

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

ANDRÉ CARLOS AULER

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO
EM FUNÇÃO DE MODOS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO**

PONTA GROSSA – PR

2014

ANDRÉ CARLOS AULER

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO
EM FUNÇÃO DE MODOS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
Coorientadora: Prof. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

PONTA GROSSA – PR

2014

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

A924a Auler, André Carlos
Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Háplico aluminico em função de modos de aplicação de calcário./ André Carlos Auler. Ponta Grossa, 2014.
63 f.

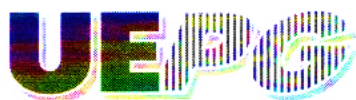
Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração : Agricultura – Linha de Pesquisa Uso e Manejo do Solo), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

Coorientadora: Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.

1. Acidez do solo. 2 . Dispersão. 3. Floculação de argilas. 4. Densidade do solo. 5. Macroporosidade. 6. Microporosidade. 7. Retenção de água. 8. Função capacidade de água. I. Pires, Luiz Fernando. II. Giarola, Neyde Fabíola Balazero. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado de Agronomia. IV. T.

CDD: 630



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Atributos físico-hídricos de um cambissolo háplico aluminico em função de modos de aplicação de calcário.”

Nome: André Carlos Euler

Orientador: Luiz Fernando Pires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. Cezar Francisco Araújo Junior

Data da Realização: 30 de julho de 2014.

A aqueles que me apoiaram incondicionalmente,
sofreram com minha ausência e,
mesmo assim, vibram com minhas (nossas) vitórias.
Aos meus pais, Carlos G. Auler e Adilce B. Auler
Dedico o trabalho.

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia desta instituição, pela oportunidade de ser integrante de seu corpo discente.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus pais e meu irmão, Carlos G. Auler, Adilce B. Auler, Anderson G. Auler pelo apoio e incentivo em todos os momentos difíceis, mesmo sem os entender.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luiz F. Pires e Profa. Dra. Neyde F. B. Giarola pelos ensinamentos, confiança em mim depositada nas diversas atividades da pós-graduação e, principalmente, pela amizade.

Aos produtores rurais, Cláudio e Madalena Kruppke, pela concessão da área de estudo, auxílio em atividades de campo e entusiasmo com a pesquisa.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, Shivelly L. Galetto, Thays Schneider, Jucimare Romaniw, Angelo R. Bini, Danilo A. Scharr, Adriano Haliski, Allison J. Fornari, Silvano Harkatin, Simone Miara, Jaqueline A. R. Borges, Hágata S. Hennipman e Filipe L. Jacques. Agradeço a estes pelo aprendizado em disciplinas, redação de artigos, auxílio em trabalhos de campo e laboratoriais. Todavia, meus mais sinceros agradecimentos pela amizade cultivada. Um agradecimento especial ao colega de laboratório e projeto, ao amigo e muitas vezes pai José. A. B. dos Santos.

Aos alunos de graduação, orientados e estagiários dos laboratórios de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais, Física do Solo e Fertilidade do Solo, Luiz M. S. Guilherme, Lúcia H. Wiecheteck, Gustavo H. Olzewski, Carlos A. M. Oliveira, Maurício de Godoi, Isabelle C. Barros, João F. P. Gomes, Gabriel G. Soares, Fabrício S. Hennipman, Angela Luz e Giovani de A. Camargo, pelo auxílio em coletas de campo, análises laboratoriais, confiança e amizade. Para alguns, também agradeço pela oportunidade de me deixarem participar de sua formação.

Aos funcionários da instituição Luciane Henneberg, Zima R. Guera, Nilcéia Lara, em especial a laboratorista do laboratório de Fertilidade do Solo, Dirce V. Oliveira, pelo auxílio nas análises laboratoriais, pela amizade e exímio exemplo de dedicação ao trabalho público.

Aos professores da instituição por todo o conhecimento repassado. Em especial à Prof. Dra. Silvana Ohse e ao Prof. Dr. Eduardo F. Caires pela amizade, conselhos e, principalmente, por serem exemplos no ato de ensinar.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização do trabalho.

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

(John F. Kennedy)

AULER, A. C. ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO EM FUNÇÃO DE MODOS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO. 2014. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2014.

RESUMO

A calagem é a prática empregada na correção da acidez do solo e sua reação depende do modo de aplicação do corretivo. A incorporação de calcário com o revolvimento do solo é uma alternativa para o aumento da reação. Porém, a mobilização do solo altera a sua estrutura e os processos que nela ocorrem. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da calagem em três modos de aplicação do calcário (na superfície, incorporada com aração e gradagem e com subsolagem e gradagem) nos atributos físico-hídricos de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico. Para isso, instalou-se um experimento em campo com delineamento em faixas, com tratamentos em arranjo fatorial (3×2). Os tratamentos constituíram-se da combinação de duas doses de calcário (0 e 15 Mg ha⁻¹) e três modos de aplicação do calcário (na superfície, incorporado com aração e gradagem e subsolagem e gradagem). Amostras indeformadas e deformadas de solo nas camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m foram coletadas nas entrelinhas da cultura do milho 18 meses após a instalação do experimento. Foram avaliados os teores de argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), curvas de retenção de água, curva de distribuição de poros, granulometria e atributos químicos do solo. Os efeitos da calagem sobre os atributos físico-hídricos do solo foram restritos à camada 0-0,10 m. A ADA e o GF foram influenciados pelo modo de aplicação do calcário, mas não pela calagem. Quando a calagem foi realizada na superfície, ocorreu redução da DS e aumento da Pt. Em todos os modos de aplicação do calcário, a calagem aumentou a retenção de água e alterou a distribuição de poros. Concluiu-se que as alterações nos atributos físico-hídricos do solo foram em sua maioria decorrentes do aumento do pH e da substituição do alumínio por cálcio e magnésio no complexo de troca.

Palavras-chave: Acidez do solo. Dispersão e floculação de argilas. Densidade do solo. Macroporosidade e microporosidade. Retenção de água. Função capacidade de água.

AULER, A. C. **PHYSICO-HYDRICAL ATTRIBUTES OF A DYSTRUDEPT IN FUNCTION OF MODES OF LIMESTONE APPLICATION**. 2014. 63 s. Dissertation (Master Science in Agronomy) – Ponta Grossa State University, Ponta Grossa, 2014.

ABSTRACT

Liming is the practice used to correct soil acidity and its reaction is dependent on the mode of application of the lime. The addition of lime to the soil with the tilling is an alternative for increasing his reaction. However, tillage alters its structure and processes occurring in it. The aim of this study was to evaluate the influence of liming of liming in three modes of application of limestone (on the surface, incorporated with plowing and harrowing and subsoiling and disking) on the physico-hydrical attributes of a Dystrudept. For this, an experiment was installed in the field with banded design, with treatments in a factorial arrangement (3×2). Treatments formed from the combination of two rates of lime (0 and 15 Mg ha⁻¹) and three modes of application of limestone (on the surface, incorporate with plowing and harrowing and subsoiling and harrowing). Undisturbed and disturbed soil samples were collected at 0-0.10 and 0.10-0.20 m layers between plant rows of corn 18 months after installation of the experiment. The water-dispersed clay (WDC), flocculation degree (FD), bulk density (BD), total porosity (TP), water retention curves, pore size distribution curve, particle size and soil chemical properties were determined order to diagnose the effects of liming the soil studied. Liming effects on the physico-hydrical attributes of the soil were restricted to 0-0.10 m layer. The WDC and the FD were influenced by tillage, but not by liming. When liming was performed on the surface, there was a reduction of the DB and increased TP. In all modes of application of limestone, liming increased water retention and altered the distribution of pores. To conclude, the changes in physico-hydrical attributes of the soil were mostly due to the increase of pH and replacement of aluminum by calcium and magnesium in the exchange complex.

Keywords: Acidity. Flocculation and dispersion of clays. Soil bulk density. Macroporosity and microporosity. Water retention. Capacity water function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Média histórica (MH)* de precipitação pluvial no período 1963-2013, e ocorrida entre maio de 2012 e dezembro de 2013.....	26
Figura 2 – Argila dispersa em água (ADA) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modo de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)] (b).....	33
Figura 3 – Grau de floculação (GF) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	37
Figura 4 – Grau de floculação (GF) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)] (b).....	38
Figura 5 – Densidade (Ds) das camadas 0-0,10 (a) e 0,10-0,20 m (b) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	39
Figura 6 – Porosidade total (Pt) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	40

- Figura 7 – Porosidade total (Pt) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)] (b)..... 43
- Figura 8 – Curvas de retenção de água (CRAs) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]..... 44
- Figura 9 – Diferenças relativas (DR) das curvas de retenção de água das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]..... 45
- Figura 10 – Diferenças relativas (DR) entre as curvas de retenção de água da ausência (sem calagem) em relação a presença da calagem (com calagem) das camadas 0-0,10 (a) e 0,10-0,20 m (b) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função de modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]..... 47
- Figura 11 – Curvas de distribuição de poros ($d\theta/d\Psi_m$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]..... 49
- Figura 12 – Curvas de distribuição de poros ($d\theta/d\Psi_m$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] em modos de aplicação do calcário: na superfície (a, b), incorporado com aração e gradagem (c, d) e incorporado com subsolagem e gradagem (e, f)..... 51

Figura 13 – Porosidade livre de água ($\theta_s - \theta_i$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO Háplico Alumínico sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]..... 53

Figura 14 – Porosidade livre de água ($\theta_s - \theta_i$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] em modos de aplicação do calcário: na superfície (a, b), incorporado com aração e gradagem (c, d) e incorporado com subsolagem e gradagem (e, f)..... 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Atributos químicos e granulométricos na camada 0-0,20 m do Cambissolo Háplico Alumínico antes da instalação do experimento (maio de 2012).....	27
Tabela 2 –	Resumo da análise de variância da argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), densidade (Ds) e porosidade total (Pt) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem e do modo de aplicação do calcário.....	33
Tabela 3 –	Teores de areia, silte, argila e carbono orgânico (CO) das camadas 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modo de aplicação do corretivo [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	35
Tabela 4 –	Acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al^{3+}) e teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+}) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modo de aplicação do calc [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	35
Tabela 5 –	Coeficientes de correlação de Pearson do grau de floculação (GF), densidade (Ds) e porosidade total (Pt) com os teores de areia, silte, argila, carbono orgânico (CO), acidez ativa (pH), potencial (H+Al), trocável (Al^{3+}) e teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^{+}), GF e argila dispersa em água (ADA) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem com calcário aplicado na superfície.....	36
Tabela 6 –	Coeficientes de correlação de Pearson da Ds com os teores de areia, silte, argila, argila dispersa em água ADA, grau de floculação (GF) carbono orgânico (CO), acidez ativa (pH), potencial (H+Al), trocável (Al^{3+}) e teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+}) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem com calcário incorporado com aração e gradagem.....	42

Tabela 7 –	Parâmetros das curvas de retenção de água e coeficiente de determinação (R^2) das regressões, ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para as camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	43
Tabela 8 –	Coeficientes de correlação de Pearson de conteúdos de água, em diferentes potenciais mátricos, com os atributos físicos e químicos, das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	46
Tabela 9 –	Distribuição de macro ($> 25 \mu\text{m}$), micro ($0,1\text{-}25 \mu\text{m}$) e criptoporos ($< 0,1 \mu\text{m}$), das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].....	50

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Ajuste de van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m}$
Equação 2	Restrição de Mualem (1986)	$m = 1 - \frac{1}{n}$
Equação 3	Diferença relativa	$DR = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} 100$
Equação 4	Função capacidade de água	$\frac{d\theta}{d\Psi_m} = \frac{\alpha^n (\theta_s - \theta_r) n m \Psi_m^{(n-1)}}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^{(m+1)}}$
Equação 5	Raio de poro	$r = \frac{1490}{h}$

LISTA DE ABREVIATURAS

ADA	Argila dispersa em água
Al^{3+}	Alumínio (acidez trocável)
Ca^{2+}	Cálcio
CC	Com calagem
CDPs	Curvas de distribuição de poros
CIAG	Calcário incorporado com aração e gradagem
CISG	Calcário incorporado com subsolagem e gradagem
CO	Carbono orgânico
CRAs	Curvas de retenção de água
CS	Calcário na superfície
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Coeficiente de variação
DR	Diferença relativa
Ds	Densidade do solo
GF	Grau de floculação
GL	Graus de liberdade
H^{+}	Hidrogênio
$\text{H}+\text{Al}$	Acidez potencial
K^{+}	Potássio
m	Saturação por alumínio
Mg^{2+}	Magnésio
Mn^{2+}	Manganês
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico (acidez ativa)
PN	Poder de neutralização
PRNT	Poder relativo de neutralização total
Pt	Porosidade total
RE	Reatividade
SC	Sem calagem
V	Saturação por bases

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa – parâmetro empírico da equação de van Genuchten
$\approx$	Aproximadamente
°	Graus
°C	Graus célsius
$\geq$	Maior ou igual a
$>$	Maior que
®	Marca registrada
$\leq$	Menor ou igual a
$<$	Menor que
‘	Minutos
ns	Não significativo
n	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
m	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
“	Polegadas
%	Por cento
Ψ_m	Potencial mátrico
**	Significativo ao nível de 1 % de significância
*	Significativo ao nível de 5 % de significância
U	Umidade gravimétrica
θ	Umidade volumétrica
θ_s	Umidade de saturação
θ_r	Umidade residual
θ_{-10}	Umidade volumétrica no potencial mátrico de -10 kPa
θ_{-33}	Umidade volumétrica no potencial mátrico de -33 kPa
θ_{-1500}	Umidade volumétrica no potencial mátrico de -1500 kPa

LISTA DE UNIDADES

$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Centimol de carga por decímetro cúbico
g	Grama
g kg^{-1}	Grama por quilograma
hPa	Hectopascal
h	Hora
L ha^{-1}	Litro por hectare
Mg ha^{-1}	Megagrama por hectare
Mg m^{-3}	Megagrama por metro cúbico
m	Metro
$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	Metro cúbico por metro cúbico
m^2	Metro quadrado
μm	Micrometro
mg dm^{-3}	Miligramma por decímetro cúbico
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mol L^{-1}	Mol por litro
$\text{oscilações min}^{-1}$	Oscilações por minuto
kg ha^{-1}	Quilograma por hectare
kg kg^{-1}	Quilograma por quilograma
kPa	Quilopascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	20
2.1	HIPÓTESE.....	20
2.2	OBJETIVO GERAL.....	20
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
3.1	A REGIÃO CENTRO-SUL PARANAENSE E A PRODUÇÃO AGRÍCOLA.....	21
3.2	ACIDEZ DO SOLO E SUA CORREÇÃO.....	21
3.3	EFEITOS DA CALAGEM EM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO.....	23
3.4	RETENÇÃO DE ÁGUA E DISTRIBUIÇÃO DE POROS NO SOLO.....	24
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E OBJETO DE ESTUDO.....	26
4.2	CARACTERIZAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	27
4.3	AMOSTRAGENS, AVALIAÇÕES E ANÁLISES LABORATORIAIS.....	29
4.4	MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTES DOS DADOS.....	30
4.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1	ATRIBUTOS ESTRUTURAIS.....	33
5.2	RETENÇÃO DE ÁGUA.....	43
5.3	DISTRIBUIÇÃO DE POROS.....	49
6	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Na região Centro-Sul do Estado do Paraná predominam sistemas de produção em agricultura familiar. No entanto, em função de sua gênese, os solos desta região apresentam elevada acidez, o que restringe a produção agrícola. Neste contexto, a calagem deveria ser empregada nos solos das propriedades rurais desta região. Todavia, os agricultores alegam que a aplicação de calcário “empedra o solo”, dificultando o preparo para a semeadura. Este é um dos principais motivos que leva os agricultores desta região a não realizarem a correção da acidez do solo.

Também é válido ressaltar que muitos agricultores dessa região utilizam o sistema convencional de preparo do solo, caracterizado pelo intenso revolvimento, o que torna o solo mais suscetível à degradação. Desse modo, ainda se fazem necessários estudos sobre o manejo do solo na agricultura familiar, principalmente tendo em vista seus impactos sobre a estrutura do meio poroso.

A partir do conhecimento empírico dos agricultores sobre os efeitos da aplicação de calcário na estrutura do solo, decidiu-se realizar um estudo sobre a qualidade estrutural e a dinâmica da resistência à penetração do solo em função da correção da acidez e modos de aplicação do calcário ao solo, visto que a incorporação com o revolvimento do solo é uma prática comumente empregada na região quando se realiza a calagem. Para isso, instalou-se um experimento em uma propriedade rural, sobre um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, com elevada acidez. O trabalho possuía quatro doses de calcário (0, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹) e três modos de aplicação do corretivo (na superfície, incorporado com aração e gradagem e com subsolagem e gradagem).

Para esta dissertação, optou-se pelo estudo dos atributos físico-hídricos do solo considerando a correção ou não da acidez e o modo de aplicação do calcário ao solo. Para isso, avaliaram-se apenas as doses 0 e 15 Mg ha⁻¹ de calcário em todos os modos de aplicação utilizados para incorporação do corretivo.

A presente dissertação foi estruturada em seções. Primeiramente apresentam-se a hipótese e os objetivos, seguidos de uma sucinta revisão de literatura. Na sequência, apresenta-se a descrição detalhada da metodologia empregada, os resultados e as conclusões obtidos no trabalho. Por fim, apresenta-se a lista completa de bibliografias utilizadas para a elaboração do trabalho.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

Este trabalho é fundamentado na hipótese de que os efeitos da calagem nos atributos físico-hídricos de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico indiferem entre os modos de aplicação do calcário: na superfície, incorporado com aração e gradagem e incorporado com subsolagem e gradagem.

2.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da calagem em três modos de aplicação do calcário (na superfície, incorporada com aração e gradagem e com subsolagem e gradagem) nos atributos físico-hídricos de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Verificar a ocorrência de alterações na estrutura de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico submetido à calagem, com diferentes modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)];
- (ii) Determinar a influência da calagem e do modo de aplicação do calcário na retenção de água pelo solo;
- (iii) Analisar a distribuição de poros no solo submetido à correção da acidez por diferentes modos de aplicação do calcário.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A REGIÃO CENTRO-SUL PARANAENSE E A PRODUÇÃO AGRÍCOLA

A região Centro-Sul do Paraná é composta por 20 municípios e é dividida geograficamente pela Serra da Esperança, a qual delimita o segundo planalto (ao leste) do terceiro planalto paranaense (ao oeste). A maioria dos municípios (14), entre eles Irati, estão localizados ao leste da Serra da Esperança, que é caracterizada por uma topografia ondulada a forte ondulada (ASSIS; ROMEIRO, 2005).

Nesta região predominam sistemas de produção baseados na agricultura familiar, sendo que as principais culturas produzidas são o milho e o feijão (ASSIS; ROMEIRO, 2005). A agricultura familiar tem grande participação na produção de alimentos para o consumo direto, além de uma importante função social, relacionada com a geração de empregos no campo e com o êxodo rural (GUILHOTO et al., 2006; TRICHES; SCHNEIDER, 2010).

Considerando que neste sistema produtivo, as propriedades agrícolas são de menor porte, assim como seu nível tecnológico e, geralmente, os agricultores possuem menor poder aquisitivo, a sua produção torna-se limitada e dependente de recursos próprios (GUILHOTO et al., 2006; GUANZIROLI et al., 2012). Neste contexto, destaca-se a importância de estudos que busquem maximizar a produção agrícola na agricultura familiar, como a correção da acidez dos solos da região centro-sul paranaense.

3.2 ACIDEZ DO SOLO E SUA CORREÇÃO

A elevada acidez é uma característica comum de solos de regiões tropicais e subtropicais (SPARKS, 2003; CAIRES et al., 2008; SPOSITO, 2008; JORIS et al., 2013). Nestas condições, em função do material de origem e do intenso processo de intemperismo ocorre a remoção de cátions de caráter básico [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+})] do complexo de troca, com consequente acúmulo de cátions ácidos [alumínio (Al^{3+}), hidrogênio (H^{+}) e manganês (Mn^{2+})]. Em solos cultivados, o processo de acidificação pode ser atribuído: (i) à absorção e exportação de cátions básicos pelas culturas; (ii) à nitrificação do amônio

3.3 EFEITOS DA CALAGEM EM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO

A calagem atua aumentando o pH do solo, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e precipitando o Al^{3+} em espécies menos tóxicas às plantas (CAIRES et al., 1998; 2003). A calagem também promove aumento no teor de fósforo (P) disponível e no teor de carbono orgânico (CO) (NOVAIS; SMITH, 1999; BRIEDIS et al., 2012). Diante de tais benefícios, a calagem tem sido destacada como uma das práticas que promove maior sustentabilidade do agroecossistema.

Além dos efeitos da calagem sobre os atributos químicos do solo, ela também tem efeitos sobre a estrutura do solo (BRONICK; LAL, 2005). De acordo com estes autores, cátions como o Al^{3+} e Ca^{2+} atuam como agentes de ligação, diretamente ou indiretamente através de pontes catiônicas com a matéria orgânica do solo, entre as partículas de argila.

A calagem também pode atuar indiretamente sobre a estruturação do solo. A correção da acidez por meio da aplicação de calcário diminui os efeitos tóxicos do Al^{3+} e aumenta os teores de Ca^{2+} e P disponível no solo, o que favorece o crescimento radicular das plantas. O maior crescimento de raízes aumentará a agregação do solo, visto que as raízes de algumas plantas (principalmente poáceas) agem como agentes temporários de ligação de partículas de solo (TISDALL; OADES, 1982).

Os resultados de pesquisas sobre a influência da correção da acidez do solo, por meio da calagem, nos atributos físico-hídricos do solo são contrastantes. Em alguns trabalhos são reportados efeitos negativos da correção da acidez, como aumento da dispersão de argilas, redução da floculação, da estabilidade de agregados e da infiltração de água no solo (GHANI et al., 1955; ROTH; PAVAN, 1991; HAYNES; NAYDU, 1998; ALBUQUERQUE et al., 2003; SIX et al., 2004). Em outros, são destacados os efeitos positivos, como aumento do armazenamento de água e da estabilidade dos agregados (CASTRO FILHO; LOGAN, 1991; CHAN; HEENAN, 1998; SIX et al., 2004; BRIEDIS et al., 2012). Ainda, há trabalhos que demonstram que esta prática não exerce influência sobre os atributos físicos do solo (TORMENA et al., 1998; COSTA et al., 2004).

Um outro aspecto a ser destacado são as condições de solo destes estudos. Normalmente, tratam-se de Latossolos, com ampla variação nos teores de areia e argila, porém baixas quantidades de silte e teores de Al^{3+} não muito elevados (ROTH; PAVAN, 1991; TORMENA et al., 1998; ALBUQUERQUE et al., 2003; COSTA et al., 2004; BRIEDIS et al., 2012). Também há resultados de trabalhos em colunas de solo desestruturado, o que restringe

a extrapolação dos resultados para condições de campo (GHANI et al., 1955; SPERA et al., 2008).

Embora os Latossolos sejam a principal classe de solo do Paraná, ocupando 31,0 % do território, ocorrem outras classes de solo no Estado, como Neossolos (22,0 %), Argissolos (15,5 %) e Cambissolos (11,0 %) (LIMA et al., 2012). Especificamente, na região Centro-Sul do Paraná, há predomínio de Cambissolos, Argissolos e Nitossolos derivados de rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos), as quais tendem a formar solos pobres em Ca^{2+} , Mg^{2+} , P e ricos em Al^{3+} (BOGNOLA et al., 2004; ASSIS; ROMEIRO, 2005; MINEROPAR, 2005). Pela expressividade de áreas agrícolas sob Cambissolos, principalmente na região Centro-Sul paranaense, ressalta-se a importância e a necessidade de realizar estudos sobre os efeitos da calagem nos atributos físico-hídricos destes solos.

3.4 RETENÇÃO DE ÁGUA E DISTRIBUIÇÃO DE POROS NO SOLO

A retenção de água pelo solo é explicada por forças que atuam sobre a matriz desse meio poroso relacionadas aos fenômenos de capilaridade e adsorção, os quais em conjunto originam o chamado potencial mátrico da água no solo (Ψ_m). Ressalta-se que é praticamente impossível separar os dois componentes de Ψ_m . No geral, assume-se que a partir da drenagem livre de um solo saturado, a capilaridade é dominante e, à medida em que o solo seca, a adsorção passa a ser mais importante (LIBARDI, 2012).

A relação entre Ψ_m e o conteúdo de água no solo (θ) dá origem a uma curva característica de retenção de água (CRA), uma importante propriedade hidráulica do solo (KLUTE, 1986; DANE et al., 2002). De acordo com Klute (1986) e Dane et al. (2002), a CRA é determinada experimentalmente em laboratório, aferindo-se θ em uma amostra indeformada ou deformada de solo após a aplicação de sucessivos incrementos de Ψ_m sobre a mesma.

A partir dos dados experimentais, ajustam-se as CRAs. Existem diferentes modelos matemáticos que podem ser usados para o ajuste da CRA e cada um desses pode fornecer informações distintas sobre a estrutura do solo (PIRES et al., 2008b). O modelo matemático mais comumente utilizado para o ajuste das CRAs é o de van Genuchten (1980). Esse modelo é caracterizado por apresentar duas assíntotas, relacionadas aos conteúdos de água no solo correspondentes à saturação (θ_s) e ao conteúdo residual (θ_r), e um ponto de inflexão

entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (α , n e m).

Quando o espaço poroso do solo não sofre modificações, a relação entre θ e Ψ_m torna-se uma propriedade física do solo. Deste modo, a partir da primeira derivada da CRA, em função do Ψ_m , é possível obter-se uma curva de distribuição de poros (CDP) do solo (JURY et al., 1991; KASTANEK; NIELSEN, 2001; PIRES et al., 2008b; LIBARDI, 2012).

O ajuste da CRA através do modelo matemático de van Genuchten gera a obtenção de um pico na CDP, permitindo a identificação de regiões de raio de poros em que ocorre a maior frequência de tamanhos de poros, fornecendo informações de forma indireta sobre a estrutura do solo (PIRES et al., 2008b).

Em literatura, os trabalhos relacionando a retenção de água e a distribuição de poros do solo com a calagem incorporada por diferentes modos de aplicação do calcário são escassos. Deste modo, devem ser realizados mais estudos sobre os efeitos desta importante prática agrícola sobre os atributos físico-hídricos do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E OBJETO DE ESTUDO

Instalou-se o experimento em maio de 2012, em uma propriedade rural familiar, situada no Distrito do Cerro da Ponte Alta (latitude: 25° 28' 0,66 S, longitude: 50° 54' 14,13 O e altitude média de 821 m), no município de Irati (PR), em um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico (SANTOS et al., 2013) de textura argilo-siltosa. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é Cfb (clima subtropical úmido), com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C, ocorrência de geadas frequentes (mesotérmico), verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (IAPAR, 2009). A precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 1601 mm, sendo o mês de agosto o mais seco e o de janeiro o mais chuvoso (Figura 1).

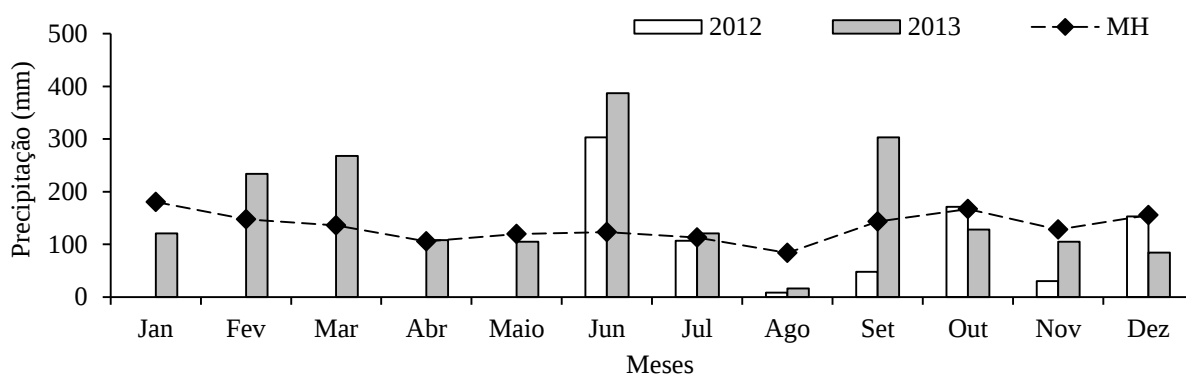


Figura 1 – Média histórica (MH)* de precipitação pluvial no período 1963-2013, e ocorrida entre maio de 2012 e dezembro de 2013. *Adaptado de Iapar (2014).

O solo estudado tem sua gênese sob a Formação Teresina, tendo como materiais de origem, principalmente, rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos) e ígneas intrusivas (MINEROPAR, 2005; BENASSI, 2008). A mineralogia dos solos da região é composta basicamente por minerais primários (muscovita, quartzo e feldspato) e secundários (caulinita, ilita, óxidos de ferro e gibbsita) (MARTINS, 2010).

A área do local de estudo foi convertida de mata (floresta ombrófila mista) à pastagem de grama missioneira gigante (*Axonopus catharinenses*) há mais de 40 anos. Desde a conversão, nunca foram realizadas práticas de correção da acidez do solo ou de adubação da forrageira. O método de pastejo empregado sempre foi contínuo com uma baixa taxa de lotação.

Todavia, pelas restrições químicas do solo por ocasião da implantação do experimento (Tabela 1), a pastagem encontrava-se em estágio avançado de degradação.

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos na camada 0-0,20 m do CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso antes da instalação do experimento (maio de 2012).

pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC _(pH 7,0)
----- cmol _c dm ⁻³ -----						
3,7	17,6	5,3	1,0	0,6	0,46	19,66
P	CO	Areia	Silte	Argila	V	M
----- g kg ⁻¹ -----						
mg dm ⁻³						%
2,7	28,3	40	467	493	10	72

pH= potencial hidrogeniônico em CaCl₂; H+Al= acidez potencial; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺= alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; CTC_(pH 7,0)= capacidade de troca de cátions potencial; P= fósforo disponível (Melich-1); CO= carbono orgânico (Walkley-Black); V e m= saturação por bases e por alumínio, respectivamente.

4.2 CARACTERIZAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Em função do reduzido tamanho e uniformidade da área experimental, não se empregou um delineamento experimental clássico ao experimento. O mesmo constitui-se de um experimento em faixas, com tratamentos em arranjo fatorial (3 × 2), sem repetições. Cada faixa, possuía área total de 600 m² (30 × 20 m – comprimento e largura), enquanto que as parcelas tinham área total de 150 m² (30 × 5 m – comprimento e largura). Para o efeito das bordaduras, desprezou-se 1 m de cada extremidade das subparcelas.

Os tratamentos constituíam-se da combinação de duas doses de calcário (0 e 15 Mg ha⁻¹) e três modos de aplicação do calcário [na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e subsolagem e gradagem (CISG)]. A dose de 0 (zero) Mg ha⁻¹ foi considerada como controle e a dose de 15 Mg ha⁻¹ foi utilizada visando elevar a saturação por bases do solo (V) a 70 %. O calcário utilizado apresentava poder de neutralização (PN) de 100,57 %, reatividade (RE) de 74,67 %, poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75,10 % e teores de CaCO₃, CaO, MgO e água de 485, 285, 200 e 100 g kg⁻¹, respectivamente.

Nos tratamentos que envolveram revolvimento do solo para incorporação, a aplicação foi realizada em duas etapas: 50 % da dose antes da primeira operação de manejo (aração ou subsolagem); e, os 50 % restantes depois da operação, porém, antecedendo a gradagem de nivelamento (igual para ambos os modos de incorporação), conforme recomendado por van Raij et al. (1985). Nos tratamentos com CS, o corretivo foi aplicado sobre a superfície em dose única.

Para a operação de aração foi utilizado um arado de discos reversível, modelo AR-3x28" TM (Lavrale[®]), com três discos de 28". Para a operação de subsolagem foi utilizado um subsolador, modelo JMHS-5 (Jan[®]), equipado com cinco hastes de formato parabólico, espaçadas em 0,40 m. Ambas as operações de aração e subsolagem foram realizadas à 0,25 m profundidade de trabalho. Após serem realizadas essas operações foi efetuada uma gradagem, utilizando-se uma grade niveladora, modelo NV (Baldan[®]), com 32 discos de 20", espaçados em 0,175 m, à 0,10 m de profundidade.

Depois de aplicados os tratamentos de calagem, semeou-se superficialmente um consórcio de aveia preta cv. Iapar 61 (50 kg ha⁻¹) + ervilhaca peluda (50 kg ha⁻¹), para a cobertura do solo durante a estação de outono-inverno de 2012. Em agosto de 2012, realizou-se o manejo da fitomassa com o herbicida Glyphosate (3 L ha⁻¹). Aos 30 dias após a dessecação, procedeu-se a semeadura da cultura do milho, variedade IPR 164 em espaçamento de 0,90 m entre as linhas e densidade de aproximadamente sete sementes por metro, sem operações que envolvam a mobilização do solo, isto é, em sistema de semeadura direta. Os tratamentos fitossanitários foram realizados conforme necessidades da cultura com o uso de pulverizador costal, nos dois anos de cultivo, assim como o manejo da fitomassa. Para o ano de 2013 repetiu-se a mesma sucessão de cultivo.

Para a semeadura do milho, no ano de 2012, utilizou-se uma semeadora-adubadora de cinco linhas, modelo PCR 2225 (Seed Max[®]), equipada apenas com discos de corte liso (16") para abertura do sulco, e disco duplo defasado (13" × 14") para deposição de adubo e semente, seguida de roda angular reta. Para o ano de 2013, a semeadura foi efetuada com uma semeadora-adubadora de sete linhas, modelo JM 3060 (Jumil[®]), equipada apenas com discos de corte liso (17") para abertura do sulco, e disco duplo desencontrado (16") para deposição de adubo e semente, seguida de conjunto compactador flutuante "V". A adubação de base da cultura em ambos os anos constitui-se da aplicação de 25,60; 57,60 e 51,20 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. Quando as plantas se encontravam em estágio V4, foram aplicados 60 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. As colheitas da cultura foram realizadas manualmente nos meses de maio de 2012 e 2013.

4.3 AMOSTRAGENS E ANÁLISES LABORATORIAIS

Aos 18 meses após a calagem, cerca de 30 dias após a semeadura do milho, procedeu-se a coleta de quatro amostras indeformadas por parcela nas entrelinhas da cultura, nas camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m do solo, com o auxílio de anéis volumétricos em aço inox e um amostrador de Uhland. Foram utilizados anéis volumétricos com volumes distintos nas coletas, visando a otimização da construção das CRAs. Os tamanhos dos anéis utilizados foram $\approx 100 \text{ cm}^3$ ($\approx 0,05 \times \approx 0,05 \text{ m}$ – diâmetro externo e altura) e $\approx 50 \text{ cm}^3$ ($\approx 0,05 \times 0,03 \text{ m}$ – diâmetro externo e altura) para os maiores e menores Ψ_m aplicados na determinação da CRA, respectivamente. Após a coleta as amostras foram envoltas em filme plástico até serem preparadas.

Após o devido preparo, as amostras indeformadas foram saturadas pelo processo de ascensão capilar (KLUTE, 1986). Depois da saturação, aplicaram-se os seguintes Ψ_m : -0,5; -1; -2; -4; -6; -8 e -10 kPa nas amostras maiores, em mesa de tensão (modelo M1-0801, Heijkamp[®]), -33; -100 e -500 kPa para as amostras menores e -1500 kPa em amostras deformadas, em câmaras de Richards (modelo 1500, Soil Moisture Equip. Corp.[®]). Na sequência da aplicação do último Ψ_m , as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por um período de 24 h para determinação do conteúdo de água no solo, inicialmente à base de massa (U , kg kg^{-1}) e, posteriormente, à base de volume (θ , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). Utilizou-se para a conversão de U em θ , a relação existente entre U e a densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}), esta última determinada pelo método do anel volumétrico. A porosidade total (P_t , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi determinada pela saturação do solo, neste caso $\theta_s = P_t$ (DANE et al., 2002).

Próximo aos pontos de coleta das amostras indeformadas foram coletadas quatro amostras com estrutura deformada, as quais foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C por 24 h, destorroadas, moídas e peneiradas em malha de 2,0 mm para obtenção da fração de terra fina seca em estufa (TFSE). A partir da TFSE determinou-se:

(i) Os teores de areia, silte e argila (g kg^{-1}), com tratamento preliminar das amostras com secagem em estufa a 105 °C por 12 h, com posterior oxidação do CO com peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Inicialmente pesaram-se 40 g de TFSE tratada e adicionaram-se 100 mL de dispersante químico [hidróxido de sódio (NaOH) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$] nas amostras. Posteriormente, as mesmas foram submetidas à dispersão mecânica mediante a agitação por 16 h, em mesa agitadora pendular à 120 oscilações min^{-1} . Após a agitação, a fração areia foi separada por tamisamento com peneira de 53 μm , enquanto as frações silte e argila separadas

pela Lei de Stokes utilizando-se um tempo de sedimentação de 2 h e com leitura por meio de densímetro de Bouyoucos (DANE et al., 2002);

(ii) O teor de argila dispersa em água (ADA, g kg^{-1}), sem tratamento prévio das amostras. Adicionaram-se 100 mL de água deionizada em 40 g de TFSE para posterior agitação por 16 h em mesa agitadora pendular à 120 oscilações min^{-1} . Após a agitação, a fração não dispersa foi separada por tamisamento com peneira de 53 μm e a leitura da fração de argila dispersa foi realizada após 2 h de sedimentação com um densímetro de Bouyoucos (EMBRAPA, 1997);

(iii) O grau de floculação (GF, %), calculado pela relação entre os teores de argila total (AT) e de ADA $[\text{GF} = (\text{AT} - \text{ADA}) / \text{AT}]$ (EMBRAPA, 1997);

(iv) O teor de carbono orgânico (CO, g kg^{-1}), pela oxidação via úmida de 1 g de TFSE com 10 mL de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0,2 mol L^{-1} em meio ácido (10 mL de H_2SO_4) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_6]$, 0,05 mol L^{-1} , conforme adaptação do método Walkley-Black (van RAIJ et al., 2001);

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

(vi) Os cátions básicos trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados em solução de KCl 1,0 mol L^{-1} , relação solo:solução 1:10 (v/v), por titulação com EDTA 0,025 mol L^{-1} ; e K^+ em solução de Mehlich-1, relação solo:solução 1:10 (v/v), e leitura por espectrofotometria de emissão em chama (PAVAN et al., 1992).

4.4 MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTES DOS DADOS

As CRAs foram ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980) (Equação 1), com a restrição de Muallem (1986) (Equação 2). Para o ajuste foi utilizado o conjunto de dados de θ e Ψ_m de todas as repetições dos tratamentos.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad , \quad (\text{Equação 1})$$

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n} \right) \quad , \quad (\text{Equação 2})$$

onde θ_s e θ_r são os conteúdos de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) de saturação e residual, respectivamente; Ψ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa); e, α , m e n parâmetros empíricos da equação de ajuste determinados pelo software SWRC Fit (SEKI, 2007).

O modelo de van Genuchten foi utilizado para se obter o ajuste das CRAs até o Ψ_m referente ao ponto de murcha permanente (-1500 kPa). A partir dos dados ajustados, foram obtidos valores de diferença relativa (DR, %) (Equação 3) entre os valores de θ para os diferentes Ψ_m visando facilitar a análise de diferenças observadas nas CRAs em função dos distintos tratamentos:

$$DR = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} 100 \quad , \quad (\text{Equação 3})$$

onde θ_1 e θ_2 são os conteúdos de água com e sem calagem incorporado com preparo reduzido, por exemplo, 1 com e 2 sem calagem.

As curvas de distribuição de poros (CDP) foram obtidas a partir da primeira derivada das CRAs em função do Ψ_m (JURY et al., 1991) (Equação 4):

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

A partir dos dados das CRAs também determinou-se a porosidade livre de água ($\theta_s - \theta_i$), calculada pela diferença entre θ_s e θ , para raios de poro (r) até o Ψ_m de -33 kPa. Os r foram calculados a partir do rearranjo e simplificação da equação de Laplace (LIBARDI, 2012) (Equação 5):

$$r = \frac{1490}{h} \quad , \quad (\text{Equação 5})$$

onde r representa os raios de poros (μm) e h o potencial mátrico da água no solo ($\text{cm H}_2\text{O}$).

Buscando facilitar a interpretação das CDPs, procedeu-se a separação das classes de poros (macro, micro e criptoporos) a partir da CRAs. Nessa classificação: os

macroporos apresentam raios $\geq 25 \mu\text{m}$ e foram obtidos pelas diferenças entre θ_s e θ no Ψ_m de -6 kPa; os microporos possuem raios no intervalo de 0,1-25 μm , sendo obtidos pela diferença entre θ nos Ψ_m de -6 e -1500 kPa; e os criptoporos têm raios $\leq 0,1 \mu\text{m}$ e são provenientes da diferença entre θ_s e θ no Ψ_m de -1500 kPa (KLEIN; LIBARDI, 2002).

4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Aplicou-se aos dados de ambas as camadas de solo avaliadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m), o modelo estatístico da análise de variância de experimentos inteiramente aleatorizados em arranjo fatorial (2×3), com quatro repetições. As pressuposições de normalidade dos resíduos e homocedasticidade foram verificadas utilizando-se os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Atendidas as pressuposições realizou-se o teste F. Quando necessário, o teste Tukey foi aplicado para comparação de médias entre os tratamentos.

Em casos de interações significativas dos atributos físicos do solo e para os valores de θ_s e nos Ψ_m de -10, -33 e -1500 kPa, foram realizadas análises de correlação linear simples. Todos os procedimentos inferenciais foram feitos considerando os níveis de 1 e 5 % de significância. As análises estatísticas foram processadas com auxílio do software R, versão 3.0.2 (R CORE TEAM, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ATRIBUTOS ESTRUTURAIS

A calagem bem como a interação desta com os modos de aplicação do calcário não afetaram os teores de ADA da camada 0-0,10 m. Entretanto, houve efeitos isolados do modo de aplicação do corretivo nesta camada (Tabela 2), sendo que a ordem de dispersão das partículas entre os modos de aplicação foi CISG > CIAG > CS (Figura 2b).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância da argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), densidade (Ds) e porosidade total (Pt) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem e do modo de aplicação do calcário.

Fontes de variação	GL	Quadrados médios			
		ADA	GF	Ds	Pt
Camada 0-0,10 m					
Calagem	1	972,80 ^{ns}	24,04 ^{ns}	0,0234 ^{**}	0,0172 ^{**}
Modo de aplicação	2	7901,80 ^{**}	219,24 ^{**}	0,0942 ^{**}	0,0532 ^{**}
Calagem vs. Modo de aplicação	2	1280,80 ^{ns}	60,07 [*]	0,0244 ^{**}	0,0485 ^{**}
Resíduo	18	427,50	15,86	0,0026	0,0012
CV (%)		8,13	8,22	4,89	5,86
Camada 0,10-0,20 m					
Calagem	1	3723,3 [*]	10,99 ^{ns}	0,0026 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Modo de aplicação	2	5590,7 ^{**}	265,33 ^{**}	0,0110 ^{**}	0,0002 ^{ns}
Calagem vs. Modo de aplicação	2	1191,4 ^{ns}	83,55 ^{ns}	0,0089 [*]	0,0004 ^{ns}
Resíduo	18	459,7	43,33	0,0016	0,0005
CV (%)		7,16	16,82	3,79	3,58

GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação; ^{ns} = não significativo; ^{**} e ^{*} = significativo aos níveis de 1 e 5 % de probabilidade de erro.

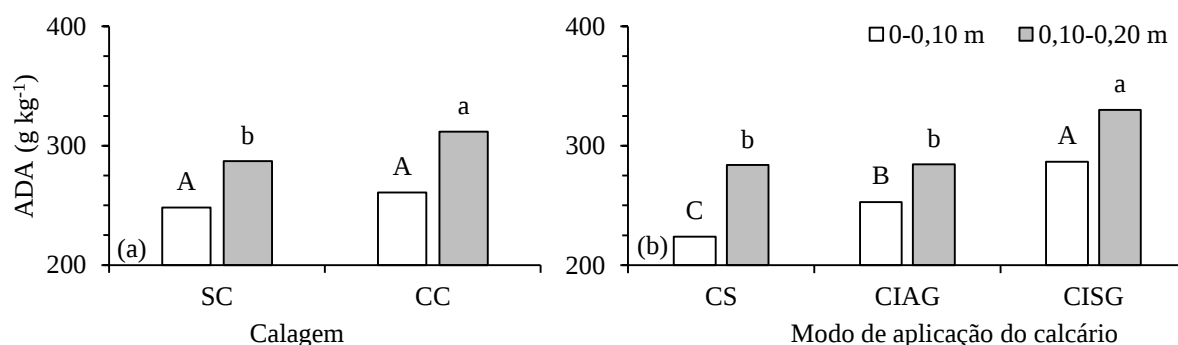


Figura 2 – Argila dispersa em água (ADA) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modo de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolação e gradagem (CISG)] (b). Médias seguidas de mesma letra maiúscula para camada 0-0,10 m e minúscula para 0,10-0,20 m não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A dispersão de partículas de argila no solo ocorre em nível de microagregados ($< 250 \mu\text{m}$), sendo um processo dependente das condições físicas e químicas do meio (CARVALHO JÚNIOR et al., 1998). Por sua vez, o revolvimento do solo é um fator fundamental para a ruptura de seus macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$), o que pode não aumentar o teor de ADA, dependendo da intensidade e frequência do revolvimento, mas sim a proporção de microagregados (EDWARDS; BREMNER, 1967; CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004).

Sistemas que envolvem o revolvimento mínimo do solo tendem a apresentar agregados maiores, possivelmente pela não destruição dos macroagregados nas operações de revolvimento e pela proteção física da palhada sobre a superfície do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004). Neste caso, o menor teor de ADA de CS em relação a CIAG e CISG (Figura 2b) era um resultado esperado, devido à preservação dos macroagregados do solo.

Em relação aos demais tratamentos, deve-se considerar que tanto CIAG como CISG apresentam mobilização da estrutura do solo, entretanto em diferentes intensidades (DOMZAL; SLOWILQSKA-JURKIEWICZ, 1987; FALLEIRO et al., 2003). Todavia, a maior mobilização de CIAG em relação ao CISG não repercutiu em um maior teor de ADA na camada 0-0,10 m (Figura 2b), o que pode estar relacionado com os maiores teores de argila do CISG em relação ao CIAG (Tabela 3).

Cátions polivalentes, como o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , atuam como pontes catiônicas entre o CO e fração argila para a formação de microagregados no solo (EDWARDS; BREMNER, 1967; TIDALL; OADES, 1982; ROTH; PAVAN, 1991; BALDOCK et al., 1994; SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012). Deste modo, considerando que os teores de argila do CISG foram maiores, enquanto que os teores de CO, Ca^{2+} e Mg^{2+} (Tabelas 3 e 4) foram similares entre CIAG e CISG, a formação de pontes catiônicas pode ter sido insuficiente para a formação de microagregados entre as frações orgânicas e minerais do CISG, favorecendo a dispersão de partículas.

A explicação para a ausência de efeito da calagem sobre a ADA da camada 0-0,10 m (Figura 2a) pode ser atribuída à flocculação das partículas de argila inicialmente dispersas devido ao longo período entre a aplicação do corretivo e a coleta das amostras (18 meses), similarmente ao que ocorre em solos tropicais oxídicos de carga variável.

Tabela 3 – Teores de areia, site, argila e carbono orgânico (CO) das camadas 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modo de aplicação do corretivo [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Modo de aplicação	Sem calagem				Com calagem			
	Areia	Silte	Argila	CO	Areia	Silte	Argila	CO
Camada 0-0,10 m	----- g kg ⁻¹ -----							
CS	46 Aa	460 Aa	494 Aab	29,53 Aa	48 Aa	461 Aa	491 Aa	30,98 Aa
CIAG	51 Aa	494 Aa	455 Ab	26,73 Aa	57 Aa	464 Aa	479 Aa	31,08 Aa
CISG	30 Aa	443 Aa	527 Aa	30,25 Aa	32 Aa	449 Aa	519 Aa	30,67 Aa
Camada 0,10-0,20 m								
CS	54 Aa	449 Aa	497 Aa	20,29 Ab	37 Bab	418 Aa	545 Aa	19,26 Aa
CIAG	43 Aa	496 Aa	461 Aa	25,17 Aa	43 Aa	483 Aa	474 Aa	19,67 Ba
CISG	21 Ab	504 Aa	475 Aa	21,75 Aab	24 Ab	464 Aa	512 Aa	21,43 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula para calagem e minúscula para modos de aplicação do calcário não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tabela 4 – Acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al³⁺) e teores de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modo de aplicação do calc [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Modo de aplicação	Sem calagem						Com calagem					
	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Camada 0-0,10 m	CaCl ₂	----- cmol _c dm ⁻³ -----					CaCl ₂	----- cmol _c dm ⁻³ -----				
CS	3,7 Ba	17,28 Aa	4,60 Aa	1,48 Ba	1,25 Ba	0,52 Bb	4,8 Aa	7,03 Ba	0,15 Ba	7,43 Aa	3,83 Ac	0,92 Aa
CIAG	4,1 Ba	15,79 Aa	3,68 Ab	2,10 Ba	1,38 Ba	0,92 Aa	5,2 Aa	6,65 Ba	0,05 Ba	7,40 Aa	5,15 Ab	0,79 Aa
CISG	3,7 Ba	17,15 Aa	3,83 Aab	1,63 Ba	1,25 Ba	0,76 Aab	5,2 Aa	6,59 Ba	0,13 Ba	7,50 Aa	6,18 Aa	0,78 Aa
Camada 0,10-0,20 m												
CS	3,7 Aa	18,99 Aa	6,53 Aa	0,58 Aa	0,55 Aa	0,46 Aa	3,7 Ab	17,94 Aa	5,48 Aa	1,13 Ab	1,20 Ab	0,69 Aa
CIAG	4,0 Ba	17,72 Aa	4,83 Aa	1,38 Ba	1,35 Ba	0,34 Aa	4,5 Aa	11,03 Bb	2,30 Bb	4,35 Aa	3,65 Aa	0,51 Aa
CISG	3,6 Ba	19,87 Aa	6,30 Aa	0,88 Ba	0,73 Ba	0,50 Aa	4,2 Aab	10,24 Bb	2,65 Bab	4,10 Aa	3,38 Aa	0,55 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula para calagem e minúscula para modos de aplicação do calcário não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

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

Na camada 0,10-0,20 m o teor de ADA foi afetado pela calagem e pelo modo de aplicação do calcário, mas não foi influenciado pela interação desses (Tabela 2). Com a calagem (CC), houve aumento da dispersão de partículas de argila (Figura 2a), o que pode ser atribuído à menor reação do corretivo nessa camada. A calagem promoveu aumento de pequena magnitude no pH no solo em CIAG e CISG, como consequência houve aumento pouco expressivo da precipitação de Al^{3+} e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Tabela 4). Deste modo, o aumento de cargas elétricas negativas pela calagem e o menor teor de cátions polivalentes podem ter dificultado a floculação de partículas de argila nesta camada.

Em relação aos efeitos dos modos de aplicação do calcário sobre o teor de ADA na camada 0,10-0,20 m, CS e CIAG apresentaram valores estatisticamente iguais e inferiores ao CISG (Figura 2b). Assim como na camada 0-0,10 m, o menor teor de ADA de CS pode ser atribuído a proteção dos macroagregados pela ausência de revolvimento do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004). A igualdade entre os teores de ADA de CIAG e CS (Figura 2b) pode ter ocorrido em função dos maiores teores de CO, Ca^{2+} e Mg^{2+} do CIAG (Tabelas 3 e 4), o que favorece o processo de agregação do solo (EDWARDS; BREMNER, 1967; TIDALL; OADES, 1982; ROTH; PAVAN, 1991; BALDOCK et al., 1994; SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012).

O maior teor de ADA do CISG na camada 0,10-0,20 m (Figura 2b) pode ser atribuído ao efeito conjunto dos maiores teores de argila e silte e menores de CO (Tabela 4). Pieri (1992) demonstrou que a degradação da estrutura do solo, em relação a sua resiliência (capacidade do solo se reestruturar naturalmente frente a uma deformação), pode ser

quantificada com base no “índice de estabilidade estrutural”, uma relação entre o teor de CO e de argila e silte. Estes autores destacam que, o baixo teor de CO em relação a altos teores de argila e silte indicam um alto risco de degradação da estrutura do solo, conforme observado neste trabalho.

Assim como ocorrido para o teor de ADA na camada 0-0,10 m, a calagem não influenciou o GF (Tabela 2). Todavia, nesta camada, o modo de aplicação do calcário e a interação destes com a calagem afetaram o GF. Sem a calagem, o GF do CS foi maior que CIAG e CISG, os quais foram estatisticamente iguais (Figura 3). O maior GF de CS pode ser atribuído ao menor teor ADA deste tratamento (Figura 3b) e a proteção dos macroagregados do solo pela ausência de seu revolvimento (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004).

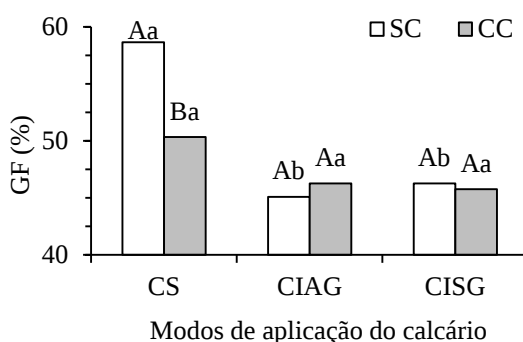


Figura 3 – Grau de floculação (GF) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]. Médias seguidas de mesma letra maiúscula para calagem e minúscula para modos de aplicação do calcário não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Dentro dos modos de aplicação do calcário, a calagem influenciou o GF apenas em CS (Figura 3). Para este modo de aplicação, o GF apresentou correlação negativa com a acidez ativa (pH) e com os teores de cátions básicos trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}) e positiva com a acidez potencial (H^{+}Al) e trocável (Al^{3+}) (Tabela 5).

Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson do grau de floculação (GF), densidade (Ds) e porosidade total (Pt) com os teores de areia, silte, argila, carbono orgânico (CO), acidez ativa (pH), potencial (H+Al), trocável (Al^{3+}) e teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), GF e argila dispersa em água (ADA) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem com calcário aplicado na superfície.

Atributo	GF	Ds	Pt
Areia	0,31 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,19 ^{ns}
Silte	-0,31 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
Argila	0,22 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,09 ^{ns}
CO	-0,32 ^{ns}	-0,40 ^{ns}	0,41 ^{ns}
pH	-0,84 ^{**}	-0,96 ^{**}	0,97 ^{**}
H+Al	0,86 ^{**}	0,96 ^{**}	-0,99 ^{**}
Al^{3+}	0,86 ^{**}	0,96 ^{**}	-0,98 ^{**}
Ca^{2+}	-0,88 ^{**}	-0,95 ^{**}	0,97 ^{**}
Mg^{2+}	-0,77 [*]	-0,89 ^{**}	0,92 [*]
K^+	-0,79 [*]	-0,91 ^{**}	0,85 ^{**}
ADA	-0,87 ^{**}	-0,84 ^{**}	0,84 ^{**}
GF	-----	0,87 ^{**}	-0,82 [*]

^{ns} = não significativo; ^{**} e ^{*} = significativo aos níveis de 1 e 5 % de probabilidade de erro.

A correlação negativa entre os cátions básicos trocáveis e positiva entre o Al^{3+} com o GF do CS (Tabela 5) indicam que quando o solo apresenta naturalmente altos teores de Al^{3+} , a sua substituição pelo aumento da concentração de Ca^{2+} , principalmente, Mg^{2+} e K^+ não é suficiente para flocular as partículas de argila dispersas. Este resultado pode ser atribuído a valência destes cátions, pois quanto maior à valência do íon maior sua resistência à dispersão (RUSSEL, 1973).

Na camada 0,10-0,20 m não houve efeito da calagem ou da interação desta com os modos de aplicação do calcário para o GF (Tabela 2). Entretanto, este foi influenciado pelos modos de aplicação do calcário (Figura 4). A não significância da calagem (Figura 4a) pode estar relacionada com a menor reação do calcário nesta camada (Tabela 4), mesmo com a incorporação ocorrida em CIAG e CISG.

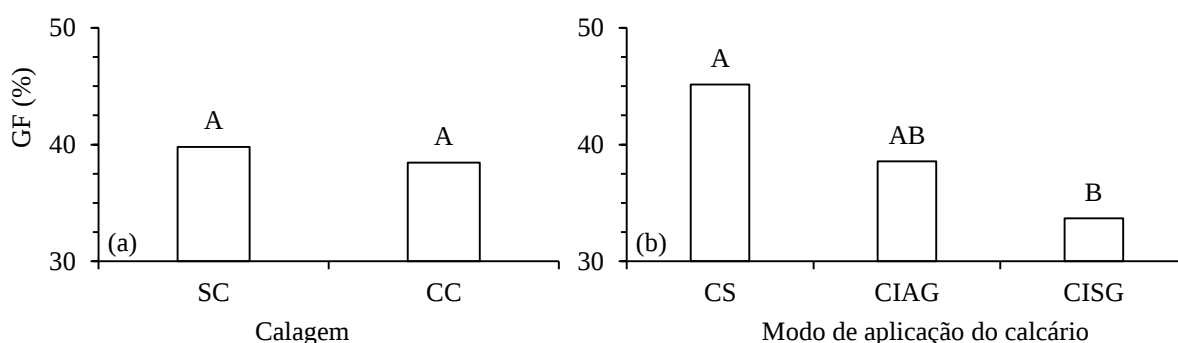


Figura 4 – Grau de floculação (GF) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)] (b). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Entre os modos de aplicação do calcário, CS apresentou GF da camada 0,10-0,20 m superior ao CISG, enquanto que CIAG não diferiu destes modos de aplicação do calcário (Figura 4b). Novamente, a preservação dos macroagregados do solo, pela ausência de preparo, repercutiu em maior GF para CS (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004). A similaridade entre o GF de CS e CIAG, que apresenta intensa desagregação do solo nesta camada, pode ser devido a incorporação de CO em profundidade (Tabela 3), pois o CO atua como um importante agente cimentante no solo (TISDALL; OADES, 1982; ROTH; PAVAN, 1991; CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012). Neste contexto, observa-se que a subsolagem empregada em CISG não promoveu a incorporação de CO no perfil (Tabela 3), porém houve a mobilização da estrutura do solo. Deste modo, CS naturalmente deveria apresentar maior GF em relação a CISG, pelo revolvimento do solo, e, mesmo esse apresentando uma menor mobilização da estrutura em relação ao CIAG, o seu menor teor de CO pode ser insuficiente para agregar suas partículas finas (argila e silte), presentes em maior quantidade neste tratamento em relação aos demais (Tabela 3) (PIERI, 1992).

A Ds e a Pt da camada 0-0,10 m foram influenciadas pela calagem, pelos modos de aplicação do calcário e pela interação destes (Tabela 2). Sem a calagem, houve redução da Ds e aumento da Pt desta camada para CIAG e CISG, os quais não diferiram entre si (Figuras 5a e 6). Considerando que tanto CIAG como CISG apresentam mobilização da estrutura do solo em diferentes intensidades, a similaridade entre esses preparos pode ser atribuída à operação de gradagem realizada em ambos tratamentos após as operações de aração e subsolagem, respectivamente.

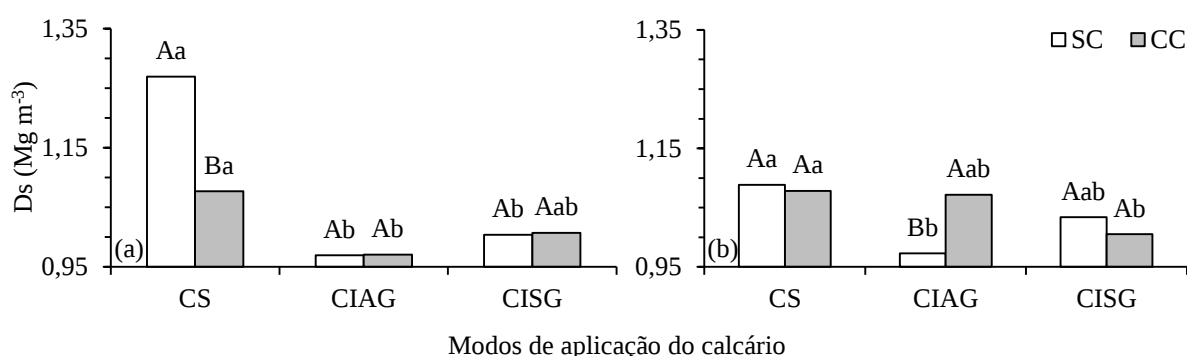


Figura 5 – Densidade (Ds) das camadas 0-0,10 (a) e 0,10-0,20 m (b) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]. Médias seguidas de mesma letra maiúscula para calagem e minúscula para modos de aplicação do calcário não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

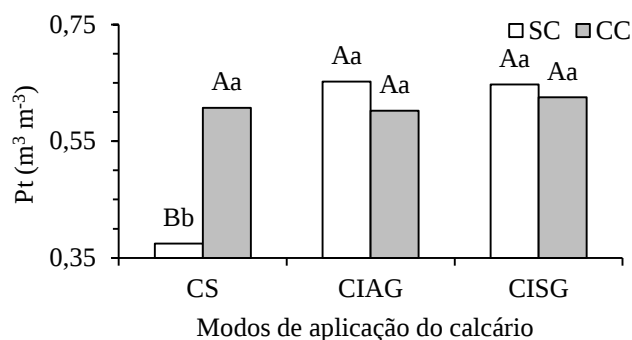


Figura 6 – Porosidade total (Pt) da camada 0-0,10 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]. Médias seguidas de mesma letra maiúscula para calagem e minúscula para modos de aplicação do calcário não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Este resultado é justificado quando se analisa o sistema de corte dos implementos agrícolas utilizados para as operações de incorporação do calcário. Na aração com arados de discos ocorre a inversão da camada superficial do solo (0-0,20 m), promovendo uma intensa mobilização de sua estrutura com a formação de grandes torrões (DOMZAL; SLOWILQSKA-JURKIEWICZ, 1987; FALLEIRO et al., 2003; REICHERT et al., 2007). Enquanto que na subsolagem a mobilização do solo é reduzida e dependente, entre outros, do espaçamento das hastes de corte do implemento. O sentido de corte das hastes dos subsoladores são de baixo para cima, em profundidades variáveis, o que também leva à formação de torrões de solo sobre a sua superfície (SPOOR; FRY, 1983; KOCHHANN; DENARDIN, 2000; REICHERT et al., 2007).

Os torrões formados em operações de preparo do solo dificultam a implantação e o estabelecimento das culturas. Deste modo, se faz necessária a gradagem do solo para o nivelamento do terreno e rompimento de torrões formados pelas operações antecessoras. A gradagem com grade niveladora, conforme utilizada neste trabalho, apenas mobiliza a superfície do solo (0-0,10 m) (FALLEIRO et al., 2003). Portanto, independente da operação de preparo antecessora, a mobilização da estrutura do solo pode ser homogeneizada pela gradagem subsequente.

Com a calagem, CS apresentou uma Ds da camada 0-0,10 m superior ao CIAG, enquanto que o CISG foi igual a ambos os modos de aplicação (Figura 5a). Todavia, as alterações na Ds não repercutiram sobre a Pt, visto que não foram verificadas diferenças para este atributo entre os preparos do solo para incorporação do calcário (Figura 6). Este efeito pode ser atribuído a ausência de revolvimento em CS e ao menor revolvimento do solo em CISG em relação ao CIAG. Estes resultados corroboram com Tormena et al. (1998), os quais estudaram

os fatores que interferem na compactação e nas modificações em alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho argiloso (478 g kg^{-1} de argila na camada 0-0,10 m), adotando diferentes níveis de calagem (semelhantes ao utilizado neste trabalho), intensidades de revolvimento e tráfego controlado de máquinas agrícolas. Os autores concluíram que na ausência do tráfego (condições similares às deste trabalho), as modificações na estrutura do solo foram semelhantes entre os preparos do solo, enquanto que a calagem não afetou a Ds e a Pt.

Dentre os modos de aplicação do calcário, a calagem reduziu a Ds e aumentou a Pt da camada 0-0,10 m apenas em CS (Figuras 5a e 6). Quando a calagem foi realizada na superfície (CS) a acidez potencial (H^+Al) e a trocável apresentaram correlação positiva com a Ds e negativa com a Pt, enquanto que o pH, e os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ tiveram comportamento inverso. A dispersão e a floculação de partículas também correlacionaram-se negativa e positivamente com a Ds e a Pt deste modo de incorporação do calcário (Tabela 5).

Considerando que a Pt ocorre entre e dentro dos macroagregados do solo, e que a Ds é inversamente proporcional a Pt, o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em relação ao Al^{3+} , o aumento do pH e a precipitação de hidróxidos amorfos de Al, podem ser as explicações para o aumento da Pt e a redução da Ds na camada 0-0,10 m com a calagem (Figuras 5a e 6 e Tabela 5). Outra possibilidade seriam os efeitos dos teores de argila e de CO sobre a redução da Ds e da Pt (FERREIRA et al., 1999; SILVA et al., 2006). Contudo, este efeito não foi verificado neste trabalho (Tabela 5).

Para a camada 0,10-0,20 m, a calagem não influenciou a Ds, porém esta foi influenciada pelos modos de aplicação do calcário e pela interação destes com a calagem (Tabela 2). Sem a calagem, CS apresentou Ds superior a CIAG (Figura 5b) provavelmente pela ausência de preparo (FALLEIRO et al., 2003). O CISG apresentou Ds nesta camada estatisticamente igual a CIAG e a CS (Figura 5b), possivelmente em função da maior mobilização em relação a CS e menor ao CIAG (FALLEIRO et al., 2003; CAMARA; KLEIN, 2005).

Com a calagem, o CISG apresentou redução da Ds na camada 0,10-0,20 m em relação a CS, enquanto que CIAG foi estatisticamente igual a estes (Figura 5b). Naturalmente CS tende a apresentar maior Ds na camada 0,10-0,20 m (CAMARA; KLEIN, 2005). Entretanto, com a maior mobilização da estrutura, como ocorrido na operação de aração empregada no CIAG, o transporte de água e contato entre as partículas de calcário e de solo é aumentado, o que favoreceu maior solubilização do corretivo (Tabela 4), aumentando a sua reação (MELLO et al., 2003; FLORA et al., 2007).

Embora CIAG tenha proporcionado maior reação do corretivo na camada 0,10-0,20 m, porém não tão expressivo como em 0-0,10 m, os atributos químicos do solo neste preparo não se correlacionaram com a Ds (Tabela 6). Neste caso, em função dos elevados teores de Al^{3+} no solo, pode ter ocorrido a precipitação do mesmo em hidróxidos amorfos de Al, os quais atuam como agentes cimentantes do solo (HAYNES; NAIDU, 1998).

Tabela 6 – Coeficientes de correlação de Pearson da Ds com os teores de areia, silte, argila, argila dispersa em água ADA, grau de floculação (GF) carbono orgânico (CO), acidez ativa (pH), potencial (H+Al), trocável (Al^{3+}) e teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem com calcário incorporado com aração e gradagem.

Atributo	Areia	Silte	Argila	CO	pH	H+Al	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	ADA	GF
Ds	0,12 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,44 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,41 ^{ns}	-0,59 ^{ns}	0,68 ^{ns}	-0,54 ^{ns}

^{ns} = não significativo.

Analizando a interação entre a calagem e os modos de aplicação do calcário na camada 0,10-0,20 m, verificou-se que apenas ocorreram diferenças na Ds com a calagem quando o calcário foi incorporado pelo CIAG (Figura 5b). Este resultado também pode ser atribuído a precipitação de hidróxidos amorfos de Al^{3+} pela correção da acidez do solo (HAYNES; NAIDU, 1998), visto que nenhum dos atributos químicos do solo avaliados correlacionou-se com a Ds neste modo de aplicação do calcário (Tabela 6).

Diferentemente do ocorrido para a Ds, a Pt da camada 0,10-0,20 m não foi afetada pela calagem, pelos modos de aplicação do calcário ou pela interação desses (Tabela 2 e Figura 7). Estes resultados sugerem que as alterações da Pt pela mobilização de sua estrutura e pela calagem são limitadas à camada 0-0,10 m. Estes resultados corroboram com Tormena et al. (2002), para um Latossolo Vermelho distrófico franco-argilo-arenoso, e Costa et al. (2004) para um Latossolo Bruno muito argiloso. Costa et al. (2004) verificaram que o revolvimento do solo para a incorporação de calcário não afetou a Pt ao longo da camada 0-0,20 m, o que foi atribuído à elevada estabilidade estrutural pelo alto conteúdo de argila do solo (629 g kg^{-1}). Tormena et al. (2002) não encontraram diferenças na Pt na camada 0,10-0,20 m em função do preparo do solo (direto, convencional e mínimo).

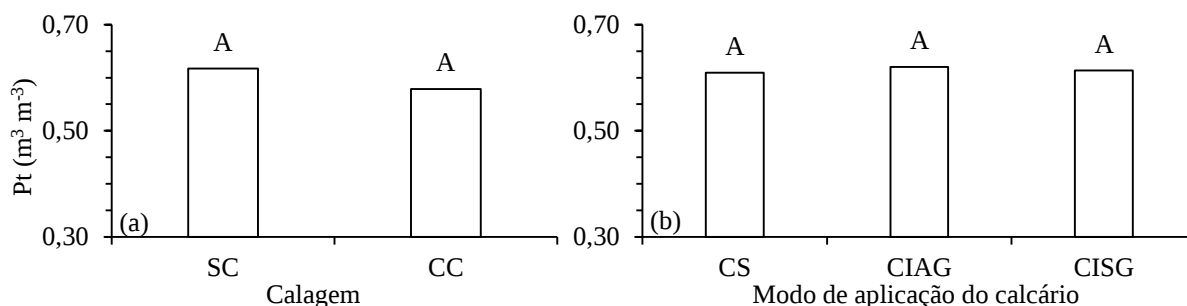


Figura 7 – Porosidade total (Pt) da camada 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] (a) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)] (b). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.2 RETENÇÃO DE ÁGUA

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de ajuste das CRAs pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para as camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m do solo em função da calagem (SC e CC) e modos de aplicação do calcário (CS, CIAG e CISG).

Tabela 7 – Parâmetros das curvas de retenção de água e coeficiente de determinação (R^2) das regressões, ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para as camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Calagem	Modo de aplicação	θ_s	θ_r	α	n	m	R^2
Camada 0-0,10 m		----- $m^3 m^{-3}$ -----		kPa^{-1}			
SC	CS	0,37	0,14	4,79	1,30	0,23	0,81
	CIAG	0,65	$3,79e^{-6}$	9,37	1,08	0,08	0,90
	CISG	0,62	$1,77e^{-5}$	1,48	1,09	0,08	0,87
CC	CS	0,61	$7,58e^{-5}$	18,62	1,05	0,04	0,90
	CIAG	0,64	0,32	4,67	1,30	0,23	0,84
	CISG	0,63	$6,94e^{-4}$	9,49	1,05	0,05	0,86
Camada 0,10-0,20 m							
SC	CS	0,55	$5,37e^{-5}$	0,91	1,07	0,06	0,89
	CIAG	0,61	$2,41e^{-6}$	11,27	1,07	0,06	0,93
	CISG	0,55	$3,86e^{-7}$	1,62	1,05	0,05	0,65
CC	CS	0,55	$5,68e^{-3}$	1,36	1,06	0,05	0,84
	CIAG	0,60	$2,23e^{-7}$	26,23	1,06	0,05	0,94
	CISG	0,61	$3,79e^{-7}$	10,57	1,07	0,06	0,95

θ_s e θ_r = conteúdos de água de saturação e residual, respectivamente; α , n, m = parâmetros empíricos de ajuste.

Os efeitos da mobilização da estrutura do solo repercutiram no aumento do espaço poroso do solo na camada 0-0,10 m, principalmente na ausência da calagem (SC), aumentando a retenção de água em Ψ_m próximos a θ_s (Figura 8). Neste caso, tanto na ausência como na presença da calagem (CC), a θ_s apresentou a ordem CIAG > CISG > CS (Tabela 7 e

Figuras 8a, c), o que pode estar relacionado com a intensidade de mobilização do solo pelos preparos empregados, isto é, aração > subsolagem > ausência de revolvimento.

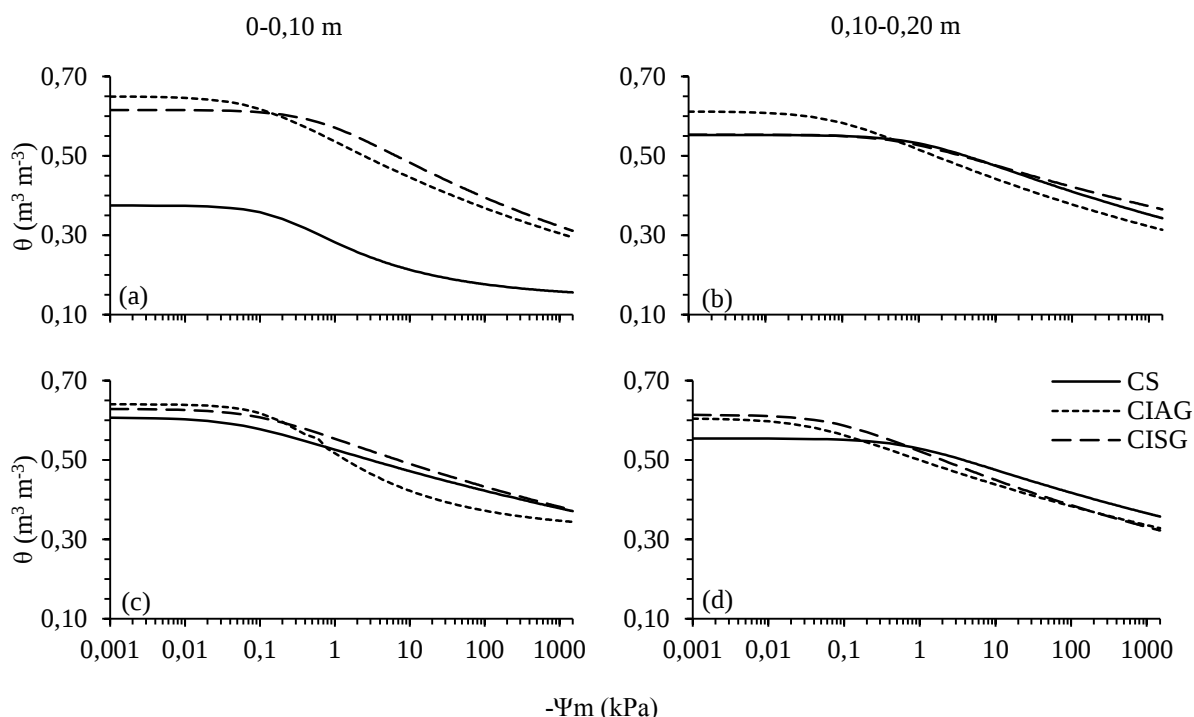


Figura 8 – Curvas de retenção de água (CRAs) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISC)].

Tanto CIAG como CISC aumentaram a retenção de água da camada 0-0,10 m na ausência da calagem (SC) em relação ao CS (Figuras 8a e 9a). Este comportamento ocorreu em função dos atributos físicos e químicos do solo (Tabela 8). A mobilização da estrutura do solo aumenta sua P_t , consequentemente reduz sua D_s , aumentando desta forma a θ_s (DANE et al., 2002; MACHADO et al., 2008; MICHELON et al., 2010). O aumento da P_t pode ser acompanhado pelo aumento da microporosidade do solo, e com isto maior será a retenção nos Ψ_m mais negativos (SHUKLA et al., 2003; LIPIEC et al., 2007).

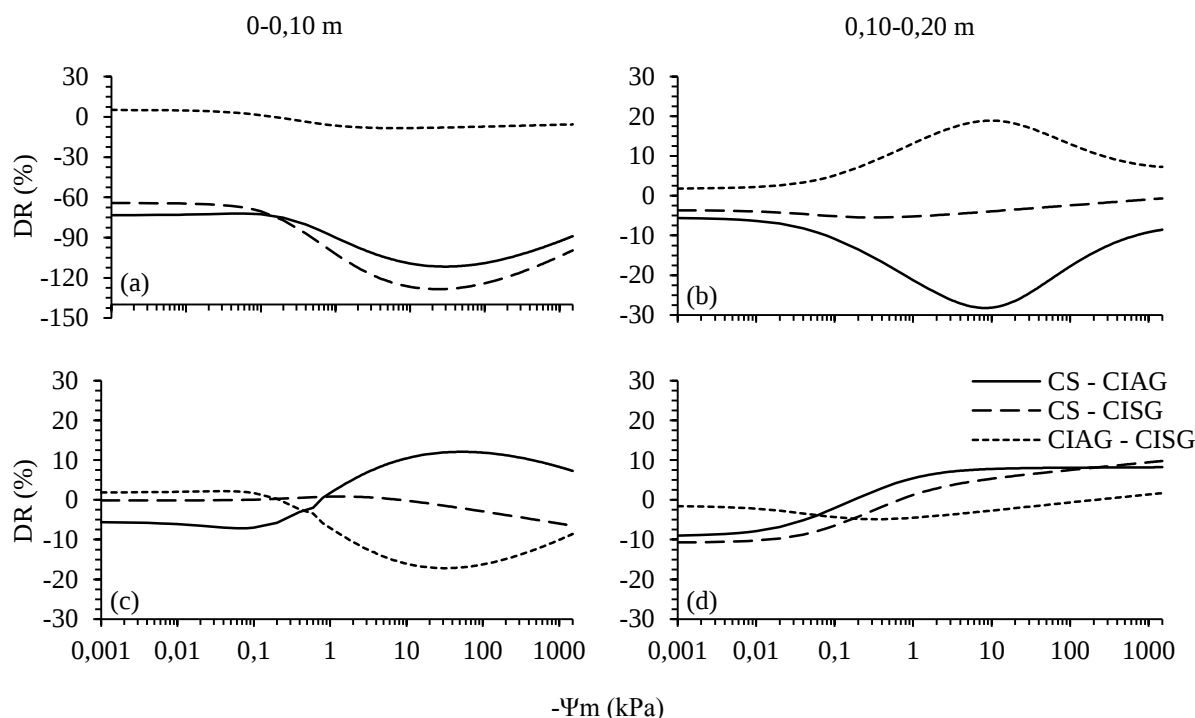


Figura 9 – Diferenças relativas (DR) das curvas de retenção de água das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Neste trabalho, os maiores teores de ADA, os quais reduzem o GF do solo, também influenciaram o aumento da retenção em altos Ψ_m no CIAG e no CISG sem calagem (Tabela 8). Embora em Ψ_m altos a retenção seja comandada pela estrutura do solo (LIBARDI, 2012), possivelmente, a adsorção de moléculas de água nas superfícies das partículas de argila dispersas pode ser a explicação para este resultado.

Assim como a ADA e o GF, os maiores teores de K^+ e menores de Al^{3+} do CIAG e do CISG sem a calagem (Tabela 4), aumentaram a retenção até o Ψ_m de -10 kPa (Tabela 8). A princípio, não há explicação para este efeito do K^+ , principalmente, e do Al^{3+} sob a retenção em altos Ψ_m . Considerando que o K^+ apresenta um grande raio iônico, logo pequeno grau de hidratação, e o inverso ocorre para o Al^{3+} (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008), esperava-se uma relação oposta à encontrada neste trabalho. Levy e Torrento (1995) destacam que o efeito do K^+ nos atributos físicos e hidráulicos do solo é o menos esclarecido entre os cátions básicos mais abundantes no solo, exatamente pelas divergências entre os resultados de pesquisas.

Tabela 8 – Coeficientes de correlação de Pearson de conteúdos de água, em diferentes potenciais mátricos, com os atributos físicos e químicos, das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem (sem e com calagem) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Atributo	Areia	Silte	Argila	ADA	GF	Ds	Pt	CO	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Camada 0-0,10 m														
θ _s	-0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,73 ^{**}	-0,79 ^{**}	-0,90 ^{**}	1,00	0,04 ^{ns}	0,40 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,45 [*]	0,34 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-0,52 ^{**}
θ ₋₁₀	-0,14 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,66 ^{**}	-0,72 ^{**}	-0,76 ^{**}	0,93 ^{**}	0,06 ^{ns}	0,43 [*]	-0,43 [*]	-0,52 ^{**}	0,43 [*]	0,38 ^{ns}	0,54 ^{**}
θ ₋₃₃	-0,08 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,43 [*]	0,42 [*]	0,73 ^{**}	-0,67 ^{**}	-0,03 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,37 ^{ns}
θ ₋₁₅₀₀	-0,04 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	0,43 [*]	0,56 ^{**}	-0,48 [*]	0,30 ^{ns}	0,41 [*]	-0,49 [*]	-0,45 [*]	0,50 [*]	0,48 [*]	-0,20 ^{ns}
Camada 0,10-0,20 m														
θ _s	-0,03 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	1,00	0,27 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,02 ^{ns}
θ ₋₁₀	-0,02 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,04 ^{**}	-0,04 ^{**}	-0,19 ^{**}	0,27 ^{**}	0,19 ^{ns}	-0,41 [*]	0,33 ^{ns}	0,37 ^{ns}	-0,36 ^{ns}	-0,38 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
θ ₋₃₃	-0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,48 [*]	-0,50 [*]	0,38 ^{ns}	0,45 [*]	-0,44 [*]	-0,49 [*]	0,12 ^{ns}
θ ₋₁₅₀₀	-0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,40 [*]	-0,24 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,37 ^{ns}

θ_s, θ₋₁₀, θ₋₃₃ e θ₋₁₅₀₀ = conteúdos de água na saturação e nos potenciais mátricos de -10, -33 e -1500 kPa, respectivamente; ADA = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; CO = carbono orgânico; pH, H+Al e Al³⁺ = acidez ativa, potencial e trocável, respectivamente; Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = teores de cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; ns = não significativo; ** e * = significativo aos níveis de 1 e 5 % de probabilidade de erro, respectivamente.

Entre a θ_s e o Ψ_m de -10 kPa, as CRAs de CS e CISG com calagem, na camada 0-0,10 m também apresentaram comportamento similar. Entretanto, a partir do Ψ_m de -10 kPa, ocorreram diferenças relativas pequenas ($< 10\%$) entre esses modos de aplicação do calcário, em função dos menores θ do CS (Figuras 8c e 9c). Neste caso, o menor teor de ADA do CS com calagem (Figura 2) e, o maior pH do solo, os níveis mais baixos de acidez potencial e trocável, e os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} do CISG (Tabela 4), são a explicação para as diferenças relativas nos Ψ_m de -33 kPa e -1500 kPa, respectivamente (Tabela 8).

De maneira geral, alguns resultados deste trabalho devem ser destacados. Primeiramente, independentemente do modo de aplicação do calcário, a calagem aumentou a retenção de água na camada 0-0,10 m (Figura 10a). Difunde-se em consenso, que em Ψ_m próximos à -1500 kPa, a retenção é dependente exclusivamente da textura do solo e do teor de CO (BEUTLER et al., 2002; OLNESS; ARCHER, 2005; MACHADO et al., 2008; MICHELON et al., 2010). Todavia, realizada a análise de correlação, verificou-se que, embora o solo estudado apresente altos teores de argila e de CO, a correção de sua acidez foi o fator exclusivo para o aumento da retenção no Ψ_m de -1500 kPa (Tabela 8). Este resultado ocorreu diretamente pelo aumento do pH do solo e, pela substituição do Al^{3+} por Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca. Esses efeitos da calagem beneficiaram a estruturação do solo (GF, Ds e Pt), principalmente quando a aplicação do calcário foi na superfície, o que também repercutiu sobre a retenção (Tabela 8).

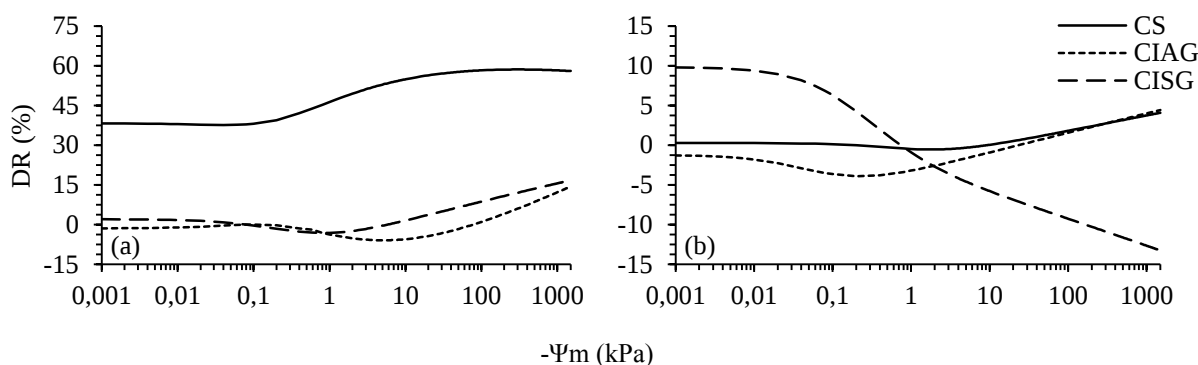


Figura 10 – Diferenças relativas (DR) entre as curvas de retenção de água da ausência (sem calagem) em relação a presença da calagem (com calagem) das camadas 0-0,10 (a) e 0,10-0,20 m (b) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso em função de modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Com o aumento do pH do solo pela calagem ocorre aumento na quantidade de cargas negativas, precipitação de Al^{3+} e aumento nos teores de Ca^{2+} , principalmente, e Mg^{2+} . Os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} em solução podem ser adsorvidos às superfícies das partículas de argila carregadas negativamente. Ainda, em condições de alta concentração destes íons, pode ocorrer

a troca iônica do Al^{3+} (CAMARGO; RAIJ, 1989; CAIRES et al., 2008). Deste modo, quanto maior a quantidade de cargas negativas, maior a adsorção de cátions e maior a substituição do Al^{3+} da fase sólida do solo.

Para a adsorção Ca^{2+} e Mg^{2+} é necessária à formação de complexos de esfera externa. Neste tipo de adsorção, a ligação entre os cátions e as partículas de argila são mediadas por moléculas de água (SPOSITO, 2008). Assim sendo, conforme constatado neste trabalho, quanto maior a adsorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} maior a retenção de água no solo, possivelmente pela formação de complexos de esfera externa.

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

Diferentemente dos demais cátions, não foram verificados efeitos do K^+ sobre a retenção de água no solo no Ψ_m de -1500 kPa (Tabela 8). Este comportamento pode ser atribuído à menor afinidade de adsorção, em comparação ao Ca^{2+} e ao Mg^{2+} , e ao menor raio hidratado deste íon (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008). Estes autores mencionam que, com base em sua valência e raio iônico, na série liotrópica, o K^+ é o primeiro cátion a ser deslocado da fase sólida do solo na troca iônica, em comparação ao Ca^{2+} , ao Mg^{2+} e ao Al^{3+} .

Na camada 0,10-0,20 m, sem a calagem (SC), praticamente não ocorreram diferenças relativas entre as CRAs de CS e CIAG. Entretanto, nesta condição, os maiores θ do CIAG repercutiram em uma maior retenção sobre CS e CISG, aproximadamente, até o Ψ_m de -10 kPa. A partir do Ψ_m de -10 kPa, os menores θ indicaram redução na retenção do CIAG (Figuras 8b e 9b). Este efeito pode ser atribuído às prováveis mudanças no espaço poroso do solo pela operação de aração. A mobilização do solo por esta operação proporciona aumento expressivo de macroporos, os quais estão relacionados com a retenção e o movimento de água em altos Ψ_m (STONE; SILVEIRA, 2001; SECCO et al., 2005; LIPIEC et al., 2006; 2007).

Com a calagem, houve o aumento na retenção do CS na camada 0,10-0,20 m em relação ao CIAG e CISG (Figura 8d). Contudo, as diferenças relativas do CS com os demais preparos foram pequenas ($< 10\%$) (Figura 9d). Este aumento de retenção ocorreu, principalmente, em função da menor reação do calcário (Tabelas 3 e 8). Este resultado, contrário ao observado na camada 0-0,10 m, demonstra que os mecanismos de atuação da calagem sobre a retenção de água, devem ser melhor estudados.

Em CS e CIAG, as diferenças entre as CRAs da camada 0,10-0,20 m pela calagem são desprezíveis (< 5 %). Todavia, nesta camada, a calagem proporcionou redução na retenção do CISG (Figura 10b). A redução da acidez potencial foi a responsável pela menor retenção do CISG com calagem (Tabela 8). Possivelmente, a redução destes cátions ácidos na fase sólida do solo, diminuiu a superfície de adsorção de moléculas de água.

5.3 DISTRIBUIÇÃO DE POROS

Sem a calagem, houve efeitos da mobilização do solo sobre as CDPs na camada 0-0,10 m (Figura 11a). No CS, pela ausência de revolvimento, o seu espaço poroso foi ocupado por poros de menor raio. Deste modo, a maior mobilização da estrutura pelas operações de aração e gradagem, proporcionaram ao CIAG poros mais frequentes com raios maiores. Enquanto que, a mobilização reduzida do solo no CISG, promoveu a ocorrência mais frequente de poros menores, em relação ao CIAG, e maiores em relação ao CS. Tais resultados corroboram com os obtidos por Bescana et al. (2006) e Lipiec et al (2006).

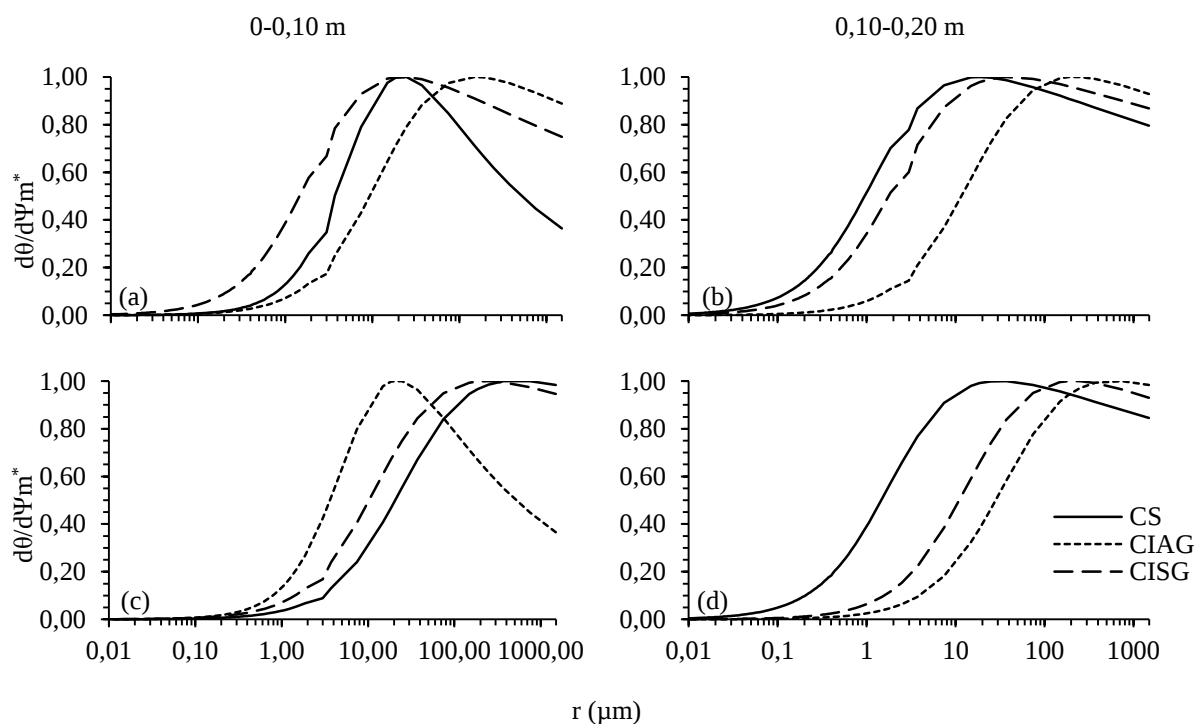


Figura 11 – Curvas de distribuição de poros ($d\theta/d\Psi_m^*$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)]. *dados normalizados.

O sistema de poros dos solos de textura fina, como o deste estudo é organizado hierarquicamente, com poros primários entre o arranjo das partículas de areia, silte e argila e poros secundários entre os agregados (EHLERS et al., 1995; KUTÍLEK, 2004; LIPIEC et al., 2006). Assim sendo, os resultados deste trabalho podem ser atribuídos ao possível aumento de microagregados, considerando o efeito desagregador dos preparos do solo sobre seus macroagregados (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004).

Com a calagem, CS e CISG apresentaram distribuição de poros similar na camada 0-0,10 m (Figura 11d). Porém, a frequência de poros menores, correspondendo a classe de microporos (0,1-25 μm) (Tabela 9), foi maior no CISG. Um resultado semelhante, porém, com uma frequência maior de macroporos, ocorreu para o CIAG nesta mesma situação (Figura 11b e Tabela 9).

Tabela 9 – Distribuição de macro (> 25 μm), micro (0,1-25 μm) e criptoporos (< 0,1 μm), das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem (sem e com calagem) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Preparo do solo	Sem calagem			Com calagem		
	Macro	Micro	Cripto	Macro	Micro	Cripto
Camada 0-0,10 m						
CS	0,15	0,07	0,16	0,12	0,11	0,37
CIAG	0,18	0,17	0,29	0,20	0,09	0,34
CISG	0,11	0,19	0,31	0,12	0,13	0,37
Camada 0,10-0,20 m						
CS	0,06	0,15	0,34	0,07	0,13	0,36
CIAG	0,15	0,11	0,34	0,15	0,12	0,33
CISG	0,07	0,12	0,36	0,15	0,14	0,32

Distribuição conforme classificação de Klein e Libardi (2002): raio de poros > 25, 0,10-25 e < 0,10 μm para macro, micro e criptoporos, respectivamente.

Dentro dos preparos, a calagem proporcionou diferenças nas CDPs na camada 0-0,10 m (Figuras 12a, c, e). No CS, ela atuou aumentando o volume de microporos e, principalmente, de criptoporos (< 0,1 μm), porém sem redução acentuada de macroporos (> 25 μm). Este efeito pode ter ocorrido pelo menor GF do CS proporcionado pela calagem (Figura 3). Spera et al. (2008) verificaram que ocorre a obstrução de macroporos pelas partículas de argila dispersas de microagregados pela calagem.

Para o CIAG e o CISG, houve um aumento pouco expressivo de macroporos e criptoporos, porém a redução de microporos foi substancial (Tabela 9). Estes preparos do solo tiveram os maiores teores de ADA (Figura 2) e a maior precipitação de Al^{3+} (Tabela 3), possivelmente como hidróxido amorfo (HAYNES; NAIDU, 1998). Deste modo, similarmente

ao que ocorre em solos com caráter coeso, a redução de microporos pela calagem pode ser atribuída ao entupimento de microporos pelas partículas de argila dispersas, a ação cimentante de hidróxidos amorfos de Al^{3+} e ao adensamento do solo pelos ciclos de umedecimento e secamento (Figura 1) (RAJARAMA; ERBACH, 1999; GIAROLA; SILVA, 2002; PIRES et al., 2008a, b; 2009).

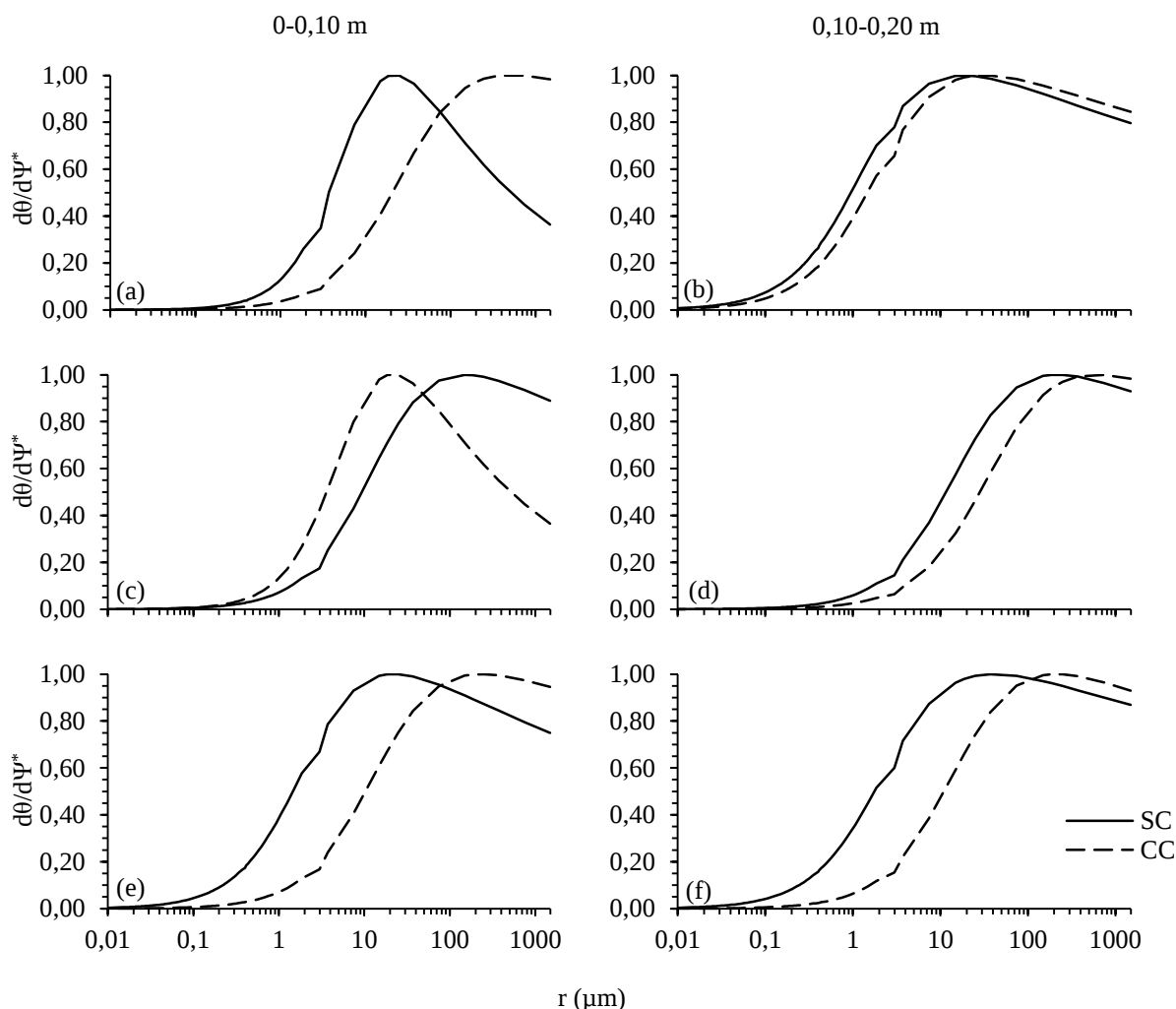


Figura 12 – Curvas de distribuição de poros ($d\theta/d\Psi^*$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] em modos de aplicação do calcário: na superfície (a, b), incorporado com aração e gradagem (c, d) e incorporado com subsolagem e gradagem (e, f). *dados normalizados.

Na camada 0,10-0,20 m, o comportamento das CDPs demonstrou que os poros mais frequentes, que apresentam maiores raios, acompanharam o grau de mobilização do solo, isto é, $CIAG > CISG > CS$, tanto na ausência como na presença da calagem (Figuras 11b, d). Resultado que também pode ser atribuído à organização hierárquica do sistema poroso pelo

efeito desagregador dos macroagregados do preparo do solo (EHLERS et al., 1995; CASTRO FILHO et al., 1998; KUTÍLEK, 2004; SIX et al., 2004; LIPIEC et al., 2006b).

Em todos os preparos do solo, a calagem proporcionou aumento no raio de poros na camada 0,10-0,20 m (Figuras 12b, d, f), sendo este efeito mais pronunciado sobre os macroporos do CISG (Tabela 9). Este resultado diferiu do comportamento de todos os atributos avaliados para esta camada.

Possivelmente, a maior macroporosidade da camada 0,10-0,20 m do CISG foi proveniente de efeitos indiretos da calagem e da escarificação empregada no preparo do solo. Em literatura, é um consenso os efeitos benéficos da calagem sobre o crescimento radicular de culturas similares às utilizadas neste trabalho, como milho e cevada (CAIRES et al., 2001; 2002). Também, há relatos de que a prática da subsolagem empregada no CISG pode ter favorecido o crescimento radicular das plantas na camada 0,10-0,20 m (DE MARIA et al., 1999). Com a decomposição de raízes das plantas são formados bioporos no solo (DEXTER, 1991; NICOLOSO et al., 2008). Deste modo, quanto maior a densidade de raízes maior a formação de bioporos.

As alterações na distribuição de poros influenciaram diretamente a porosidade livre de água do solo (Figura 13). Valores de porosidade livre de água abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor considerado como crítico ao desenvolvimento das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968), não foram observados apenas para o CIAG na camada 0-0,10 m, tanto sem como com a calagem (Figuras 13a, c). Contudo, a calagem aumentou ligeiramente a porosidade livre de água neste modo de aplicação do calcário em todos os raios de poro (Figura 14c).

Os maiores valores de porosidade livre de água do CIAG foram em função da maior macroporosidade na camada 0-0,10 m deste modo de aplicação do calcário, independentemente da calagem, em relação a CS e CISG (Tabela 9). Klein e Libardi (2002) destacam que a macroporosidade é importante para a aeração do solo, visto que nos macroporos ocorre o fluxo livre de gases (GRABLE; SIEMER, 1968; REYNOLDS et al., 2002).

O CISG sem a calagem, como uma consequência da grande quantidade de poros de menor raio (Figuras 11a e 12e), teve a menor porosidade livre de água da camada 0-0,10 m entre os modos de aplicação do calcário (Figuras 13 a, c). Dentre os modos de aplicação do corretivo, em ambas as camadas, apenas na camada 0-0,10 m do CS a calagem reduziu a porosidade livre de água, contudo, estes valores ainda foram superiores ao limite crítico (Figura 14a).

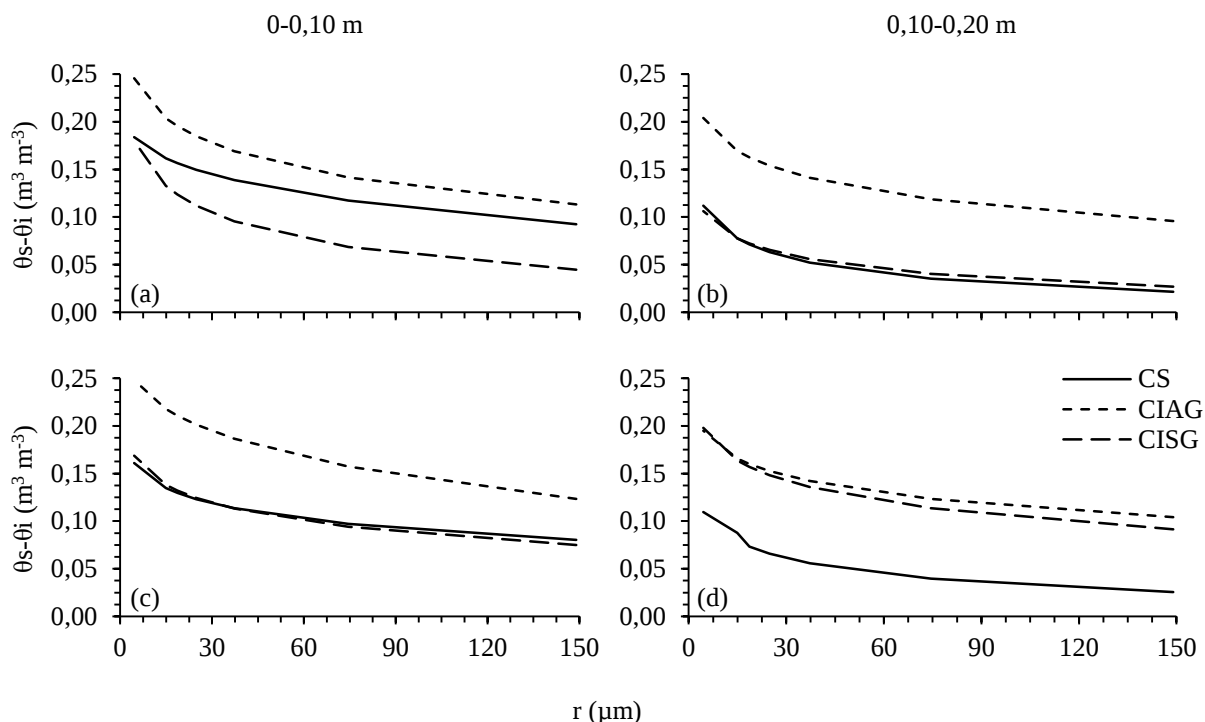


Figura 13 – Porosidade livre de água ($\theta_s - \theta_i$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico sem (a, b) e com calagem (c, d) e modos de aplicação do calcário [calcário na superfície (CS), incorporado com aração e gradagem (CIAG) e com subsolagem e gradagem (CISG)].

Na camada 0,10-0,20 m, a porosidade livre de água do CIAG sem a calagem foi superior ao demais preparos nesta condição, que tiveram porosidade livre de água abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ em poros com raio $> 15 \mu\text{m}$ (Figura 13b). Este é um efeito direto da maior mobilização do solo no CIAG (DOMZAL; SLOWILQSKA-JURKIEWICZ, 1987; FALLEIRO et al., 2003). Todavia, nesta camada, com a calagem, houve aumento expressivo da porosidade livre de água, exclusivamente, do CISG (Figuras 14b, d, f). Este resultado seguiu a mesma relação com o aumento da macroporosidade. Portanto, deve-se ressaltar a importância da formação de bioporos para a aeração do solo (DEXTER, 1991).

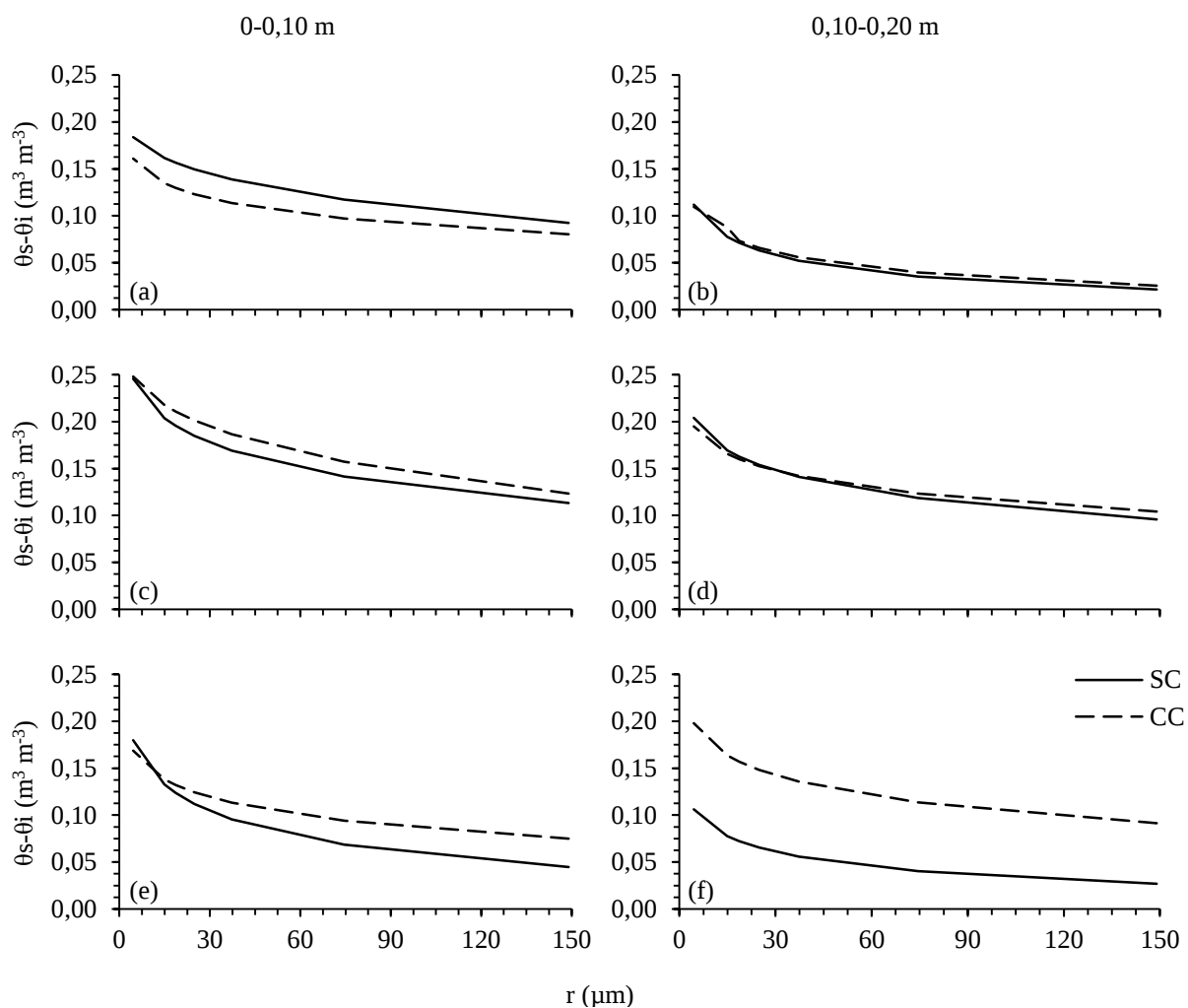


Figura 14 – Porosidade livre de água ($\theta_s - \theta_i$) das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico em função da calagem [sem (SC) e com calagem (CC)] em modos de aplicação do calcário: na superfície (a, b), incorporado com aração e gradagem (c, d) e incorporado com subsolagem e gradagem (e, f).

6 CONCLUSÕES

Para o CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico estudado, as alterações da aplicação de calcário na superfície sobre a densidade do solo e a porosidade total são restritas a camada 0-0,10 m e equivalentes às operações de aração e subsolagem, ambas seguidas de gradagem.

Em baixos potenciais mátricos, a substituição do alumínio por cálcio e magnésio no complexo de troca, principalmente com a calagem em superfície, exerce maior influência sobre a retenção de água no solo em relação aos teores de argila e carbono orgânico.

A incorporação do calcário, tanto por aração como por subsolagem, ambas seguidas de gradagem, ocasiona efeitos deletérios no volume de microporos do solo. Enquanto que a aplicação do corretivo na superfície aumenta esta importante classe de poros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 799-806, 2003.
- ASSIS, R. L.; ROMEIRO, A. R. Agroecologia e agricultura familiar na região centro-sul do estado do Paraná. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 43, n. 1, p. 155-177, 2005.
- BALDOCK, J. A.; AOYAMA, M.; OADES, J. M.; SUSANTO; GRANT, C. D. Structural amelioration of a South Australian red-brown earth using calcium and organic amendments. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, n. 3, p. 571-594, 1994.
- BENASSI, D. A. **Percepção e uso dos solos: o caso dos agricultores familiares da região centro-sul do Paraná**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.
- BESCANA, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in Semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n.1, p. 19-27, 2006.
- 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**, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.
- BOGNOLA, I. A.; FASOLO, P. J.; BHERING, S. B.; MARTORANO, L. G. Solos, Clima e Vegetação da Região de Campos Gerais. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Eds). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. cap 3, p. 57-76.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; QUADROS NETO, C.; FERREIRA, A. O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, n. 1, p. 80–88, 2012.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.
- CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1011-1022, 2002.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, 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 aplicado na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.
- CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2008.
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.
- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.
- CAMARGO, O. A.; Van RAIJ, B. Movimento do gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 3, p. 275-280, 1989.
- CARVALHO JÚNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo vermelho-escuro textura média, na região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 505-514, 1998.
- CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, v. 55, n. 5, p. 1407-1413, 1991.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.
- CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. Effect of lime (CaCO_3) application on soil structural stability of a red earth. **Australian Journal of Soil Research**, v. 36, n. 1, p. 73-86, 1998.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 281-284, 2004.
- DANE, J. H.; TOPP, C. G.; CAMPBELL, G. S. (Eds). **Methods of soil analysis: Part 4 – Physical methods**. 3. Ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. 1692 p.
- DE MARIA, 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**, v. 23, n. 3, p. 703-709, 1999.

- DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.
- DOMZAL, A.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. Effect of tillage and wheather condition on the structure and physical properties of soil and yield of winter wheat. **Soil and Tillage Research**, v. 10, n. 3, p. 225-241, 1987.
- EDWARDS, A. P.; BREMMER, J. M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 64-73, 1967.
- EHLERS, W.; WENDROTH, O.; MOL, F. Characterizing pore organization by soil physical parameters. In: HARTGE, K. H., STEWART, B. A. (Org.). **Soil Structure – Its Development and Function**. Advances in Soil Science. Boca Raton, Lewis Publishers, 1995. cap. 13, p. 257-275.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.
- 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**, v. 27, n. 6, p. 1097-1104, 2003.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515-524, 1999.
- FLORA, L. P. D.; ERNANI, P. R.; CASSOL, P. C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um Cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1591-1598, 2007.
- GHANI, M. O.; HASAN, K. A.; KHAN, M. F. A. Effect of liming on aggregation, non capillary pore space and permeability of a lateritic soil. **Soil Science**, v. 80, n. 2, p. 469-478, 1955.
- GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p. 613-620, 2002.
- GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.
- GUANZIROLI, C. E.; BUAINAIN, A. M.; DI SABBATO, A. Dez anos de evolução da agricultura familiar no Brasil: (1996 e 2006). **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 2, p. 351-370, 2012.
- GUILHOTO, J. J. M.; SILVEIRA, F. G.; ICHIHARA, S. M.; AZZONI, C. R. A importância do agronegócio familiar no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 3, p. 355-382, 2006.
- HAYNES, R. J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 51, n. 2, p. 123-137, 1998.

- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática – segundo Köppen**, 2009. CD-ROM.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Médias históricas em estações do Iapar**. Londrina: Iapar, 2014. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Fernandes_Pinho.htm>. Acesso em: 23 maio 2014.
- JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n.1-2, p. 409-424, 2013.
- JURY, A. W.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil Physics**. 5. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1991. 328 p.
- KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573-580, 2005.
- KASTANEK, F. J., NIELSEN, D. R. Description of soil water characteristics using a cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 279–283, 2001.
- 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**, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. 2. Ed. Madison: SSSA, 1986. 1358 p. p. 635-662.
- KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.
- KUTÍLEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 175-184, 2004.
- LEVY, G. J.; TORRENTO, J. R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Science**, v. 160, n. 5, p. 352-358, 1995.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2. Ed. São Paulo: EDUSP, 2012.
- LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **Conhecendo os principais solos do Paraná: abordagem para professores do ensino fundamental e médio**. Curitiba: SBCS-NEP, 2012.
- LIPIEC, J.; KUŚ, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, 2006.
- LIPIEC, J.; WALCZAK, R.; WITKOWSKA-WALCZAK, B.; NOSALEWICZ, A.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; SŁAWIŃSKI, C. The effect of aggregate size on water

- retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. **Soil and Tillage Research**, v. 97, n. 2, p. 239-246, 2007.
- 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**, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.
- MARTINS, E. C. **Caracterização e quantificação mineralógica da fração argila do horizonte Bi de Cambissolos da região de Irati, Paraná, pelo método de Rietveld**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.
- MELLO, J. C. A.; VILLAS BÔAS, R. L.; LIMA, E. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BÜLL, L. T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 553-561, 2003.
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.
- MINERAIS DO PARANÁ S.A. – MINEROPAR. **Avaliação geológica e geotécnica para o planejamento territorial e urbano do município de Irati**. Curitiba: Mineropar, 2005.
- MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: SSSA, p. 799–823, 1986.
- MUNEER, M.; OADES, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability .III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Research**, v. 27, n. 2, p. 411-423, 1989.
- NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.
- OLNESS, A.; ARCHER, D. Effect of organic carbon on available water in soil. **Soil Science**, v. 170, n. 2; p. 90-101, 2005.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 131–143, 2004.
- PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Circular Técnica 76. Londrina: IAPAR, 1992. 39 p.

- PIERI, C. J. M. G. **Fertility of Soils: a future for farming in the West African Savannah**. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- PIRES, L. F.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, n. 1-2, p. 72-77, 2008b.
- PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, n. 2, p. 297-304, 2008a.
- PIRES, L. F.; REICHARDT, K.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; DIAS, N. M. P.; BACCHI, O. O. S. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 1, p. 151-161, 2009.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013.
- RAJARAMA, G.; ERBACH, D. C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. **Journal of Terramechanics**, v. 36, n. 1, p. 39-49, 1999.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**. V. 5. Viçosa: SBCS, 2007. 496 p. Cap. 2, p. 49-134.
- REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002.
- ROTH, C.; PAVAN, M. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3-4, p. 351-361, 1991.
- RUSSEL, E. W. **Soil conditions and plant growth**. 10.ed. London: Longman, 1973.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.
- SECCO, D.; ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.
- SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, n. 1, p. 407-437, 2007.
- SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Tillage effects on physical and hydrological properties of a typic argioquoll in Central Ohio. **Soil Science**, v. 168, n. 11, p. 802-811, 2003.

- SILVA, M. A. S.; MAFRA, Á. 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**, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.
- SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. Cap. 5, p. 205-274
- SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2. Ed. San Diego: Elsevier Science, 2003.
- 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**, v. 32, n. especial, p. 2613-2620, 2008.
- SPOOR, G.; FRY, R. K. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 28, n. 3, p. 217-234, 1983.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. Ed. New York: Oxford University, 2008.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.
- SUMNER, M. E. The electrical double layer and clay dispersion. In: SUMNER, M. E.; STEWART, B. A. (Org.). **Soil Crusting - Chemical and Physical Processes**. Advances in Soil Science. Boca Raton, Lewis Publishers, 1992. Cap. 1, p. 1-31.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, jun. 1982.
- TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p.301-309, 1998.
- TRICHES, R. M.; SCHNEIDER, S. Alimentação Escolar e Agricultura Familiar: reconectando o consumo à produção. **Saúde e Sociedade**, v. 19, n. 4, p. 933-945, 2010.
- Van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p.892-898, 1980.
- Van RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 284 p.

Van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, Â. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1985. 285 p.

WEIRICH NETO, P. H.; CAIRES, E. F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 257-261, 2000.