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

As amostras de solo foram coletadas no mês de fevereiro de 2013 para avaliações dos atributos químicos e físicos do solo.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, arranjo em parcelas subdivididas, com duas repetições. A parcela principal recebeu doses de 0, 8 e 16 Mg ha⁻¹ de calcário (dolomítico, PR 80 %, PN 95 %, CaO 27 %, MgO 17 %) em superfície e incorporado com arado e uma gradagem leve. A subparcela recebeu doses de 0 e 6 Mg ha⁻¹ de gesso (20 % de Ca e 16 % de S) aplicada na superfície do solo. Na subsubparcela foi alocado o fator camada amostrada de 5 cm de espessura até a profundidade de 25 cm. Estes tratamentos foram efetuados no ano de 2010.

Para a coleta das amostras de estrutura preservadas utilizou-se o trado tipo Uhland, sendo que os cilindros possuíam dimensões de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (100 cm³ aproximadamente). A coleta das amostras de solo deformadas foram realizadas utilizando-se pá de corte. As amostras de solo de estrutura preservada e deformada foram sempre coletados em locais adjacentes, totalizando 120 coletas para cada tipo de amostra. A partir da instalação do experimento, o local foi conduzido com o sistema de plantio direto até a data da coleta das amostras.

3.3 Análise de atributos químicos

Para as análises químicas seguiu-se a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). A saturação por bases foi obtida pela relação entre a soma de bases e a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7. A saturação por alumínio foi calculada pela relação entre Al³⁺ trocável

e a CTC efetiva. Os resultados das análises químicas foram obtidos em duplicata.

3.4 Análise de atributos físicos

3.4.1 Textura do solo, argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF)

Para análise granulométrica do solo utilizou-se o método da pipeta, descrito por Ruiz (2005). Para a ADA, seguiu-se o mesmo método, porém ao invés de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio, as amostras foram agitadas somente com água deionizada, e foi coletado somente a fração argila do solo. O IF foi obtido pela equação:

$$\text{IF}(\%) = \frac{\text{Argila total} (\%) \times \text{ADA} (\%)}{\text{ADA} (\%)} \times 100$$

3.4.2 Densidade do solo (DS) e densidade de sólidos do solo

A DS foi determinada pela relação entre a massa da amostra seca em estufa 105 °C e o seu volume ocupado no cilindro (EMBRAPA, 1997). A densidade de sólidos do solo foi determinada pela metodologia do balão volumétrico seguindo a descrição proposta por Embrapa (1997).

3.4.3 Ensaio de Proctor e densidade relativa (DR)

A DR foi calculada pela relação entre a DS e a densidade máxima obtida pelo ensaio normal de Proctor. Para o ensaio de Proctor, utilizou-se cilindro volumétrico de 1000 cm³, de altura 12 cm, no qual

a amostra foi compactada em três camadas, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete de 2,5 kg, em queda livre de uma altura de 30,5 cm, correspondendo a uma energia de 560 kPa. Foram umedecidas gradualmente 10 amostras de solo para a obtenção da curva quadrática, da qual estimou-se posteriormente a umidade ótima de compactação (UOC) e a densidade máxima do solo. Para determinação da umidade três amostras do núcleo compactado foram retiradas e pesadas imediatamente, secas em estufa 105 °C e pesadas novamente.

3.4.4 Porosidade total (PT)

A porosidade total foi determinada pela equação:

$$PT = 1 - \frac{DS}{DSS}$$

em que, PT é porosidade total; DS é densidade do solo; e DSS é densidade de sólidos do solo.

3.4.5 Distribuição do diâmetro dos poros

Foram considerados macroporos os poros maiores que 0,05 mm (diferença entre a umidade do solo saturado e a umidade no potencial do solo (Ψ) -6 kPa), microporos os poros entre 0,05 e 0,0002 mm (diferença de umidade entre os Ψ de -6 kPa e -1500 kPa) e criptoporos os poros menores que 0,0002 mm (Ψ inferiores a -1500 kPa), como descrito em Klein (2014). A umidade gravimétrica foi transformada em volumétrica através do volume ocupado pela massa de solo seco da amostra.

3.4.6 Retenção hídrica

As curvas de retenção hídrica foram geradas utilizando-se o modelo matemático de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m}$$

em que θ é a umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em determinado potencial mátrico; θ_s é a umidade do solo saturado; θ_r é a umidade residual do solo no ponto de murcha permanente; e α , n e m são parâmetros empíricos da equação. A umidade medida foi obtida nos Ψ de -1, -3, -6, -10, -14 kPa, em funis de Haines, -100 e -300 kPa em câmara de Richards e em -1500 kPa, por equação gerada a partir de dados obtidos no psicrômetro modelo WP4-T, marca Decagon Devices® (2000).

3.4.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Para a elaboração do IHO foi considerado o Ψ de -6 kPa como umidade volumétrica (θ) na CC e foi ajustada à DS através de regressão linear. Como θ no PMP, considerou-se o valor de Ψ -1500 kPa, ajustado à DS através de regressão exponencial. Para cálculo da porosidade de aeração (PA), utilizou-se a equação:

$$\theta = \left(1 - \frac{DS}{DSS}\right) - 0,1$$

em que, θ é a umidade volumétrica na qual a PA é 10%, DS é densidade do solo, e DSS é densidade de sólidos do solo. A PA foi ajustada à DS através de regressão linear.

Considerou-se como a RP limitante de 2 MPa. Para isso, as amostras, após terem sido submetidas a última tensão na câmara de Richards (Ψ 300 kPa, para a construção da curva de retenção hídrica), algumas foram imediatamente penetradas e outras, expostas ao ambiente para sofrerem perda gradual de água obtendo-se assim, diferentes umidades para possibilitar o ajuste dos dados ao modelo de Busscher (1990). Então, foram penetradas em penetrômetro de bancada computadorizado, com software instalado permitindo a obtenção dos valores de força aplicada do início até o final da penetração da amostra no cilindro, a intervalos de 1 segundo, na velocidade constante de penetração de $0,17 \text{ mm s}^{-1}$, com cone de 4 mm de diâmetro da base (área da base = $12,56 \text{ mm}^2$) e semi-ângulo de 30° . A umidade foi determinada após, secando-se a amostra em estufa 105°C . A média dos 200 valores centrais do cilindro constituiu a RP medida da amostra, sendo que as dimensões aproximadas do cilindro eram de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A partir destes valores de RP medida à determinada umidade e DS, ajustou-se a RP estimada através do modelo matemático de Busscher (1990), posteriormente linearizado por Silva et al. (1994):

$$\ln RP = a + b \cdot \ln DS - c \cdot \ln \theta$$

em que, RP é a resistência à penetração; DS é a densidade do solo; θ é umidade volumétrica; a , b , e c são os parâmetros empíricos da equação. Após a RP ser estimada, fixou-se o valor de 2 MPa (RP crítica) para determinar a umidade limitante, em função da DS:

$$\theta = \left(\frac{(\text{Exp}^a \cdot \text{DS}^b)}{\text{RP}_{2\text{MPa}}} \right)^{\frac{1}{c}}$$

3.4.8 Estabilidade de agregados em água

As amostras de solo com estrutura deformada foram peneiradas manualmente, utilizando-se os agregados úmidos que passaram pela malha 7,93 mm e retidos na malha 4,75 mm. Após foram secos em estufa 65 °C, utilizando-se uma massa de 50 g para oscilar em água num dispositivo com frequência de 32 oscilações min⁻¹ por um tempo de 15 min. O conjunto de peneiras possui malhas de 4,75; 2; 1 e 0,212 mm. Posterior a isso, os agregados foram separados por classes médias (6,34; 3,375; 1,5; 0,606 e 0,106 mm, sendo esta última determinada pela diferença entre a massa inicial de agregados e a soma das demais classes médias) secos em estufa 105 °C e obtida a massa de cada classe média. O DMG e o DMP de agregados foram determinados segundo as equações propostas por Kemper & Chepil (1965):

$$\text{DMG} = e^{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot \log x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad \text{DMP} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

em que, DMG é o diâmetro médio geométrico de agregados; DMP é o diâmetro médio ponderado de agregados; w_i é a proporção de agregados nas diferentes classes de peneiras; e x_i é o valor médio de cada classe (mm).

3.4.9 Análises estatísticas

Os dados obtidos de pH_(H2O), saturação de bases, Ca, Al trocável, saturação por Al, MOS, Mg, P, K, CTC efetiva, argila, silte, areia, DMP, DMG, DR, microporos, macroporos, criptoporos, PT, ADA e IF foram submetidos a análise de variância e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%

de significância, usando o *software* Assistat. Para determinação dos coeficientes das equações de Busscher (1990) e van Genuchten (1980) utilizou-se análise avançada de equações não lineares no *software* Statistica 10, pela minimização do somatório do quadrado dos desvios entre dados medidos e estimados, através do algoritmo de Levenberg-Marquardt. As figuras foram desenvolvidas com o *software* gráfico SigmaPlot 12.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das variáveis analisadas são apresentados sempre que houve diferença significativa na análise de variância. Para nenhuma das variáveis avaliadas ocorreu interação tripla entre modo de aplicação das doses de calcário, doses de gesso e profundidade. Quando ocorreu interação dupla, os fatores isolados significativos foram desconsiderados.

Na Tabela 1, são apresentadas as correlações entre alguns dos atributos físico e químicos avaliados no trabalho. O coeficiente de correlação Pearson (r) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa da relação e o valor sugere o grau de associação entre as variáveis. Para interpretar a magnitude dos coeficientes, valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; valores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como elevados (FIGUEIREDO FILHO & SILVA JR., 2009). Quando o coeficiente de correlação é significativo estatisticamente, significa dizer que a correlação representou bem a real associação entre variáveis da população.

Nota-se que mesmo baixos coeficientes foram significativos estatisticamente, o que se deve ao grande número de amostras abrangidas pela análise (Tabela 1).

Tabela 1 - Correlação de Pearson entre algumas das variáveis analisadas (n=120). **Significativo pelo teste t ($p \leq 0,01$); * Significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$).

	Argila	Silte	Areia	pH	P	K ⁺	Mg ²⁺	MOS	Al ³⁺	Ca ²⁺	CTC ef.
Silte	-0,92 **										
Areia	-0,91 **	0,68 **									
pH	-0,78 **	0,72 **	0,71 **								
P	-0,70 **	0,65 **	0,62 **	0,53 **							
K ⁺	-0,60 **	0,58 **	0,53 **	0,72 **							
Mg ²⁺	-0,27 **	0,25 **	0,25 **	0,56 **	0,10	0,15					
MOS	-0,79 **	0,72 **	0,72 **	0,71 **	0,67 **	0,67 **	0,28 **				
Al ³⁺	0,51 **	-0,50 **	-0,43 **	-0,80 **	-0,50 **	-0,47 **	-0,54 **	-0,52 **			
Ca ²⁺	-0,49 **	0,48 **	0,41 **	0,73 **	0,52 **	0,42 **	0,37 **	0,55 **	-0,90 **		
CTC ef.	-0,43 **	0,41 **	0,38 **	0,63 **	0,40 **	0,34 **	0,56 **	0,53 **	-0,63 **	0,82 **	
CTC(pH 7)	0,59 **	-0,56 **	-0,51 **	-0,85 **	-0,48 **	-0,47 **	-0,47 **	-0,52 **	0,92 **	-0,79 **	-0,50 **
S. Bases	-0,72 **	0,68 **	0,64 **	0,95 **	0,57 **	0,54 **	0,56 **	0,69 **	-0,91 **	0,89 **	0,75 **
Sat. Al	0,50 **	-0,50 **	-0,41 **	-0,78 **	-0,51 **	-0,46 **	-0,54 **	-0,53 **	0,99 **	-0,92 **	-0,66 **
DS	0,27 **	-0,26 **	-0,24 **	-0,22 *	-0,11	-0,21 *	-0,18 *	-0,34 **	0,14	-0,03	0,00
CC	0,23 *	-0,24 **	-0,17	-0,18	-0,22 *	-0,36 **	-0,06	-0,15	0,20 *	-0,06	0,08
PMP	0,27 **	-0,26 **	-0,24 **	-0,22 *	-0,11	-0,21 *	-0,18 *	-0,34 **	0,14	-0,02	0,00
PT	-0,12	0,09	0,13	-0,01	-0,05	0,05	0,08	0,11	0,07	-0,16	-0,13
DMP	-0,61 **	0,56 **	0,56 **	0,60 **	0,47 **	0,32 **	0,33 **	0,55 **	-0,56 **	0,56 **	0,48 **
DMG	-0,55 **	0,49 **	0,52 **	0,55 **	0,41 **	0,23 *	0,30 **	0,49 **	-0,51 **	0,52 **	0,44 **
ADA	0,22 *	-0,10	-0,30 **	0,10	-0,22 *	-0,24 **	0,26 **	-0,21 *	-0,36 **	0,29 **	0,15 **
IF	0,11	-0,19	0,00	-0,36 **	0,00	0,05	-0,35 **	-0,04	0,53 **	-0,46 **	-0,29 **
Macrop.	-0,23 **	0,22 *	0,20 *	0,12	0,12	0,28 **	0,09	0,17	-0,10	-0,06	-0,14
Microp.	0,10	-0,12	-0,06	-0,08	-0,17	-0,27 **	0,03	0,01	0,14	-0,05	0,08

Tabela 1 - Correlação de Pearson entre algumas das variáveis analisadas (n=120). **Significativo pelo teste t ($p \leq 0,01$); * Significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$). Continuação...

	CTC _(pH 7)	Sat. B.	Sat. Al	DS	CC	PMP	PT	DMP	DMG	ADA	IF	Macrop.
S. Bases	-0,91 **											
Sat. Al.	0,91 **	-0,91 **										
DS	0,15	-0,15	0,15									
CC	0,26 **	-0,17	0,20 *	0,25 **								
PMP	0,15	-0,15	0,15	1,00 **	0,25 **							
PT	0,06	-0,07	0,06	-0,71 **	-0,12	-0,71 **						
DMP	-0,53 **	0,63 **	-0,57 **	-0,25 **	-0,01	-0,25 **	0,10					
DMG	-0,47 **	0,57 **	-0,51 **	-0,22 *	0,05	-0,22 *	0,11	0,98 **				
ADA	-0,31 **	0,20 *	-0,38 **	0,02	-0,07	0,02	-0,10	0,13	0,13			
IF	0,50 **	-0,44 **	0,55 **	0,06	0,14	0,06	0,07	-0,34 **	-0,32 **	-0,95 **		
Macrop.	-0,14	0,07	-0,10	-0,63 **	-0,77 **	-0,63 **	0,72 **	0,07	0,04	-0,02	-0,06	
Microp.	0,20 *	-0,10	0,13	-0,22 *	0,89 **	-0,22 *	0,22 *	0,11	0,15	-0,08	0,12	-0,48 **

4.1 Avaliações dos atributos químicos

4.1.1 pH, saturação por bases, saturação por Al e teor de Al

Na aplicação superficial de calcário, nas três doses o pH foi alterado principalmente nas camadas superficiais com diferenças para as três doses aplicadas com incorporação (Figura 1). Inclusive na dose 0 Mg ha⁻¹, a camada superficial do solo se encontrou com pH mais elevado, o que pode ser atribuído ao efeito residual das 13 Mg ha⁻¹ já aplicadas antes da implantação do experimento. Na maior dose de 16 Mg ha⁻¹ aplicada em superfície, o pH superou o valor 6 nos primeiros 5 cm, mas logo na camada de 5-10 cm diminuiu drasticamente, chegando a valores próximos de 5 e, em profundidades inferiores a esta chega a valores por volta de 4,6.

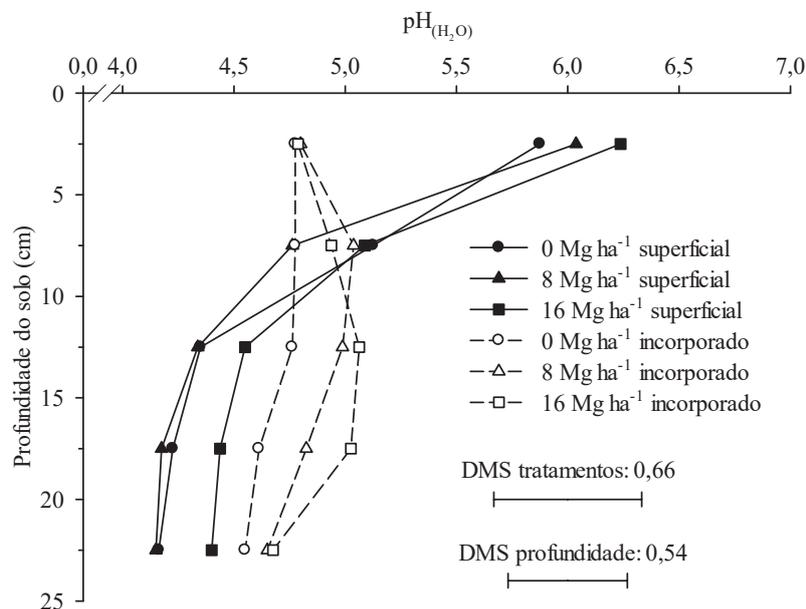


Figura 1 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos valores de pH em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância.

As maiores doses, no geral, elevaram mais o pH, mas a diferença mais perceptível está entre a aplicação superficial e incorporada. Enquanto as doses aplicadas superficialmente corrigiram a camada mais superficial e pouco alteraram as camadas mais profundas, a incorporação proporcionou homogeneidade pelo perfil avaliado, embora não tenha elevado o pH do solo a valores desejáveis para campos sob o sistema de plantio direto, que são acima de 5,5 (CQFS-RS/SC, 2004), indicando, que para que isso aconteça, seria necessário aumentar a dose de calcário. Rheinheimer et al. (2000), também obtiveram maior uniformidade de correção do pH incorporando o calcário, e os efeitos de correção foram proporcionais as doses aplicadas.

O gradiente de pH na aplicação superficial de calcário pode ser explicado pelo aumento da retenção de cátions em decorrência da geração de cargas elétricas negativas com a elevação do pH do solo, além dos ânions resultantes de sua dissolução serem também consumidos nas reações com outros cátions ácidos (H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+} e Fe^{2+}) na camada de deposição do calcário (RHEINHEIMER et al., 2000; CAIRES et al., 2003). Para que a neutralização da acidez ocorra na subsuperfície, os produtos da dissociação do calcário têm de ser arrastados para as camadas inferiores (RHEINHEIMER et al., 2000).

Caires et al. (2003) ressaltaram em seu trabalho que o calcário, quando incorporado, proporcionou aumento significativo do pH no subsolo (20-40 e 40-60 cm), após 11 meses, que permaneceu consistente até 35 meses após a sua aplicação e os resultados obtidos mostraram claramente que os efeitos benéficos da calagem na correção da acidez do subsolo foram pouco pronunciados em aplicações

superficiais e mais evidentes quando houve incorporação do calcário no solo. Rossato et al. (2009), concluíram que a incorporação de calcário com aração foi o modo mais eficiente de corrigir a acidez em profundidade.

Com a saturação por bases, houve efeito semelhante ao pH pelo modo de aplicação das doses de calcário no perfil do solo (Figura 2), evidenciando a relação de dependência entre ambos, confirmada pela correlação positiva de 0,95 (Tabela 1).

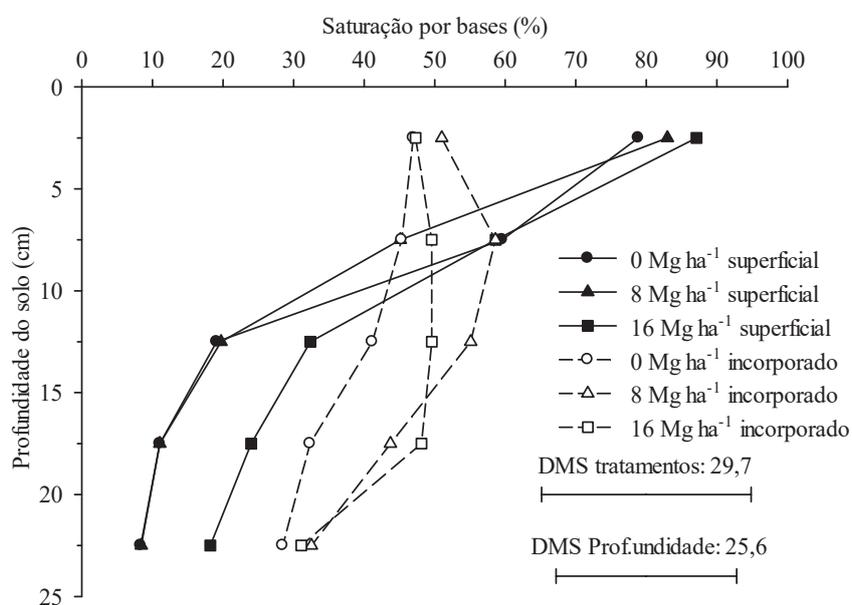


Figura 2 - Efeito do manejo de aplicação de calcário na saturação por bases em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Embora a incorporação de calcário não tenha elevado a saturação por bases acima de 65%, como é recomendado pela CQFS-RS/SC (2004), aumentou significativamente em profundidade, quando comparadas com as três doses aplicadas em superfície (Figura 2). O

efeito das doses de calcário aplicadas superficialmente nas camadas mais profundas foi pouco pronunciado e, os valores ficaram próximos de 10% nas doses 0 e 8 Mg ha⁻¹, ou seja, valores extremamente baixos. Já as doses de calcário aplicadas superficialmente apresentaram valores bastante elevados na primeira camada (0-5 cm), se aproximando de 90%, para a maior dose de calcário mas, logo na profundidade inferior a 10 cm, esses valores diminuem abruptamente.

O Al trocável teve valores próximos de zero na camada superficial quando a aplicação de calcário foi feita sem incorporação (Figura 3), como também verificado por trabalho de Bilibio et al. (2010), em que o Al foi totalmente corrigido apenas na superfície do solo. Os níveis de Al na primeira camada são pouco maiores (aproximadamente 0,5 cmol_c dm⁻³) quando as doses de calcário foram incorporadas com arado, não chegando a haver diferenças significativas. Na segunda camada amostrada (5 a 10 cm) também não houve diferença entre doses e manejos de aplicação. Já a partir dos 15 cm de profundidade, as concentrações de Al³⁺ passam a ser significativamente maiores nas aplicações sem incorporação, acentuando-se ainda mais com o aumento da profundidade.

A saturação por alumínio foi muito próxima de zero na superfície, nas doses de calcário aplicadas superficialmente, e aumentou com a profundidade, chegando a valores elevados principalmente na dose 0 e 8 Mg ha⁻¹ nas últimas camadas avaliadas (Figura 4). A correção do Al é mais eficiente no sistema de preparo convencional, independente da aplicação de gesso agrícola, devido à incorporação desse corretivo ao solo (BILIBIO et al., 2010).

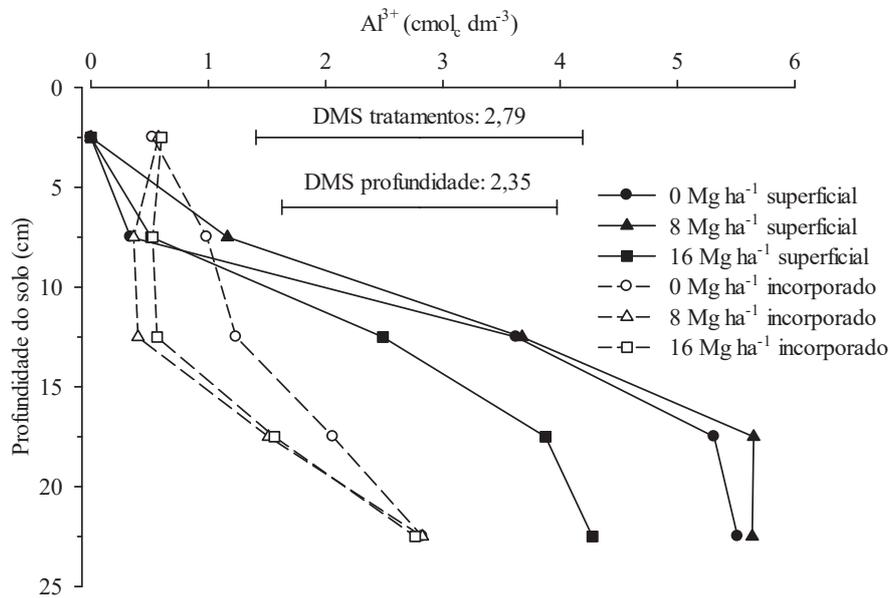


Figura 3 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de Al^{3+} em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

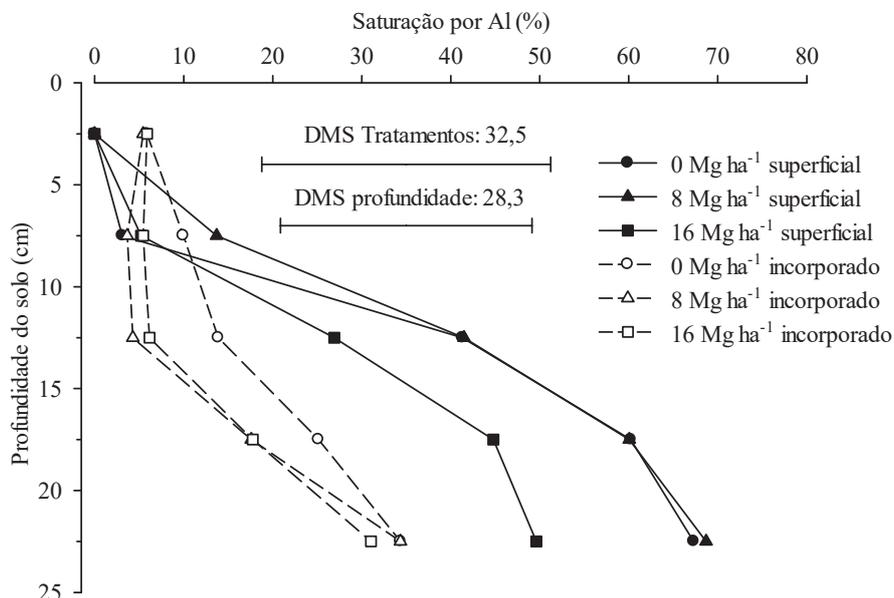


Figura 4 - Efeito do manejo de aplicação de calcário na saturação por Al em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Não houve efeito de gesso sobre a saturação de Al nas camadas de solo avaliadas, podendo ser explicado pela dose de gesso de 6 Mg ha^{-1} , que embora fosse alta, pode ter sido insuficiente para aportar Ca mediante as altas concentrações de Al deste solo. Além disso, se houve algum efeito, pode ter ocorrido em camadas mais profundas que as amostradas, como ocorreu com o trabalho de Pauletti et al. (2014), em que as doses de 0, 1,5, 3, 6 e 12 Mg ha^{-1} , aplicadas superficialmente em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura franco arenosa, somente foram significativas em diminuir a saturação de Al, em profundidades inferiores a 40 e 60 cm, 36 e 72 meses após a aplicação do gesso, respectivamente.

4.1.2 Ca, Mg, K, P e CTC efetiva

Os teores de Ca^{2+} (Figura 5) assumem comportamento semelhante ao pH (Figura 1) e a saturação por bases (Figura 2) e inverso ao Al^{3+} (Figura 3), e no caso do Al^{3+} confirmado pela correlação negativa entre ambos de -0,90 (Tabela 1). Quando a aplicação de calcário é realizada sem incorporação, em solos onde a presença de cátions ácidos é abundante, o Ca^{2+} perde seu íon acompanhante (CO_3^{2-}), em reação com o H^+ e é transformado em HCO_3^- , e assim o Ca^{2+} com residual de cargas positivas, é retido nas primeiras camadas do solo, nas cargas negativas das argilas e da matéria orgânica (PAULETTI et al., 2014), o que explica os níveis mais elevados de Ca^{2+} encontrados nas camadas superficiais (Figura 5). Já a incorporação das doses de calcário proporcionou maiores teores de Ca^{2+} em profundidade, quando comparada com a aplicação superficial.

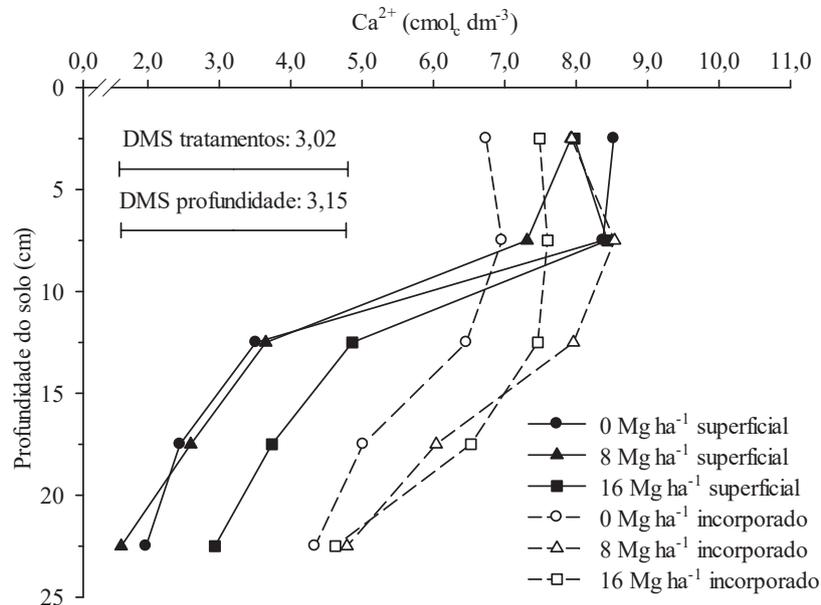


Figura 5 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de Ca^{2+} em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

O gesso diminuiu significativamente os teores de Mg até a profundidade de 20 cm (Figura 6). Na dose zero de gesso, em que os teores de Mg^{2+} não foram influenciados, constata-se um gradiente em função da profundidade, com valores mais elevados de Mg^{2+} na superfície do solo, explicados pela semelhança com o Ca^{2+} em ligar-se às cargas negativas da MOS e argilas.

Caires et al. (2003) também constataram lixiviação de Mg com o uso de gesso e relataram que a lixiviação de Mg^{2+} tem sido uma resposta frequente nos estudos com aplicação de gesso em solos. A movimentação das bases está associada à formação de pares iônicos neutros como K_2SO_4^0 , CaSO_4^0 e MgSO_4^0 (RAMOS et al., 2013), facilitando a percolação desses cátions pelo perfil, pois não se ligam aos

coloides e a MOS com residuais de cargas negativas. Devido a menor preferência pelas cargas negativas do solo, em relação ao Ca, o Mg é deslocado no perfil, sob forte influência do efeito do gesso (PAULETTI et al., 2014). Neste trabalho os teores de Ca^{2+} e K^{2+} não foram influenciados pelas doses de gesso.

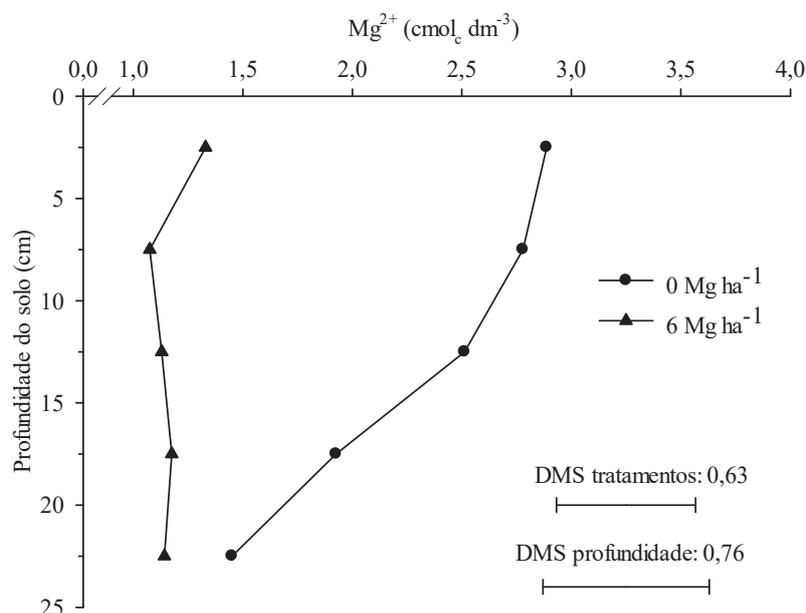


Figura 6 - Efeito das doses de gesso nos teores de Mg^{2+} em um Cambissolo Húmico aluminoso para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Em trabalho de Rampim et al. (2011), foi constatada a diminuição de Mg nos primeiros 40 cm do perfil do solo com doses de gesso entre 1 e 5 Mg ha^{-1} . Serafim et al. (2012), em um estudo com doses de gesso em um Latossolo gibbsítico, também verificaram lixiviação de Mg do horizonte A (0-20 cm) à medida que aumentaram as doses, contudo, a descida do nutriente na coluna de solo não

significou perda total, pois houve acúmulo do Mg na camada B (20-40 cm).

O K^+ foi influenciado apenas pelo fator profundidade, diminuindo gradativamente com a camada de solo avaliada (Figura 7). A ligação do íon às cargas negativas da argila e da MOS contribui para que esse gradiente se manifeste. Souza et al. (2012), estudando manejo de aplicação de doses de gesso também encontraram efeito significativo apenas para o fator profundidade, não havendo efeito de manejo e residual de gesso, da mesma forma, também encontraram níveis muito superiores na camada superficial diminuindo gradativamente com o aumento da profundidade, até os 30 cm avaliados.

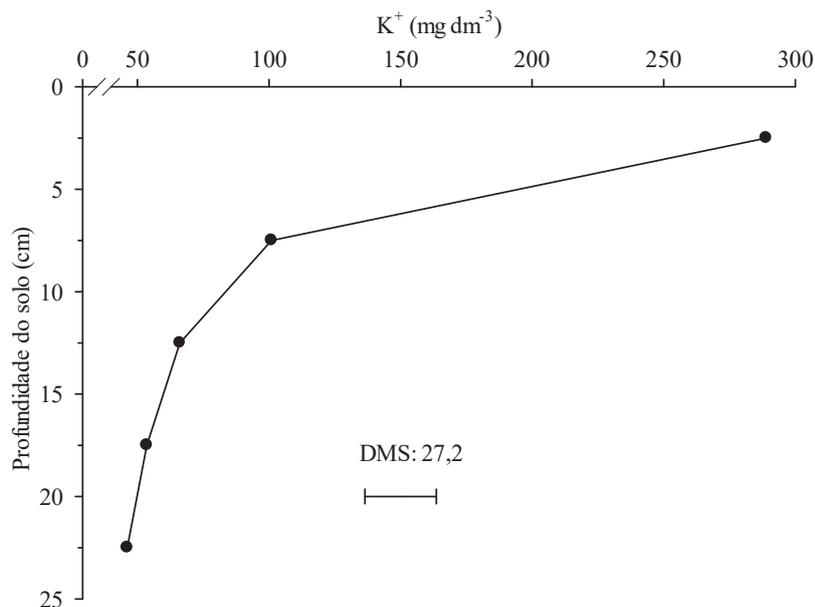


Figura 7 - Teores de K^+ em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Poder-se-ia esperar lixiviação de K^+ pela aplicação de gesso, como houve com o Mg^{2+} , por ser elemento monovalente e, por

isso, teoricamente poderia se ligar às cargas negativas do solo com menor energia, quando comparado ao Mg. Porém, a ausência de efeito da aplicação de gesso na lixiviação de K^+ pode ser explicada pela baixa formação do par iônico $K_2SO_4^0$ (PAULETTI et al., 2014), par iônico esse, que seria suscetível à lixiviação pela ausência de cargas.

Constatou-se um gradiente químico de K^+ gerado pelas aplicações superficiais deste insumo (Figura 7). Se por um lado, isso é bom por minimizar a lixiviação desse nutriente para zonas mais profundas que o alcance do sistema radicial das culturas, por outro lado, pode provocar deficiência às plantas, pela baixa absorção pelas raízes mais profundas.

Altas concentrações de K^+ nas camadas superficiais podem inibir a absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Quando há aumento na concentração de K^+ em solução e for associado a períodos de maior disponibilidade hídrica no solo, o K^+ é mais absorvido, exercendo maior inibição competitiva com outros cátions básicos, ocorrendo efeito depressivo especialmente na absorção de Mg^{2+} , pois entre estes nutrientes competem pelo mesmo sítio transportador trans-membrana (CASTAMANN, 2009).

Serafim et al. (2012), em seu trabalho com doses de gesso, não encontrou diferenças para a lixiviação de K^+ sob o uso de doses crescentes de gesso (0, 3, 6, 9, 12 e 15 $Mg\ ha^{-1}$). No trabalho de Silva et al. (1997), em que foram avaliadas as doses de calcário e gesso, aplicadas em dois cultivos subsequentes, nas maiores doses de gesso, no segundo cultivo, obteve resultados semelhantes para o Mg e o K, em Latossolo Roxo distrófico, não houve efeito do gesso sobre o K, mas proporcionou a lixiviação de Mg. O Mg movimentou-se pelo perfil do

solo em forma de pulso, ou seja, diminuição na camada superficial e acúmulo em camadas inferiores, característico da lixiviação provocada pela gessagem, segundo os autores.

Rampim et al., (2011), trabalhando com Latossolo Vermelho eutroférico, constataram que o uso do gesso em doses de 1 a 5 Mg ha⁻¹ ocasionou redução linear de K⁺ até 0,10 m e de Mg²⁺ até 0,40 m de profundidade do solo, um ano após a sua aplicação, e atribuiu a maior lixiviação de Mg em relação ao K por ser MgSO₄⁰ a forma prioritária sobre outros pares iônicos de ligação com o sulfato, e assim oferece condições para que a lixiviação ocorra.

O P foi influenciado pelas doses de gesso e camada de solo amostrada (Figura 8). Na camada superficial do solo, 0-5 cm, a maior dose de gesso proporcionou maiores teores de P. Já nas demais camadas do solo não houve diferença para as doses de gesso. O gesso contém uma pequena quantidade de fósforo de 0,5 a 0,8% de P₂O₅ (CQFS-RS/SC, 2004). Assim, a dose de 6 Mg ha⁻¹ pode ter aportado de 30 a 48 kg ha⁻¹ de P₂O₅, contribuindo para a diferença significativa no P para as doses de gesso na camada superficial.

Constatou-se a ocorrência de gradiente químico para as profundidades amostradas, com teores mais elevados de P nas camadas superficiais. O P localizado em maior proporção na superfície do solo pode representar algumas desvantagens, tais como a perda por erosão, menor disponibilidade de nutrientes em veranicos e também ocasionar concentração superficial de raízes, tornando a planta mais susceptível à desidratação em períodos de déficit hídrico (BARBOSA et al., 2015). Além de ser tóxico às plantas, o Al³⁺, que se faz presente em maior quantidade na subsuperfície, contribui para diminuir a disponibilidade

de fosfato no solo, formando fosfatos de alumínio de baixa solubilidade em solos ácidos (RAMPIM et al., 2013). A correlação entre o Al^{3+} e P foi de -0,50 (Tabela 1).

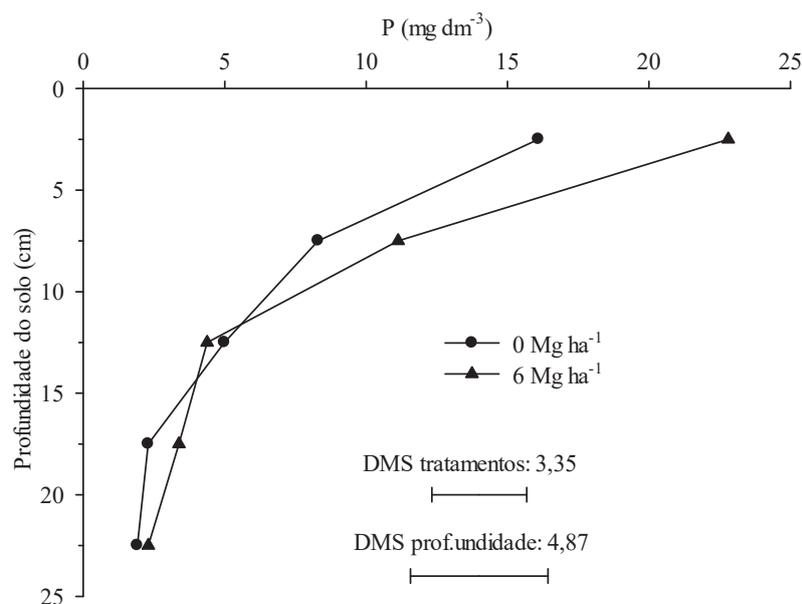


Figura 8 - Efeito das doses de gesso nos teores de P em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Um dos efeitos benéficos esperados da calagem é aumento na disponibilidade de P fixado nos óxidos de Fe e Al pela ação das OH^- em substituir as ligações com o H_2PO_4^- , liberando P para a solução do solo, não constatado, entretanto, neste trabalho pelo efeito doses de calcário aplicadas. Isso pode ter acontecido devido à metodologia empregada para análise do P (Melich 1), que é pouco sensível a variações na concentração do elemento na solução do solo.

A CTC efetiva foi influenciada pelo modo de aplicação das doses de calcário (Figura 9), sendo que as doses de 8 e 16 Mg ha^{-1} de

calcário condicionaram maior CTC efetiva do solo. Isso ocorre pelo aumento da CTC e do potencial elétrico negativo superficial do solo com adsorção química de hidroxilas na superfície dos óxidos e hidróxidos, principalmente de ferro e alumínio, nas arestas quebradas da caulinita e da ionização de grupamentos funcionais da matéria orgânica (ALBUQUERQUE et al., 2000).

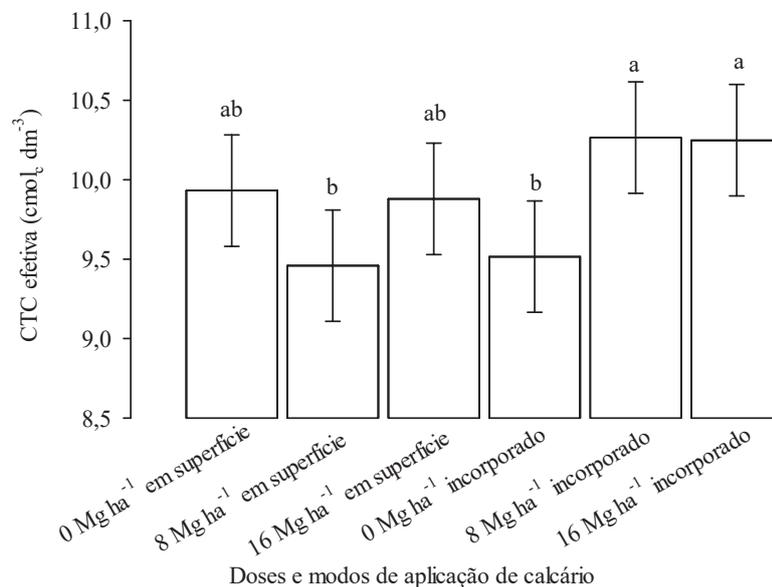


Figura 9 - Efeito do manejo de aplicação de doses de calcário na CTC efetiva em um Cambissolo Húmico aluminico. As barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

A CTC efetiva também foi alterada pelo fator camada amostrada (Figura 10), e pode estar relacionada a maior quantidade de MOS superficial que, pela calagem, libera cargas negativas, e assim são ocupadas por Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . O maior teor de MOS na superfície, além das cargas positivas de óxidos de ferro e alumínio mais abundantes

em profundidade, contribuem para que a CTC efetiva seja maior nas camadas superficiais do solo (SERAFIM et al., 2012).

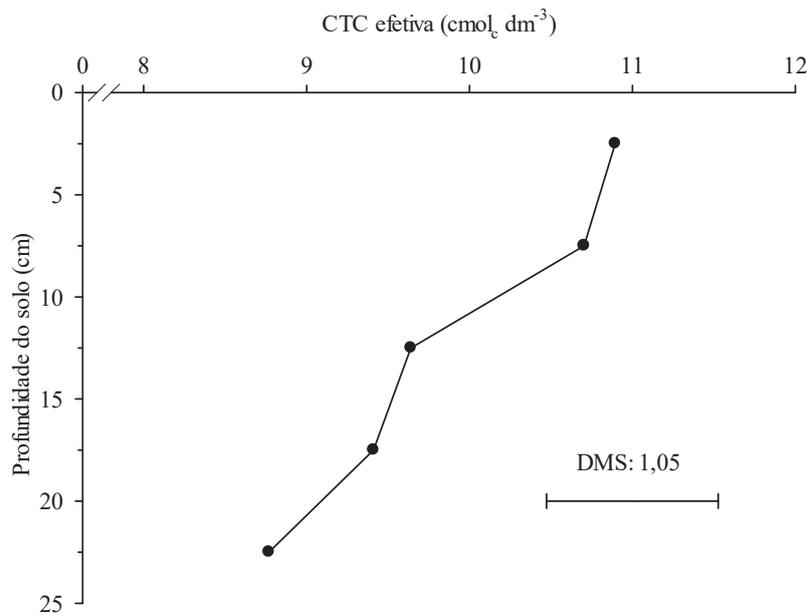


Figura 10 - CTC efetiva em um Cambissolo Húmico alumínico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

4.1.3 Matéria orgânica do solo (MOS)

A MOS foi alterada em superfície pelo manejo do solo com aração por ocasião da incorporação do calcário (Figura 11). Já nas camadas mais profundas a 5 cm não houve diferença entre os dois manejos, sendo que as doses de calcário não assumiram comportamento definido para os valores obtidos de MOS. Os altos teores de MOS encontrados neste solo se devem, em grande parte, pela elevada altitude da região, superior a 1100 metros, com temperaturas amenas, fazendo com que a decomposição pelos microrganismos seja lenta.

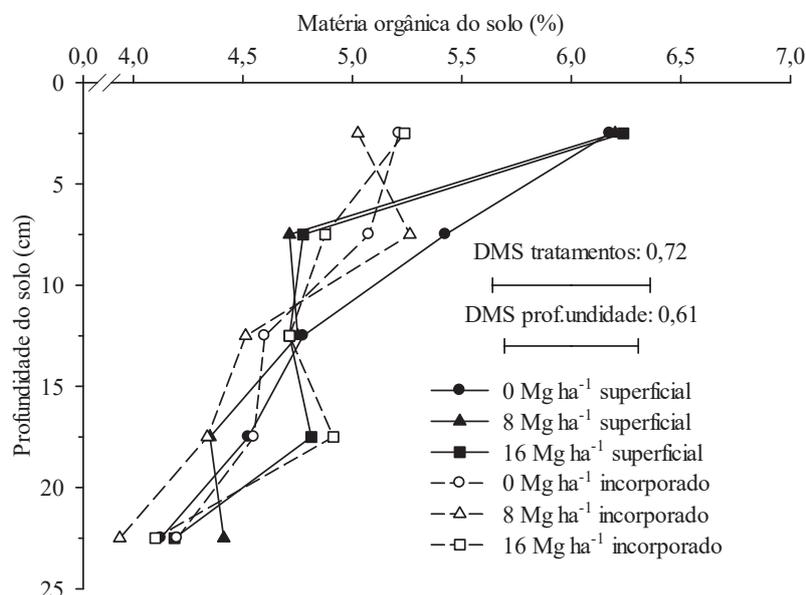


Figura 11 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores de matéria orgânica do solo em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Andrade et al. (2012), estudando um Cambissolo Húmico, encontraram resultados similares de carbono orgânico total, para o sistema de manejo de uma aração e duas gradagens leves em relação à semeadura direta. Os maiores teores de MOS na superfície do solo se deve a não incorporação dos resíduos culturais. A presença de palha em superfície em semeadura direta auxilia na manutenção da umidade do solo e evita o contato direto dos raios solares, diminuindo a temperatura na camada superficial do solo e, conseqüentemente, a mineralização da MOS (LOSS et al., 2014).

Já, Oliveira et al. (2004), estudando manejos de aração, sistema de plantio direto e campo natural de cerrado em um Latossolo Vermelho distrófico do Cerrado, atribuíram o menor teor carbono orgânico em superfície à ação de revolvimento do solo feita pelo arado

de discos, quebrando agregados na camada superficial do solo eliminando a proteção física da matéria orgânica e expondo-a ao ataque dos microrganismos, provocando perdas de carbono do solo na forma de CO₂. A oxidação pela exposição ao O₂ também contribui para os menores teores superficiais de MOS quando ocorre o revolvimento do solo (ROZANE et al., 2010).

A correlação entre a MOS e o Al³⁺ foi de -0,52, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice-versa (Tabela 1). Para Rampim et al. (2011), a MOS exerce papel importante na complexação do Al, e no sistema de plantio direto o Al tem menor importância devido à intensa complexação desse cátion com compostos hidrossolúveis de baixo peso molecular, os quais têm origem na decomposição de resíduos vegetais e na exsudação radicular. Assim, mesmo solos com elevados teores de Al³⁺ podem manter boas produtividades. A formação de complexos entre as substâncias orgânicas hidrossolúveis e o Ca e o Mg na superfície do solo e a posterior troca desses cátions pelo alumínio em camadas mais profundas são responsáveis pela neutralização da acidez em profundidade, devido às substâncias orgânicas quelantes possuírem maior afinidade pelo alumínio do que pelo cálcio e magnésio (RHEINHEIMER et al., 2000).

4.2 Avaliações físicas do solo

4.2.1 Textura do solo

Os teores de argila (Figura 12), silte (Figura 13) e areia (Figura 14) da camada superficial do solo foram alterados pelo revolvimento do solo com arado, quando houve a incorporação do

calcário. Ao passo que a argila apresentou menores teores nas camadas superficiais, o silte e areia apresentaram teores mais altos, quando a houve a manutenção do sistema de plantio direto.

Nos tratamentos em que não houve revolvimento do solo para a aplicação de calcário, pode ter ocorrido a lessivagem da fração argila, o que explicaria os menores teores encontrados em superfície do solo. Isso provavelmente aconteceu ao longo do tempo pela utilização do solo, com culturas anuais desde 2002 até o momento em que as amostras foram coletadas, em 2013, ou até mesmo antes disso quando o solo era mantido sob campo nativo, tendo em vista que nunca houve revolvimento intenso na área. Os teores de silte e areia foram maiores na primeira camada do solo, compensando a diferença para chegar ao somatório de 100% das três frações.

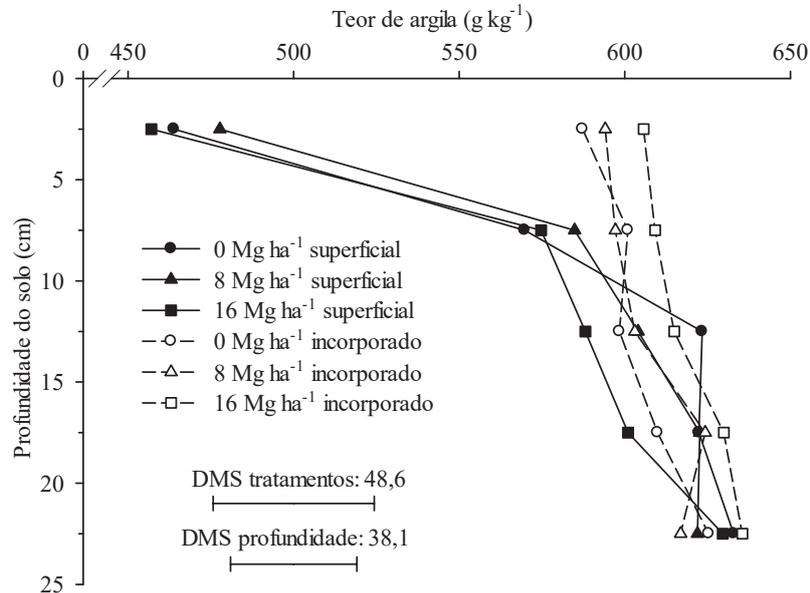


Figura 12 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores argila em um Cambissolo Húmico aluminoso para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

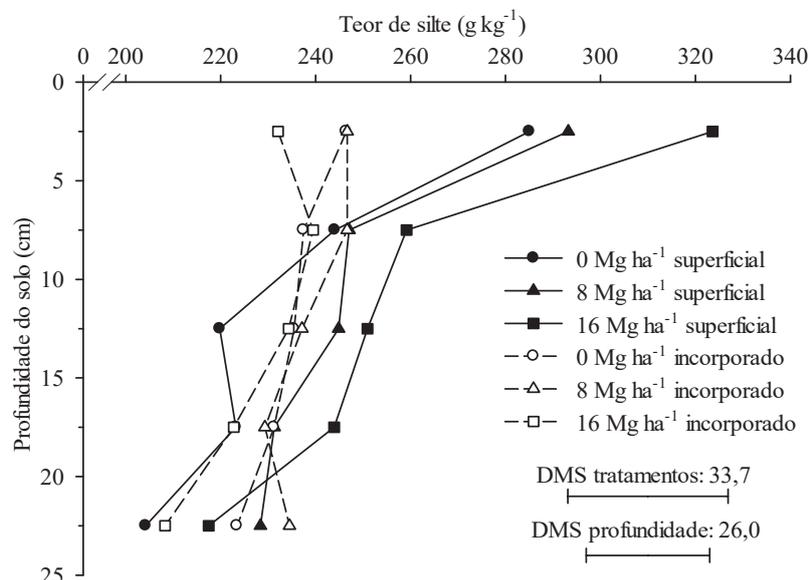


Figura 13 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores silte em um Cambissolo Húmico aluminoso para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

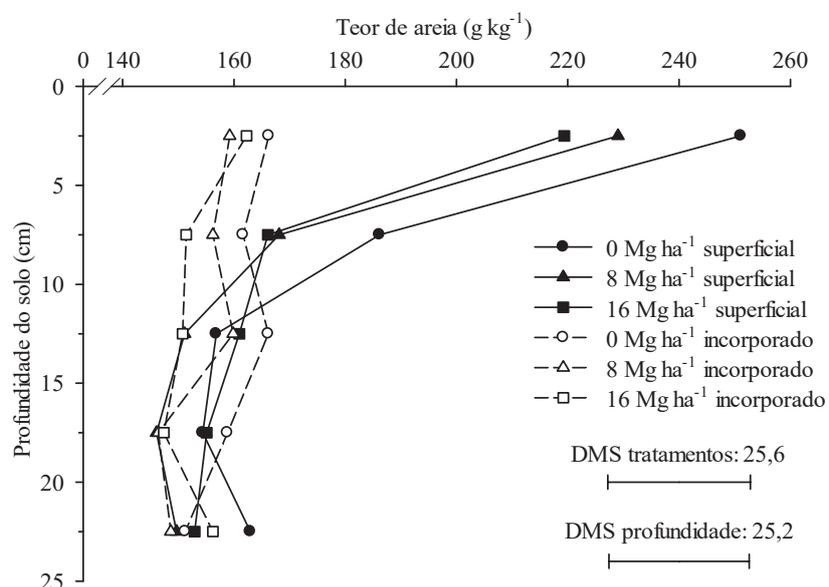


Figura 14 - Efeito do manejo de aplicação de calcário nos teores areia em um Cambissolo Húmico aluminoso para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

A aração e gradagem do solo ocasionou a inversão de camadas, fazendo com que a argila retornasse à superfície do solo. Situação semelhante foi verificada em Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa em que foram avaliados diferentes sistemas de preparo de solo para a implantação da cana-de-açúcar (SILVA JR. et al., 2013).

4.2.2 Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF)

A ADA, assim como o IF, foram influenciados somente pelo fator camada de solo amostrada (Figura 15 e 16), em que foi perceptível a associação negativa entre a ADA e o IF, sendo a correlação significativa entre ambos de -0,95 (Tabela 1).

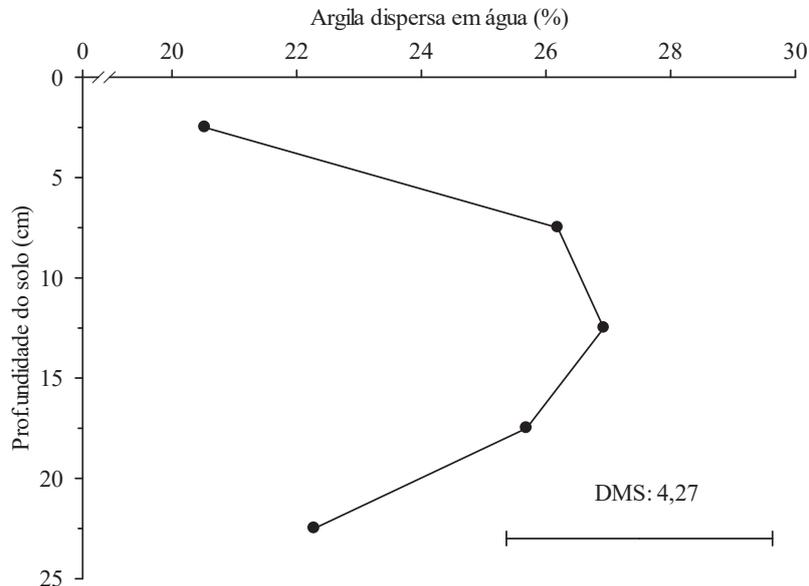


Figura 15 - Argila dispersa em água de um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

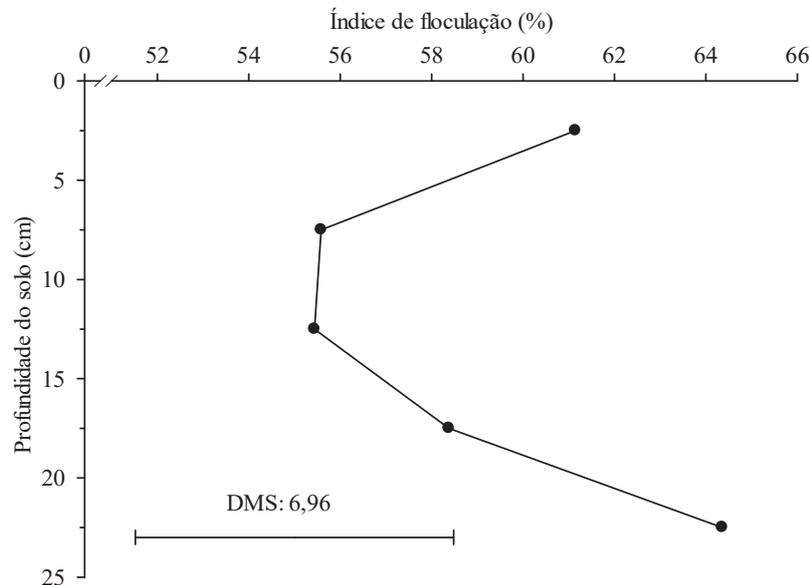


Figura 16 - Índice de flocação da argila do solo de um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

A atividade de Al^{3+} e H^+ na solução do solo é considerada o principal agente floculante em solos ácidos (ALBUQUERQUE et al., 2003). A correlação entre o IF e o Al^{3+} foi significativa de 0,53 (Tabela 1), confirmando o poder floculante do Al^{3+} . Assim, a diminuição da ADA e o aumento do IF em profundidade pode ser explicado, em parte, pela concentração mais elevada de Al^{3+} e também maior saturação por Al.

A maior estabilidade dos microagregados, devido à pouca exposição à agentes desagregantes físicos, além do equilíbrio e a formação contínua de ácidos húmicos, mesmo havendo menores teores de matéria orgânica em subsuperfície também pode contribuir para maiores IF (SILVA JR. et al., 2013). Silva et al. (2000), encontraram

valores mais elevados de IF em subsuperfície do solo, apesar do menor teor de matéria orgânica, e atribuíram isso aos aspectos ligados à gênese e mineralogia do solo.

Na superfície, maiores IF estariam relacionados ao também maior teor de MOS (AGNE & KLEIN, 2014), muito embora neste trabalho a correlação entre o IF e a MOS tenha sido muito baixa (-0,04) e não significativa. De qualquer forma, o estudo em uma profundidade maior seria necessário para evidenciar tendências ou variabilidade inerente ao próprio solo. Em estudo de um Latossolo Vermelho distroférico, Agne & Klein, (2014) encontraram valores de IF que variaram de 36,4 a 44,2% para a camada de 0 a 30 cm. Assim, mesmo com variações de IF pelo perfil das camadas amostradas (55,4 a 64,3%), o solo apresenta valores que podem ser considerados elevados de IF quando comparado a outros.

Os efeitos dispersivos ou flocculantes da calagem e gessagem não foram constatados. Os valores de ADA variaram de 20,5 a 26,9% e são comparáveis, embora pouco superiores, aos encontrados por Ferreira et al. (2010), estudando manejo de solo com pastagens em um Cambissolo, que obtiveram valores aproximados de 8 a 16% de ADA.

4.2.3 Avaliação de compactação do solo

Os dados de DS em função da umidade do solo obtidos no ensaio de Proctor foram ajustados a uma equação quadrática, com a qual obteve-se UOC de $0,34 \text{ g g}^{-1}$ e a densidade máxima de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 17).

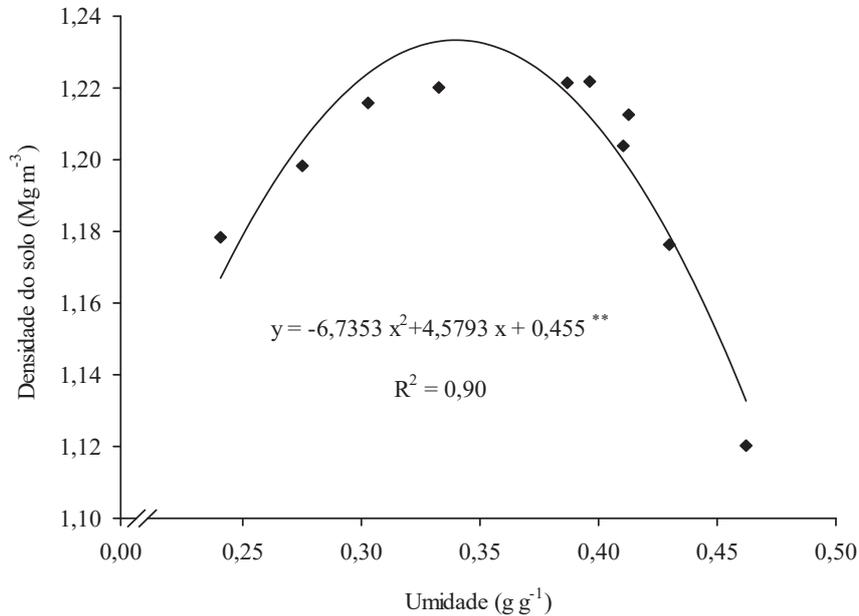


Figura 17 - Curva normal de Proctor da densidade do solo (DS) em função da umidade gravimétrica (UG). ** Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

A UOC, assim como a densidade máxima desse tipo de solo com altos teores de MOS, pode ser considerada uma particularidade. Luciano et al. (2012), estudando diferentes solos, encontraram valores muito próximos de UOC ($0,34 \text{ g g}^{-1}$) e densidade máxima ($1,24 \text{ Mg m}^{-3}$) para um Cambissolo Húmico alumínico típico com teores altos de carbono orgânico. Comparando-se com outros tipos de solos, como por exemplo no trabalho de Betioli Jr. et al. (2012), avaliando um Latossolo Vermelho (750 g kg^{-1} argila, 50 g kg^{-1} silte, 200 g kg^{-1} areia) encontrou menor valor de UOC ($0,29 \text{ g g}^{-1}$) e maior valor de densidade máxima ($1,52 \text{ Mg m}^{-3}$). A variação entre a umidade ótima de compactação e a densidade máxima pode estar associada aos teores de areia fina, argila e carbono orgânico total (LUCIANO et al., 2012). Essas diferenças podem ser atribuídas ao elevado teor de MOS, pois a densidade da MOS

foi inferior a densidade de sólidos do solo, o que contribui para que a DS, e inclusive a densidade máxima, do solo sejam baixas.

A utilização da DR para obter níveis de compactação pode ser utilizada para quantificar a compactação do solo (KLEIN, 2006). Valores menores que 0,80 são considerados solos soltos, onde o crescimento das plantas é prejudicado pelo excesso de PA e menor volume de água disponível; 0,80 a 0,90 considerado não compactado, condição não restritiva ao crescimento das plantas; 0,90 a 0,95 é considerado compactado e acima de 0,95 muito compactado (MARCOLIN, 2009). A DR do solo foi influenciada pelos modos de aplicação das doses de calcário (Figura 18) e também pela camada do solo avaliada (Figura 19). Entretanto, em nenhuma das médias de DR foram encontrados valores indicadores de compactação, sendo que para alguns tratamentos, inclusive, as médias de DR podem ser enquadradas em “solo solto” onde há excesso de aeração.

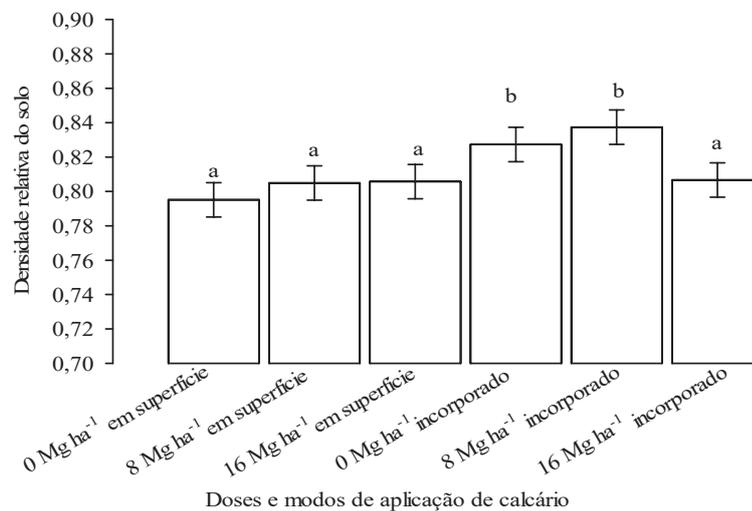


Figura 18 - Densidade relativa do solo em função do manejo de aplicação das doses de calcário em um Cambissolo Húmico aluminico. As barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

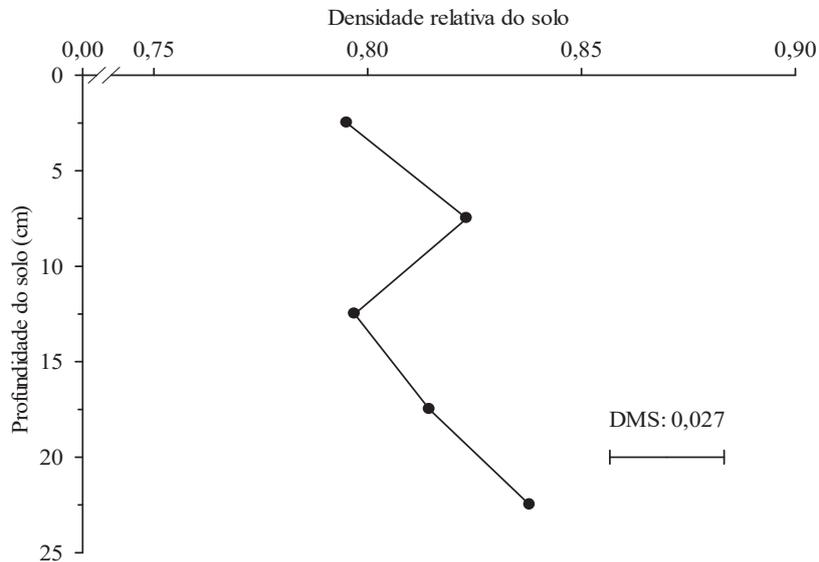


Figura 19 - Densidade relativa em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Para fins informativos é apresentado o histograma e a curva estimada de distribuição normal de todas as amostras (

Figura 20), como uma abordagem descritiva dos dados. A DR média do solo para todas as amostras foi de $0,81 \text{ Mg m}^{-3}$. Considerando que os dados seguem distribuição normal, a média mais e menos dois desvios padrões, tem-se aproximadamente 95% de todas as amostras com DR entre 0,73 e 0,89 indicando não haver problemas de compactação para este solo.

O tráfego de máquinas agrícolas é a principal causa da compactação do solo, que foi intensificada pela modernização da agricultura, com o aumento do peso das máquinas e equipamentos e da intensidade de uso do solo (RICHART et al., 2005). Entre outros fatores, a constatação de ausência de níveis críticos de compactação no

uso desse solo para os cultivos agrícolas, pode ser atribuída aos altos índices de MOS. A MOS contribui para efeitos benéficos na agregação, retenção e disponibilidade de água às plantas. A palhada decorrente de culturas atua amortecendo as pressões exercidas pelas máquinas na superfície do solo, preservando a sua estrutura (OLIVEIRA et al., 2004).

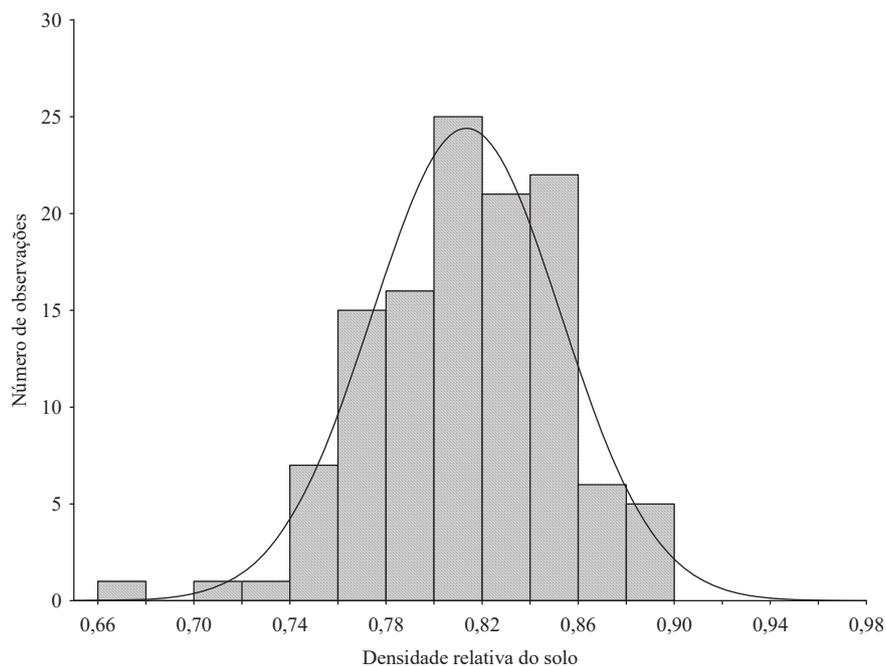


Figura 20 - Histograma e curva estimada de distribuição normal da densidade relativa do solo (n=120). Bom Jesus, 2013.

4.2.4 Porosidade total (PT) e distribuição do diâmetro dos poros

Embora a PT tenha se mostrado significativa pelo teste F, no teste Tukey não houve diferença com 5 % de significância para as doses de gesso, o que demonstra a modesta diferença entre os tratamentos (Figura 21).

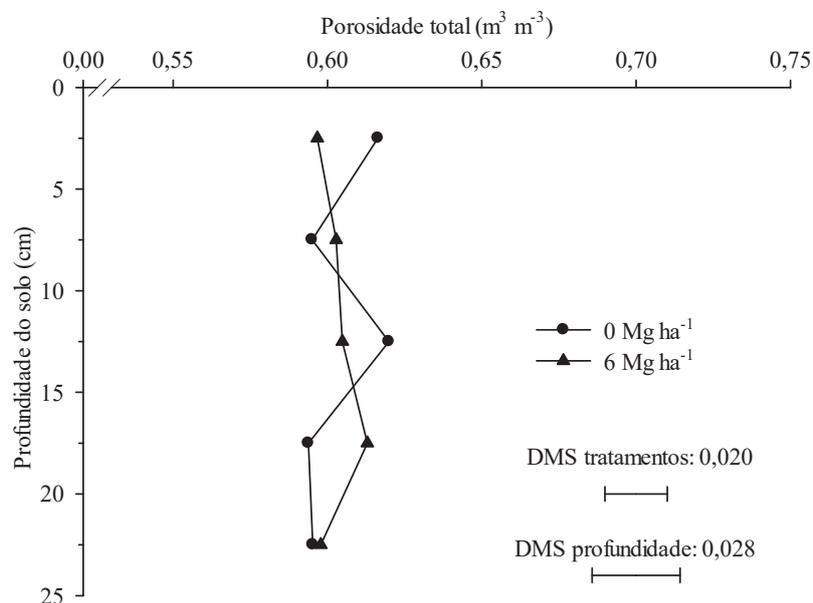


Figura 21 - Efeito das doses de gesso na porosidade total em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Os valores de PT encontrados são semelhantes aos do trabalho de Bertol et al. (2000), em um Cambissolo Húmico, que obtiveram média de $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para semeadura direta e $0,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o preparo convencional do solo com uma aração e duas gradagens. A PT é considerada ideal quando apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GIOIA, 2011). Assim, os valores obtidos variando de $0,59$ a $0,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, podem ser considerados superiores aos considerados já ideais, refletindo a boa estruturação física do solo.

Para os macroporos, também podendo ser considerados poros de aeração, apesar de haver diferença estatística para o fator camadas amostradas, são considerados valores superiores aos considerados limitantes ao desenvolvimento das culturas, que seria de

no mínimo $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (TORMENA et al., 1998a; MARCOLAN, 2002) e ideais de $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GIOIA, 2011). Assim, não se espera deficiência de aeração para o sistema radicular das culturas em nenhuma das profundidades avaliadas, com valores muito próximos aos considerados ideais (Figura 22).

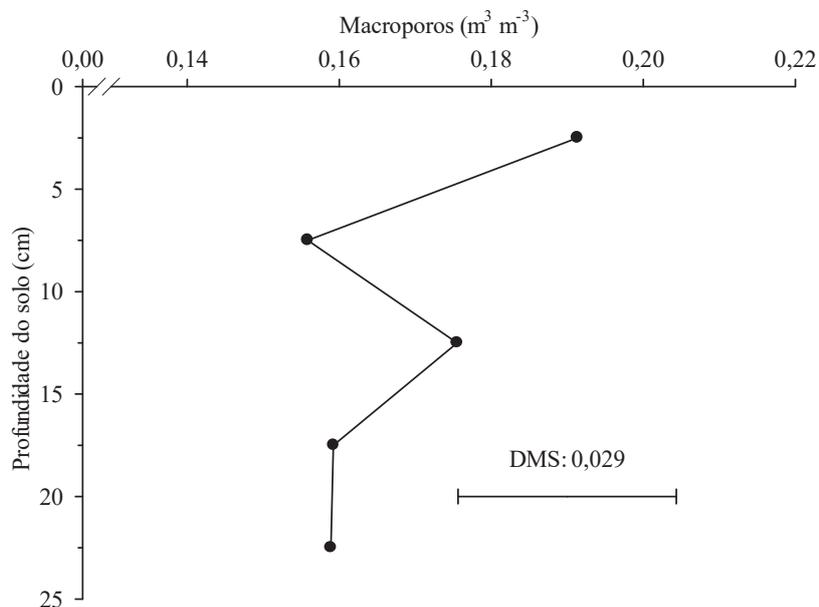


Figura 22 - Macroporos (água retida no solo em Ψ superiores a -6 kPa) em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

O fluxo de gases bem como o movimento de água no solo, são intimamente relacionados ao volume de macroporos, e assim, a garantia da oxigenação radicular bem como a capacidade de infiltração e redistribuição de água no perfil dependem dessa propriedade (VIEIRA, 2006).

As doses de $0, 8$ e 16 Mg ha^{-1} de calcário aplicado superficialmente, bem como a dose de 16 Mg ha^{-1} incorporada,

apresentaram, no geral, o maior volume de microporos (Figura 23). Já comparando o perfil do solo, a maior quantidade de microporos está nas camadas intermediárias avaliadas, praticamente para todos os tratamentos.

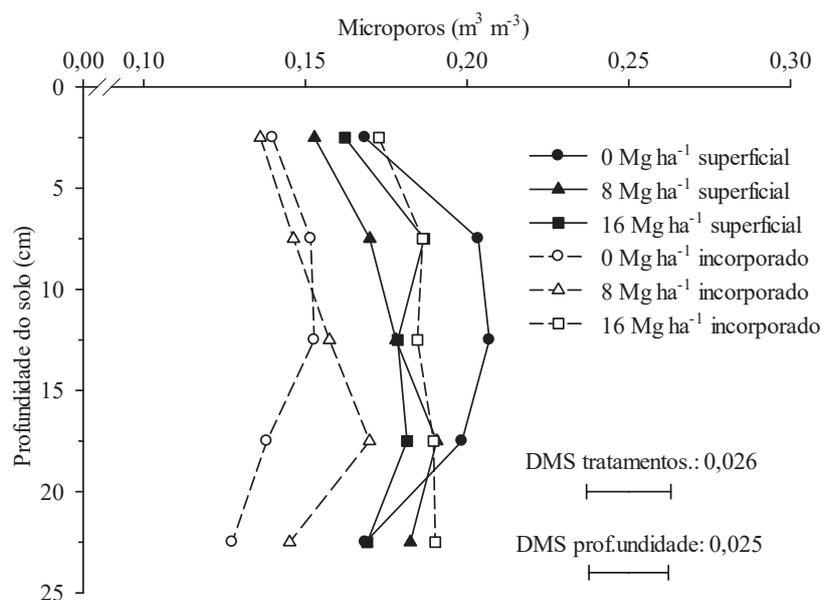


Figura 23 - Efeito do manejo de aplicação de calcário para os microporos do solo (água retida entre Ψ -6 a -1500 kPa) teores areia em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Os criptoporos foram influenciados pelo fator profundidade avaliada (Figura 24). Não foi possível estabelecer tendência clara dos criptoporos e a relação com a profundidade. Os criptoporos ocupam menor volume entre 0-5 cm, aumentam na camada de 5-10 cm, diminuem na camada de 10-15 cm, e nas demais camadas aumentam gradativamente com o aumento da profundidade.

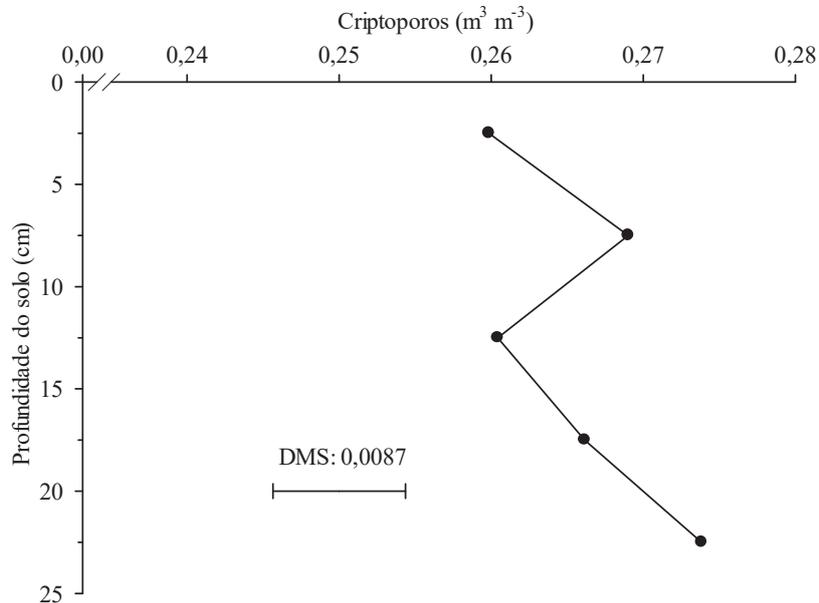


Figura 24 - Criptoporos (água retida no solo em Ψ inferiores a -1500 kPa) em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. A barra horizontal indica diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Para a distribuição do volume de poros no perfil do solo para os dois manejos empregados, verificou-se que a porosidade total, macroporos e criptoporos ocuparam volumes semelhantes, três anos após a implantação do experimento (Figura 25 a e b). Normalmente o revolvimento do solo promove um aumento temporário da macroporosidade, quando comparado à semeadura direta, entretanto, é eliminado pela reconsolidação ou adensamento natural do solo (VIEIRA, 2006).

Quando comparado o volume dos microporos, poros de maior importância agrícola pela retenção de água disponível as culturas (KLEIN, 2014), foi perceptível um faixa ligeiramente mais ampla para o solo sem revolvimento (Figura 25 a e b).

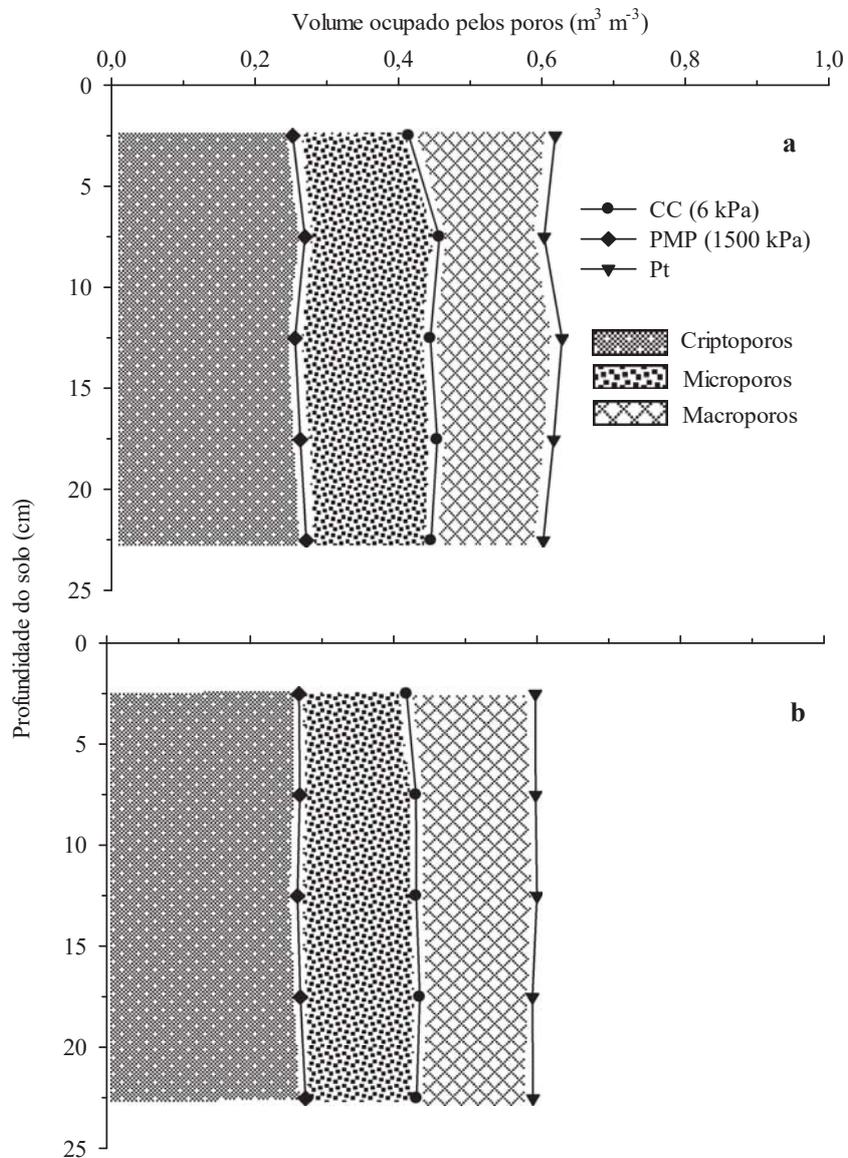


Figura 25 - Porosidade do solo sob aplicação superficial (a) e incorporada de calcário (b) em um Cambissolo Húmico aluminico. Bom Jesus, 2013.

4.2.5 Retenção hídrica

Ajustando-se os dados obtidos pelo psicrômetro (WP4) em diferentes potenciais a uma regressão exponencial (Figura 26), chega-

se a equação $y=0,6088x^{-0,11114}$. O Ψ -1500 kPa, entendida por vários autores como sendo o PMP (TORMENA et al., 1998b; KLEIN & LIBARDI, 2002; BEUTLER et al., 2002), neste trabalho quando calculado o valor da umidade gravimétrica correspondente, foi de 0,27 g g⁻¹.

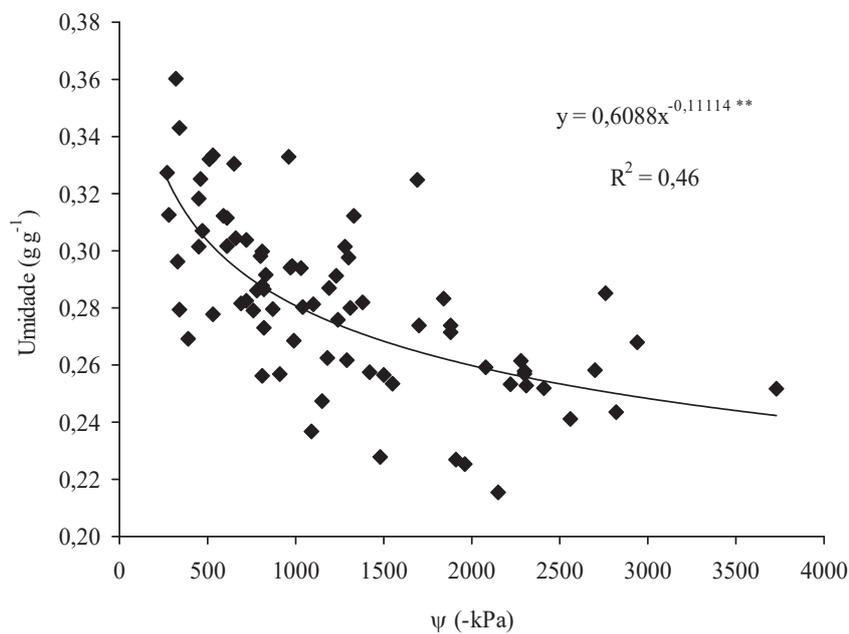


Figura 26 - Umidade gravimétrica em função do potencial do solo (Ψ) no ponto de orvalho no psicrômetro WP4 de amostras aleatorizadas para um Cambissolo Húmico aluminico. ** Significativo pelo teste F ($p < 0,01$). Bom Jesus, 2013.

As curvas de retenção hídrica para todas as combinações de tratamentos são apresentadas na Figura 27, 28, 29, 30, 31 e 32. Não houve grandes variações e isso provavelmente ocorreu, pelo rearranjo dos poros do solo, devido ao tempo decorrido entre a instalação do experimento (quando foi submetido ao manejo de aração e gradagem) e a coleta das amostras.

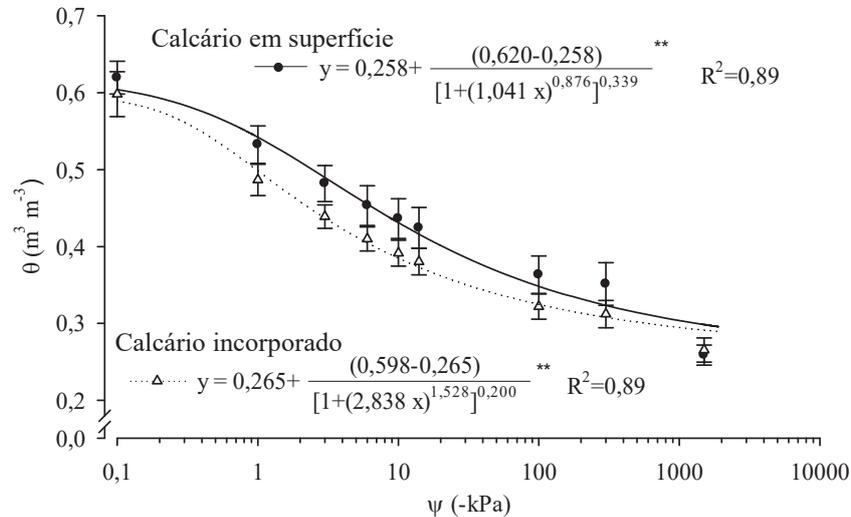


Figura 27 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 0 Mg ha^{-1} de calcário e 0 Mg ha^{-1} de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 ($n=10$). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

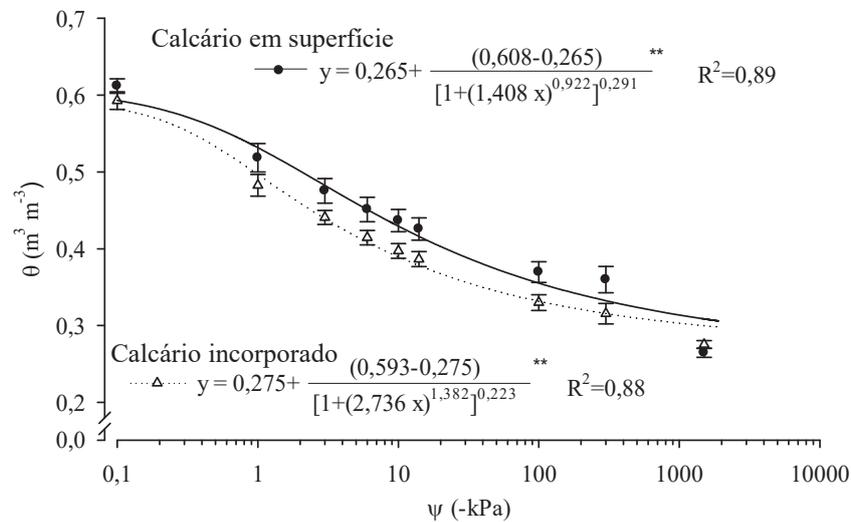


Figura 28 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 0 Mg ha^{-1} de calcário e 6 Mg ha^{-1} de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 ($n=10$). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

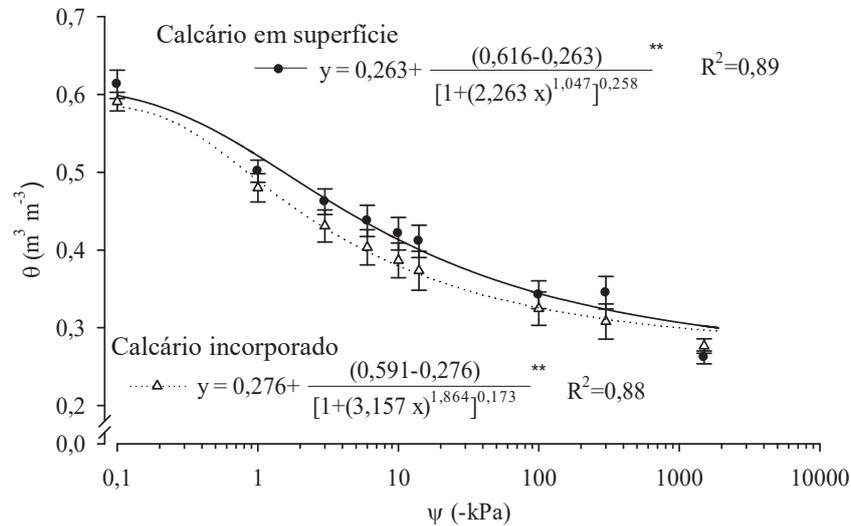


Figura 29 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 8 Mg ha⁻¹ de calcário e 0 Mg ha⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p < 0,001). Bom Jesus, 2013.

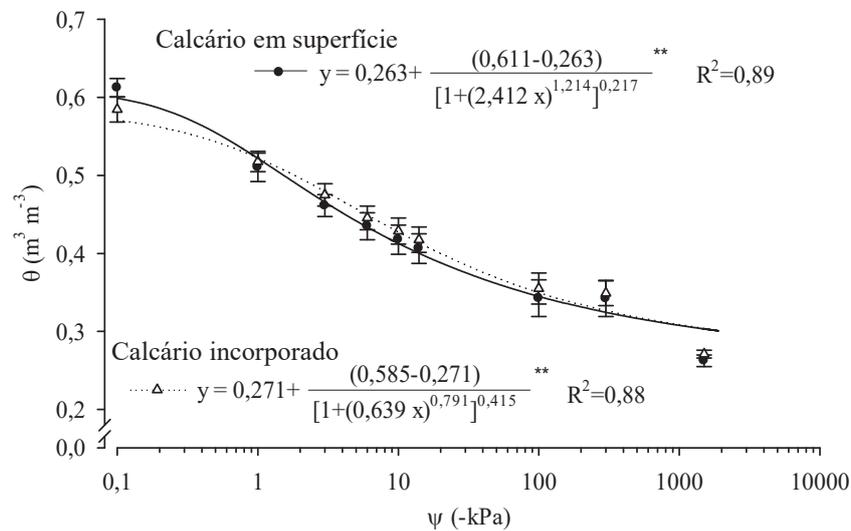


Figura 30 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 8 Mg ha⁻¹ de calcário e 6 Mg ha⁻¹ de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 (n=10). **Significativo pelo teste F (p < 0,001). Bom Jesus, 2013.

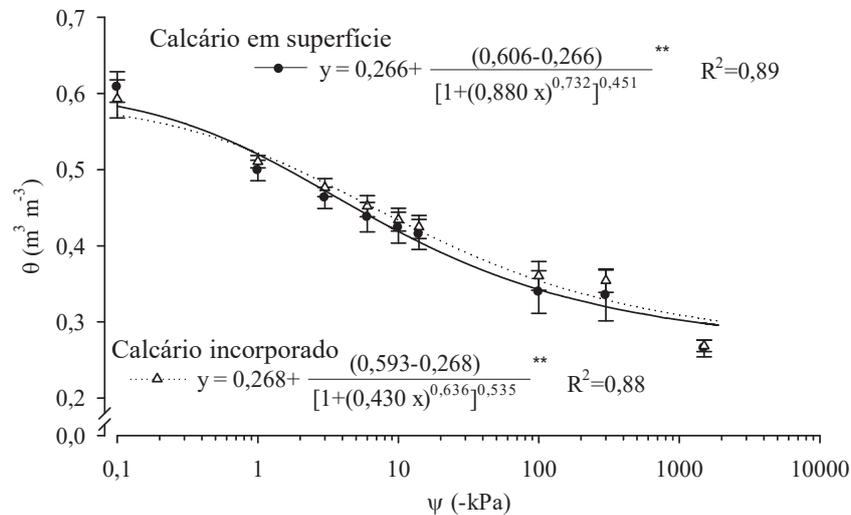


Figura 31 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 16 Mg ha^{-1} de calcário e 0 Mg ha^{-1} de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 ($n=10$). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

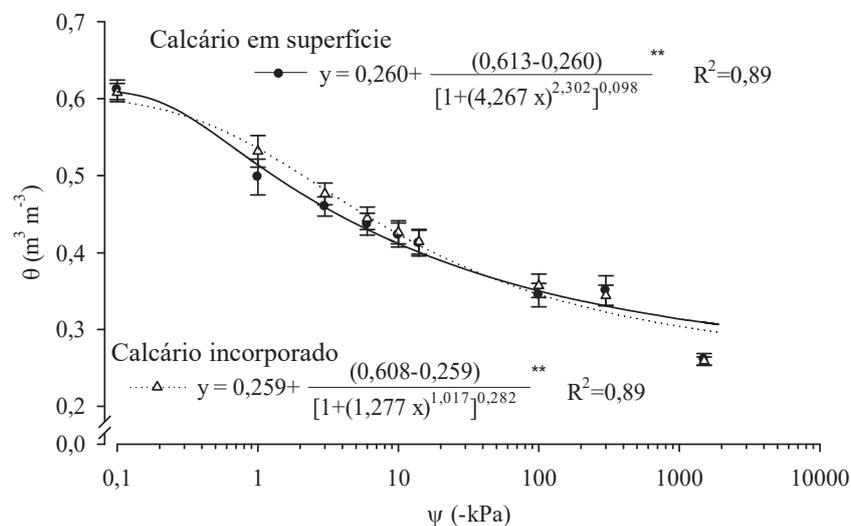


Figura 32 - Curvas de retenção hídrica da umidade volumétrica (θ) em função do potencial do solo (Ψ) para dois manejos empregados ao solo nas doses de 16 Mg ha^{-1} de calcário e 6 Mg ha^{-1} de gesso. Barras representam intervalo de confiança de 0,95 ($n=10$). **Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

Embora as curvas de retenção hídrica serem bastante similares entre si, de maneira geral, o solo em que ocorreu o revolvimento reteve menor teor de umidade em todas as tensões avaliadas.

As doses de gesso, bem como as doses de calcário aplicadas, demonstraram efeito reduzido e não alteraram de forma significativa as curvas de retenção hídrica do solo. Serafim et al. (2012) avaliando o efeito de aplicação de doses de gesso (0, 3, 6, 9, 12 e 15 Mg ha⁻¹) na retenção de água de um Latossolo, verificaram não ter sido possível estabelecer relações entre ambas. Os autores evidenciaram que o gesso não teve efeito aparente capaz de alterar a relação da matriz do solo com a água para as doses estudadas. Dessa maneira, concluíram que os efeitos positivos do gesso na redução do déficit hídrico, relatados na literatura, se devem mais ao aumento do volume de solos explorado pelas culturas do que ao aumento da capacidade de armazenamento do solo por unidade de volume.

Verificou-se que o PMP, ao Ψ -1500 kPa é sempre menor medido que estimado pela equação de van Genuchten (1980), indicando ajuste fraco nas mensurações do psicrômetro WP4 ou inadequação da equação para representar a retenção hídrica deste solo, nesse potencial.

Por outro lado, grande parte das médias dos demais potenciais teve seu intervalo de confiança que se sobrepõe à estimação do modelo, com 95% de probabilidade de o intervalo conter o verdadeiro valor de umidade. A menor sobreposição dos intervalos de confiança dos dados medidos pode ser constatada no tratamento 0 Mg ha⁻¹ de calcário e 6 Mg ha⁻¹ de gesso (Figura 28).

Considerando-se água disponível, a retida entre Ψ de -6 e

-1500 kPa (BEUTLER et al., 2002; KLEIN et al., 2006), o tratamento que teve a maior disponibilidade hídrica foi a aplicação superficial na dose 0 de calcário e 0 Mg ha⁻¹ de gesso, com 0,157 m³ m⁻³; e que menos reteve água foi o tratamento de 8 Mg ha⁻¹ de calcário incorporado e 0 Mg ha⁻¹ de gesso, com 0,101 m³ m⁻³ (Tabela 2).

Tabela 2 - Água disponível às plantas pela equação de van Genuchten (1980), considerando-se a diferença entre a umidade volumétrica (θ) na capacidade de campo (Ψ -6 kPa) e o ponto de murcha permanente (Ψ -1500 kPa), a partir das curvas de retenção hídrica. Bom Jesus, 2013

Tratamento (Mg ha ⁻¹)	Água disponível estimada entre Ψ -6 e -1500 kPa		
	θ -6 kPa (m ³ m ⁻³)	θ -1500 kPa (m ³ m ⁻³)	Δ (m ³ m ⁻³)
0 calcário sup. 0 gesso	0,455	0,298	0,157
0 calcário inc. 0 gesso	0,405	0,291	0,114
0 calcário sup. 6 gesso	0,451	0,309	0,142
0 calcário inc. 6 gesso	0,409	0,300	0,109
8 calcário sup. 0 gesso	0,435	0,302	0,132
8 calcário inc. 0 gesso	0,398	0,297	0,101
8 calcário sup. 6 gesso	0,434	0,303	0,131
8 calcário inc. 6 gesso	0,449	0,304	0,146
16 calcário sup. 0 gesso	0,441	0,298	0,143
16 calcário inc. 0 gesso	0,454	0,304	0,151
16 calcário sup. 6 gesso	0,430	0,309	0,121
16 calcário inc. 6 gesso	0,447	0,299	0,148
Média	0,434	0,301	0,133
Comparação de médias para água retida entre Ψ -6 kPa e -1500 kPa (m ³ m ⁻³)			
Doses de calcário	0 Mg ha ⁻¹	8 Mg ha ⁻¹	16 Mg ha ⁻¹
	0,130 ^{ns}	0,127	0,141
Doses de gesso	0 Mg ha ⁻¹	6 Mg ha ⁻¹	
	0,133 ^{ns}	0,133	
Manejo do solo	Apl. superficial		Incorporação
	0,138 ^{ns}		0,128

A água retida entre Ψ 0 e - 6 kPa é a que drena em pouco tempo pelo potencial gravitacional, o que justifica o cálculo de disponibilidade de água para as plantas não contemplar essa faixa de potencial (OLIVEIRA et al., 2004). Ao realizar a análise dos fatores isolados, doses de calcário, doses de gesso e manejos empregados ao solo, para a água disponível às plantas (Ψ -6 a -1500 kPa) estimados pela equação de van Genuchten (1980), não foi constatada diferença para nenhuma das médias (Tabela 2).

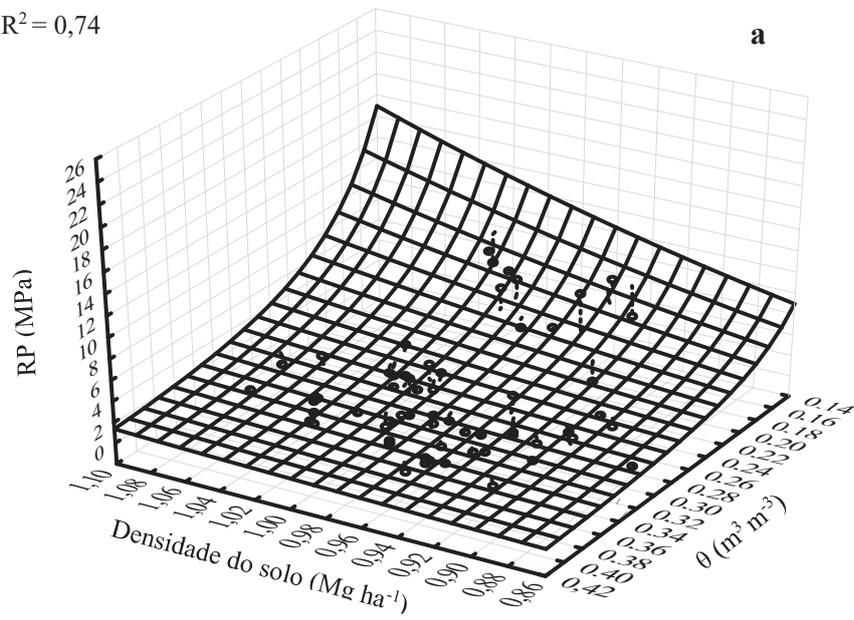
4.2.6 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Para a elaboração do IHO, é preciso encontrar a RP como um dos limites inferiores. Na Figura 33a e b, observa-se a estimativa gerada pelo modelo de Busscher (1990) aos dados observados, em que a RP é estimada em função da DS e θ . Foram geradas duas equações, uma para quando houve a incorporação do calcário ao solo e outra para quando a aplicação foi feita em superfície, ou seja, mantendo-se o sistema de plantio direto. Para fins comparativos optou-se por realizar o IHO entre esses dois sistemas de manejo do solo.

Foi possível observar a dependência da RP, ajustada pelo modelo, da DS e umidade do solo (Figura 33a e b), em que a DS teve relação direta e a θ inversa com a RP, também constatada por Beutler et al. (2004). Por essa razão, medidas de RP a campo com penetrômetros sem mensuração de DS e umidade do solo, oferecem baixa confiabilidade.

$$RP = e^{((-2,0239 + 3,6117 * \ln(DS)) - 2,2944 * \ln(\theta))}$$

$$R^2 = 0,74$$



$$RP = e^{((-3,4353 + 4,4926 * \ln(DS)) - 3,1623 * \ln(\theta))}$$

$$R^2 = 0,78$$

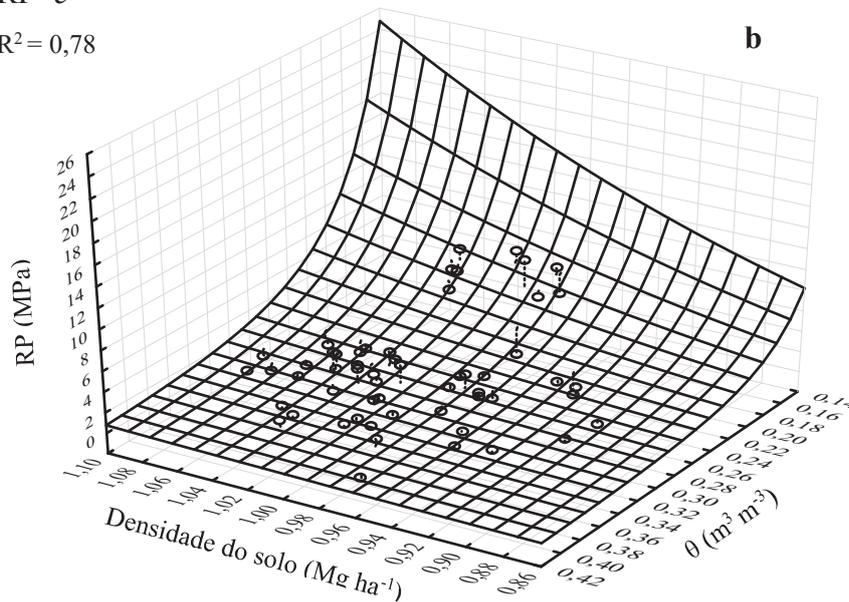


Figura 33 - Resistência mecânica à penetração (RP) estimada pelo modelo de Busscher em função da umidade (θ) e densidade do solo. Aplicação de calcário em superfície (a) e com incorporação ao solo (b). ** Significativo pelo teste F ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

Fixando uma DS qualquer, observa-se o efeito da água em reduzir a RP, e isso deve-se ao efeito lubrificante da água, que reduz a coesão entre as partículas na matriz do solo (TORMENA et al., 2007), ou seja, quanto mais úmido estiver o solo, menor será a RP oferecida por ele (Figura 33a e b). Por essa razão em anos chuvosos, mesmo em solos com problemas de compactação, as plantas podem desenvolver raízes satisfatoriamente.

A correlação entre a RP observada e medida está representada na Figura 34a para a aplicação superficial de calcário, e na Figura 34b para a incorporação de calcário. Ambos os manejos empregados ao solo apresentaram coeficientes de correlação altos (0,86 e 0,87) e significativos ($p < 0,001$).

O desvio da reta linear da equação gerada para os valores medidos e estimados de RP em relação às retas de referência 1:1 foi maior para o manejo de incorporação do calcário (Figura 34a) em relação ao manejo de aplicação superficial de calcário (Figura 34b). Esse desvio maior foi comprovado pelo também maior desvio entre valores medidos e estimados pela equação de Busscher, sendo o somatório em valores absolutos de 48,2 para a aplicação superficial de calcário e de 42,9 para quando houve a incorporação do calcário ao solo. Se todos os valores medidos e estimados ficassem sobre a linha 1:1 seria esperado um somatório de desvios igual a zero, mas como isso é praticamente impossível, considerou-se que os valores estimados pela equação de Busscher (1990) foram representativos dos reais valores medidos para os dois manejos empregados ao solo.

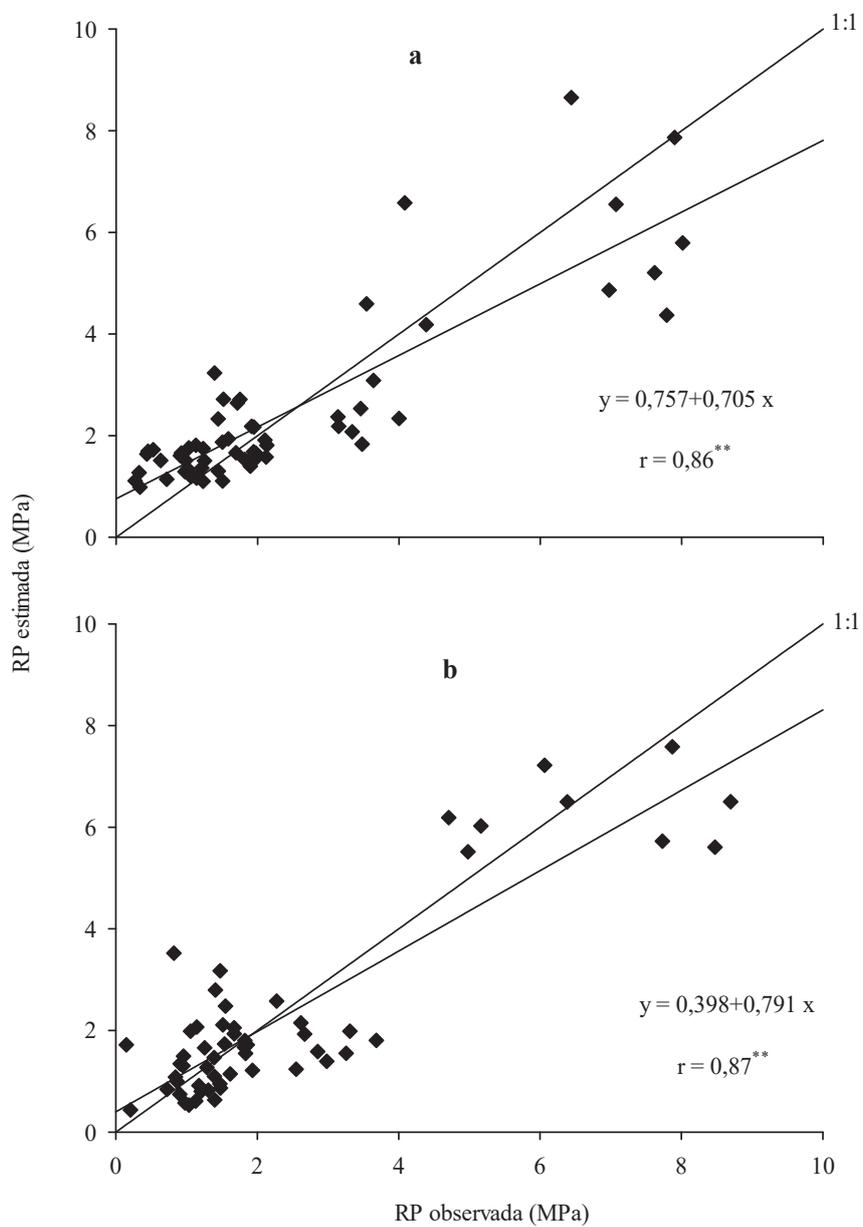


Figura 34 - Resistência mecânica à penetração (RP) observada e estimada pela equação de Busscher (1990) em Cambissolo Húmico aluminico não revolvido (a) e revolvido (b) e linha referencial 1:1. ******significativo pelo teste t ($p < 0,001$). Bom Jesus, 2013.

A umidade do solo na qual a RP de 2 MPa se torna limitante para o crescimento das plantas, na aplicação superficial e incorporada de calcário, está representada na Figura 35. Com a redução do teor de água no solo, ocorre aumento na resistência à penetração decorrente da maior coesão entre partículas e também perda do efeito lubrificante da água (BEUTLER et al., 2001).

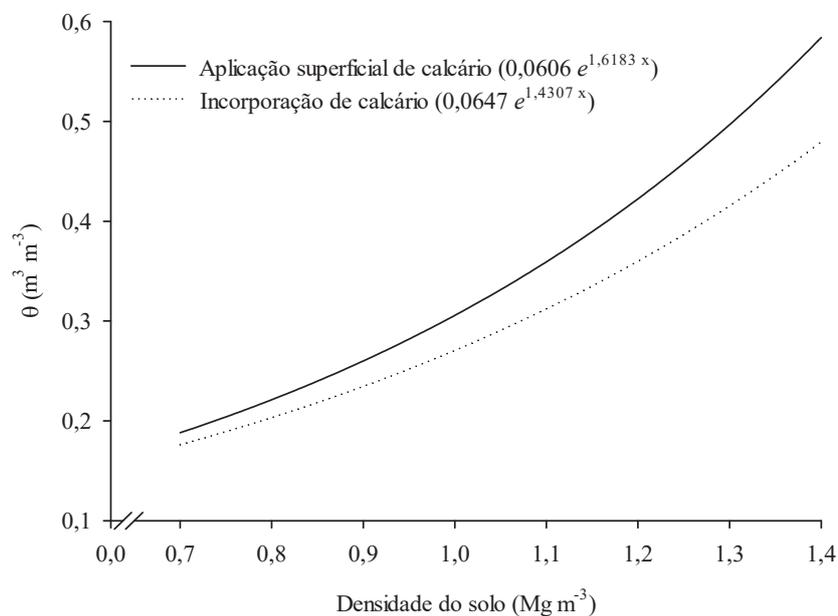


Figura 35 - Umidade volumétrica (θ) na qual ocorre resistência mecânica à penetração de 2 MPa para dois manejos empregados em um Cambissolo Húmico aluminico. Bom Jesus, 2013.

A umidade em que o solo passa a oferecer RP (2 MPa) foi maior para os tratamentos em que não houve incorporação de calcário, ou seja, mantendo-se o sistema de plantio direto. Os resultados corroboram com Silva et al. (2000) que também encontraram maior RP em sistema de plantio direto em relação ao solo preparado com

escarificação e duas gradagens trabalhando com um Latossolo Vermelho-Escuro.

O IHO, foi avaliado para os dois manejos de aplicação de calcário, ou seja, sem revolvimento do solo e aração sucedida por gradagem leve (Figura 36a e b). As linhas pontilhadas verticais representam a amplitude da variação de DS encontrada em cada um dos manejos.

O limite superior do IHO é representado pelo menor valor de umidade entre PA (PT - 10%) e a capacidade de campo (Ψ -6 kPa). O limite inferior é o maior valor de umidade entre a RP limitante (2 MPa) e o PMP (Ψ -1500 kPa). Assim, não foi possível observar variações elevadas para os limites do IHO para os dois manejos empregados ao solo. Em qualquer tipo de preparo, após determinado período, ocorre a reestruturação e reorganização das partículas (SILVA JR. et al., 2013), dessa forma três anos após o revolvimento do solo para a aplicação do calcário, o IHO tende assemelhar-se ao sistema de plantio direto.

Dentro da amplitude de DS encontradas para quando o calcário foi aplicado em superfície, o parâmetro superior que limitou o IHO foi a umidade na CC e, no limite inferior foi a RP de 2MPa (Figura 36a). No solo que recebeu as doses de calcário incorporadas com arado e gradagem leve, o parâmetro do limite superior que limitou o IHO também foi a CC, e no limite inferior foi o PMP até a DS de 0,985 Mg m⁻³ ($0,0982e^{1,0071x} = 0,0647e^{1,4307x}$), e em DS superiores a esta foi substituído pela RP 2 MPa (Figura 36b).

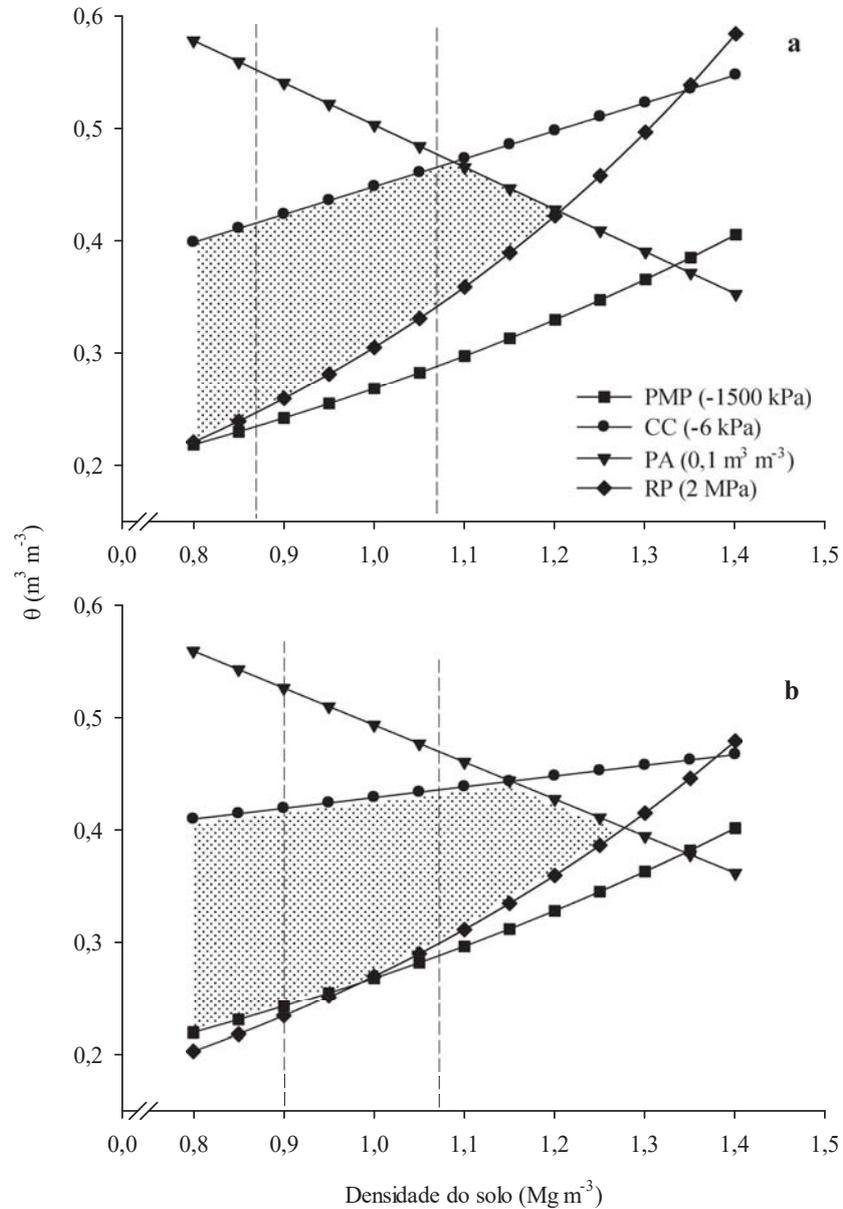


Figura 36 - Intervalo hídrico ótimo para aplicação superficial (a) e incorporada de calcário (b). Área hachurada representa a faixa de umidade volumétrica (θ), delimitada pelos limites superior e inferior para cada densidade do solo considerada. As linhas pontilhadas representam mínima e máxima densidade do solo no campo. PMP: ponto de murcha permanente; CC: capacidade de campo; PA: porosidade de aeração; RP: resistência mecânica à penetração. Bom Jesus, 2013.

Realizando uma extrapolação do modelo para DS superiores às encontradas, para o solo em que o calcário foi aplicado sem revolvimento (Figura 36a), o IHO foi igual a zero na DS em que a linha do limite superior da PA e inferior da RP (2 MPa) se interceptam, obteve-se o valor de densidade do solo crítica de $1,205 \text{ Mg m}^{-3}$ (matematicamente quando $-0,3748 \cdot DS + 0,8779 = 0,0606 \cdot e^{1,6183 \cdot DS}$). A densidade crítica para o solo revolvido (Figura 36b), em que o limite superior da PA e o inferior da RP se interceptam foi $1,277 \text{ Mg m}^{-3}$ (matematicamente quando $-0,3286 \cdot DS + 0,8223 = 0,0647 \cdot e^{1,4307 \cdot DS}$). Assim, o IHO não foi limitante em nenhum dos manejos do solo, já que a amplitude de suas DS encontradas a campo não se aproximaram da densidade do solo crítica.

Em ambos os manejos do solo (Figura 36a e b), ocorreu aumento na retenção de água na capacidade de campo (Ψ -6 kPa) e no PMP (Ψ -1500 kPa) à medida que os valores de DS aumentaram, pois com o aumento da DS houve redução na macroporosidade e redistribuição dos tamanhos dos poros (TORMENA et al., 1998b). Assim, os dados sugerem que quando a DS aumenta, diminui a PT e macroporos e aumentam os criptoporos.

A amplitude do IHO para a incorporação e a aplicação superficial de calcário está representada na Figura 37. Constatase, dentro da amplitude das faixas de DS observadas, maior IHO para o solo que não houve revolvimento. Para ambos os manejos do solo, o IHO foi negativamente correlacionado com o aumento da DS. A variabilidade da produtividade das culturas está ligada à disponibilidade de água no solo (TORMENA & SILVA, 2002), assim a determinação do IHO assume importância bastante relevante.

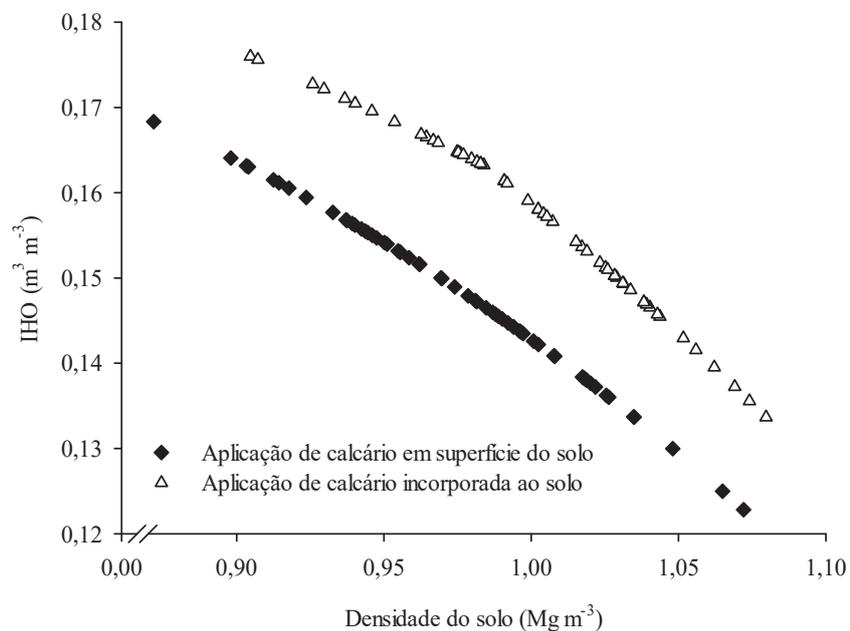


Figura 37 - Intervalo hídrico ótimo (IHO) para dois manejos de aplicação de calcário em um Cambissolo Húmico aluminico. Bom Jesus, 2013.

A DS mínima e máxima encontrada para a aplicação superficial de calcário foi de 0,87 e 1,07 Mg ha⁻³, respectivamente e 0,90 e 1,08 Mg ha⁻³ para a de incorporação das doses de calcário. Na aplicação superficial de calcário a amplitude do IHO em função da DS foi de 0,168 a 0,123 m³ m⁻³ para a menor e maior DS, respectivamente. Já para o sistema de aplicação de calcário com incorporação ao solo, a amplitude foi de 0,176 a 0,134 m³ m⁻³ para a menor e maior DS, respectivamente (Figura 37).

A incorporação de calcário proporcionou menor amplitude de DS e também menor amplitude de IHO. Isso pode ser atribuído à reorganização da geometria porosa do solo pelo preparo com arado de discos e gradagem leve.

4.2.7 Estabilidade de agregados em água

Nos tratamentos em que houve incorporação do calcário, o DMP foi significativamente menor na primeira camada (0-5 cm) e na segunda (5-10 cm), manteve esta tendência, embora sem significância estatística para a maior parte dos tratamentos (Figura 38).

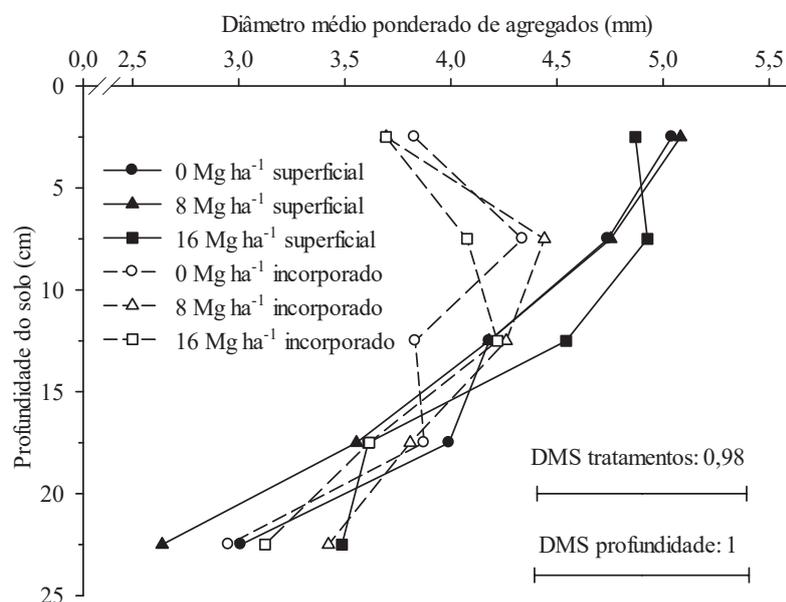


Figura 38 - Efeito do manejo de aplicação de calcário no diâmetro médio ponderado de agregados em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

Resultados semelhantes foram encontrados por Castro Filho et al. (1998), tanto para o DMP quanto para o DMG, e podem ser explicados, em parte, pelo acúmulo de resíduos vegetais na superfície, em que o sistema de plantio direto melhorou o estado de agregação graças ao incremento do teor de C-orgânico, sobretudo na camada superior do solo, de 0-10 cm. A correlação entre a MOS e o DMG foi

positiva de 0,56 (Tabela 1). Nas camadas mais profundas que 15 cm, não houve diferença entre manejo e nem doses de calcário aplicadas. O revolvimento do solo expõe a matéria orgânica à aeração e, consequente, à ação de microorganismos, principalmente na superfície do solo, e pela correlação significativa entre a MOS e o DMP, explica a menor estabilidade de agregados quando houve a incorporação de calcário com aração e gradagem.

Os valores de DMP obtidos foram altos, quando comparados aos de outros trabalhos, com outros tipos de solos (CASTRO FILHO et al., 1998; WENDLING et al., 2005; GARCIA & ROSOLEN, 2010; BONINI & ALVES, 2011). Foram, porém, semelhantes aos obtidos por Albuquerque et al. (2003), que consideraram que, de maneira geral, os solos tamponados do planalto sul-brasileiro têm alta estabilidade da estrutura, mantendo os agregados estáveis devido aos teores satisfatórios de carbono orgânico. Mesmo os menores valores superficiais, por volta de 3,7 mm, influenciados pelo revolvimento do solo para a aplicação do calcário, ainda foram altos, comparados aos trabalhos supracitados.

O DMG foi alterado principalmente pelo manejo do solo nas camadas superficiais, com menores valores para a incorporação de calcário, ou seja quando houve revolvimento do solo (Figura 39). Na profundidade de 0-5 cm, Bilibio et al. (2010) verificaram que o DMG foi maior em sistemas conservacionistas devido à ausência de revolvimento do solo. Como afirmaram Suzuki et al. (2014), o diâmetro de agregados pode estar associado à MOS, devido aos maiores teores de carbono orgânico presentes nos sistemas sem revolvimento do solo, visto que o carbono orgânico tem um papel preponderante nos

processos de formação e estabilização de macroagregados no solo, por ser um eficiente agente cimentante (OLIVEIRA et al., 2004; GARCIA & ROSOLEM 2010), perceptível neste trabalho pela similaridade de comportamento entre MOS (Figura 11) e estabilidade de agregados DMP (Figura 38) e DMG, (Figura 39).

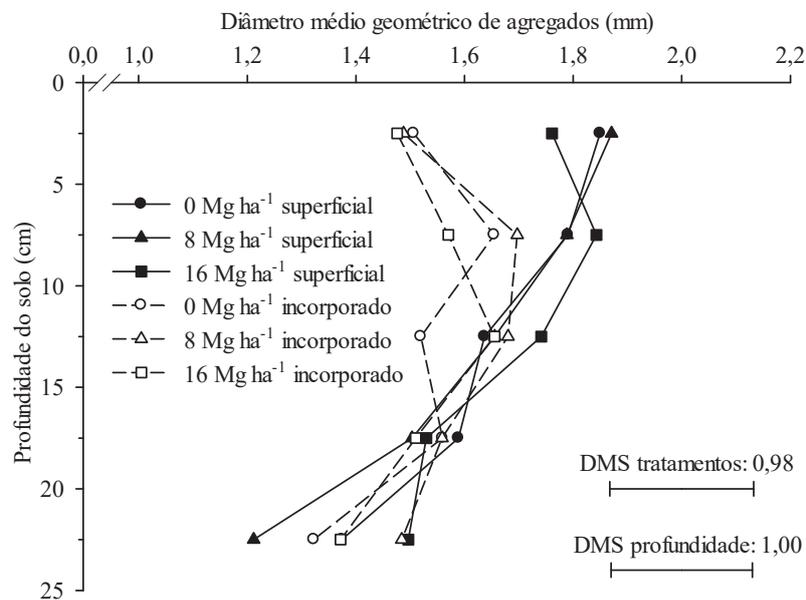


Figura 39 - Efeito do manejo de aplicação de calcário no diâmetro médio geométrico de agregados em um Cambissolo Húmico aluminico para cinco camadas de avaliação. As barras horizontais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey a 5% de significância. Bom Jesus, 2013.

5 CONCLUSÃO

A aplicação de calcário com incorporação ao solo influencia a distribuição dos elementos químicos avaliados pelo perfil do solo e, assim, melhora as camadas subsuperficiais do solo.

Em doses de até 6 Mg ha^{-1} , gesso não demonstra melhorar os atributos químicos da subsuperfície de Cambissolos Húmicos alumínicos típicos que possuem elevada capacidade de tamponamento.

O revolvimento do solo diminui a estabilidade dos agregados e o teor de matéria orgânica em camadas superficiais do solo.

As características físicas e químicas de Cambissolos Húmicos alumínicos típicos permitem que sejam utilizados para a agricultura sem acarretar problemas compactação.

Após a decorrência de um período de tempo de três anos, o revolvimento do solo, doses de calcário e doses de gesso não são determinantes em alterar a retenção hídrica do solo.

O intervalo hídrico ótimo indica não haver limitações hídricas para o solo mantido sob sistema de plantio direto e nem quando ocorre revolvimento para incorporação do calcário.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.

AGNE, S. A.; KLEIN, V. A. Matéria orgânica e atributos físicos de um Latossolo Vermelho após aplicações de dejetos de suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v. 18, n. 7, 720-726, 2014.

AGUIAR, L. I. G. *Propriedades físico-hídricas do solo em plantio direto após calagem*. 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2007.

ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C.; Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 295-300, 2000.

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*, Ilhéus, v. 27, p. 799-806, 2003.

ALCARDE, J. C. *Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas por J. C. Alcarde*. São Paulo: ANDA, 2005. (ANDA, Boletim Técnico, 6)

ALMEIDA NETO, O. B. *Dispersão da argila e condutividade hidráulica em solos com diferentes mineralogias, lixiviados com soluções salino-sódicas*. 2007. 83 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

ANDRADE, A. P.; MAFRA, A. L.; PICOLLA, C. D.; ALBUQUERQUE, J. A.; BERTOL, I. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, p. 814-821, 2012.

ARAÚJO, S. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; GARBUIO, F. J. Aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade: Alterações químicas no solo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1755-1764, 2009.

BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 31, n. 1, p. 87-95, 2015.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 687-694, 1999.

BELTRAME, L. F. C.; TAYLOR, F. C. Causas e efeitos da compactação do solo. *Lavoura Arrozeira*, Porto Alegre, v. 33, n. 318, p. 59-62, 1980.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 58, p. 555-560, 2001.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, É. F. D.; DILY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 91-95, 2000.

BETIOLI JR., E. B.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 971-982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-56, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. da. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. *Irriga*, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 181-192, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.

BILIBIO, W. D.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E. N. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 34, p. 817-822, 2010.

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*, Viçosa, v. 35, p. 1263-1270, 2011.

BRASIL. Instrução Normativa nº 004 de 02/08/2004. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. *Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos corretivos de acidez, corretivos de alcalinidade, corretivos de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura*. Brasília: Diário Oficial da União, 2004.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transaction of the American Society of Agronomists*. Michigan, v. 33, p. 519-524, 1990.

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 de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

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 aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. *Plant and Soil*, Netherlands, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997.

CASTAMANN, A. *Normas DRIS para rendimento de grão e teor de óleo da cultura da soja, cultivada no Planalto Médio do Rio Grande do Sul*. 2009. 154 f. Tese (Doutorado em agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2009.

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

CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, M. F.; OLIVEIRA, E. L. de; SANTANA, E. F. Efeito do carbonato de cálcio na dispersão de argila de um Latossolo. *Agropecuária Técnica*, Areia, v. 18, n. 1/2, p. 1-6, 1997.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. *Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10. ed. Porto Alegre: SBCS. CQFS, 2004. 400 p.

COSTA, C. S. *Utilização do estéril da extração do gesso, como condicionador das propriedades físicas de um Neossolo Quartizarênico do sertão de Pernambuco*. 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004.

DEMARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.

DECAGON DEVICES. *Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter*. United State of America: Decagon devices, 2000. 70 p.

DIAS JR.; M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIAS, L. E. *Uso de gesso como insumo agrícola*. Seropédica: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Biologia, 1992. (Comunicado técnico, 7).

ELTZ, F. M. L.; ORLOWSKI, E.; ROLOFF, G. Efeito de sistema de preparo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 13, p. 259-67, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa/CNPS), 1997. 212p.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa v. 27, n. 6, p. 1097-1104, 2003.

FAVARETTO, N.; NORTON, L. D.; JOERN, B. C.; BROUDER, S. M. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 70, p. 1788-1796, 2006.

FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. da; MARTIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M. da; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Santo Antônio de Goiás, v. 36, n. 6, p. 1769-1777, 2012.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M.; RALISCH, R. Estabilidade física de solo sob diferentes manejos de pastagem extensiva em Cambissolo. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 31, n. 3, p. 531-538, 2010.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JR., J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, Recife, v. 18, n. 1, 2010.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1489-1498, 2010.

GIOIA, M. T. *Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico do noroeste Paulista*. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2011.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; HÖRBE, T. A. N.; FERREIRA, A. O.; TABALDI, F. M. E LANZANOVA, M. E. Alterações nos atributos físicos de um latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2115-2126, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, É; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, p. 1512-1521, 2013.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, p. 105-20, 1990.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

IJIMA, M.; KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, Tokyo, v. 60, p. 130-138, 1991.

IMHOFF, S. C. *Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos*. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em agronomia/Solo e Nutrição d Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARCK, F. E.; eds. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 1. ed. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KLEIN, C. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Vermelho em plantio direto escarificado sobre o rendimento de grãos de milho*. 2011. 106 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2011.

KLEIN, V. A. *Física do solo*. 3.ed. Passo Fundo: UPF editora, 2014, 263 p.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânica de um latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. 1998. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa v. 26, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um latossolo vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, p. 646-650, 2006.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIMA, C. R. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p. 199-205, 2003.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S. de; SILVA, S. A. de. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e ADA em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. *Revista Árvore*, Viçosa, 37:539-546, 2013.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 71-78, 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 30, p. 43-54, 2014.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; DA COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MAGALHÃES, P. S. G. Interação máquina – solo. In: CORTEZ, L. A. B.; MAGALHÃES, P. S. G. *Introdução à Engenharia Agrícola* 1. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1992. p. 191-204.

MALA VOLT A, E. *Manual de química agrícola: adubos e adubação*. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 607 p.

MANFRÉ, L. A.; DA SILVA, A. M.; URBAN, R. C. Atributos de qualidade de solos sob dois diferentes tipos de manejo no município de Ibiúna/SP, Brazil. *Interciencia*, Caracas, v. 36, n. 10, p. 757-763, 2011.

MARCOLAN, A. L. *Atributos físicos e químicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do seu revolvimento na reaplicação de calcário no sistema plantio direto*. 2002, 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

MARCOLIN, C. D. *Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto*. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2009. 187 f. Tese (Doutorado em agronomia/Produção Vegetal). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2009.

MARKET, C. M.; PAVANA, M. A.; LANTMANN, A. F. *Considerações sobre o uso do gesso na agricultura*. Piracicaba: POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. (Informações Agronômicas 40)

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

NAVA, G.; ERNANI, P. R.; SÁ, A. A.; PEREIRA, A. J. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 215-222, 2012.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JR., M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, I. D.; COSTA, K. D. P.; RODRIGUES, C.; MACEDO, F. R.; MOREIRA, F. P.; SANTOS, K. D. Manutenção e correção da fertilidade do solo para inserção do cerrado no processo produtivo. *Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos*, Montes Belos, v. 1, n. 1, p. 50-64, 2005.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, p. 1777-1785, 2011.

PAULETTI, V.; PIERRI, L. de; 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*, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.

PEREIRA, B. L. S.; SOUZA, L. D. SOUZA, L. S.; SANTOS, C. V. Avaliação da estabilidade de agregado em Latossolo amarelo distrófico na Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. In: JORNADA CIENTÍFICA EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA TROPICAL, 3., 2009, Cruz das Almas. *Anais*. . . Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. CD-ROM.

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

RAIJ, B. van; MASCARENHAS, H. A. A.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; IGUE, T.; de SORDI, G. Efeito de calcário e de gesso para soja cultivada em latossolo roxo ácido saturado com sulfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 18, p. 305-312, 1994.

RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M. de; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 1018-1026, 2013.

RAMPIM, L.; DO CARMO LANA, M; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em latossolo vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1623-1638, 2013.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, p. 1687-1698, 2011.

REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. 1 ed. São Paulo: Manole. 1987. 188 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 1. ed. Barueri: Editora Manole, 2004, 478 p.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 797-805, 2000.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

RIO GRANDE DO SUL. *Zoneamento Ambiental da Silvicultura: estrutura, metodologia e resultados*, 2010, 131 p.

ROSSATO, O. B.; CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. D.; BRUNETTO, G.; ADORNA, J. C.; GIROTTO, E.; LORENZI, C. R. Correction of soil acidity in the subsurface of an oxisol with sandy loam texture under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 659-667, 2009.

ROTH, C. H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G. B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, p. 241-248, 1991.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 24-32, 2010.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, p. 297-300, 2005.

SANTOS, G. A.; PEREIRA, A. B.; KORNDÖRFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 26, n. 1, 100-108, 2010.

SANTOS, R. L. dos; AZEVEDO, V. M. de; FREIRE, F. J.; ROCHA, A. T. da; TAVARES, J. A.; SANTOS FREIRE, M. B. G. dos. Extração e eficiência de uso de nutrientes em capim-elefante na presença de gesso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 497-505, 2012.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JR., A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 427-436, 2000.

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M. de; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 27, p. 964-977, 2011.

SILVA JR., C. A.; CARVALHO, L. A.; CENTURION, J. F.; OLIVEIRA, E. C. A. de. Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo sob diferentes tipos de preparo. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 29, n. 1, p. 1489-1500, 2013.

SILVA, A. J.; SAMPAIO, A. R.; COSTA, L. M.; FONTES, L. E. F. Efeito de calcário e gesso na dispersão e microagregação de um latossolo vermelho amarelo. *Agropecuária Técnica*, Areia, v. 19, n. 1/2, p. 30-36, 1998.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 02, p. 329-337, 2006.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, N. M.; RAIJ, B. van; CARVALHO, L. H.; BATAGLIA, O. C.; KONDO, J. I.; Efeitos do calcário e do gesso nas características químicas do solo e na cultura do algodão. *Bragantia*, Campinas, v. 56, n. 2, p. 389 - 401, 1997.

SILVA, R. M.; PAIVA, F. M. L.; SANTOS, C. A. G. Análise do grau de erodibilidade e perdas de solo na bacia do Rio Capiá baseado em SIG e Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 2, n. 1, p. 26-40, 2009.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 795-801, 2000.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; ALVES JR., J.; SILVA, J. G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 24, p. 53-59, 2008.

SOUZA, F. S. de; ROSA JR., E. J.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; ROSA, Y. B. C. J.; ZEVIANI, W. M. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1717-1732, 2012.

SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D. Metodologias para análise de agregados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 32., 2009, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: Universidade Federal do Ceará/Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2009. 1 CD-ROM.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

STRECK, E. V.; KAMPF, N. DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2. ed. Porto Alegre: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul, 2008. 222p.

SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N. S.; STEWART, B. A. *Subsoil management techniques*. 1. ed. Athens: Lewis Publishers, 1995. p. 147-185.

SUZUKI, L. E. A. S.; LIMA, C. L. R. de; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PILLON, C. N. Estrutura e armazenamento de água em um argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, p. 94-106, 2014.

TEDESCO, M. J.; GIANELO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros minerais*. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia – UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORSELLI, T. B. G. A.; KROLOW, I. R. C.; SIMONETE, M. A. Atributos físico-hídricos de um solo cultivado com pastagem de azevém sob diferentes combinações de preparo e tratamento. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 37, n. 2, p. 117-123, 2006.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, London, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TORMENA C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.

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*, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998a.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 305-314, 2002.

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

_____. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 52, n. 3, p. 223-232, 1999.

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

VERONESE, M.; FRANCISCO, E. A. B.; ZANCANARO, L.; ROSOLEM, C. A. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1158-1165, 2012.

VIEIRA, M. L. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. D. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, Madison, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936.