

**ESCARIFICAÇÃO COMO FORMA DE
INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO**

MÁRCIO LUIS VIEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, janeiro de 2011.

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

**ESCARIFICAÇÃO COMO FORMA DE
INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO**

MÁRCIO LUIS VIEIRA

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, janeiro de 2011.

CIP – Catalogação na Publicação

V658e Vieira, Márcio Luis
Escarificação como forma de incorporação de calcário em um
Latossolo Vermelho sob plantio direto / Márcio Luis Vieira. –
2011.
171 f. : il. ; 30 cm.

Orientação: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.
Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de
Passo Fundo, 2011.

1. Solos – Densidade. 2. Produtividade agrícola. 3. Solos -
Compactação. 4. Latossolos. 5. Palha – Utilização na
agricultura. 6. Química do solo. 7. Física do solo. 8.
Calcário. I. Klein, Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU : 631.543

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

“Escarificação como forma de incorporação de calcário em um
Latossolo Vermelho sob plantio direto”

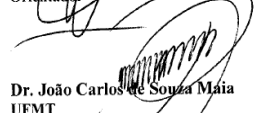
Elaborada por


MÁRCIO LUIS VIEIRA

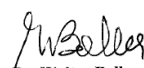
Como requisito parcial para a obtenção do grau de
“Doutor em Agronomia – Área de Produção Vegetal”


Aprovada em: 27/09/2010
Pela Comissão Examinadora

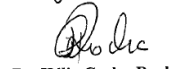

Dr. Vilsom Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

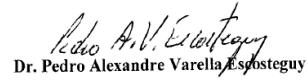

Dr. João Carlos de Souza Maia
UFMT


Dr. Arno Udo Dallmeyer
UFSM


Dr. Walter Boller
UPF


Dr. Vilsom Antonio Klein
Coordenador PPG Agro


Dr. Hélio Carlos Rocha
Diretor FAMV


Dr. Pedro Alexandre Varella Esposteguy
UPF

Ao **Vilmar**, meu pai;
A **Maria Guiomar**, minha mãe;
A **Daniela**, minha esposa, e
a **Maria Luiza** minha filha, pelo
amor e esforço incansável
para que eu completasse
mais esta etapa, pois sem
você eu nada teria
conseguido.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho teve a participação e a contribuição de inúmeras pessoas. Em especial gostaria de expressar meus agradecimentos às seguintes pessoas e entidades:

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força espiritual, vida e saúde.

A minha família, pela compreensão, paciência e muitos esforços despendidos durante a realização do curso.

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – UPF que, através do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, possibilitou a realização do Curso de Doutorado e deste trabalho com a disponibilização de estrutura e bolsa de estudos.

Ao Professor Dr. Wilson Antonio Klein pela orientação, confiança, incentivo, profissionalismo, amizade e principalmente paciência demonstrada ao longo do curso, e que acima de tudo foi um companheiro nessa jornada de descobertas e aprendizados pela ciência do solo.

Aos docentes do curso de pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

Aos professores Walter Boller e Pedro Alexandre Varella Escosteguy, membros do comitê de orientação, pela amizade, apoio e atenção.

Aos colegas do programa de pós-graduação, que de alguma forma ajudaram com comentários, críticas e sugestões, em

especial a Clóvis Dalri Marcolin e Alfredo Castamann, pela amizade, colaboração e convivência amigável no decorrer do curso.

Aos colegas da família do LAFAS: Marcos André Simon, Iradi João Biasuz Junior, João Paulo Massing, Giovani Zoldan, Fábio Durigon, Estér Maria de Lima, Matheus Bassegio, Tiago Madalosso e Maura de Oliveira pela colaboração na realização desse trabalho e amizade.

Aos funcionários da FAMV pelo apoio e amizade.

Aos funcionários do Centro de Extensão e Pesquisa Agropecuária pelo apoio nas atividades de campo.

A minha esposa Daniela, pelo apoio, amor, carinho e confiança, que possibilitaram mais esta vitória.

A minha pequena Maria Luiza que sentiu e soube compreender a necessidade de tempo demandada por esta tese e teve de ser privada de minha companhia em muitos momentos.

A todas as pessoas que, de diversas maneiras, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Resumo.....	1
Abstract.....	4
1 Introdução.....	6
2 Revisão de Literatura.....	10
2.1 Solo agrícola sob sistema plantio direto (PD).....	10
2.2 Compactação do solo.....	12
2.3 Atributos físico-hídricos afetados pelo manejo de solo	15
2.3.1 Influência da textura nas propriedades do solo	15
2.3.2 Densidade do solo.....	17
2.3.3 Resistência mecânica do solo à penetração.....	19
2.3.4 Geometria porosa do solo.....	20
2.3.5 Água no solo	22
2.3.6 Água disponível as plantas.....	24
2.3.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	26
2.3.8 Efeito dos atributos físicos sobre as culturas.....	29
2.4 Descompactação do solo em plantio direto	32
2.4.1 Práticas mecânicas.....	32
2.4.2 Efeitos sobre a conservação do solo.....	34
2.4.3 Efeitos sobre as culturas.....	36
2.4.4 Descompactação na semeadura.....	37
2.5 Acidez do solo.....	39
2.5.1 Acidez do solo em plantio direto.....	39
2.6 Atributos químicos afetados pela acidez.....	41
2.6.1 Efeito sobre as culturas.....	43

2.7 Calagem.....	45
2.7.1 Calagem em plantio direto.....	46
2.8 Conjugação de operações.....	48
3 Material e métodos.....	50
4 Resultados e discussões.....	65
4.1 Atributos físico-hídricos do solo	65
4.1.1 Textura do solo.....	65
4.1.2 Densidade de sólidos do solo (D _{ss}).....	68
4.1.3 Consistência do solo.....	70
4.1.4 Densidade do solo (D _s).....	78
4.1.5 Densidade máxima do solo (D _{máx}).....	82
4.1.6 Densidade relativa do solo (DR).....	89
4.1.7 Porosidades do solo.....	92
4.1.8 Resistência mecânica do solo a penetração (RP).....	100
4.1.9 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	106
4.2 Rendimento das culturas.....	111
4.2.1 Aveia, trigo e cevada.....	111
4.2.2 Soja.....	116
4.2.3 Girassol.....	118
4.2.4 Milho.....	121
4.3 Relações de variáveis físicas e culturas.....	123
4.4 Atributos químicos do solo	128
4.4.1 pH H ₂ O, índice SMP e matéria orgânica (MOS).....	128
4.4.2 Alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (SAI).....	131
4.4.3 Fósforo (P) e potássio (K).....	133

4.4.4 Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).....	134
4.4.5 Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (SB) e saturação por potássio (SK).....	135
4.4.6 Micronutrientes.....	136
5 Conclusões.....	137
6 Considerações Finais.....	138
Referências.....	140
Apêndices.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Tratamentos do experimento.....	53
2	Cultivar (CT), ano agrícola (AA), data de semeadura (DS), adubação, umidade gravimétrica na semeadura (Ug) e data de colheita (DC) em função das culturas.....	61
3	Teores de argila, silte, areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF) em função do manejo e profundidade (PROF) (6 meses).....	66
4	Teores de argila, silte e areia em função do manejo e profundidade (18 meses).....	67
5	Densidade dos sólidos do solo em função do manejo e profundidade (6 meses).....	68
6	Densidade dos sólidos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	69
7	Valores do teor de umidade a base de massa para o limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade (6 meses).....	70
8	Valores do teor de umidade a base de massa para o limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade (18 meses).....	71
9	Valores do teor de umidade a base de massa para o limite líquido (LL) em função do manejo e profundidade (6 meses).....	72
10	Valores do teor de umidade a base de massa para o limite líquido (LL) em função do manejo e profundidade (18 meses).....	72
11	Índice de plasticidade (IP) em função do manejo e profundidade (6 meses).....	73
12	Índice de plasticidade (IP) em função do manejo e profundidade (18 meses).....	74

13	Razão entre teor de água ótimo de compactação e limite plástico (UG/LP) em função do manejo e profundidade (6 meses).....	75
14	Razão entre teor de água ótimo de compactação e limite plástico (UG/LP) em função do manejo e profundidade (18 meses).....	76
15	Densidade do solo em função do manejo e profundidade (6 meses).....	78
16	Densidade do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	80
17	Densidade máxima do solo (DMS) e teor de água ótimo (UG) em função do manejo e profundidade (6 meses)....	82
18	Densidade máxima do solo (DMS) e teor de água ótimo (UG) em função do manejo e profundidade (18 meses)..	82
19	Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade (6 meses).....	83
20	Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade (18 meses).....	84
21	Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade (6 meses).....	89
22	Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	91
23	Porosidade total, volume de macroporos, microporos e criptoporos do solo em função do manejo e profundidade (6 meses).....	93
24	Porosidade total do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	96
25	Volume de macroporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	97
26	Volume de microporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	98

27	Volume de criptoporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	99
28	Resistência à penetração do solo na umidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade (6 meses).....	101
29	Resistência à penetração do solo na umidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade (18 meses).....	103
30	Resistência à penetração do solo na umidade correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade (6 meses).....	104
31	Resistência à penetração do solo na umidade correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade (18 meses).....	105
32	Densidade crítica do solo e relativa no IHO com a RP de 2 MPa, nos manejos de solo (6 meses).....	108
33	Densidade crítica do solo e relativa no IHO com a RP de 2 MPa, nos manejos de solo (18 meses).....	109
34	Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da aveia (ano 2006).....	111
35	Número de panículas (PAN), número de espiguetas/panícula (ESP), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da aveia (ano 2006).....	112
36	Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura do trigo (ano 2006).....	113
37	Número de espigas (EEP), número de espiguetas/espiga (ESE), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura do trigo (ano 2006).....	114
38	Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da cevada (ano 2006).....	114

39	Número de espigas (EEP), número de espiguetas/espiga (ESE), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da cevada (ano 2006).....	115
40	Número final de plantas (STD), número de grãos/planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da soja (ano 2006/2007).....	116
41	Percentual de vagens com 1 grão (V1G), percentual de vagens com 2 grãos (V2G), percentual de vagens com 3 grãos (V3G) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da soja (ano 2006/2007)....	117
42	Número de capítulos.m ⁻² em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008).....	118
43	Diâmetro de capítulos (cm) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008).....	119
44	Rendimento de grãos (kg.ha ⁻¹) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008).	120
45	Rendimento de grãos (kg.ha ⁻¹) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do milho (ano 2008/2009)....	121

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1 Vista frontal do protótipo.....	52
2 Vista lateral do protótipo.....	52
3 Croqui do experimento.....	54
4 Precipitação pluvial durante o ciclo das culturas solo..	64
5 Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (PD-6 meses).....	85
6 Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (PDE-6 meses).....	86
7 Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (PD-18 meses).....	87
8 Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (PDE-18 meses).....	88
9 Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa, em função do manejo (6 meses).....	106
10 Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa, em função do manejo (18 meses).....	107
11 Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e densidade do solo em função de diferentes manejos.....	123
12 Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e densidade relativa do solo em	

	função de diferentes manejos.....	124
13	Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e RP na CC e PMP em função de diferentes manejos.....	125
14	Relação entre rendimento de grãos de girassol e densidade do solo em função de diferentes manejos.....	125
15	Relação entre rendimento de grãos de girassol e densidade relativa do solo em função de diferentes manejos.....	126
16	Relação entre rendimento de grãos de girassol e RP na CC e PMP em função de diferentes manejos.....	127

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice		Página
1	Dados de pH em água do solo, Índice SMP e teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	166
2	Teores de alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (SAI) em função do manejo e camadas (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	167
3	Teores de fósforo (P) e potássio (K) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	168
4	Teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em função do manejo e camadas (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	169
5	Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	170
6	Saturação de bases (Bases) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	171
7	Teor de enxofre (S) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	172
8	Teores de boro (B), manganês (Mn), zinco	

(Zn) e cobre (Cu) em função do manejo e profundidade (18 meses, sendo a amostra formada por 5 subamostras).....	173
---	-----

ESCARIFICAÇÃO COMO FORMA DE INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO

Márcio Luis Vieira¹; Vilson Antonio Klein²

RESUMO – No sistema de plantio direto (PD) onde a semeadura é realizada em solo coberto com restos culturais com um mínimo de revolvimento, quando manejado de forma inadequada e continuado, pode ocorrer compactação, com todas as suas consequências negativas a produção e preservação do ambiente. Aliado a isso nessas áreas sob plantio direto, corretivos e fertilizantes são aplicados na superfície ou incorporados pelos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras subsuperficialmente, o que ocasiona um gradiente de concentração de nutrientes ou elementos tóxicos na camada superficial em relação ao restante do perfil. As limitações físicas e químicas do solo em profundidade acarretam uma concentração do sistema radicular na camada superficial, predispondo as plantas a déficit hídrico. Este trabalho teve por objetivo estudar as alterações nas propriedades físico-químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico de Passo Fundo (RS), conduzido sob PD e submetido a diferentes métodos de descompactação e correção do solo com calcário, e o efeito destas alterações sobre o rendimento das culturas. Os tratamentos foram: plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDE), plantio direto com calcário em superfície (PD+CS), plantio

¹ Doutorando do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal.

² Orientador, Eng.-Agr., Dr. Professor da FAMV/PPGAgro/UPF

direto escarificado com calcário em superfície (PDE+CS), plantio direto escarificado com calcário incorporado e em superfície (PDE+CI+CS) e plantio direto escarificado com calcário incorporado (PDE+CI). Avaliou-se a textura, a consistência, as densidades dos sólidos e do solo, a densidade relativa, a porosidade, a densidade máxima do solo, a resistência mecânica à penetração (RP), o intervalo hídrico ótimo (IHO), pH em H₂O, índice SMP, matéria orgânica do solo (MOS), teores de P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, saturação de bases, saturação por Al e K, CTC e micronutrientes. As culturas avaliadas foram: aveia, trigo, e cevada (2006), soja (2006-07), girassol (2007-08) e milho (2008-09). Os resultados indicaram que os grupos de manejo com mobilização do solo apresentaram densidade do solo, densidade relativa, porosidade, densidade máxima do solo e resistência mecânica à penetração (RP) inferior ao grupo de manejos com PD, demonstrando ser uma alternativa para a conservação do solo e da água, com efeitos que permaneceram por mais de 18 meses. O IHO apresentou densidade crítica semelhante entre os manejos de solo. Do ponto de vista químico, o pH em H₂O e o índice SMP aumentaram nos manejos com aplicação de calcário, diminuindo os teores de alumínio trocável, reduzindo a acidez potencial do solo e aumentando a saturação de bases. O rendimento de grãos das culturas teve comportamento distinto entre os sistemas de manejo de solo e os anos agrícolas. Conclui-se que a melhoria nas condições químicas (aumento de pH e redução da acidez potencial e saturação com alumínio) e físicas (redução da densidade do solo e RP e aumento na porosidade) do solo nem sempre conseguem ser refletidas em

rendimento das culturas, sendo influenciadas pelas características climáticas vigentes.

Palavras-chave: Compactação, propriedades físicas, propriedades químicas, rendimento de culturas.

CHISELING AS A LIME INCORPORATION IN OXISOL UNDER NO-TILLAGE

Márcio Luis Vieira; Vilson Antonio Klein

ABSTRACT – In the no-tillage (NT) where the seeding is performed in soil covered with crop residues with minimum tillage, when handled improperly, and continued, compaction can occur, with all its negative consequences on production and environmental conservation. Allied to this in those areas under tillage, lime and fertilizer are applied on the surface or incorporated by the seed drills of seeders subsurface, which causes a concentration gradient of nutrients or toxic elements in the surface layer relative to the rest of the profile. The limitations of physical and chemical soil lead concentration in depth of the root system in the surface layer, predisposing plants to water deficit. The present study aims to analyze the changes in physical and chemical properties of an Oxisol of the Passo Fundo (RS), conducted under no-tillage and subjected to different methods of decompression and correction of the soil with lime, and the effect of these changes on crop yields. The treatments were: no-tillage (NT), chiseled (C), no-tillage with lime surface (NT+LS), chiseled with lime surface (C+LS), chiseled with lime surface and embedded (C+LS+E) and chiseled with lime embedded (C+E). The following soil parameters were assessed: the texture, consistency, bulk density and particle density, the relative density, porosity, maximum density of the soil, penetration resistance (PR) and least limiting water range (LLWR), pH H₂O, SMP, MOS, levels of P, K, Ca, Mg, Al, H + Al, base saturation, Al saturation, and

K, CTC and micronutrients.. The crops were: oats, wheat, and barley (2006), soybean (2006-07), sunflower (2007-08) and corn (2008-09). The results indicated that groups of management with tillage showed bulk density, relative density, porosity, maximum density and PR than the NT group managements, proving to be an alternative for the conservation of soil and water, with effects that lasted for over 18 months. The LLWR had similar critical density between soil managements. From the chemical point of view, the pH H₂O, SMP increased in plots that contemplated application of lime in different methodologies, reducing the levels of exchangeable aluminum, reducing the potential acidity of the soil and increasing base saturation, being restricted depth 10 cm. The yield of crops was different in the systems of soil management and crop years. It is concluded that the improvement in chemical (pH increase and reduction of acidity and aluminum saturation) and physical (reduction of bulk density and PR and increase in porosity) conditions of the soil cannot always be reflected in crop yields, and greatly influenced by prevailing climatic characteristics.

Keywords: Soil compaction, physical properties, chemical properties, crop yield.

1 INTRODUÇÃO

No sistema de plantio direto, em que a semeadura é realizada em solo coberto com restos culturais, com o mínimo de revolvimento da camada superficial do solo, sendo que este tende a minimizar a formação de camadas compactadas no solo, enquanto a utilização de forma inadequada do plantio direto pode resultar em aumento da densidade do solo.

A compactação do solo, originada da pressão exercida pelos rodados das máquinas e por implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de umidade inadequadas para manejo, é um dos principais problemas físicos que limitam a produtividade das culturas. Esta compactação, caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar, limita a infiltração e a redistribuição de água no solo; reduz as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, que afeta o crescimento das raízes em busca de água e nutrientes; limita o crescimento radicular por impedimento mecânico, culminando com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas.

Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos. Atualmente, no Brasil, como no resto do mundo, há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas e possíveis problemas de compactação, o que se deve em grande parte

às operações mecanizadas realizadas sem considerar a umidade adequada do solo e a utilização de máquinas e implementos cada vez mais pesados e com relação rodado/solo inadequada.

A escarificação é apontada como uma ferramenta para proporcionar a descompactação do solo, mesmo em áreas sob plantio direto, mas não se sabe a duração de seus efeitos e de que forma eles atuam ao longo do tempo sobre o movimento da água no solo e sobre o rendimento das culturas.

Nas áreas sob plantio direto, corretivos e fertilizantes são aplicados na superfície ou incorporados pelos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras a uma profundidade máxima de 0,12 a 0,15 m, o que ocasiona um gradiente de concentração de nutrientes ou elementos tóxicos bastante distinta na camada de 0-10 cm em relação ao restante do perfil, acarretando uma concentração do sistema radicular nessa camada. Esta é uma questão que vem preocupando técnicos e produtores que trabalham com o sistema plantio direto no Brasil, tendo em vista que o revolvimento do solo não permite a manutenção da qualidade do solo (agregação, espaço poroso e infiltração de água) nesse sistema. Desta forma, as limitações químicas do solo às plantas por excesso de acidez ou pela presença de elementos químicos tóxicos é corrigida adotando a prática de reaplicar o calcário sem incorporá-lo ao solo.

Em muitas situações, isto se apresenta como um impedimento químico ao crescimento do sistema radicular além desta camada, principalmente pela toxidez de alumínio, trazendo como consequência a dificuldade das raízes em penetrar mais

profundamente, para dali extrair água e assim a planta resistir a períodos de deficiência hídrica.

Diante dessa situação de adoção em grande escala do plantio direto, os métodos convencionais de incorporação de calcário e fertilizantes ao solo, com o uso de arados e grades, não são mais recomendados uma vez que mobilizam excessivamente o solo desestruturando-o e expondo-o a erosão hídrica.

O conhecimento da dinâmica da acidez a partir da superfície do solo, no sistema plantio direto, ao longo do tempo, é necessário para estabelecer ajustes na recomendação de calagem e na frequência de reaplicação do corretivo. A reacidificação, processo que ocorre naturalmente no solo, se manifesta de forma diferenciada no sistema plantio direto. A decomposição de resíduos culturais e o uso de adubos nitrogenados depositados na superfície do solo provoca uma intensa acidificação da camada superficial, formando um gradiente de pH a partir da superfície.

A conjugação de operações (escarificação+ destorroamento/nivelamento em conjunto com a aplicação de corretivos) surge como uma alternativa para reduzir a compactação do solo e, incorporar o calcário mais profundamente, conseqüentemente, diminuindo a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração do sistema radicular das plantas e propiciando um ambiente favorável sem limitações físicas e químicas para o desenvolvimento deste.

A hipótese formulada para esse trabalho foi de que a descompactação mecânica do solo em áreas sob plantio direto com o uso de escarificador conjugado à aplicação de calcário em profundidade melhora suas propriedades físico-químicas, as condições

de conservação do solo e da água e exerce influência positiva sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas e o rendimento das culturas.

Para verificar esta hipótese realizou-se esse trabalho, que teve como objetivo estudar as alterações nas propriedades físico-químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico de Passo Fundo (RS), conduzido sob sistema plantio direto e submetido à diferentes métodos de descompactação e correção do solo, e o efeito destas alterações sobre o rendimento das culturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo agrícola sob sistema plantio direto (SPD)

A desestruturação do solo, a compactação e a redução nos teores de matéria orgânica são considerados os principais indutores da degradação dos solos agrícolas. Tal degradação, com todas as suas implicações e nefastas consequências, tem resultado no desafio de viabilizar sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, criando-se novos paradigmas tecnológicos baseados na sustentabilidade. No novo conceito de sistema agrícola produtivo, a fertilidade do solo assume uma abrangência maior que a habitual, expressada apenas nos parâmetros de acidez, disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica. As variáveis físicas, como armazenamento e conservação de água, difusão do calor e permeabilidade ao ar e à água, passam a ter relevância na avaliação da fertilidade do solo (DENARDIN & KOCHHANN, 1993). Neste contexto, o emprego efetivo do sistema plantio direto, com as suas premissas básicas, mostra-se muito mais importante e eficiente para as regiões tropicais e subtropicais exploradas com agricultura (FANCELLI & FAVARIN, 1989).

A área estimada sob sistema plantio direto (SPD) no planeta representa aproximadamente 7 % do total cultivado, o que, em valor numérico, significa 95,5 milhões de ha, estando 85 % no continente americano (FEBRAPDP, 2009). No Brasil, estima-se que a área ocupada com SPD seja de aproximadamente 25,5 milhões de ha, o que representa quase 27 % do total no mundo.

O SPD pode ser dividido em duas fases: a de instalação, correspondente aos primeiros quatro ou cinco anos após o início do sistema, e posteriormente a de manutenção, em que claramente são observadas alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (SALET, 1994).

De acordo com Assis & Lanças (2005), o plantio direto é uma prática conservacionista especialmente adequada para as condições de ambiente de regiões tropicais, onde se faz necessário manter o solo protegido do sol e da chuva. Este sistema caracteriza-se pela eficiência no controle de perdas de solo e água e na redução nos custos operacionais, principalmente pela eliminação de operações de preparo do solo, tais como a aração e a gradagem. A sua adoção tem viabilizado a implantação de sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, tornando-se a base da sustentabilidade na agricultura.

Os fatores do solo que afetam o desenvolvimento radicular podem ser divididos em fatores biológicos, fatores químicos, como presença de nutrientes e elementos tóxicos, e fatores físicos, como resistência mecânica à penetração, disponibilidade hídrica e aeração (ROSOLEM, 1995). Quando um solo não saturado é submetido à determinada pressão, ocasionando redução de volume com consequente aumento de densidade, ocorre o processo de compactação do solo (GUPTA & ALLMARAS, 1987). O arranjo estrutural do solo, a consistência, a porosidade total, o número e tamanho dos poros e a difusão de gases são afetados pela compactação, que, por consequência, afeta o crescimento das raízes (TAYLOR & BRAR, 1991). Em termos práticos, o uso intensivo de máquinas, segundo

Camargo e Alleoni (1997), vem tornando comuns os problemas de compactação em solos agrícolas.

De acordo com Silva et al. (2008) que estudaram diversos manejos de solo, as maiores alterações nos atributos físico-hídricos do solo ocorreram na área sob plantio direto, que, ainda assim, apresentou níveis considerados favoráveis ao desenvolvimento de plantas. Estes autores também observaram que o pisoteio de animais, tanto em área sob pastagem cultivada como em área de cerrado nativo pastejado, promoveu alterações mais severas nos atributos físico-hídricos da camada de 5 a 10 cm. A resistência do solo à penetração, a macroporosidade e a condutividade hidráulica saturada se apresentaram mais sensíveis e foram, portanto, melhores indicadores dos efeitos do uso e manejo do solo (SILVA et al., 2008).

2.2 Compactação do solo

Com a crescente utilização do sistema plantio direto, os atributos físicos do solo tem sido modificados, necessitando, portanto, de pesquisas com períodos de duração mais longos para se poder estudar os fenômenos ligados à sua estrutura. Alguns atributos do solo são amplamente reportados na literatura, tais como a densidade do solo que mostra uma tendência de aumento nos primeiros anos de cultivo e, com o passar dos anos, apresenta uma tendência de diminuição dos seus valores. Entretanto muitas dúvidas sobre o sistema persistem, sendo necessário obter informações de outros atributos físicos (ASSIS & LANÇAS, 2005).

Na literatura, existem inúmeros relatos dos níveis de compactação do solo cultivado sob sistema plantio direto. Contudo, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação do solo, sob sistema plantio direto, que influi negativamente na produção das culturas e quais os limites críticos das propriedades físico-mecânicas que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004).

A compactação do solo é consequência de alterações no arranjo das partículas do solo condicionadas por fatores internos, como textura, estrutura, alternância de secagem e umedecimento, e externos, como o tráfego de máquinas, implementos, principalmente quando efetuado em determinados teores de água. A compactação diminui o volume ocupado por determinada massa de solo diminuindo o volume de poros com diâmetros maiores (macroporos), que permitem livre circulação de ar e água. Por conseguinte, modifica-se os atributos físicos do solo, como aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração, que afetam a disponibilidade de nutrientes para as plantas, as condições do solo para desenvolvimento de microorganismos e a região ocupada pelas raízes, a rizosfera (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

O manejo do solo para fins agrícolas é responsável por alterações na estrutura do solo, o que afeta as propriedades físico-hídricas do mesmo. Em razão disso, a quantidade de água retida a determinadas tensões varia, o que torna o conceito de água no solo disponível às plantas não tão simples de ser interpretado (KLEIN & CAMARA, 2007). Em solos compactados, a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RP),

comumente, são limitantes ao desenvolvimento das plantas, mesmo havendo água disponível (KLEIN & LIBARDI, 2000).

Segundo Borges et al. (1999), o aumento da compactação acarreta no incremento do teor de água no solo e a redução da porosidade de aeração, que podem alterar o suprimento de oxigênio e a disponibilidade de nutrientes e aumentar o nível dos elementos tóxicos às plantas e aos microrganismos. Por sua vez, o aumento da compactação do solo aumenta a resistência à penetração das raízes, acarretando situações em que, mesmo havendo água disponível às plantas, o sistema radicular cessa o crescimento, afetando o desenvolvimento das plantas e sua produção (KLEIN & CAMARA, 2007).

Solos que apresentam alta resistência mecânica à penetração de raízes são comuns em áreas agrícolas onde se utilizam máquinas com relação rodado solo inadequada ou em locais submetidos ao pisoteio intenso de animais (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Um solo compactado tem o arranjo estrutural, a porosidade total, a difusão de gases, a infiltração e o armazenamento de água comprometidos, que, por conseqüência, afetam o crescimento radicular das plantas (TAYLOR & BRAR, 1991). Por sua vez, o rompimento de camadas compactadas do solo por meio de equipamentos moto mecanizados tem custo elevado (DIAS JUNIOR, 2000).

Secco et al. (2009) estudando diferentes níveis de compactação encontraram as maiores densidades do solo (Ds) e resistência mecânica a penetração de raízes (RP), em Latossolos cultivados sob sistema plantio direto, na camada de 0,07-0,12m, sendo

que, os níveis de compactação do solo existentes nos dois Latossolos reduziram o rendimento de grãos na cultura do milho e trigo, mas não o rendimento da soja, indicando que valores de D_s e R_p observados são restritivos ao crescimento e desenvolvimento daquelas culturas, ressaltando que uma operação de escarificação do solo aumentou o rendimento de grãos da cultura do milho no LVdf em relação aos três estados de compactação do solo, porém não modificou o rendimento da soja.

2.3 Atributos físico-hídricos afetados pelo manejo de solo

2.3.1 Influência da textura nas propriedades do solo

As modificações provocadas pelo revolvimento do solo na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico, alteram as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas em sistemas não irrigados. O preparo modifica também a rugosidade superficial, com a incorporação de resíduos vegetais, ocasionando diminuição da infiltração e aumento da evaporação de água. Além do manejo, a granulometria influencia a retenção de água, pois as forças de adsorção dependem, basicamente, da espessura do filme de água que recobre as partículas, a qual varia de acordo com sua superfície específica. Assim, a retenção de água é maior em solos argilosos e com alto teor de matéria orgânica (SILVA et al., 2005).

De acordo com Nhantumbo & Cambule (2006), a textura do solo expressa pela areia mais argila pode ser usada para estimar a densidade máxima e compará-la com a obtida através do ensaio de Proctor, assim como o teor de água dos solos agrícolas. A inclusão da fração silte na análise melhora a relação entre a textura e os parâmetros relacionados. O estudo foi realizado em amostras de solos agrícolas, para uma melhor estimativa da compactação dos solos da província de Maputo.

Klein et al. (2010) avaliando 100 amostras de solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, correlacionaram o teor de água do solo no ponto de murcha permanente (PMP) em função do teor de argila destes solos e obtiveram um R^2 de 0,91. Isso significa dizer que cerca de 91% da variação do teor de água do solo na condição do PMP podem ser atribuídos ao fator argila, observando-se um incremento do teor de água com o aumento do teor de argila, na proporção de $0,1\text{g g}^{-1}$ para um aumento de 294g kg^{-1} no teor de argila.

De acordo com Eberhardt et al. (2008), a textura tem influência sobre o fósforo remanescente do solo, uma vez que todas as frações tiveram correlação com ele, com oposição entre as partículas finas (fração argila e silte), com correlação negativa ($r = -0,82$ e $-0,69$ respectivamente), e as partículas grossas (fração areia fina e grossa), com correlação positiva ($r = 0,60$ e $0,71$). Tal influência da textura é devida à presença de óxidos de Fe e de Al (gibbsite, goethita, óxidos de Fe e Al livres e amorfos) na fração argila.

2.3.2 Densidade do solo

A densidade do solo, definida como o quociente de seu peso de sólidos por seu volume é afetada por cultivos que alteram a estrutura e por conseqüência o arranjo e o volume dos poros. Estas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (KLEIN, 1998).

Segundo Beltrame & Taylor (1980), as causas das alterações na densidade dos solos são naturais, difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo, como por exemplo, a eluviação de argilas e as forças mecânicas originadas da pressão causada pelos rodados das máquinas agrícolas e pela própria ação de implementos sobre o solo. Afirmam, ainda que esta pressão é originária das forças de tração e do próprio peso do trator e dos implementos, sendo o tráfego excessivo o principal responsável pela compactação.

Trabalho de Assis & Lanças (2003) demonstrou uma diminuição da densidade do solo de acordo com o tempo de adoção do sistema plantio direto, a partir dos 12 anos, sendo que se deve observar que os resultados relacionados com os sistemas de manejo do solo apresentam uma diversidade de respostas a um mesmo sistema, por causa de características do solo, da planta, do clima e outros. Os maiores valores de densidade do solo nos primeiros anos de implantação do sistema plantio direto se devem ao não revolvimento do solo e com o passar dos anos o efeito nocivo dessa compactação

desaparece, à medida que o plantio direto se estabelece adequadamente.

Cavaliere et al. (2006) testando três manejos sendo estes o plantio sem revolvimento do solo (PSR), preparo mínimo com escarificação (PM) e preparo convencional com aração e gradagem (PC) concluíram que os sistemas de preparo influenciam a densidade do solo e a resistência do solo à penetração nas camadas estudadas, sendo que, a retenção de água no solo não é influenciada pelos sistemas de preparo apenas pela densidade do solo.

O sistema de manejo do solo é considerado uma das fontes mais importantes de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. Muitos trabalhos têm comparado sistemas de manejo com e sem revolvimento do solo, sendo que o alcance da dependência espacial da densidade do solo foi de 7,5 m no plantio direto e 8,5 m no preparo convencional. O maior alcance no preparo convencional, comparado ao plantio direto sugere maior homogeneidade desta variável neste sistema de manejo, possivelmente devido ao intenso revolvimento do solo, o que pode ter promovido maior desagregação do solo, evidenciada pela redução da macroporosidade. Provavelmente essa desagregação está associada ao tráfego mais intenso de máquinas e à redução dos teores de carbono orgânico do solo (9,5 e 13,3 g kg⁻¹, respectivamente, no preparo convencional e plantio direto), o que justifica a menor densidade do solo no plantio direto, comparada à do preparo convencional (SCHAFFRATH et al., 2008).

De acordo com Lima et al., (2007) informações importantes relacionadas ao manejo do solo e de irrigação de culturas podem ser obtidas a partir da avaliação de indicadores facilmente

mensuráveis como a densidade e a umidade do solo. Considerando-se um valor médio de densidade de $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$ encontrado em estudo de um Argissolo Vermelho distrófico arênico, esta não representa um fator crítico para o desenvolvimento das plantas.

2.3.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas e modificadas pelos sistemas de preparo do solo. O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo numa zona próxima à extremidade das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes (BENNIE, 1996). Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IJIMA & KONO, 1991). Além disso, estudos recentes indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas (MASLE & PASSIOURA, 1987) e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE & FARQUHAR, 1988). Valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie (BENGOUGH & MULLINS, 1990). Desta forma, a resistência do solo à penetração é informação fundamental para a avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do solo para o crescimento das plantas.

O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração (PASSIOURA, 1991). Segundo Russel & Goss (1974), a pergunta a ser feita seria qual a impedância mecânica máxima do solo suportável para que não haja prejuízos à produção agrícola. Silva et al. (2002) relatam que um valor de 2 MPa de resistência à penetração do solo tem sido associado a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

Lima et al. (2007) avaliaram o intervalo de densidade crítica (Dsc) de um Argissolo Vermelho distrófico arênico no município de Santa Maria-RS sob plantio direto desde 1989, considerando a disponibilidade de água para as culturas e os valores restritivos de resistência à penetração (RP de 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa), e verificaram que adotando-se uma RP de 1,5 MPa, valores de densidade inferiores a 1,37 e superiores a 1,69 Mg m⁻³ podem ser restritivos ao crescimento radicular. Quando considerada uma RP de 2MPa, a densidade crítica na umidade volumétrica em capacidade de campo foi de 1,76 Mg m⁻³ e na umidade volumétrica no ponto de murcha permanente foi de 1,44 Mg m⁻³.

2.3.4 Geometria porosa do solo

Os sistemas de preparo do solo promovem modificações nas propriedades físicas como a agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), a densidade e a porosidade do solo (DE MARIA et al., 1999). A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (DIAS JR. & PIERCE, 1996). De forma geral

estas propriedades funcionam como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas.

De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada por provocar modificações morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. As raízes diminuem de diâmetro para penetrar em pequenos poros, pois a resistência mecânica do solo estimula a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas (RUSSEL & GOSS, 1974). Portanto, existe uma estreita relação entre distribuição do diâmetros dos poros do solo e crescimento radicular, com crescimento de raízes maior onde há maior número e continuidade de microporos (HATANO et al., 1988).

Por outro lado, foi verificado que solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes, por causa do menor contato solo/raiz, provocando também um menor desenvolvimento das plantas (HÄKANSSON, 1990; BEUTLER & CENTURION, 2003).

Klein & Libardi (2002), estudando as alterações que o manejo do solo para fins agrícolas provoca nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, concluíram que o manejo do solo em área irrigada aumentou a densidade do solo até à profundidade de 0,4 m, diminuindo a porosidade total e alterando a distribuição do diâmetro dos poros, acarretando a conseqüente diminuição do volume de macroporos e aumento de micro e criptoporos, sendo que, em densidades superiores a $1,256 \text{ Mg.m}^{-3}$ a porosidade de aeração passou a ser limitante (inferior a $0,10 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

Bertol et al. (2000), avaliando diferentes manejos de solo em um Cambissolo Húmico háplico, mostram que a densidade e microporosidade do solo aumentam na semeadura direta em relação ao preparo convencional, com conseqüente diminuição da macroporosidade, porosidade total e relação macroporos/porosidade total, na profundidade de 0-5,0 cm; na profundidade de 5,0-15,0 cm. No entanto, a microporosidade aumenta e a relação macroporos/porosidade total aumenta na semeadura direta em relação ao preparo convencional, e os demais atributos não são afetados.

2.3.5 Água no solo

O solo, o reservatório de água para as plantas, é afetado pelo manejo e práticas culturais que alteram a dinâmica e a retenção de água nos seus poros. Esta retenção de água na matriz do solo é governada por duas forças principais: as forças capilares e as forças de adsorção, as quais se denominam de forças mátricas que dá origem ao termo potencial mátrico da água no solo. O gráfico que relaciona o teor de água no solo com o potencial mátrico se denomina curva de retenção da água no solo (KLEIN, 1998).

As condições superficiais são de grande importância para a infiltração da água no solo e para determinar as diferenças observadas entre os sistemas de cultivo em solos profundos. O plantio direto é também indicado para regiões semi-áridas em que mantém maior umidade do solo e se promove o crescimento da raiz na superfície do solo e, em alguns casos, raízes profundas no perfil do

solo também, em especial nos anos de baixa pluviosidade. Na superfície do solo, as diferenças entre os sistemas de preparo do solo em relação ao conteúdo de água são mascarados por pequena capacidade de exploração de água. Nestes solos, o rendimento é favorecido pela água acumulada no perfil, mas depende da distribuição favorável da chuva durante toda a época de cultivo, incluindo o período de enchimento dos grãos (LAMPURLANÉS et al., 2001)

De acordo com Reichardt (1987), sistemas de manejo que possibilitem a manutenção de maior volume de água disponível para as culturas contribuem para a diminuição do estresse hídrico. Muitos fatores afetam a retenção da água no solo, sendo o principal deles a textura, pois ela determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, determinando em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros. Arruda et al. (1987) tentaram efetuar uma correlação entre textura do solo e água disponível e concluíram que a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, baseados somente na textura podem levar a conclusões equivocadas, em contrapartida, Klein et al. (2010) relatam que o teor de argila e o teor de argila+silte do solo permitem determinar o teor de água no solo no PMP, e a equação $PMP(g\ g^{-1})=0,0003*Argila\ (g.kg^{-1})+0,0118$ pode ser utilizada para estimar o PMP.

Conforme Borges et al. (1999), o aumento da compactação acarreta o aumento da umidade do solo e a redução da porosidade de aeração, que podem implicar na redução do suprimento de oxigênio, afetar a disponibilidade de nutrientes e de elementos em níveis tóxicos às plantas e aos microrganismos.

A avaliação do processo da redistribuição da água no solo, em condições de campo, demanda considerável tempo e apreciável custo, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a freqüentes alterações no tempo (LOYOLA & PREVEDELLO, 2003) e da estrutura (KLEIN & LIBARDI, 2000).

2.3.6 Água disponível às plantas

De acordo com Klein (1998), o conceito de água disponível (AD), como aquela contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é indispensável para o correto manejo da água e orientação de projetos de irrigação. O critério é controvertido mas se usado com bom senso é de grande utilidade no entendimento da dinâmica da água e sua disponibilidade às culturas. A grande dificuldade é estabelecer critérios para a definição da umidade na qual o solo se encontra na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente.

Em relação a este ponto, Reichardt (1987) fez uma detalhada revisão sobre “capacidade de campo” citando o trabalho pioneiro de Veihmeyer e Hendrickson, que definem a “capacidade de campo como sendo a quantidade de água retida no solo, depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente, o que geralmente ocorre dois a três dias depois de uma chuva, ou irrigação, em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes”.

O principal fator que determina a murcha permanente das plantas é a taxa de movimento de água através do solo até as raízes como comprovaram Van Lier e Libardi (1997) para a cultura do arroz. Por outro lado Letey (1985) e Orellana et al. (1997) frisam que em determinadas situações, nem toda a água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente é disponível às plantas, introduzindo assim, o conceito de que a faixa de umidade não limitante, definida como intervalo hídrico ótimo (IHO), como sendo a faixa de umidade do solo cujos limites são definidos considerando-se além da capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente, a resistência à penetração e a porosidade de aeração do solo.

Albuquerque et al. (2006) avaliaram o efeito do preparo do solo e de formas de aplicação de calcário em experimento de longa duração, nas características de um Latossolo Bruno Alumínico argiloso e nos componentes do rendimento da cultura da soja e concluíram que a maior umidade volumétrica e a água disponível nos sistemas de plantio direto sem mobilização podem ser devido ao maior volume de microporos e teor de carbono orgânico (CO) nestes sistemas.

Por meio da análise de correlação dos dados disponíveis da camada de 0–0,10 m, observaram que o teor de CO, a estabilidade de agregados e a microporosidade apresentaram correlação positiva com a umidade volumétrica e com a água disponível, enquanto a macroporosidade apresentou relação negativa. O conteúdo de CO e o volume de microporos foram responsáveis pela retenção de água no solo, já a estabilidade de agregados pode ter apresentado uma relação

indireta em virtude de sua relação positiva com a microporosidade e com o conteúdo de CO (ALBUQUERQUE et al., 2006).

2.3.7 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água e porosidade, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes. Num solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Desta forma, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações (ARAÚJO et al., 2004).

Neste contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998), a partir do trabalho de Silva et al. (1994), incorpora num único parâmetro a amplitude de água disponível do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que o solo está submetido. Desta maneira, o IHO é utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo, como proposto por Silva et al. (1994).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo (DE MARIA et al., 1999), porosidade do solo (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA & ROLOFF, 1996; DE MARIA et al., 1999; ROSOLEM et al., 1999; BEUTLER et al., 2001).

Neste sentido, Lal (1994) sugere que estas avaliações utilizem medidas integradoras do comportamento físico do solo, fazendo menção ao IHO. Os valores médios de propriedades, como densidade, água disponível e porosidade do solo, permitem comparar os efeitos dos sistemas de manejo e, por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a utilização do IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, aeração e resistência do solo à penetração, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas. Imhoff et al. (2001) utilizaram o conceito do IHO juntamente com a pressão de preconsolidação para estimar as pressões críticas que podem ser aplicadas sem causar a degradação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Para Bengough et al. (2005), o intervalo hídrico ótimo, considerado como a mínima limitação da água no solo, quando usada em conjunto com o monitoramento da água no solo, prevê um método de determinação de estresses físicos do solo agindo em uma cultura durante um período vegetativo. O sistema radicular e o alongamento individual das raízes estão muitas vezes limitados à resistência do

solo, onde as raízes têm encontrado formas de penetrar e explorar solos compactados. A modelagem e métodos de análise de imagem, em combinação com métodos moleculares e de microscopia, são promissoras técnicas para dar novas perspectivas para controlar os níveis de alongamento da raiz no nível celular, e de como responder à mudanças nas raízes das tensões ambientais. Isso deve permitir que, em última análise, abordagens mais orientadas para a seleção de plantas por análise radicular para as culturas problema tragam benefícios crescentes em solos com pequeno intervalo hídrico ótimo.

As alterações estruturais decorrentes do manejo inadequado também alteram a distribuição de tamanho e continuidade de poros (OLIVEIRA et al., 2002 e OLIVEIRA et al., 2004) e modificam, conseqüentemente, a dinâmica da água no solo relacionada à infiltração e recarga do lençol freático (REICHERT et al., 2007). Como resultado, o solo perde sua capacidade produtiva e tem a susceptibilidade à erosão aumentada, podendo desencadear perdas irreversíveis ao ambiente. As alterações estruturais dos solos em áreas de proteção ambiental resultam em restrições ao crescimento das plantas, ao aumento da erosão e à diminuição da produção de água na bacia hidrográfica, desencadeando o processo degradativo dessas áreas essenciais para a sustentabilidade do ambiente (LIMA et al., 2009).

Kaiser et al. (2009) comparando o IHO em um Latossolo argiloso com três níveis de compactação concluíram que a compactação do solo reduz o IHO no perfil do solo explorado pelas raízes, e a amplitude de variação e a densidade crítica obtida são dependentes do valor de resistência à penetração considerada

limitante. A resistência do solo à penetração e à aeração do solo são os principais fatores limitantes para esse Latossolo sob altos níveis de compactação. As raízes do feijoeiro não cresceram na camada em que o IHO foi nulo com resistência crítica de 3 MPa.

2.3.8 Efeito dos atributos físicos sobre as culturas

A compactação do solo é considerada por Freitas (1994), a maior limitação à alta produtividade das culturas em todo o mundo, pois afeta diretamente o crescimento das raízes, diminuindo a capacidade de infiltração de água no solo, reduzindo a translocação de nutrientes e limitando a camada para ser explorada pelas raízes. Destaca ainda que, por depender de vários fatores, principalmente da umidade do solo no período de crescimento das raízes, o efeito da compactação sobre a produção das culturas é difícil de ser quantificado.

Rosolem et al. (1994) mostraram que a compactação do solo afetou o crescimento radicular, mas não afetou a produção de matéria seca total e da parte aérea de plantas de milho. Gediga (1991) constatou que, em níveis considerados intermediários de compactação do solo, houve incrementos no acúmulo de massa na parte aérea do milho.

Para Bennie (1996), é difícil generalizar conclusões, pois a influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular é decorrente de diversos fatores, que dependem das características genéticas das plantas, das condições ambientais e do estágio de desenvolvimento do vegetal. De acordo com Falleiro et al. (2003) as

alterações edáficas, provocadas pelos diferentes sistemas de preparo, podem requerer ajustes no manejo das culturas e nas recomendações de adubação e calagem. Estes ajustes podem ocorrer de acordo com a região, em decorrência das diferenças no manejo e na rotação de culturas empregada ou de fatores ligados ao clima e ao solo.

Foloni et al. (2003) afirmam que o impedimento físico em subsuperfície alterou a distribuição do sistema radicular das plantas de milho ao longo do perfil do solo, porém, não diminuiu a produção total de raízes, sendo que, uma camada compactada com resistência à penetração de 1,4 MPa impediu o sistema radicular do milho atravessar essa camada e se desenvolva em profundidade. Secco et al. (1996), trabalhando com a cultura da soja, não observaram diferenças no rendimento de grãos comparando vários sistemas de manejo de solo, entre eles o plantio direto e a escarificação em plantio direto, sendo que, Vieira et al. (2004) também não encontraram diferenças significativas no rendimento de grãos de soja comparando plantio direto com plantio direto escarificado. Em contrapartida, Ferreras et al. (2001) concluíram que o rendimento de soja sob plantio direto foi 47,88% inferior ao obtido em área sob plantio direto escarificado.

Eltz et al. (1989) observaram que a produtividade de milho em sistema plantio direto é superior ao sistema de manejo convencional, concluindo que provavelmente seja devido a um período maior de conservação da água no perfil, maior fertilidade na camada explorada pelas raízes e menor perda de solo.

De acordo com Beutler et al. (2004), a determinação do intervalo hídrico ótimo é um indicador importante no monitoramento da compactação do solo e na prevenção de perdas de produtividade do

arroz de sequeiro. A compactação do solo a partir de um valor de resistência à penetração de 1,82 MPa e de densidade do solo de 1,62 Mg.m⁻³ reduz a produtividade do arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho de textura média. Beutler & Centurion (2004) estudando plantas de soja e de arroz encontraram redução na altura de plantas quando os valores de resistência à penetração (RP) foram superiores a 3,00 MPa, sendo que, a produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja foi reduzida na RP de 3,76 e 3,37 MPa e de 3,93 e 3,37 MPa para as plantas de arroz.

Dados sobre os efeitos negativos de estados de compactação do solo na produtividade das culturas em condições de lavoura são escassos, dada a dificuldade de isolar o fator compactação do solo. Secco et al. (2004) constataram que a compactação pelo tráfego pesado não influenciou o rendimento de grãos de trigo, de sorgo e de milho, atribuindo este fato à continuidade de poros gerada pela proximidade dos agregados do solo, o que teria melhorado a disponibilidade de água por ascensão capilar.

O índice de área foliar de plantas de milho submetidas a déficit hídrico foi maior em solos de textura argila pesada e franco-argilo-siltosa do que no solo de textura franco-arenosa. Para uma mesma profundidade de solo a altura das plantas de milho foi reduzida, quando a fração de água disponível às plantas foi inferior a 0,57, 0,74 e 0,52 m³ m⁻³, e a senescência das folhas foi aumentada, quando a fração de água disponível às plantas foi inferior a 0,34, 0,63 e 0,38 m³ m⁻³, para os solos de textura argilosa, franco-argilo-siltosa e franco-arenosa, respectivamente (CARLESSO e SANTOS, 1999).

Silva et al. (2006) estudando plantas cultivadas em vaso em diferentes níveis de compactação verificaram que a *Brachiaria brizantha* mostrou-se mais tolerante à compactação dentro da faixa de densidade do solo estudada, enquanto o algodoeiro revelou-se como a mais susceptível em todas as características estudadas. A soja apresentou os maiores incrementos no crescimento da parte aérea em relação à densidade do solo de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$; na densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$. Verificou-se estreita relação entre compactação e crescimento das plantas estudadas, bem como tendência de respostas inversamente proporcionais das plantas à compactação que se aproxima do modelo quadrático com ótimo crescimento, ocorrendo em densidades do solo próximas a $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$.

2.4 Descompactação do solo em plantio direto

2.4.1 Práticas mecânicas

As propriedades físicas de superfície e subsuperfície e a cobertura do solo são alteradas pelo preparo mecânico e influenciam a erosão hídrica pluvial. A densidade, rugosidade e porosidade do solo são as propriedades de superfícies mais prontamente alteradas pelo preparo, enquanto na subsuperfície, tal alteração se restringe à densidade e porosidade do solo (BERTOL et al., 2008).

Segundo Machado et al. (2005), vários autores recomendam a execução da escarificação em intervalos de três a cinco anos e somente quando a compactação subsuperficial do solo exigir

este tipo de tratamento, pois, caso contrário, poderão ocorrer prejuízos ao solo, ao invés de benefícios.

Conforme Vieira et al. (2007), uma das práticas mecânicas que podem ser adotadas em solos sob plantio direto (PD) é a escarificação, que tem por objetivos reduzir a densidade do solo e a sua resistência mecânica à penetração das raízes e aumentar a permeabilidade do solo. O efeito dessas alterações sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas e o rendimento de grãos é dependente das condições climáticas vigentes. Em condições de umidade do solo ideal, as limitações físicas tendem a não se manifestar com muita intensidade.

De acordo com Machado et al. (2002), a escarificação consiste em mobilizar o solo a uma determinada profundidade (no máximo 30 cm), com mínimo revolvimento. A quebra do solo dá-se por ação da haste do escarificador no sentido vertical, sendo que isso acontece da melhor maneira, quando o terreno encontra-se mais seco, pois, dessa forma, a ação dos braços do escarificador torna-se mais intensa. Por não provocar a inversão do solo, a escarificação causa-lhe uma menor desagregação, sendo que os resíduos vegetais ficam depositados na superfície, facilitando assim, o controle da erosão e melhorando a infiltração e retenção de água, a estrutura e a porosidade do solo.

Escarificadores são implementos utilizados para o preparo do solo, sem a inversão de camadas do mesmo com a principal função de quebrar camadas compactadas na superfície, onde pode ocorrer a utilização de um disco de corte a frente da haste e um rolo destorroador para posterior nivelamento do solo (VIEIRA, 2008).

O implemento de haste em função do seu modo de ação rompe o solo nos seus pontos de menor resistência, desagregando menos e afetando pouco os seus agregados, dando assim, maior porosidade e estabilidade estrutural a esse solo, reduzindo significativamente os problemas de erosão hídrica (CAMARA, 2004). Silva (2003) concluiu que a escarificação é uma prática agrícola que pode ser utilizada para diminuir o estado de compactação em lavouras sob plantio direto, ocasionando incremento de rendimento de grão na cultura do milho.

O preparo do solo efetuado com uma escarificação resulta em maior rugosidade, porosidade e cobertura superficial do que quando esse método é seguido de gradagem e também maior do que quando é feita uma aração seguida de gradagens. Esse método, por sua vez, acarreta maior rugosidade e porosidade e menor cobertura superficial no solo do que a semeadura direta, pois nesta o preparo é efetuado somente na linha de semeadura (BERTOL et al., 1997; SCHICK et al., 2000; BERTOL et al., 2007). Abaixo da camada de solo preparada, a densidade, e porosidade são pouco influenciadas pela escarificação seguida de gradagem e pela semeadura direta, enquanto, na aração seguida de gradagens, ocorre considerável aumento de densidade e diminuição da porosidade (CAVALIERI et al., 2006; MARCOLAN & ANGHINONI, 2006).

2.4.2 Efeitos sobre a conservação do solo

Dentre as variáveis primárias que influenciam a erosão hídrica do solo, a cobertura e a rugosidade superficial são as mais

importantes, sendo responsáveis por quase toda armazenagem de água e retenção de sedimentos da erosão de superfície do solo (KAMPHORST et al., 2000).

A água armazenada na superfície tem mais tempo para infiltrar no solo e o tempo de escoamento superficial é menor, refletindo-se em menor volume de enxurrada. O aumento da rugosidade superficial aumenta o tempo de empoçamento na superfície e retarda o início e o pico do escoamento (ZOLDAN JUNIOR, 2006; BERTOL et al., 2007). O tempo necessário para a água acumular na superfície do solo, iniciar o escoamento e atingir o seu pico é fundamental para definir as características do hidrograma. Essas variáveis hidráulicas são influenciadas especialmente pela rugosidade e porosidade superficiais, dependentes principalmente do preparo do solo. Assim, o retardamento do início do escoamento, em decorrência do empoçamento da água na superfície, dentre outros fatores, e o retardamento do tempo de equilíbrio da enxurrada, em decorrência do seu crescimento mais lento, resultam em redução do volume e da taxa máxima da enxurrada e em diminuição das perdas de solo por erosão hídrica.

A infiltração de água no solo aumenta e a enxurrada diminui em superfícies rugosas de solo e, ou, cobertas em relação a superfícies lisas e, ou, descobertas. Em decorrência disso, superfícies rugosas de solo e parcialmente cobertas, como ocorre na escarificação seguida de gradagem, são mais eficazes na redução da erosão hídrica do que superfícies rugosas e descobertas, como se observa na aração seguida de gradagens. O escoamento de água da chuva em superfície de solo com grande rugosidade apresenta menor carga de sedimentos

do que nas menos rugosas, resultando em menor perda total de solo. Ainda, a taxa de perda de solo tende a aumentar com o aumento da erosividade da chuva, especialmente em solos degradados por arações e gradagens por longo tempo (ZOLDAN JUNIOR, 2006).

2.4.3 Efeitos sobre as culturas

Oliveira et al. (2005) destacam que quando a cultura do girassol é cultivada em solos sem limitação de ordem física ou química, o sistema radicular apresenta potencial para exploração de maior volume de solo, proporcionando maior resistência à seca e ao acamamento, maior absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, maior rendimento. Solos sob plantio direto, sistema conservacionista de solo, muito adotado na região do Brasil e sobre o qual a cultura do girassol será implantada, segundo Klein et al. (2007) têm apresentado alguns problemas tanto de ordem física como química. Alterações na estrutura do solo provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas têm ocasionado aumento da densidade com conseqüente aumento na resistência mecânica do solo a penetração das raízes.

Klein et al. (2007) estudando a cultura do girassol, constataram que a escarificação por minimizar os efeitos negativos da compactação proporcionou rendimento de grãos significativamente maior do que o plantio direto. Em termos absolutos a diferença foi de quase 600 kg/ha. Esses resultados corroboram com inúmeros outros trabalhos (Klein et al., 2008) que também encontraram incremento no

rendimento de grãos de outras culturas comerciais (milho, trigo, soja e etc.) quando o plantio direto é escarificado eventualmente.

2.4.4 Descompactação na semeadura

As semeadoras-adubadoras são equipadas com mecanismos sulcadores que têm por objetivo a mobilização do solo na linha de semeadura, permitindo a colocação do adubo e sementes em profundidade. Os mecanismos sulcadores são os dispositivos que melhor estabelecem a relação entre o solo e as máquinas de semeadura, cuja operação é quase sempre a última na implantação mecanizada de uma cultura (BERTOL et al., 1997). Nesse sentido, é importante avaliar os sulcadores sob condições de rugosidade e cobertura superficial do solo.

Klein e Boller (1995) estudando o efeito da escarificação e de mecanismos sulcadores de semeadoras-adubadoras no rendimento de grão de milho, obtiveram um rendimento de grãos superior em solo escarificado em relação ao PD e uma diferença entre mecanismos sulcadores em PD. Os mesmos autores concluíram que a utilização de sulcador do tipo facão elimina o problema da compactação do solo, proporcionando um bom desenvolvimento da cultura do milho.

De acordo com Machado et al. (2002), os mecanismos sulcadores são responsáveis pela abertura do sulco para deposição de semente e adubo. É de extrema importância a utilização de sulcadores que estejam em ótimo estado, pois, caso se encontrem demasiadamente desgastados, além de abrirem um sulco com formato

e profundidade irregulares, exigirão um maior esforço de tração, podendo, também, causar a compactação do fundo do sulco.

Existem diversos tipos de sulcadores no mercado como os discos simples ou duplos e apresentam um bom trabalho em terrenos com excesso de cobertura vegetal ou, mesmo, com pequenas raízes e pedras. Caso o local apresente muitas pedras ou raízes, que esse tipo de sulcador não consiga cortar, o trabalho de abertura do sulco será prejudicado, pois o disco rolará sobre as raízes ou pedras, não mantendo o sulco com uma adequada e uniforme profundidade. Devido ao seu movimento giratório, são mecanismos que requerem um menor esforço de tração. Os sulcadores de disco liso podem ser do tipo disco inclinado, no qual o disco é colocado de forma inclinada com relação à linha de deslocamento da máquina. Através dessa inclinação e do giro do disco, ocorre a abertura do sulco. Por se tratar de um mecanismo pouco preciso, tem sido pouco utilizado ultimamente. O disco ondulado não apresenta inclinação com relação à linha de deslocamento da semeadora, possuindo na sua borda, ondulações, cujo formato dependerá do tipo, condição do solo e quantidade de massa vegetal que se encontre sobre a superfície do terreno. Normalmente, esse tipo de sulcador é utilizado em semeadoras de plantio direto, em associações com outro sulcador, sendo colocado à frente deste (MACHADO et al., 2002).

2.5 Acidez do solo

Grande parte dos solos agrícolas das regiões tropicais e subtropicais apresenta limitações ao crescimento de muitas culturas devido aos efeitos da acidez excessiva. Na região sul do Brasil, a correção da acidez dos solos é indispensável para alcançar os tetos de produção de grande parte das plantas cultivadas. O conhecimento da natureza da acidez do solo e suas manifestações no crescimento das plantas são fundamentais para o entendimento da prática da correção dos solos (TEDESCO & BISSANI, 2004).

Sob o ponto de vista de Caires et al. (2004), a acidez do solo limita a produção agrícola em consideráveis áreas no mundo, em decorrência da toxidez causada por Al e Mn e baixa saturação por bases. As raízes das plantas não se desenvolvem bem em solos ácidos, sobretudo por causa da toxidez de Al e da deficiência de Ca. A calagem é a prática mais eficiente para elevar o pH, teores de Ca e saturação por bases e reduzir Al e Mn trocáveis no solo. A reação do calcário, entretanto, é limitada ao local de sua aplicação no solo. A calagem não tem um efeito rápido na redução da acidez do subsolo, que depende da lixiviação de sais através do perfil do solo.

2.5.1 Acidez do solo em plantio direto

Na região sul do Brasil, tem aumentado o interesse pela busca de alternativas para a introdução de culturas no sistema plantio direto, sem proporcionar revolvimento do solo. As vantagens desse

procedimento estão relacionadas com a manutenção de atributos químicos e estruturais do solo, com o maior controle da erosão e com a economia com as operações de incorporação de calcário e preparo do solo. No entanto, caso a acidez do solo não seja adequadamente corrigida, o crescimento radicular e a nutrição das plantas podem ser comprometidos (CAIRES et al., 2004).

De acordo com Klein et al. (2007) em solos sob plantio direto onde os corretivos (calcário) e fertilizantes são aplicados na superfície do solo, têm-se observado um elevado gradiente na concentração de nutrientes e de elementos tóxicos ao desenvolvimento do sistema radicular no perfil do solo. Caires & Fonseca (2000) destacam inclusive que a calagem na superfície em sistema plantio direto, sem critério adequado, pode ocasionar redução na absorção de zinco e de manganês em decorrência do aumento do pH nessa camada.

Em baixo pH, particularmente inferior a 5,5, alumínio e manganês podem alcançar níveis tóxicos no solo. O alumínio quando atinge elevadas concentrações na solução do solo, ocupa a maior parte dos sítios de troca catiônica. Também inibe severamente o crescimento das raízes, especialmente no subsolo ácido, e restringe a absorção de cálcio e magnésio. A toxicidade de alumínio aumenta também o estresse hídrico durante períodos de seca devido a um deficiente crescimento do sistema radicular. Os problemas com manganês são menos comuns, mas podem ser igualmente tóxicos, sob certas condições. Em casa de vegetação a toxicidade por ferro pode ocorrer em certas culturas, como gerânio, se o pH da mistura do substrato for muito baixo. O alumínio ocorre principalmente em minerais de solos de clima temperado. Os problemas com alumínio

raramente aparecem em solos orgânicos porque esses solos têm pouca disponibilidade deste, desta forma as plantas toleram solos ácidos orgânicos melhor do que solos ácidos minerais, principalmente, devido ao baixo nível de alumínio (PLASTER, 2003).

A correção da acidez do solo é muito importante ao adequado desenvolvimento do milho, embora existam materiais genéticos mais tolerantes às condições de acidez. O aumento do pH do solo altera a disponibilidade de nutrientes, causando aumentos na absorção de N, P, K, Ca e Mg pelo milho. São vários os trabalhos que demonstram aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional (ERNANI et al., 1998). Mesmo os genótipos de milho com tolerância ao Al e que conseguem aprofundar seu sistema radicular em solos ácidos, normalmente, apresentam respostas positivas à calagem (RAIJ et al., 1998). Por outro lado, trabalhos têm demonstrado respostas pouco expressivas do milho à aplicação superficial de calcário e altas produtividades da cultura em solos ácidos manejados em sistema plantio direto (PÖTTKER & BEN, 1998 e RHEINHEIMER et al., 2000).

2.6 Atributos químicos afetados pela acidez

Para Bohnem et al. (2006), tanto o teor de P no solo como sua absorção pelas plantas são muito afetadas pela acidez. A correção da acidez excessiva promove: aumento da taxa de mineralização da matéria orgânica, com a conseqüente liberação de P e de outros

nutrientes ligados à mesma; maior aproveitamento do P pelas plantas, tanto do P já existente no solo como do adicionado, devido à menor fixação pelos minerais. Geralmente, o aumento do pH do solo pela calagem proporciona aumento da CTC pH-dependente. Parte do K em solução pode passar para a forma trocável, para neutralizar as cargas negativas da fração coloidal do solo. Dessa forma as perdas de K por lixiviação podem ser reduzidas. Os corretivos de acidez (calcário) suprem Ca e Mg para as plantas, principalmente para as leguminosas, que absorvem maiores quantidades destes nutrientes. Este suprimento é importante em solos ácidos da região do cerrado, em que os teores de Ca e Mg são extremamente baixos ($<0,1 \text{ cmol/dm}^3$).

A correção da acidez do solo afeta a atividade microbiana de várias formas: a movimentação do solo, necessária para a incorporação de corretivo no sistema convencional de preparo de solo, aumenta a aeração e a temperatura do mesmo favorecendo a mineralização da matéria orgânica, com a conseqüente liberação de nutrientes; a calagem reduz os teores de Al^{3+} e de Mg^{2+} tóxicos, que inibem a atividade dos microrganismos do solo; o aumento do pH do solo provocado pela calagem favorece o crescimento das bactérias, que são mais eficientes na mineralização da matéria orgânica (TEDESCO & BISSANI, 2004).

Muitos solos ácidos podem conter Al^{3+} e/ou Mn^{2+} na solução em quantidades elevadas, que podem ser tóxicas para as culturas. Como a solubilidade de ambos diminui com o aumento do pH, a correção da toxidez é facilmente obtida pela calagem. Enquanto

o Mn é um micronutriente essencial, o Al não é necessário ao desenvolvimento das plantas (ESCOSTEGUY et al., 2006).

De acordo com Escosteguy et al. (2006) no solo, o Mn não é transportado junto com a água até as raízes das plantas, quando ela é absorvida pelas plantas, como acontece com o nitrogênio, o sulfato e o boro. Em função dessa característica o Mn é considerado um nutriente "imóvel" no solo e, conseqüentemente, é suprido às plantas por um pequeno volume de solo, que corresponde ao volume diretamente em contato com as raízes. Devido a isso, a concentração de Mn no volume total do solo não é tão importante quanto à concentração existente no solo imediatamente aderido a superfície das raízes. Quando extrapolado para a situação de uma lavoura, esse aspecto indica a importância do bom desenvolvimento do sistema radicular para a absorção de Mn. Dessa forma, os fatores que controlam o crescimento das raízes, como a disponibilidade de água, a densidade, a aeração e a concentração de elementos ácidos e tóxicos do solo, são importantes no controle da absorção desse micronutriente pelas plantas.

2.6.1 Efeito sobre as culturas

Segundo Doss e Lund (1975), solos ácidos, que não são corrigidos em profundidade, são uma séria limitação ao desenvolvimento radicular das plantas, diminuindo assim a produtividade. Estes mesmos autores estudaram o efeito do pH do subsolo sobre o desenvolvimento do sistema radicular vegetativo, bem como na produtividade de algodão, com o pH do subsolo não corrigido, desde que ocorresse um certo déficit hídrico durante o

período vegetativo da cultura. Quando as precipitações foram normais não ocorriam diferenças significativas.

O plantio direto tem inconvenientes, como os relacionados ao calcário e fertilizantes, que são lentamente solubilizados, como os superfosfatos, que tendem a permanecer próximos da superfície. Com o tempo, isso pode resultar em camadas do solo ácido relativamente infértil se comparadas à superfície, o que pode limitar o desenvolvimento de um sistema radical mais eficaz. Alguns dos efeitos nocivos parecem ser compensados, pelo menos em alguns solos, pela formação de raízes eficazes perto da superfície, resultante das melhores situações de umidade e temperatura. Em função dos benefícios gerais do plantio direto, muitos deles têm trabalhado com algumas modificações de cultivo, que tendem a superar problemas com temperatura e umidade. A remoção dos resíduos a partir do centro da linha e a escarificação do solo melhora a produção em grãos para algumas destas áreas (WOLF & SNYDER, 2003).

Doss et al. (1979) afirmam baseados em trabalhos realizados com algodão e milho, que a aplicação profunda de calcário aumentou o desenvolvimento radicular e vegetativo das culturas, incrementou a extração de água do solo e a produtividade. Concluem ainda que para os solos Rhodic Paleudult e Typic Paleudult, a incorporação de calcário a 30 cm de profundidade foi suficiente para obter um satisfatório crescimento radicular e alta produtividade de algodão e milho.

Pöttker & Ben (1998) constataram que a aplicação superficial de calcário corrige a acidez do solo, principalmente, na camada de 0–5 cm, mas, mesmo assim, observaram aumentos na

produtividade de grãos de soja e cevada, possivelmente, devido às condições não muito drásticas da acidez na camada subsuperficial do solo. Segundo Caires et al. (1998), a ação neutralizante do calcário aplicado na superfície de áreas já cultivadas vai atingindo gradativamente as camadas mais profundas no perfil do solo, o que faz com que essa prática produza resultados benéficos com o tempo de cultivo.

De acordo com Miranda et al. (2005), doses adequadas de calcário promovem aumentos de produtividade da soja e do milho cultivados em sistemas de plantio direto e convencional, sendo que, em solos com acidez elevada, o calcário incorporado ao solo promove maior produtividade de milho que o não incorporado, em plantio direto. A aplicação superficial do calcário sem incorporação é eficiente na correção da acidez do solo apenas na camada de 0–5 cm e o efeito do calcário depende do tempo decorrido da aplicação e do volume de solo corrigido.

2.7 Calagem

A calagem em solos ácidos há muito tem sido um tema importante, mas às vezes negligenciada como prática agrícola. A calagem melhora a resposta das culturas a adubos, melhorando a captação de nutrientes, especialmente, o fósforo, reduzindo o alumínio, e promovendo atividades desejáveis de organismos como a que os rizóbios desenvolvem na fixação biológica de nitrogênio para as leguminosas. Embora o baixo pH seja definido como uma elevada

concentração de íons H^+ , o alumínio também desempenha um papel central na acidez do solo. O alumínio é um dos principais constituintes da maioria dos solos minerais (aluminossilicatos e óxidos de alumínio), incluindo argilas (BRADY & WEIL, 2008).

A recomendação de calagem em uso no Sul do Brasil é uma questão que vem preocupando técnicos e produtores que trabalham com o sistema plantio direto no Brasil, em função de que a maioria dos produtores vem adotando a prática de reaplicar o calcário sem incorporá-lo ao solo. Entretanto, há carência de dados da pesquisa para recomendar métodos de aplicação de calcário mais adequados ao sistema plantio direto.

Segundo Caires et al. (2003), a ação do calcário na neutralização da acidez de subsolos é dificultada pelo aumento da retenção de cátions em decorrência da geração de cargas elétricas variáveis negativas com a elevação do pH do solo. Além disso, os ânions resultantes de sua dissolução, responsáveis pela correção da acidez, são também consumidos nas reações com outros cátions ácidos (Al^{3+} , Mn^{2+} e Fe^{2+}) na camada de deposição do calcário. No entanto, o aumento do pH na superfície do solo pode acelerar a velocidade com que o HCO_3^- , acompanhado por Ca e Mg, movimenta-se para o subsolo para reagir com a acidez.

2.7.1 Calagem em plantio direto

Em solos sob plantio direto, onde os corretivos (calcário) e fertilizantes são aplicados na superfície do solo, têm-se observado um elevado gradiente na concentração de nutrientes e de elementos

tóxicos ao desenvolvimento do sistema radicular no perfil do solo. Caires & Fonseca (2000) destacam inclusive que a calagem na superfície em sistema plantio direto, sem critério adequado, pode ocasionar redução na absorção de zinco e de manganês em decorrência do aumento do pH nessa camada.

A aplicação de calcário dolomítico na superfície aumenta os teores de Ca e Mg trocáveis, notadamente na camada superficial do solo (0-5 cm), de forma mais lenta e contínua do que quando o calcário foi incorporado no solo. Tal efeito foi ainda mais evidente na camada superficial com o parcelamento da dose de calcário na superfície (1/3 da dose aplicada anualmente por três anos). O calcário incorporado proporciona aumento nos teores de Ca e Mg trocáveis, principalmente, nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) e, em menor magnitude, nas camadas mais profundas do solo, conforme o tempo de reação do corretivo. O gradiente de concentração de Ca e Mg trocáveis, a partir da superfície do solo, foi mais acentuado com a calagem superficial do que com o calcário incorporado (CAIRES et al., 2003).

Em contrapartida, Ciotta et al. (2004) concluíram que a aplicação de calcário sobre a superfície do solo e sem incorporação foi eficiente na elevação do pH, na camada de 0-15 cm, e na elevação dos teores de Ca e Mg e da saturação por bases, bem como na diminuição da saturação por Al trocável, na camada de 0-20 cm, não diferindo do tratamento com incorporação de calcário ao solo com aração e duas gradagens, sendo que, os teores de Ca, Mg e K em solução foram diretamente relacionados com os teores desses elementos na fase trocável.

De acordo com Mello et al. (2003), a aplicação de calcário em superfície, na instalação do sistema plantio direto, independentemente da granulometria e da dose do material corretivo, altera positivamente os atributos químicos do solo (pH, H^+ , Al, Ca^{2+} e Mg^{2+}) das camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), 12 meses após a calagem, sendo que, a aplicação de doses mais elevadas de calcário, com maior granulometria, mostra efeito residual prolongado para a correção da acidez do solo.

2.8 Conjugação de operações

De Roo (1956) desenvolveu equipamento com o qual fazia incorporação de calcário e fertilizante a uma profundidade de até 40 cm. Este equipamento era composto por uma aiveca e, no fundo do sulco aberta por esta, uma haste de subsolador para distribuir calcário e fertilizantes até 40 cm de profundidade, obtendo assim um maior crescimento radicular. Alonço (1990) avaliou o equipamento denominado “wye double digger” o qual incorpora calcário e fertilizantes em profundidade por meio de uma aiveca e de uma enxada rotativa. Esta avaliação foi feita em solos sob Cerrado com a cultura do milho, não obtendo, porém diferenças significativas entre tratamentos em relação à produtividade das culturas. Outro problema deste equipamento é a elevada demanda de tempo, (em torno de 27h/ha) e o conseqüente consumo de energia.

Johnson et al. (1969) e Marking (1986) comentam o mecanismo de injeção de fertilizantes líquidos em profundidade no solo com o auxílio de hastes de subsolador, obtendo bons resultados

no desenvolvimento da cultura devido à descompactação do solo em profundidade e colocação de nutrientes.

Em Países Europeus vem sendo utilizados subsoladores equipados com adubadoras pneumáticas que sopram o fertilizante no subsolo por meio de dutos instalados na parte posterior da haste sulcadora (SCHULTE-KARRING, 1973). Nutriente como o fósforo, indispensável para as plantas, é imóvel no solo. Esta é uma justificativa da utilização desses equipamentos para melhorar a distribuição e a mistura no perfil do solo, incrementando o crescimento do sistema radicular e a absorção desse nutriente. Richards et al. (1995) apresentam uma proposta de incorporação de calcário em profundidade com a utilização de um subsolador com dispositivo acoplado. Destaca que com a incorporação de calcário ocorreu um incremento de Ca e a redução da toxidez de alumínio, sendo uma excelente estratégia para melhorar o ambiente ao crescimento profundo do sistema radicular.

Klein et al. (2007) descreveram a utilização de um escarificador modificado com a finalidade de descompactação do solo e deposição de calcário em profundidade onde, o calcário era conduzido por tubulações flexíveis e metálicas do reservatório até o interior do solo, conduzindo o calcário para uma tubulação de metal fixada na parte posterior de cada haste, sendo depositado a aproximadamente 5 cm acima da profundidade de trabalho das hastes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no Centro de Extensão e Pesquisa Agropecuária da Universidade de Passo Fundo, no município de Passo Fundo, uma região com altitude média de 700 m acima do nível do mar, clima segundo a classificação de Köppen, do tipo Cfa 1 (subtropical chuvoso) e com coordenadas S - 28° 12' e W - 52° 23'.

O solo da área experimental pertence à Unidade de Mapeamento Passo Fundo, classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico (STRECK et al., 2008), relevo ondulado e substrato basalto, com composição média de 0,56 kg.kg⁻¹ de argila, 0,11 kg.kg⁻¹ de silte e 0,33 kg.kg⁻¹ de areia, sendo que a análise dos atributos químicos do solo da área constam no Quadro 1.

A área vinha sendo conduzida sob sistema plantio direto por 9 anos. Após a colheita da soja, em maio de 2006, foi realizada uma operação de escarificação na profundidade de 25 cm, utilizando-se um escarificador modelo Jumbo-Matic, de engate na barra de tração, equipado com cilindros hidráulicos de acionamento por controle remoto, cinco hastes de formato parabólico, espaçadas em 350 mm, ponteira com largura de 18,7 mm na extremidade e 78,2 mm no meio, disco de corte com diâmetro de 432 mm, para corte dos restos culturais e nivelador/destorroador, composto por um rolo com barras transversais/helicoidais, que também tinha por função auxiliar na regulagem da profundidade. A umidade do solo no momento do manejo era 0,2641 kg.kg⁻¹. Este equipamento foi adaptado e descrito por Klein et al. (2007) para a injeção de calcário em profundidade.

Quadro 1: Análise de solo da área experimental antes do experimento.

Camada	Argila	MOS	pH H ₂ O	Ind. SMP	P	K		
cm	-----%-----				----mg dm ⁻³ ----			
0-5	31	3,4	4,8	5,3	37	217		
5-10	41	1,9	4,8	5,2	15	101		
10-15	41	1,6	4,8	5,0	5	93		
15-20	45	1,5	4,7	4,8	2	78		
	Al	Ca	Mg	H+Al	CTC			
	-----cmol _c dm ⁻³ -----							
0-5	1,1	3,1	1,4	9,7	14,8			
5-10	2,4	2,1	1,0	10,9	14,2			
10-15	3,2	1,4	0,7	13,7	16,1			
15-20	3,8	1,1	0,5	17,3	19,1			
	Saturação (%)			S	B	Mn	Zn	Cu
	Bases	Al	K	-----mg dm ⁻³ -----				
0-5	34	18	3,8	12	0,6	26	1,3	1,2
5-10	23	42	1,7	16	0,4	15	0,5	1,5
10-15	15	58	1,6	17	0,4	11	0,3	1,6
15-20	09	68	1,0	20	0,3	09	0,3	1,6

O calcário utilizado foi classificado como da faixa C com registro número RS-06451-10000, apresentando as seguintes características: CaO de 26%, MgO de 14%, PN de 81% e PRNT de 75,49%.

Nas Figuras 1 e 2, apresenta-se uma visão geral do equipamento com os sistemas colocados na posição de trabalho.



Figura 1: Vista lateral do protótipo utilizado no experimento.



Figura 2: Vista frontal do protótipo utilizado no experimento.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas e 4 repetições, sendo os manejos (Tabela 1) as parcelas principais e as subparcelas constituídas das profundidades de coleta das amostras para as análises dos atributos físicos e químicos do solo. As camadas foram de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm. A disposição dos tratamentos na área experimental está apresentada no croqui do experimento (Figura 3), em que as parcelas apresentavam 50 m² (5 m de largura e 10 m de comprimento) de área total.

Tabela 1 – Tratamentos do experimento

Código	Tratamentos	Discriminação
T1	PD	Plantio direto, sem aplicação de calcário.
T2	PDE	Plantio direto escarificado, sem aplicação de calcário.
T3	PD+CS	Plantio direto com aplicação a lanço de calcário em superfície, ½ SMP para atingir pH 5,5 de acordo com a análise de solo*.
T4	PDE+CS	Plantio direto com aplicação de calcário em superfície, aplicado a lanço ½ SMP para atingir pH 5,5 e após escarificado.
T5	PDE+CS+CI	Plantio direto onde foi aplicado a lanço ½ SMP para atingir pH 5,5 + 1/2 SMP para atingir pH 5,5 em profundidade com o aplicador escarificador de acordo com a análise de solo.
T6	PDE+CI	Plantio direto onde foi aplicado ½ SMP para atingir pH 5,5 com aplicador escarificador de acordo com a análise de solo.

*As doses de calcário foram 3,1 Mg.ha⁻¹ em superfície e 3,1 Mg.ha⁻¹ em profundidade com calcário PRNT 75,49%.

As amostras com estrutura preservada ($n=32$ aos 6 meses após o preparo e $n=96$ aos 18 meses após o preparo), utilizadas para a determinação da densidade do solo, porosidade e resistência mecânica do solo à penetração, foram coletadas nas profundidades anteriormente citadas, com o auxílio de um amostrador do tipo “Uhland”, utilizando cilindros de aço inoxidável com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Juntamente retirou-se amostras com estrutura não preservada para a determinação da densidade de sólidos, granulometria e análise química.

A determinação da densidade dos sólidos e do solo foi realizada conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997).

A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade dos sólidos. A classificação dos poros: macroporos, microporos e criptoporos foi feita aplicando tensões crescentes. Os macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) foram determinados na tensão de 6 kPa (EMBRAPA, 1997), os criptoporos a partir de 1500 kPa (KLEIN, 1998) e os microporos (poros com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm) foram obtidos pela diferença da umidade volumétrica entre as tensões de 6 e 1500 kPa.

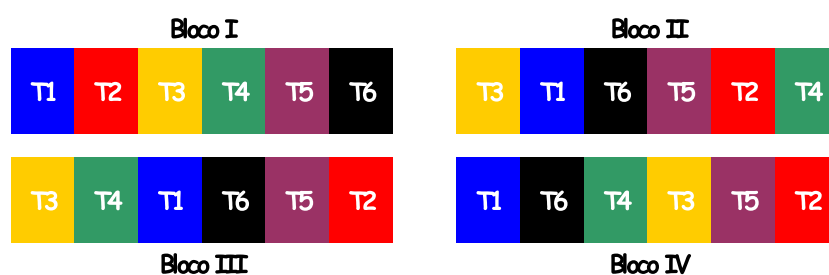


Figura 3: Croqui do experimento.

Estas amostras foram colocadas na tensão de 6 kPa, para determinação da capacidade de campo do solo, se utilizando para esta tensão de funis de placa porosa (Funis de Haynes). As amostras foram submetidas à tensão até que o fluxo de água cessasse. Para a determinação da tensão de 1500 kPa foi empregado um psicrômetro modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICES, 2000).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de 0,1667 mm s⁻¹, equipado com uma célula de carga de 200 N, e haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30^o, receptor e interface acoplado a um microcomputador para coleta dos dados através de um software próprio do equipamento. As determinações foram realizadas em amostras com estrutura preservadas submetidas a diferentes tensões (6; 10; 25; 50; 100; 200 kPa). Para cada amostra foram obtidos 250 valores e utilizados os 200 valores centrais. Os valores de RP foram ajustados a um modelo não-linear proposto por Busscher (1990), que ajusta a RP em relação à densidade e umidade do solo, conforme equação (1).

$$RP = EXP(a * b \ln \theta * c \ln Ds) \quad (1)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos da equação de Busscher

Ds = Densidade do solo (Mg.m⁻³)

θ = Umidade volumétrica (m³.m⁻³)

Para a determinação da densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação foi utilizado o ensaio de Proctor, na qual a amostra é compactada em um cilindro metálico de aproximadamente 1000 cm³, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30,5 cm, semelhante ao que é preconizado por Nogueira (1998) e correspondendo a uma energia de 560 kPa. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em 7 ou 8 umidades, com intervalos de cerca de 1,5% de umidade gravimétrica, partindo-se de uma umidade de 16% que permitiu que o quarto ou quinto ponto ficasse próximo à umidade crítica. Após cada compactação, foram retiradas três amostras do corpo cilíndrico formado (base, meio e topo), para determinação da umidade real. Para ambos os manejos realizaram-se apenas uma repetição para cada profundidade amostrada.

Com base nos valores de umidade real e densidade do solo correspondentes, estimou-se a densidade máxima (Equação 2) e a umidade ótima de compactação (Equação 3) de cada uma das amostras de cada profundidade. Para fazer essa estimativa, os dados foram transferidos para um gráfico de uma planilha de cálculo (Excel) e foi inserida uma linha de tendência polinomial de segundo grau que gerou uma equação com os parâmetros para o cálculo.

$$D_{m\acute{a}x.} = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

$$Ug \text{ ótima} = \frac{b}{-2a} \quad (3)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos da equação de regressão

Para o cálculo da densidade relativa (KLEIN, 2006), foi determinada a densidade máxima do solo para todas as profundidades, através do teste de Proctor normal com 560 kPa de energia, (Nogueira, 1998) e calculada a partir da equação (4):

$$DR = \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade máxima do solo}} \quad (4)$$

O limite de liquidez (LL), que corresponde à umidade do solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão aberta na superfície da amostras, foi determinado conforme metodologia descrita pela Embrapa (1997), na qual se utiliza a fração do solo que passa pela peneira 40 (malha com abertura de 0,425 mm).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade na qual ao se moldar um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro surgem fissuras na superfície do mesmo (início da fragmentação), foi determinado conforme metodologia descrita pela Embrapa (1997), que também especifica o uso da fração do solo que passou pela peneira 40.

O índice de plasticidade (IP) foi obtido subtraindo-se a umidade gravimétrica do LL da umidade gravimétrica do LP. A Razão

entre umidade ótima de compactação (UG) e limite plástico (LP) foi obtida dividindo-se a umidade gravimétrica ótima para compactação do solo pela umidade no LP do solo.

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foi utilizada a metodologia descrita por Klein (1998), calculando-se a porosidade de aeração (PA) mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (SOJKA, 1992), o ponto de murcha permanente (PMP) de 1500 kPa, a capacidade de campo (CC) de 6kPa e a resistência mecânica à penetração (RP) de 2,0 MPa devido a evidências de que para as culturas em geral seja em torno deste valor o limitante ao sistema radicular (FOLONI et al., 2003). A PA, CC e PMP, e os dados foram linearizados em função da densidade do solo. A RP, por outro lado, foi ajustada de forma não linear, devido à mesma sofrer interações da densidade e da umidade do solo.

As análises físicas foram realizadas aos 6 e 18 meses após a implantação dos tratamentos, sendo que aos 6 meses foram considerados somente os manejos PD e PDE, considerando que não existiam diferenças físicas em função da aplicação de calcário das diferentes formas nos diferentes manejos, somente devido a mobilização do solo. Aos 18 meses foram realizadas as análises físicas para todos os seis tratamentos, com exceção aos relativos a consistência do solo e testes de compactabilidade do solo que mantiveram-se somente nos manejo PD e PDE.

O teor de carbono orgânico do solo foi determinado pelo método de Walkley - Black, considerado como padrão, baseado no princípio da oxidação da matéria orgânica, com dicromato de potássio em meio sulfúrico, com aquecimento externo, conforme a

metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) e por meio do fator de conversão de 1,724 se obteve o teor de matéria orgânica, que foi multiplicado pela densidade do solo para transformação a base de volume.

O restante das determinações químicas foi realizado conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). As análises químicas foram realizadas com o uso de trado, antes da implantação dos tratamentos e 18 meses após esta, sendo que, para cada tratamento foi coletada apenas uma amostra em cada profundidade, ressaltando que cada amostra foi composta por cinco subamostras retiradas em cada parcela.

As culturas implantadas para a avaliação dos tratamentos foram trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia branca (*Avena sativa* L.), cevada (*Hordeum vulgare* L.), soja (*Glycine max* L. Merrill), girassol (*Helianthus annuus* L.) e milho (*Zea mays* L.). Sendo que, os dados de implantação e condução estão descritos a seguir (Tabela 2). A semeadura foi realizada em sentido perpendicular a operação de manejo da área para todas culturas.

Tabela 2: Cultivar (CT), ano agrícola (AA), data de semeadura (DS), adubação, umidade gravimétrica na semeadura (Ug) e data de colheita (DC) em função das culturas

Cultura	CT	AA	DS	Adubação	Ug	DC
Aveia	UPF-20	2006	14/06/06		0,2641	13/11/06
Trigo	Rubi	2006	14/06/06	Adubação	0,2641	13/11/06
Cevada	MN-686	2006	14/06/06	conforme	0,2641	13/11/06
Soja	CD 212RR	2006/07	24/11/06	recomendação da	0,2330	20/04/07
Girassol	AG-972	2007/08	19/10/07	CQFSRS/SC	0,2582	05/02/08
Milho	AS-32	2008/09	10/10/08	(2004)	0,2458	23/03/09

A semeadura das culturas foi efetuada na época recomendada, com um trator Valtra, modelo 985 com TDA, equipado com uma semeadora adubadora modelo SHM-15, marca Semeato, sendo que, para a aveia, trigo e cevada o espaçamento entrelinhas foi de 0,17 m. Para a semeadura da cultura da soja foi utilizada uma semeadora-adubadora PDM Plus 700, com 7 linhas espaçadas em 45 cm. Para a semeadura do girassol e do milho realizou-se sulcamento e a deposição de adubo utilizando semeadora adubadora PDM Plus 700, com 4 linhas espaçadas em 0,9 cm, sendo que duas linhas eram equipadas com sulcador do tipo facão para adubo e outras duas não possuíam sulcador para o adubo somente disco de corte. A semeadura do girassol foi feita utilizando saraquá.

O rendimento de grãos de aveia, trigo e cevada foi determinado em área de 5 m², de cada unidade experimental, com colhedora de parcelas. Os grãos colhidos foram pesados e foi determinada a umidade para correção do rendimento de grãos a umidade de 13% (também utilizado como padrão para as outras culturas). Foi determinado o número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH), peso de mil grãos (PMG), número de panículas (PAN), número de espiguetas/panícula (ESP), número de grãos/espiguetas (GEP) em 3 metros lineares coletados em cada parcela.

Para determinação do rendimento da cultura de soja foram colhidos 10 m² de cada parcela. Os grãos colhidos foram pesados, e foi determinada a umidade para correção do rendimento de grãos. Foi determinado também o número final de plantas (STD), número de grãos/planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG), percentual de vagens

com 1 grão (V1G), percentual de vagens com 2 grãos (V2G) e percentual de vagens com 3 grãos (V3G), em 3 metros lineares coletados em cada parcela.

No girassol, antes da maturação, os capítulos foram protegidos do ataque de pássaros utilizando sacos de papel. A colheita foi realizada manualmente e os capítulos trilhados utilizando colhedora de parcelas. O rendimento de grãos foi determinado colhendo-se as plantas em 2 m de duas linhas centrais de cada parcela, determinando a umidade da massa de grãos, onde também foi analisado o número de capítulos.m⁻² e o diâmetro de capítulos (cm).

Para determinação do rendimento da cultura de milho foram utilizados 12,6 m² de cada parcela. Os grãos colhidos foram pesados e foi determinada a umidade para correção do rendimento de grãos.

Os dados da precipitação pluvial ocorrida durante a realização do trabalho e respectivos ciclos de desenvolvimento das culturas estão apresentados na Figura 4.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. As análises foram processadas por meio do Statistical Analysis System (SAS INSTITUTE, 1996).

A densidade máxima do solo e a umidade ótima de compactação não foram comparadas estatisticamente por não apresentarem repetições.

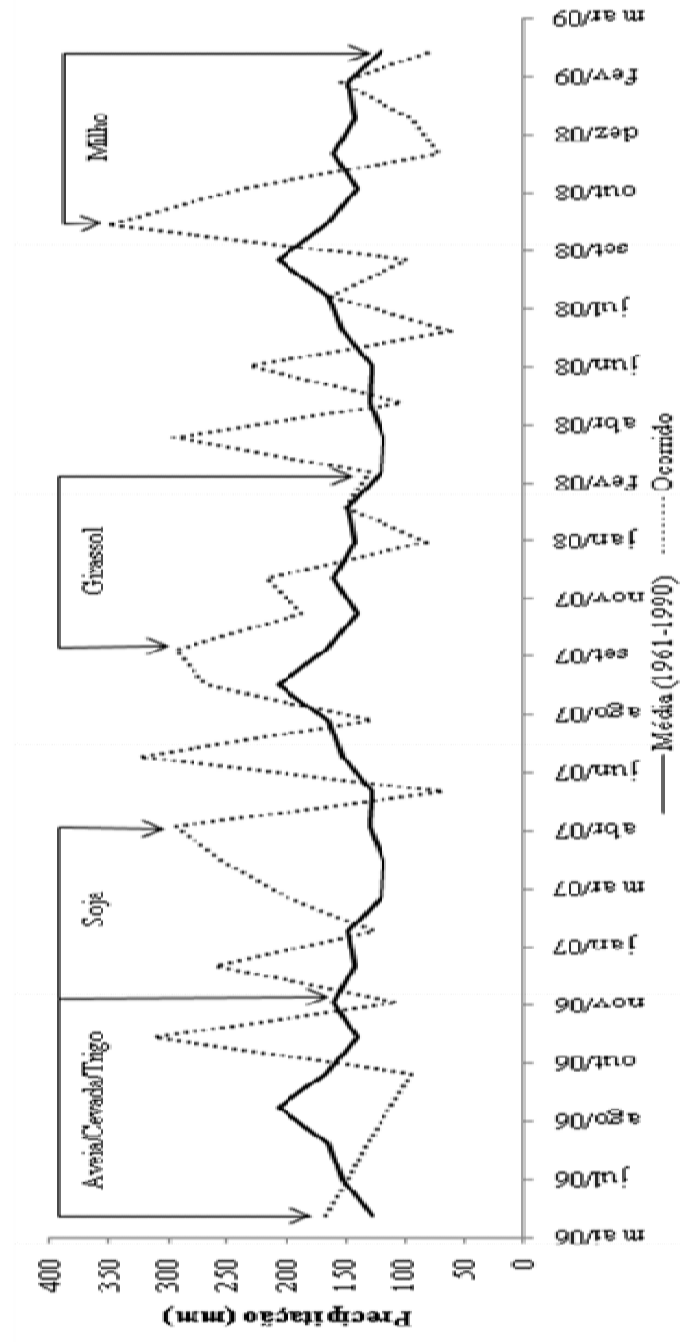


Figura 4: Precipitação pluvial durante o ciclo das culturas (Fonte: Rede Nacional de Agrometeorologia, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos físico-hídricos do solo

4.1.1 Textura do solo

A composição granulométrica do solo é uma característica que possui importância no estudo do seu comportamento físico-hídrico. Vários atributos físico-hídricos do solo são influenciados pelo teor de argila do solo, tais como, a estrutura, o movimento de água, a porosidade e a densidade do solo (KLEIN, 2008). A análise granulométrica foi realizada visando caracterizar o solo local ao invés de verificar a existência de um possível efeito dos manejos de solo na distribuição das partículas primárias do solo. É importante ressaltar que a operação de escarificação não promoveu a inversão das camadas do solo como pode ser comprovada pelos dados da tabela 3.

A composição granulométrica do perfil do solo e o fracionamento da areia nos dois manejos iniciais (sem aplicação de calcário), aos seis meses após a implantação do experimento estão apresentados na Tabela 3 e a composição granulométrica sem fracionamento de areia para os seis manejos aos 18 meses após a implantação destes está apresentada na Tabela 4. O resultado das análises granulométricas mostraram que o Latossolo Vermelho distrófico húmico (STRECK et al., 2008) apresenta semelhança nos teores de argila em profundidade (Tabela 3) em ambos os manejos, sendo que resultados semelhantes foram encontrados por Machado et

al. (1981) e Vieira (2006), reforçando a característica deste tipo de solo.

Tabela 3 – Teores de argila, silte, areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	Argila	Silte	Areia					
			AT	AMG	AG	AM	AF	AMF
---cm---	-----		%					
			PD					
0- 5	56,56	8,90	34,54	0,30	0,96	11,80	18,94	2,54
5 -10	57,60	9,22	33,18	0,26	1,42	7,10	19,42	4,98
10 - 15	55,10	11,58	33,32	0,26	0,68	8,50	18,94	4,94
15 - 20	59,03	9,27	31,70	0,24	0,80	8,64	18,24	3,78
Média	57,07	9,74	33,19	0,27	0,97	9,01	18,89	4,06
			PDE					
0- 5	57,08	8,44	34,48	0,18	0,80	9,42	20,32	3,76
5 -10	57,05	12,63	30,32	0,48	2,20	7,50	16,16	3,98
10 - 15	55,60	9,14	35,26	0,12	0,84	9,20	20,26	4,84
15 - 20	55,08	11,40	33,52	0,68	1,80	10,40	17,90	2,74
Média	56,20	10,40	33,40	0,37	1,41	9,13	18,66	3,83

O conhecimento da textura é fundamental para avaliar o potencial de compactação, da disponibilidade de água, da aeração, da condutividade do solo ao ar, à água e ao calor, da infiltração e da redistribuição de água (PREVEDELLO, 1996).

Além disso, como os processos de erosão, transporte e deposição de partículas sólidas são dependentes, entre outras grandezas, da granulometria dos materiais expostos e carregados, a curva granulométrica é essencial na hidrossedimentologia, possibilitando a obtenção de diâmetros característicos das amostras, fundamentais na estimativa do deslocamento de sedimentos em bacias hidrográficas (SILVA et al., 2004). Convém ressaltar que a calagem não agregou e nem dispersou agregados de argila, o que pode ser comprovado pelos resultados das Tabelas 3 e 4.

Tabela 4 – Teores de argila, silte e areia em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada ----- cm -----	Argila ----- % -----	Silte ----- % -----	Areia
PD			
0- 5	58	10	32
5 -10	58	10	32
10 - 15	58	8	34
15 - 20	60	11	29
Média	58	10	32
PDE			
0- 5	57	14	29
5 -10	58	13	29
10 - 15	60	10	30
15 - 20	58	13	29
Média	58	13	29
PD+CS			
0- 5	58	10	32
5 -10	61	13	26
10 - 15	61	10	29
15 - 20	61	13	26
Média	60	12	28
PDE+CS			
0- 5	56	15	29
5 -10	58	13	29
10 - 15	58	10	32
15 - 20	59	11	30
Média	58	12	30
PDE+CI+CS			
0- 5	58	11	31
5 -10	60	11	29
10 - 15	58	10	32
15 - 20	61	10	29
Média	60	10	30
PDE+CI			
0- 5	58	13	29
5 -10	61	13	26
10 - 15	60	11	29
15 - 20	63	9	28
Média	60	12	28

4.1.2 Densidade de sólidos do solo (Dss)

Na média das camadas avaliadas a densidade média dos sólidos, como era de se esperar não alterou com os manejos, aos 6 e 18 meses (Tabelas 5 e 6). Comparando as médias dos manejos em relação as profundidades aos 6 meses ocorreu diferença somente na camada de 15-20 cm e aos 18 meses as diferenças não foram significativas. A densidade dos sólidos é uma característica que caracteriza o solo em relação ao seu material de origem, onde de acordo com o material predominante o solo terá uma maior ou menor densidade dos sólidos. O manejo do solo pode alterar esta propriedade através da adição de matéria orgânica ao sistema, o que é corroborado por Ceddia (1996), Kiehl (1979) e Libardi (2005) que relatam que a densidade de sólidos da MO é bastante baixa, variando de 0,6 a 1,0 g.cm⁻³. O incremento de matéria orgânica em função dos manejos (Tabela 34) foi inexistente, explicando desta forma a manutenção da densidade dos sólidos do solo.

Tabela 5 – Densidade dos sólidos do solo em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----Mg.m ⁻³ -----		
0- 5	A 2,66 ab	A 2,65 b	2,66 b
5 -10	B 2,63 b	A 2,68 a	2,65 b
10 - 15	A 2,68 ab	B 2,64 a	2,66 b
15 - 20	A 2,71 a	A 2,70 a	2,70 a
Média	A 2,66	A 2,66	
CV	2,15%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 6 – Densidade dos sólidos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	----- cm -----					Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20		
	----- Mg.m ³ -----					
PD	A 2,66 ab	B 2,56 b	A 2,68 ab	A 2,71 ns	2,65 ns	
PDE	B 2,65 ab	BA 2,68 a	B 2,64 ab	A 2,70	2,65	
PD+CS	B 2,61 b	BA 2,67 a	A 2,72 a	BA 2,69	2,67	
PDE+CS	A 2,64 ab	A 2,66 a	A 2,68 ab	A 2,62	2,67	
PDE+CI+CS	A 2,73 a	A 2,66 a	A 2,59 b	A 2,61	2,65	
PDE+CI	A 2,64 ab	A 2,65 a	A 2,64 ab	A 2,62	2,65	
Média	A 2,65	A 2,65	A 2,66	A 2,66		
CV (%)	3,43					

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ns: Diferença não significativa.

4.1.3 Consistência do solo

Os limites de consistência do solo são determinados pelas relações entre as partículas sólidas e dessas com a água, que resultam nas forças de coesão e de adesão (BRAIDA et al., 2006).

A consistência do solo analisada através dos limites plástico (LP) e líquido (LL), bem como por meio do índice de plasticidade do solo (IP) e razão entre teor de água ótimo de compactação e limite plástico (UG/LP), dos 6 meses e 18 meses após a implantação dos tratamentos são apresentados nas Tabelas 7 a 14.

Para o limite plástico ocorreram diferenças nas médias dos manejos, sendo que o maior teor de água ficou no manejo PDE, tanto aos 6 meses (Tabela 7) quanto aos 18 meses (Tabela 8). Dentro das profundidades na média dos manejos o maior teor de água ficou na profundidade de 17,5 cm diferindo estatisticamente das demais nos 6 meses e repetindo-se novamente aos 18 meses (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7 – Valores do teor de umidade a base de massa para o limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
0- 5	A 0,225 a	B 0,208 c	0,217 b
5 -10	B 0,210 ab	A 0,222 b	0,217 b
10 - 15	B 0,207 b	A 0,222 b	0,212 b
15 - 20	B 0,218 a	A 0,256 a	0,237 a
Média	B 0,214	A 0,227	
CV	8,59%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Considera-se que a umidade do solo onde se encontram as melhores condições para o preparo é quando o solo está na consistência friável (BAVER et al., 1973). O manejo elevou o teor de água do limite de plasticidade no PDE (Tabela 8), sendo que nesta condição partindo-se da umidade do solo na capacidade de campo, a condição de friabilidade é atingida mais rapidamente, podendo este solo ser cultivado antes do que o solo do PD, visando otimizar a utilização das máquinas e implementos agrícolas.

Tabela 8 – Valores do teor de umidade a base de massa para o limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
0- 5	A 0,228 a	B 0,218 b	0,223 b
5 -10	B 0,211 b	A 0,225 b	0,218 b
10 - 15	A 0,218 b	A 0,219 b	0,219 b
15 - 20	B 0,216 b	A 0,250 a	0,233 a
Média	B 0,218	A 0,228	
CV	4,29%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação ao limite de liquidez do solo nos 6 e 18 meses ambos ficaram acima no manejo PDE se comparado ao PD (Tabelas 9 e 10).

Silva et al. (2006), estudando os efeitos dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos limites de consistência e na agregação do solo, concluíram que os sistemas de manejo sequeiro e irrigado reduziram os valores do limite de plasticidade nas camadas de

0–0,20 e 0,20–0,40 m, em relação ao solo sob mata nativa. Os sistemas de manejo conservacionistas aumentam os estoques de matéria orgânica e a estabilidade de agregados (BALESDENT et al., 2000).

Tabela 9 – Valores do teor de umidade a base de massa para o limite líquido (LL) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	----- kg.kg ⁻¹ -----		
0- 5	A 0,348 ns	A 0,350 b	0,349 a
5 -10	A 0,343	B 0,338 c	0,340 b
10 - 15	B 0,342	A 0,351 b	0,346 a
15 - 20	B 0,342	A 0,360 a	0,351 a
Média	B 0,344	A 0,350	
CV	2,54%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ns: Diferença não significativa.

Tabela 10 – Valores do teor de umidade a base de massa para o limite líquido (LL) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	----- kg.kg ⁻¹ -----		
0- 5	B 0,342 ns	A 0,351 b	0,346 b
5 -10	A 0,342	B 0,337 c	0,340 c
10 - 15	B 0,342	A 0,349 b	0,340 b
15 - 20	B 0,342	A 0,360 a	0,351 a
Média	B 0,342	A 0,349	
CV	2,54%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em um solo classificado como Haplorthox, Petter (1990), definiu que os valores de umidade para o limite plástico e líquido, obtidos foram de 0,27 e 0,44 kg.kg⁻¹, respectivamente.

A modificação no manejo do solo resultou em aumento significativo dos limites de liquidez e de plasticidade (Tabelas 7 a 10), embora este aumento não tenha sido refletido em aumento do índice de plasticidade (intervalo de umidade entre os limites de liquidez e de plasticidade) que se manteve na média maior no PD do que no PDE (Tabelas 11 e 12) em ambas as épocas.

Tabela 11 – Índice de plasticidade (IP) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada		PD	PDE	Média
-----cm-----				
0- 5	B	12,29 b	A 14,22 a	13,26 a
5 -10	A	13,23 ab	B 11,55 ab	12,39 ab
10 - 15	A	14,02 a	B 12,87 bc	13,45 a
15 - 20	A	12,36 b	B 10,43 c	11,40 b
Média	A	12,98	B 12,27	
CV		16,52%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Baver et al. (1972), isso acontece porque a manifestação da plasticidade ocorre apenas depois que duas condições são atendidas: deve haver água suficiente para a formação de camadas rígidas de moléculas de água nas superfícies coloidais adjacentes e deve haver água extra para funcionar como lubrificante entre as camadas rígidas de moléculas de água. Assim, a matéria orgânica (MOS)(Tabela 34) afetaria apenas a primeira demanda, tornando-a maior, mas não teria efeito sobre a segunda demanda de água.

A mobilização do solo causou uma pequena redução na matéria orgânica na camada de 0-5 cm e um aumento na camada de 10-15 cm, indicando que esta deslocou a MOS em profundidade, pois a média dos manejos permaneceu semelhante.

Ocorreram diferenças entre profundidades nos manejos e entre manejos nas profundidades para a variável IP, tanto aos 6, quanto aos 18 meses (Tabela 12).

Tabela 12 – Índice de plasticidade (IP) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada -----cm-----		PD	PDE	Média
0- 5	B	11,45 b	A 13,25 a	12,35 ab
5 -10	A	13,15 a	B 11,21 b	12,18 ab
10 - 15	A	12,40 a	A 12,97 a	12,69 a
15 - 20	A	12,57 a	B 11,04 b	11,80 b
Média	A	12,39	B 12,12	
CV		9,24%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em contrapartida, Braida et al. (2006) estudando um Argissolo, constataram que o acúmulo de matéria orgânica não produziu efeito sobre a plasticidade do solo e, assim, independentemente do teor de CO, o mesmo não apresentou plasticidade, em função de seu elevado teor de areia (629 g kg^{-1}). Além disso, observaram um efeito menor sobre o limite de liquidez, talvez porque, nesse caso, o efeito sobre as forças de adesão, predominantes na faixa de umidade em que o solo é plástico, é diluído pelo fato de a fração mineral do solo conter baixa reatividade. Por

outro lado, por essa mesma razão, foi acentuada a ação de reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

A relação entre a umidade crítica de compactação desse solo no teste de Proctor normal e o limite de plasticidade, que expressa o limite de compactação suportado pelo solo no limite de plasticidade, demonstram que ocorreram diferenças significativas entre PD e PDE, sendo de 1,08 e 1,03 no PD e 0,92 e 0,90 no PDE, aos seis e 18 meses (Tabela 13).

Tabela 13 – Razão entre teor de água ótimo de compactação e limite plástico (UG/LP) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----			
0- 5	A 1,01 b	A 1,02 a	1,02 a
5 -10	A 1,07 ab	B 0,91 b	0,99 ab
10 - 15	A 1,14 a	B 0,91 b	1,03 a
15 - 20	A 1,07 ab	B 0,83 b	0,95 b
Média	A 1,08	B 0,92	
CV	9,51%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ojeniyi & Dexter (1979) indicam que essa razão é igual a 0,90, sugerindo que a UG possa ser estimada como sendo igual a 90 % do limite de plasticidade.

Este fato assume relevância, pois, a determinação da umidade em que os solos adquirem características friáveis é muito importante, uma vez que com estes dados é possível definir as faixas de umidade em que poderão ser feitos preparos ou semeadura afetando ao mínimo a estrutura do solo (VIEIRA, 2006).

Vasconcelos et al. (2010), avaliando limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar, inclusive com queima, concluíram que foi igual na superfície em todas as situações avaliadas, com exceção do solo de mata, por não ter sofrido a queima. Também se percebeu que o solo sob mata nativa apresentou valor médio de 1,08 para a razão UG/LP, representativo em três profundidades, que significa uma UG 8 % acima do LP. Como o intervalo de consistência friável representa a faixa ótima de umidade para a mobilização mecânica do solo, constataram que o solo com limite de plasticidade próximo daquele sob mata nativa apresentava baixo risco de compactação, reforçando assim a recomendação de elevar e manter adequados os teores para a matéria orgânica do solo (VASCONCELOS et al., 2010).

Tabela 14 – Razão entre teor de água ótimo de compactação e limite plástico (UG/LP) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----			
0- 5	A 0,98 b	B 0,95 a	0,97 ns
5 -10	A 1,04 ab	B 0,89 b	0,96
10 - 15	A 1,02 a	B 0,93 a	0,98
15 - 20	A 1,06 ab	B 0,84 c	0,95
Média	A 1,03	B 0,90	
CV	4,13%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ns: Diferença não significativa.

Cada mineral de argila atribui diferentes propriedades aos solos nos quais são predominantes. Por esta razão, propriedades do solo como contração expansão, plasticidade, capacidade de retenção de água, resistência do solo e adsorção de elementos químicos são dependentes do tipo e da quantidade de argila presente no solo (BRADY & WEIL, 2008).

De acordo com Teske et al. (2007), no solo deste experimento o padrão mineralógico é de caulinita, que é o argilomineral dominante, seguida de argilominerais do tipo 1:1. Nestes solos, verificam-se também diferenças no padrão mineralógico entre as argilas grossas e finas.

4.1.4 Densidade do solo (Ds)

Observou-se que os valores de densidade do solo na média dos manejos (Tabela 15) apresentaram diferença significativa entre estes. O PDE apresentou uma densidade do solo média 4,54% inferior ao PD, mesmo após uma cultura de inverno (6 meses), contradizendo Ralisch et al. (2001), que concluíram que a escarificação tem efeito somente para uma cultura, não tendo efeito residual para outras culturas subsequente, enquanto que Pierce et al. (1992) relata que o efeito da escarificação pode persistir por anos em um solo franco-arenoso.

Tabela 15 – Densidade do solo em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----g.cm ⁻³ -----		
0- 5	A 1,29 ns	B 1,11 b	1,20 a
5 -10	A 1,32	B 1,30 a	1,31 a
10 - 15	A 1,33	B 1,30 a	1,32 a
15 - 20	A 1,35	A 1,33 a	1,34 b
Média	A 1,32	B 1,26	
CV	4,19%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Klein et al. (2009,) estudando indicadores de qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado, concluíram que a densidade do solo no PD foi estatisticamente superior ao PDE.

Em relação a densidade do solo 18 meses após a implantação dos manejos (Tabela 16), ocorreram diferenças significativas entre os manejos, formando dois grupos distintos: no primeiro deles os manejos que não sofreram mobilização (PD e PD+CS) com maior densidade do solo e os que sofreram mobilização (PDE, PDE+CS, PDE+CI e PDE+CS+CI) com menor densidade do solo.

A escarificação do solo sob sistema plantio direto há seis anos, segundo Klein et al. (2008), aumentou o rendimento de grãos de trigo semeado sete meses após a escarificação e diminuiu a densidade e a densidade relativa do solo, aumentando a porosidade total e a porosidade livre de água durante o ciclo da cultura do trigo.

Com relação à profundidade, na média dos manejos, a densidade aumentou com o aumento da profundidade (Tabela 16). Dentro dos manejos, as maiores densidades foram encontradas no PD, nas camadas de 0-5, 5-10 e 15-20 cm, onde somente na camada de 10-15 cm não ocorreram diferenças entre os manejos

Estes dados concordam com os resultados encontrados por Vieira (1981), Silva et al. (2000), Reichert (2008), indicando que, no sistema plantio direto, há tendência à compactação na camada subsuperficial, porém em profundidade menor do que para preparos que mobilizam o solo (KLEIN, 1998). Essa maior densidade do solo em PD deve-se ao não revolvimento do solo e tráfego de máquinas (KLEIN & BOLLER, 1995 e TORMENA, 1991).

Tabela 16 – Densidade do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	cm					Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20		
	----- Mg.m ⁻³ -----					
PD	B 1,34 a	B 1,34 a	A 1,34 ns	A 1,39 a	1,36 a	
PDE	B 1,14 b	A 1,33 ab	A 1,33	A 1,34 b	1,29 b	
PD+CS	B 1,33 a	B 1,33 ab	BA 1,34	A 1,38 ab	1,34 a	
PDE+CS	B 1,12 b	A 1,32 ab	A 1,33	A 1,36 ab	1,28 b	
PDE+CI+CS	A 1,24 ab	A 1,31 b	A 1,32	A 1,29 c	1,29 b	
PDE+CI	C 1,19 b	B 1,32 ab	B 1,31	A 1,36 ab	1,30 b	
Média	C 1,23	B 1,32	B 1,33	A 1,35		
CV (%)	2,95					

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
ns: Diferença não significativa.

A escarificação reduz a densidade do solo e isso ocorre porque o escarificador promove a mobilização do solo, ocasionando o empolamento sem revolvimento com aumento da porosidade total (BOLLER, 1990 e KLEIN et al.,1995).

No escarificador, a ação agressiva causada pelas hastes estreitamente espaçadas com ponteiras promove um maior volume de solo mobilizado, para o uso em preparo conservacionista. Alguns têm ponteiras mais largas o que possibilita uso de ferramentas mais espaçadas e a maiores profundidades de trabalho, resultando numa taxa de incorporação de resíduos vegetais mais baixas (ORTIZ-CAÑAVATE, 1980).

4.1.5 Densidade máxima do solo ($D_{m\acute{a}x}$)

A densidade máxima do solo determinada através do ensaio de Proctor (Tabela 17 e 18) para as duas épocas de coleta foi semelhante entre as profundidades e os manejos, e a umidade ótima de compactação foi semelhante entre manejos e profundidades (6 e 18 meses).

Tabela 17 – Densidade máxima do solo (DMS) e teor de umidade ótimo (UG) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada (cm)	PD		PDE	
	DMS (g.cm ⁻³)	UG (g.g ⁻¹)	DMS (g.cm ⁻³)	UG (g.g ⁻¹)
0- 5	1,51	0,227	1,53	0,207
5 -10	1,56	0,223	1,59	0,203
10 - 15	1,55	0,226	1,58	0,203
15 - 20	1,53	0,234	1,56	0,212
Média	1,54	0,228	1,56	0,206

Tabela 18 – Densidade máxima do solo (DMS) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Camada (cm)	PD		PDE	
	DMS (Mg m ⁻³)	UG (kg kg ⁻¹)	DMS (Mg m ⁻³)	UG (kg kg ⁻¹)
0- 5	1,52	0,224	1,53	0,208
5 -10	1,56	0,219	1,59	0,200
10 - 15	1,55	0,221	1,57	0,205
15 - 20	1,54	0,229	1,56	0,211
Média	1,54	0,223	1,56	0,206

Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004) relatam, que em um solo argiloso ($0,66 \text{ g.g}^{-1}$ de argila), a densidade de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto um solo arenoso ($0,32 \text{ g.g}^{-1}$ de argila) foi de $1,77 \text{ g.cm}^{-3}$.

As equações utilizadas para calcular a densidade máxima do solo e umidade gravimétrica ótima de compactação, aos 6 e 18 meses após a implantação dos manejos, e as curvas de compactação que deram origem aos dados estão apresentadas nas tabelas 19 e 20 e figuras 5, 6, 7 e 8.

Tabela 19 – Equações para cálculo de densidade máxima do solo ($D_{\text{máx}}$) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Manejo	Camada (cm)	Equação	R^2
PD	0- 5	$D_{\text{máx}} = -41,526x^2 + 18,866x - 0,6283$	0,99
	5 -10	$D_{\text{máx}} = -41,672x^2 + 18,556x - 0,5060$	0,97
	10 - 15	$D_{\text{máx}} = -37,591x^2 + 17,006x - 0,3727$	0,98
	15 - 20	$D_{\text{máx}} = -36,883x^2 + 17,325x - 0,5025$	0,91
PDE	0- 5	$D_{\text{máx}} = -42,357x^2 + 17,555x - 0,2845$	0,98
	5 -10	$D_{\text{máx}} = -32,792x^2 + 13,298x + 0,2404$	0,90
	10 - 15	$D_{\text{máx}} = -39,937x^2 + 16,186x - 0,0633$	0,99
	15 - 20	$D_{\text{máx}} = -18,243x^2 + 7,7391x + 0,7377$	0,99

As equações apresentadas nas Tabelas 19 e 20 mostram que a menor $D_{\text{máx}}$ foi encontrada em ambos os períodos (6 e 18 meses após o manejo) e manejos (PD e PDE) na camada de 0-5 cm.

Resultados semelhantes a estes foram encontrados por Marcolin (2009) que avaliando 10 solos com diferentes composições granulométricas concluiu que a maior densidade máxima ocorreu no solo com o menor teor de argila e na camada de solo mais profunda

que foi analisada, pois apresentava o menor teor de matéria orgânica do perfil do solo. O menor valor da densidade do solo máxima não ocorreu no solo com o maior teor de argila e sim no solo com o maior teor de matéria orgânica, comportamento semelhante à densidade do solo no campo, sendo que a explicação para isto pode estar relacionada a relação da mecânica do solo com sua composição granulométrica.

Tabela 20 – Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e unidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejo	Camada (cm)	Equação	R ²
PD	0- 5	$D_{\text{máx}} = -49,209x^2 + 21,569x - 0,8944$	0,99
	5 -10	$D_{\text{máx}} = -36,566x^2 + 16,017x - 0,1940$	0,85
	10 - 15	$D_{\text{máx}} = -32,540x^2 + 14,414x - 0,0417$	0,94
	15 - 20	$D_{\text{máx}} = -40,040x^2 + 18,357x - 0,5659$	0,89
PDE	0- 5	$D_{\text{máx}} = -42,750x^2 + 17,809x - 0,3212$	0,98
	5 -10	$D_{\text{máx}} = -31,030x^2 + 12,430x - 0,3480$	0,88
	10 - 15	$D_{\text{máx}} = -41,750x^2 + 17,090x - 0,1743$	0,99
	15 - 20	$D_{\text{máx}} = -19,375x^2 + 8,1513x + 0,7046$	0,99

D

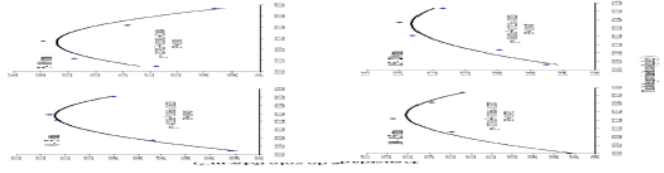


Figura 5: Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo).

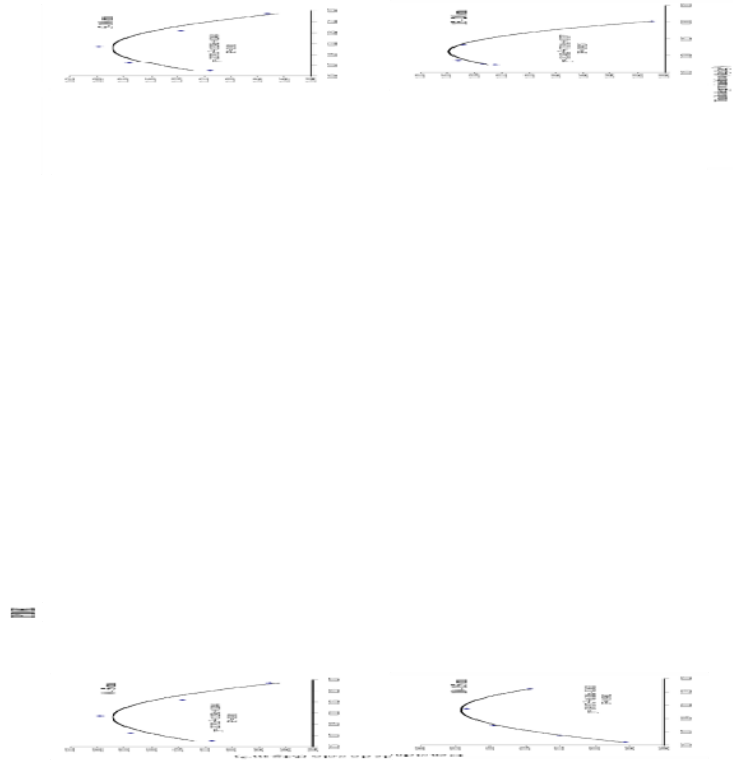


Figura 6: Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo).

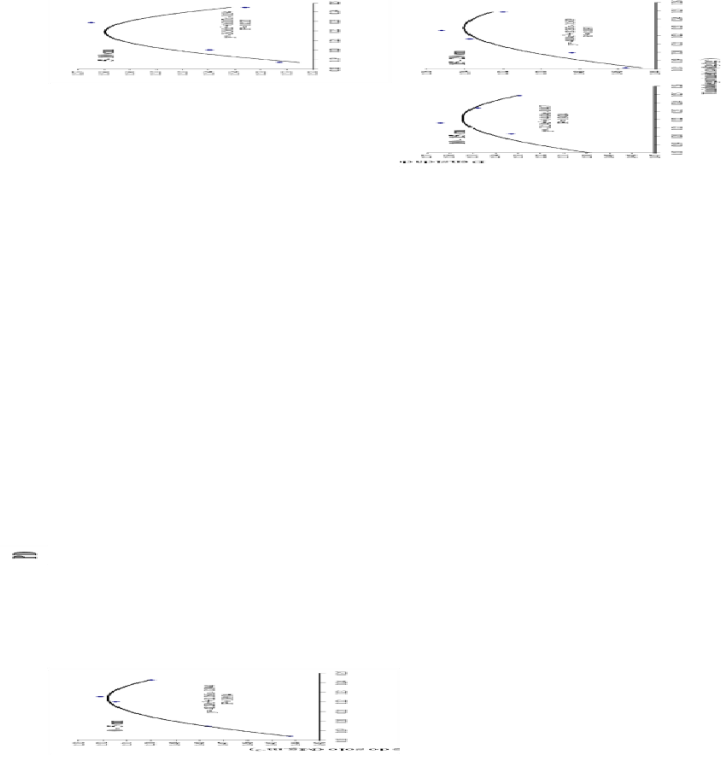


Figura 7: Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo).

III

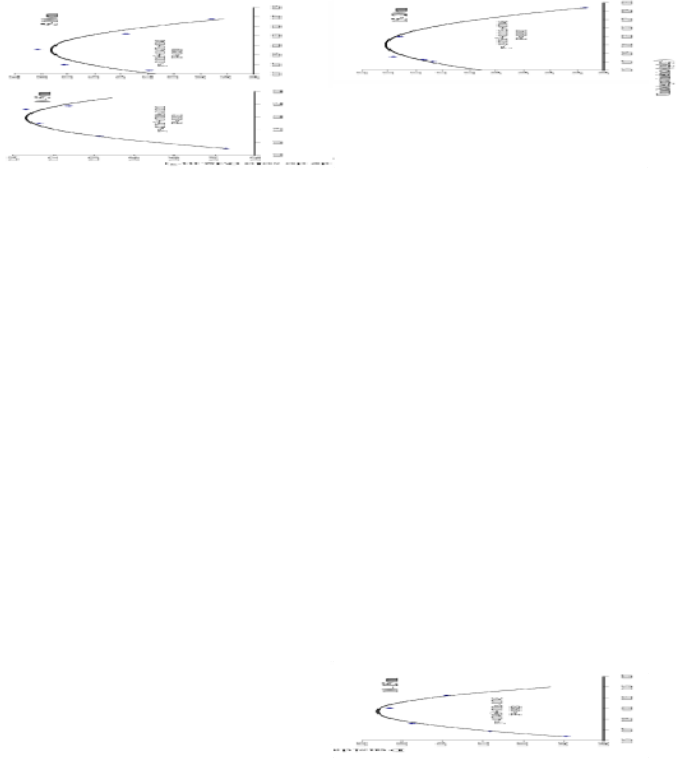


Figura 8: Curvas do Teste de Proctor em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo).

4.1.6 Densidade relativa do solo

Na média das camadas, a densidade relativa (DR) no campo aos 6 meses foi maior no PD do que no PDE (Tabela 21) apresentando também diferença significativa entre as profundidades, sendo a menor DR na camada de 0-5 cm. Dentro do manejo PD não ocorreram diferenças entre as profundidades, demonstrando uma maior uniformidade da densidade do solo em profundidade, já para o manejo PDE a DR foi menor somente na superfície (camada de 0-5 cm). Comparando os manejos nas profundidades, o PD apresentou uma DR superior ao PDE na camada de 0-5 cm e 15-20 cm.

Tabela 21 – Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada (cm)	PD	PDE	Médias
0- 5	A 0,84 a	B 0,71 b	0,77 b
5 -10	A 0,84 a	A 0,84 a	0,84 a
10 - 15	A 0,86 a	A 0,85 a	0,85 a
15 - 20	A 0,88 a	B 0,86 a	0,87 a
Média	A 0,85	B 0,81	
CV	4,19 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Estes resultados demonstram que para ambos os manejos a DR ainda não pode ser considerada limitante, segundo trabalho de Klein et al. (2009), que estudando solo semelhante concluíram que no PDE na DR 0,85 e no PD na DR 0,9, parece haver um ponto crítico, a partir do qual as condições físicas do solo apresentam maior

degradação a ponto de comprometer o pleno desenvolvimento das plantas.

A DR no campo, aos 18 meses, foi maior no PD e PD+CS do que nos manejos que apresentaram escarificação PDE, PDE+CS, PDE+CI e PDE+CS+CI (Tabela 22), apresentando também diferença significativa entre as profundidades sendo a menor DR na camada de 0-5 cm, intermediária nas camadas de 5-10 e 10-15 cm e maior na camada de 15-20 cm.

Marcolin (2009), estudando diversos solos da região Sul em relação a DR concluiu que como a densidade do solo na camada superficial sofre influência do menor teor de argila, do maior teor de matéria orgânica e do manejo, apresenta menor valor nessa camada, mas a densidade máxima também é influenciada pelo teor de argila e matéria orgânica e apresenta valores menores nessa camada, com isso a densidade relativa reflete a influência do manejo adotado em cada solo.

No Brasil, estudos de Torres & Saraiva (1999), em Latossolo Roxo cultivado dois anos com soja, em clima tropical, observaram que, a partir da DR de 0,84 e 0,87, ocorreu decréscimo da produtividade.

Carter (1990) constatou que a produtividade máxima de trigo e de cevada esteve associada à DR de 0,81 em solo arenoso de clima temperado. Håkansson (1990) realizou cerca de 100 experimentos de campo com cevada, em solos com diferentes texturas e conteúdos de matéria orgânica, e verificou que a DR ótima esteve associada ao valor de 0,87.

Tabela 22 – Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	----- cm -----					Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20		
PD	BA 0,88 a	B 0,86 a	B 0,87 ns	A 0,90 a	0,88 a	
PDE	B 0,74 b	A 0,83 bcd	A 0,85	A 0,86 c	0,82 b	
PD+CS	BA 0,87 a	B 0,85 ab	B 0,86	A 0,89 ab	0,87 a	
PDE+CS	C 0,73 b	B 0,82 cd	BA 0,85	A 0,87 bc	0,82 b	
PDE+CI+CS	A 0,81 ab	A 0,81 d	A 0,84	A 0,83 d	0,83 b	
PDE+CI	B 0,78 b	A 0,84 abc	A 0,85	A 0,87 bc	0,86 b	
Média	C 0,81	B 0,84	B 0,85	A 0,87	0,87	
CV (%)	3,13					

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.7 Porosidades do solo

A porosidade total e o volume de criptoporos (Tabela 23) apresentaram diferenças entre os manejos, discordando dos resultados obtidos por Inoue et al. (2002) e Costa et al. (2002). O volume de macroporos e de microporos não apresentaram diferença significativa entre os manejos aos 6 meses (Tabela 23).

Em relação à porosidade total esta foi maior na camada de 0-5 cm. No PD não ocorreram diferenças entre as profundidades, e no PDE a maior porosidade foi na camada de 0-5 cm.

Para o volume de macroporos não ocorreram diferenças entre as médias dos manejos. Nas médias das profundidades também não ocorreram diferenças. Dentro dos manejos no PD o menor volume de macroporos esteve na camada de 0-5 cm, se diferenciando das outras três camadas. No PDE o maior valor esteve na camada de 0-5 cm diferindo das demais.

Cabe ressaltar que na camada de 0-5 cm do PD esses valores do volume de macroporos não foram considerados adequados em termos de garantia de aeração do sistema radicular e drenagem da água no solo, cujo limite crítico considerado é de $0,1 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (BAVER et al., 1972; REYNOLDS et al., 2002).

Um fato relevante a ser destacado é a elevada variação dos valores do volume de macroporos ($CV = 39,82\%$, Tabela 23), indicando uma elevada variabilidade espacial, o que pode interferir no desenvolvimento do sistema radicular das plantas e no fluxo de água em profundidade, em contrapartida Moreira & Silva (1987)

constatarem que a variabilidade temporal pode minimizar essas limitações.

Tabela 23 – Porosidade total, volume de macroporos, microporos e criptoporos do solo em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada -----cm-----	PD	PDE	Médias
	-----cm ³ .cm ⁻³ -----		
Porosidade Total			
0-5	B 0,517 a	A 0,584 a	0,550 a
5-10	A 0,511 a	B 0,507 b	0,509 b
10-15	A 0,512 a	B 0,500 b	0,506 b
15-20	B 0,493 a	A 0,502 b	0,497 b
Média	B 0,508	A 0,523	
CV	3,93%		
Macroporos			
0-5	A 0,051 b	B 0,170 a	0,117 ns
5-10	A 0,104 a	A 0,105 b	0,105
10-15	A 0,133 a	B 0,108 b	0,120
15-20	A 0,096 a	A 0,106 b	0,099
Média	A 0,096	A 0,121	
CV	39,82 %		
Microporos			
0-5	A 0,204 ns	A 0,175 b	0,189 b
5-10	B 0,206	A 0,208 a	0,207 a
10-15	B 0,206	A 0,211 a	0,208 a
15-20	A 0,214	A 0,210 a	0,212 a
Média	A 0,207	B 0,201	
CV	4,19 %		
Criptoporos			
0-5	A 0,262 a	A 0,239 a	0,250 a
5-10	A 0,201 b	A 0,193 b	0,197 b
10-15	A 0,173 b	A 0,181 b	0,177 b
15-20	A 0,182 b	A 0,191 b	0,187 b
Média	A 0,205	A 0,201	
CV	11,88 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ns: Diferença não significativa.

Para a variável água disponível (AD) que corresponde ao volume de microporos, esta foi 1,95% menor no manejo PDE comparado ao PD. Em relação às profundidades a menor microporosidade se localizou nos 0-5 cm e as maiores aos 10-15 e 15-20 cm. Em ambos os manejos, a menor quantidade de AD foi encontrada na camada de 0-5 cm. Este menor volume de microporos, somado às condições de superfície como microrrelevo e cobertura do solo podem desfavorecer a retenção da água no solo para as culturas no PDE.

Estes resultados são confirmados por Andrade et al. (2010) que avaliaram alguns atributos físicos e suas relações com os teores de carbono orgânico de um Cambissolo Húmico alumínico nos sistemas de preparo convencional (PC) e semeadura direta (SD), após 12 anos com rotação e sucessão de culturas e concluíram que a semeadura direta apresentou melhor agregação do solo na camada superficial (0-5 cm) em relação ao preparo convencional, o que está associado ao maior volume de microporos, teor de carbono orgânico total e retenção de água, não havendo necessidade de revolvimento do solo.

O volume de criptoporos (Tabela 23) não apresentou diferença significativa entre os manejos, sendo que no PD estes ocupam em torno de $0,205 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, demonstrando que 49,75% da água retida no solo está indisponível às plantas, enquanto que no PDE os criptoporos, ocupam em torno de $0,201 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondendo a 50% da água retida no solo. Resultados semelhantes a estes foram encontrados por Vieira (2006) estudando este mesmo tipo de solo em PDE e PD.

Em relação à porosidade total aos 18 meses (Tabela 24) ocorreram diferenças entre os sistemas que sofreram mobilização do solo e os que não sofreram mobilização. A maior porosidade total esteve presente nos manejos PDE, PDE+CS, PDE+CI e PDE+CI+CS e menor nos manejos PD e PD+CS. Nas médias das profundidades a maior porosidade foi nos 0-5 cm diferindo estatisticamente das outras. Dentro das camadas, de 0-5 cm, o comportamento foi semelhante à média dos manejos e na profundidade de 10-15 cm não foram significativos.

Para o volume de macroporos (Tabela 25) ocorreram diferenças entre as médias dos manejos. Nas médias das camadas também ocorreram diferenças. Dentro dos manejos no PDE+CI+CS a menor macroporosidade esteve na camada de 10-15 cm e o maior valor esteve na camada de 0-5 cm do manejo PDE+CI. Verifica-se que várias profundidades e vários manejos apresentaram volume de macroporos restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular de plantas sendo inferior a $0,10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (VOMOCIL & FLOCKER, 1961; LIBARDI, 2005).

Na variável AD (Tabela 26) a maior disponibilidade encontra-se aos 0-5 cm com $0,197 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ diferindo das outras profundidades. Comparando-se os manejos o maior volume de microporos encontra-se no PDE+CI+CS com $0,219 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e as menores nos manejos PD e PD+CS. Para os criptoporos (Tabela 27) ocorreram diferenças entre as médias dos manejos e nas médias das profundidades. Dentre os manejos os maiores volumes de água indisponível estão no PD e PD+CS e os menores volumes nos manejos PDE, PDE+CS, PDE+CI+CS e PDE+CI.

Tabela 24 – Porosidade total do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	----- cm -----				Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	
	----- cm ³ .cm ⁻³ -----				
PD	A 0,494 b B	0,475 b A	0,499 ns BA	0,486 b	0,489 b
PDE	A 0,570 a B	0,503 a B	0,495 B	0,504 a	0,518 a
PD+CS	A 0,490 b A	0,502 a A	0,493 A	0,490 ab	0,494 b
PDE+CS	A 0,574 a B	0,505 a B	0,502 C	0,480 b	0,513 a
PDE+CI+CS	A 0,546 a B	0,509 a B	0,490 A	0,504 a	0,512 a
PDE+CI	A 0,547 a B	0,506 a B	0,502 B	0,490 ab	0,511 a
Média	A 0,537 B	0,500 B	0,497 B	0,492 B	
CV (%)	2,99				

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 25 – Volume de macroporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejo	----- cm -----				Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	
	----- cm ³ .cm ⁻³ -----				
PD	B 0,085	c B 0,109	ab A 0,161	a BA 0,131	ab 0,121 a
PDE	A 0,186	ab B 0,117	ab B 0,103	ab B 0,113	ab 0,130 a
PD+CS	B 0,066	c A 0,126	a A 0,150	ab A 0,160	a 0,126 a
PDE+CS	A 0,175	ab B 0,104	b B 0,110	ab C 0,050	b 0,110 ab
PDE+CI+CS	A 0,145	b BA 0,112	ab B 0,041	c B 0,059	b 0,089 b
PDE+CI	A 0,219	a B 0,120	ab CB 0,101	b C 0,059	b 0,125 a
Média	A 0,146	B 0,115	CB 0,111	C 0,095	
CV (%)	28,45				

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 26 – Volume de microporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejo	----- cm -----				Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	
	----- m ³ .m ⁻³ -----				
PD	A 0,196 a	B 0,154 c	B 0,127 c	C 0,135 ab	0,153 d
PDE	A 0,204 a	A 0,176 ab	A 0,180 b	A 0,179 abc	0,185 b
PD+CS	A 0,214 a	BA 0,166 bc	B 0,132 c	C 0,112 c	0,156 cd
PDE+CS	A 0,221 a	CB 0,193 a	C 0,180 b	CB 0,215 ab	0,203 ab
PDE+CI+CS	A 0,205 a	A 0,190 a	A 0,241 a	A 0,240 a	0,219 a
PDE+CI	C 0,140 b	B 0,178 ab	BA 0,193 b	BA 0,215 ab	0,181 bc
Média	A 0,197	B 0,176	B 0,175	BA 0,183	
CV (%)	16,44				

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 27 – Volume de criptoporos do solo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	cm				Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	
	----- cm ³ .cm ⁻³ -----				
PD	B 0,212 a	B 0,212 a	B 0,212 ns	A 0,220 a	0,214 a
PDE	B 0,180 b	A 0,210 ab	A 0,211	A 0,211 b	0,203 b
PD+CS	B 0,210 a	B 0,210 ab	BA 0,211	A 0,218 ab	0,212 a
PDE+CS	B 0,178 b	A 0,208 ab	A 0,211	A 0,215 ab	0,203 b
PDE+CI+CS	A 0,196 ab	A 0,206 b	A 0,210	A 0,204 c	0,204 b
PDE+CI	C 0,189 b	B 0,208 ab	BA 0,208	A 0,215 ab	0,205 b
Média	C 0,194	B 0,209	BA 0,210	A 0,214	
CV (%)	2,94				

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.8 Resistência mecânica do solo à penetração

Os valores de RP foram ajustados a um modelo não-linear proposto por Busscher (1990), que ajusta a RP em relação à densidade e umidade do solo, conforme equação $RP \text{ (MPa)} = \text{EXP}[-1,02 + (3,18(\ln D_s)) - (0,92(\ln \theta))]$. Na média a RP apresentou diferença entre os manejos do solo nas condições avaliadas na capacidade de campo aos 6 meses e 18 meses (Tabelas 28 e 29).

Esta alteração na resistência mecânica do solo a penetração (RP) é possível de ser quantificada determinando-se simultaneamente o conteúdo de água no solo (θ) e a resistência do solo à penetração em diferentes potenciais mátricos (Ψ) (SILVA & KAY, 1997; TORMENA et al., 1998 e TORMENA & SILVA, 2002), que resultam em curvas de retenção de água do solo e de resistência do solo à penetração. Estas curvas permitem a interpretação das relações entre a densidade do solo, os teores de carbono orgânico do solo, os teores de água e a resistência do solo à penetração em sistemas de manejo de solo.

O PD apresentou uma RP superior ao PDE, destacando-se a diminuição da diferença com a redução da umidade do solo. Isto demonstra a eficiência da escarificação na redução da resistência mecânica do solo, concordando com Inoue et al. (2002) e Cavalieri et al. (2003), contradizendo, porém, Ralisch et al. (2001), que verificaram o efeito da redução na RP no espaço de tempo durante um ciclo de cultura anual, concluindo que o efeito da escarificação na RP não perdura por mais do que um cultivo.

Na média das profundidades observou-se um comportamento crescente da RP, sendo menor aos 0-5 cm e igual nas outras camadas.

Entre os sistemas de manejo em profundidade, observou-se diferença significativa em todas as profundidades, tendo o PD apresentado a RP superior ao PDE aos 0-5 e 15-20 cm, ao passo que nas demais profundidades o PDE foi superior ao PD.

Tabela 28 – Resistência à penetração do solo na umidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----MPa-----		
0-5	A 1,66 b	B 1,15 b	1,40 b
5-10	B 1,91 ab	A 1,99 a	1,95 a
10-15	B 2,03 a	A 2,13 a	2,08 a
15-20	A 2,21 a	B 2,07 a	2,14 a
Média	A 1,95	B 1,84	
CV	11,61%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na média, a RP apresentou diferença entre os manejos do solo nas condições avaliadas na capacidade de campo também aos 18 meses (Tabelas 29). Em relação à RP aos ocorreram diferenças entre os sistemas que sofreram mobilização do solo e os que não sofreram mobilização. A menor RP esteve nos manejos PDE, PDE+CS, PDE+CI e PDE+CI+CS e maior nos manejos PD e PD+CS. Nas médias das profundidades a menor RP foi aos 0-5 cm diferindo estatisticamente das outras.

O aumento da densidade condiciona um novo arranjo e acomodação das partículas do solo favorecendo um incremento do número de contato entre elas, aumentando a resistência à penetração e diminuindo a porosidade do solo (SILVA et al., 2002).

Em relação à RP na umidade do ponto de murcha permanente aos 6 meses está foi maior no manejo PD do que no PDE e nas médias das camadas foi aumentando com o aumento da profundidade. Dentro do manejo PDE somente foi inferior a 2 MPa na camada de 0-5 cm sendo limitante nas demais e no manejo PD todas as camadas foram consideradas limitantes.

Na umidade do solo no ponto de murcha permanente (PMP) (Tabela 30), a RP nas médias dos manejos foi maior no PD do que no PDE, apresentando diferença significativa entre as camadas, onde a menor foi aos 0-5 cm e a maior nos 5-10 cm que não diferiu estatisticamente dos 10-15 cm. No entanto, nas profundidades o PDE apresentou uma variação significativa, sendo a menor RP na profundidade 0-5 cm enquanto que nas demais não diferiram. Estes dados tem vinculação direta com a densidade do solo (Tabela 15)

Deve-se considerar que dentre os atributos físicos, a RP é o que mais frequentemente compromete o IHO, que veremos a seguir, uma vez que aumenta com a compactação do solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998, 1999; BEUTLER, 2003). O valor da RP adotado como limitante é de 2,0 MPa (TAYLOR & BRAR, 1991; TORMENA et al., 1999a, b), porém varia com o tipo de solo e de cultura (DEXTER, 1987; BEUTLER, 2003).

Tabela 29 – Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) na unidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	----- cm -----					Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20		
PD	C 1,87 a	B 2,09 a	BA 2,27 a	A 2,38 ab	2,15 a	
PDE	B 1,36 b	A 1,94 bc	A 1,92 b	A 1,94 bc	1,79 b	
PD+CS	B 1,75 a	B 2,00 ab	BA 2,22 a	A 2,54 a	2,13 a	
PDE+CS	B 1,25 b	A 1,81 c	A 1,92 b	A 1,83 bc	1,70 b	
PDE+CI+CS	A 1,58 ab	A 1,80 c	A 1,63 c	A 1,59 c	1,65 b	
PDE+CI	A 1,77 a	A 1,89 bc	A 1,82 bc	A 1,83 bc	1,83 b	
Média	B 1,59	A 1,92	A 1,96	A 2,02		
CV (%)	11,16					

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 30 – Resistência à penetração do solo na umidade correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade (6 meses após o preparo)

Camada	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----MPa-----		
0-5	A 2,88 c	B 1,95 b	2,41 c
5-10	B 3,65 bc	A 3,91 a	3,78 b
10-15	B 4,19 ab	A 4,35 a	4,27 ab
15-20	A 4,53 a	B 4,10 a	4,31 a
Média	A 3,81	B 3,58	
CV	13,15%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Comportamento semelhante ao descrito anteriormente foi constatado também na RP do PMP aos 18 meses (Tabela 31), onde os grupos de manejo mostraram-se também semelhantes. Dentro dos 10-15 cm não ocorreram diferenças entre os manejos. Na média dos manejos a profundidade de 0-5 cm apresentou a menor RP e os 15-20 cm a maior. Também aqui se verifica uma correlação significativa com a densidade encontrada no perfil do solo (Tabela 16).

O aumento excessivo na RP do solo obriga o sistema radicular da plantas a realizar uma expansão lateral, diminuindo a sua densidade em profundidade (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Letey (1985) considera o valor de 2,0 MPa como impeditivo ao crescimento radicular. Mas muitos outros autores encontraram valores de RP limitante ao crescimento radicular, variando abaixo e acima desse valor (ROSOLEM et al., 1999; KLEIN & CAMARA, 2007).

Tabela 31 – Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) na unidade correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo)

Manejos	----- cm -----					Média
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20		
PD	B 3,70 a	B 3,69 a	B 3,68 ns	A 3,88 a	3,74 a	
PDE	B 2,94 b	A 3,64 ab	A 3,66	A 3,67 b	3,48 b	
PD+CS	B 3,64 a	B 3,65 ab	B 3,66	A 3,82 ab	3,70 a	
PDE+CS	B 2,88 b	A 3,58 ab	A 3,66	A 3,76 ab	3,47 b	
PDE+CI+CS	A 3,31 ab	A 3,55 b	A 3,60	A 3,50 c	3,49 b	
PDE+CI	C 3,13 b	B 3,58 ab	B 3,59	A 3,76 ab	3,52 b	
Média	C 3,27	B 3,62	B 3,64	A 3,73		
CV (%)	4,04					

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.9 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

No IHO, a RP aumentou conforme o aumento da densidade e aumento da umidade do solo e tanto aos 6 meses após o preparo (Figura 9) como aos 18 meses após o preparo (Figura 10) apresentaram-se como limite inferior em todas as densidades.

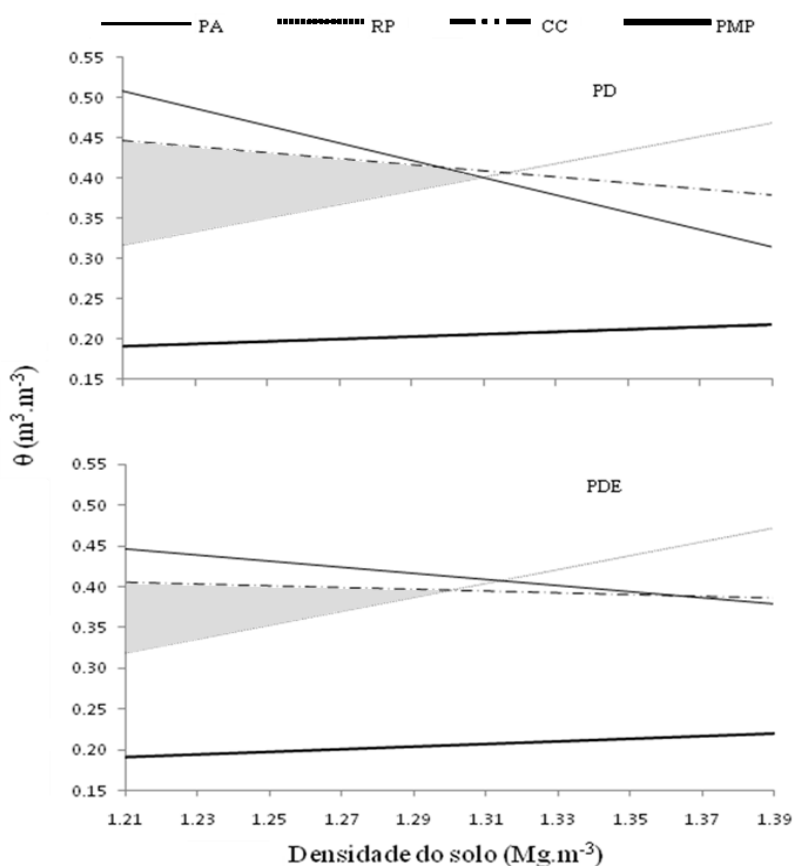


Figura 9 - Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), PA de 0,1 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa, em função do manejo (6 meses após o preparo). IHO = área hachurada.

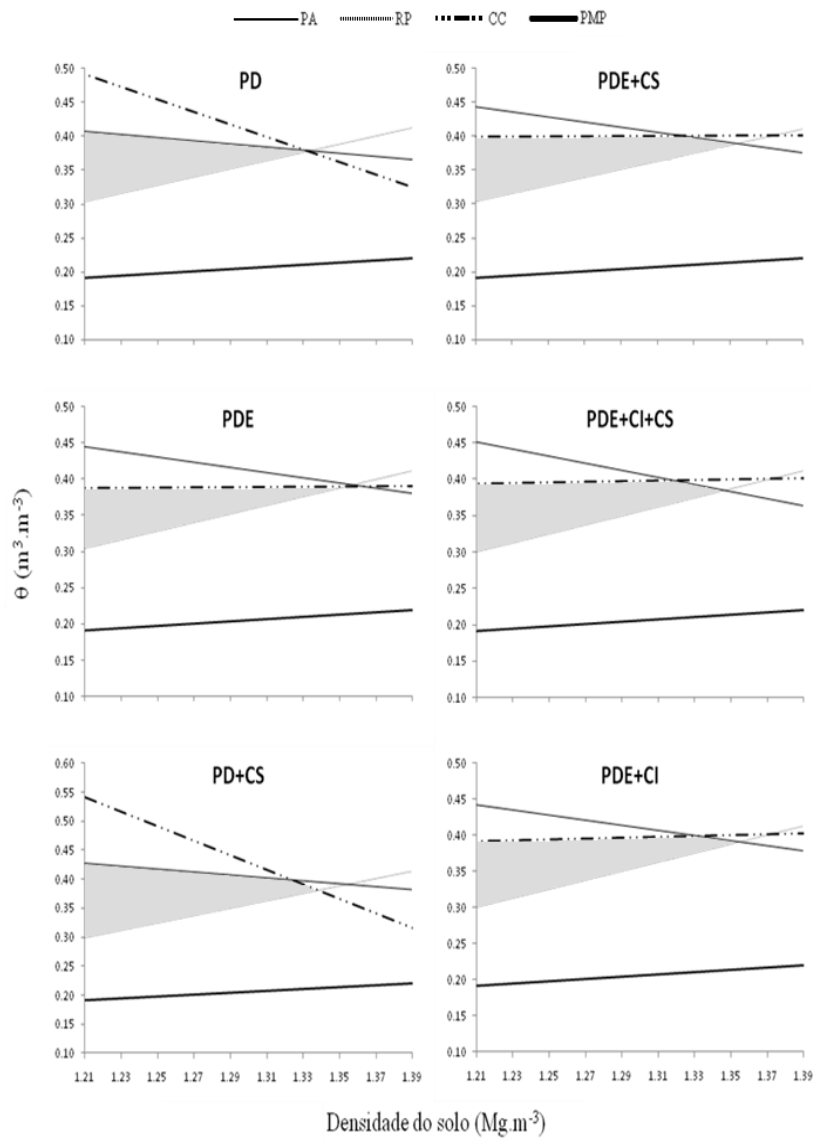


Figura 10 - Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), PA de 0,1 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa, em função do manejo (18 meses após o preparo). IHO = área hachurada.

Para o PD, o limite inferior do IHO com a RP de 2 MPa, o PMP não se apresentou como limitante em nenhuma das condições observadas, sendo esse afetado antes pela RP, o limite superior permaneceu na CC até a densidade de $1,29 \text{ g.cm}^{-3}$, passando então a PA ser limitante. A densidade crítica, isso é, onde o IHO é igual a zero, foi de $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$ (Tabela 32).

Tabela 32 – Densidade crítica do solo (Ds) e densidade relativa (DR) no IHO com a RP de 2 MPa, nos manejos de solo (6 meses após o preparos)

Manejo do solo	IHO = 0 (RP 2,0 MPa)	
	Ds (g.cm^{-3})	DR
PD	1,31	0,85
PDE	1,30	0,83

Onde: Ds – densidade crítica do solo e DR – densidade relativa crítica.

No PDE, também não ocorreram limitações com o PMP no limite inferior, pois a RP foi a limitante em todas as situações. O limite superior permaneceu na CC limitante até a densidade de $1,26 \text{ g.cm}^{-3}$, a partir dessa passou a ser a PA, apresentando uma densidade crítica de $1,33 \text{ g.cm}^{-3}$.

Lima et al. (2007) estudando um Argissolo Vermelho distrófico arênico concluíram que adotando-se uma RP de 1,5 MPa, valores de densidade inferiores a $1,37$ e superiores a $1,69 \text{ g.cm}^{-3}$ podem ser restritivos ao crescimento radicular. Quando considerada uma RP de 2 MPa, a densidade crítica na umidade de capacidade de campo foi de $1,76 \text{ g.cm}^{-3}$ e na umidade no ponto de murcha permanente foi de $1,44 \text{ g.cm}^{-3}$.

Aos 18 meses nos manejos PD e PD+CS, o limite inferior do IHO com a RP de 2 MPa, o PMP também não se apresentou como limitante em nenhuma das condições observadas, sendo esse afetado antes pela RP, o fato que chama atenção é de que ao contrário dos 6 meses quando o limite superior permaneceu na CC até a densidade de $1,29 \text{ g.cm}^{-3}$, não ocorreu aos 18 meses onde a PA foi sempre limitante indicando uma maior dificuldade enfrentada pelo sistema radicular das plantas. A densidade crítica, isso é, onde o IHO é igual a zero, foi de $1,33 \text{ g.cm}^{-3}$ para o PD e $1,34 \text{ g.cm}^{-3}$ para o PD+CS (Tabela 33).

Tabela 33 – Densidade crítica do solo (Ds) e densidade relativa (DR) no IHO com a RP de 2 MPa, nos manejos de solo (18 meses após o preparo)

Manejo do solo	IHO = 0 (RP 2,0 MPa)	
	Ds (g.cm^{-3})	DR
PD	1,33	0,86
PDE	1,36	0,87
PD+CS	1,34	0,87
PDE+CS	1,35	0,87
PDE+CI+CS	1,35	0,87
PDE+CI	1,36	0,87

Onde: Ds – densidade crítica do solo e DR – densidade relativa crítica.

Já nos manejos que passaram por mobilização aos 18 meses o comportamento foi semelhante ao observado aos 6 meses, também não ocorreram limitações com o PMP no limite inferior, pois a RP foi a limitante em todas as situações. Para o PDE, o limite superior permaneceu na CC limitante até a densidade de $1,36 \text{ g.cm}^{-3}$ que foi a densidade crítica não sendo afetada pela PA. Para os outros manejos mobilizados o limite superior permaneceu na CC limitante até a densidade de $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$ nos manejos PDE+CS e PDE+CI+CS e

de $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ no manejo PDE+CI a partir dessa passou a ser a PA, apresentando uma densidade crítica de $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$ nos manejos PDE+CS e PDE+CI+CS e de $1,36 \text{ g.cm}^{-3}$ no manejo PDE+CI.

As densidades relativas (DR) críticas para os manejos aos 6 meses e 18 meses após o preparo estão apresentadas nas tabelas 32 e 33. Verifica-se que ocorreu um aumento neste indicador de qualidade física do solo.

De acordo com Klein et al. (2009), solos com compactação têm sua geometria porosa afetada, o que aumenta a retenção de água sem que, no entanto, essa água esteja necessariamente disponível para as plantas.

4.2 Rendimento das culturas

4.2.1 Aveia, trigo e cevada

Na cultura da aveia não ocorreram diferenças no número final de plantas (STD) (Tabela 34). Isto evidencia que o preparo do solo com o equipamento de hastes e destorroador não comprometeu a implantação da cultura

Para as variáveis peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) expressos na Tabela 34 e rendimento de grãos (REND) (Tabela 35) ocorreram diferenças entre tratamentos.

Tabela 34 – Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da aveia (ano 2006)

Manejos	STD (plantas.m ⁻²)	PH (kg.hectolitro ⁻¹)	PMG (g)
PD	464,0 ns	40,31 b	32,78 b
PDE	466,2	42,66 ab	34,00 ab
PD+CS	495,6	41,49 ab	34,87 ab
PDE+CS	511,0	42,71 ab	34,74 ab
PDE+CI+CS	452,2	43,66 ab	35,21 a
PDE+CI	581,6	44,35 a	34,26 ab
Média	495,1	42,53	34,31
CV (%)	17,37	3,50	2,82

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

ns: Diferença não significativa.

No REND a maior média foi encontrada no tratamento PDE+CI+CS e a menor do tratamento PD. Este maior rendimento está associado ao maior PH e PMG apresentados por este manejo.

O número de panículas (PAN), número de espiguetas/panícula (ESP) e número de grãos/espiguetas (GEP) (Tabela 35) não apresentaram diferença entre os tratamentos.

Tabela 35 – Número de panículas (PAN), número de espiguetas/panícula (ESP), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da aveia (ano 2006)

Manejos	PAN (panículas.m ⁻²)	ESP	GEP	REND (kg.ha ⁻¹)
PD	394,85 ns	20,97 ns	1,83 ns	2853 b
PDE	369,85	23,67	2,00	3024 ab
PD+CS	426,47	21,00	2,07	3025 ab
PDE+CS	408,82	22,20	1,98	3219 a
PDE+CI+CS	376,47	23,42	1,94	3264 a
PDE+CI	449,26	23,87	1,88	2964 ab
Média	404,29	22,52	1,95	3058
CV (%)	16,00	9,46	9,46	4,77

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns: Diferença não significativa.

No trigo dentre todas as variáveis analisadas a única que apresentou diferença significativa foi o PH, sendo maior no manejo PDE (Tabela 36), que não diferiu dos manejos PDE+CS, PDE+CI+CS e PDE+CI, no entanto esta não refletiu na variável REND (Tabela 45), provavelmente em função de um déficit hídrico ocorrido no período de floração e enchimento de grãos da cultura (Figura 4).

Klein et al. (2008) acompanhando a cultura do trigo num ano com excesso hídrico concluiu que a cultura do trigo respondeu positivamente às alterações nas propriedades físicas do solo, provocadas pela escarificação e aplicação de calcário, produzindo, em média, 682 kg.ha⁻¹ a mais no PDE, comprovando o efeito positivo da escarificação do solo sobre o desenvolvimento e o rendimento da cultura do trigo.

Tabela 36 – Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura do trigo (ano 2006)

Manejos	STD (plantas.m ⁻²)	PH (kg.hectolitro ⁻¹)	PMG (g)
PD	732,3 ns	79,20 c	31,03 ns
PDE	750,7	81,09 a	32,23
PD+CS	889,7	79,51 bc	31,19
PDE+CS	724,3	80,47 ab	32,66
PDE+CI+CS	699,3	80,99 a	31,66
PDE+CI	697,1	80,81 a	31,56
Média	748,9	80,34	31,65
CV (%)	20,67	0,67	2,40

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

ns: Diferença não significativa.

Dos componentes de rendimento, o número de grãos por espiguetas, número de espiguetas por espiga e o peso hectolitro também foram significativamente maiores no PDE em relação ao PD.

Isto comprova que as alterações físicas respondem de forma diferencial nas culturas em momentos de excesso ou déficit hídrico.

Tabela 37 – Número de espigas (EEP), número de espiguetas/espiga (ESE), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura do trigo (ano 2006)

Manejos	EEP (espigas.m ⁻²)	ESP	GEP	REND (kg.ha ⁻¹)
PD	434,56 ns	14,65 ns	1,71 ns	2383 ns
PDE	433,82	13,90	1,86	2301
PD+CS	484,56	12,97	2,12	2343
PDE+CS	402,94	12,97	2,05	2481
PDE+CI+CS	338,97	13,97	1,85	2521
PDE+CI	463,13	13,72	1,98	2400
Média	426,33	13,70	1,93	2405
CV (%)	35,11	9,32	16,46	4,77

ns= Diferença não significativa.

Tabela 38 – Número final de plantas (STD), peso do hectolitro (PH) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da cevada (ano 2006)

Manejos	STD (plantas.m ⁻²)	PH (kg.hectolitro ⁻¹)	PMG (g)
PD	383,8 ns	57,40 ns	40,97 ns
PDE	372,1	60,29	37,70
PD+CS	402,9	59,87	38,71
PDE+CS	409,6	59,99	37,78
PDE+CI+CS	383,1	57,01	39,15
PDE+CI	369,8	59,46	37,07
Média	386,9	59,00	38,56
CV (%)	17,12	4,98	6,35

ns: Diferença não significativa.

Para a cultura da cevada não ocorreram diferenças em nenhuma das variáveis avaliadas (Tabelas 38 e 39), provavelmente em função dos mesmos motivos da cultura do trigo.

Tabela 39 – Número de espigas (EEP), número de espiguetas/espiga (ESE), número de grãos/espiguetas (GEP) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da cevada (ano 2006)

Manejos	EEP (espigas.m ⁻²)	ESP	GEP	REND (kg.ha ⁻¹)
PD	370,58 ns	27,20 ns	0,91 ns	2848 ns
PDE	350,00	27,15	0,91	2970
PD+CS	388,97	27,55	0,89	2786
PDE+CS	372,06	27,82	0,94	2711
PDE+CI+CS	358,82	26,70	0,93	2937
PDE+CI	345,59	26,77	0,91	2827
Média	364,34	27,37	0,91	2846
CV (%)	14,63	6,28	2,48	6,73

* Diferença não significativa.

4.2.2 Soja

O número final de plantas (STD), número de grãos/planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG) não apresentaram diferença significativa para os sistemas de manejo do solo (Tabela 40), indicando um desenvolvimento muito similar das plantas da soja em condições de solo distintas (densidade do solo, porosidade e RP). Todos os manejos apresentaram PMG superior ao encontrado na média para a cultivar, que é de 120 g (REUNIÃO..., 2006). Para o percentual de vagens com 1 grão (V1G), percentual de vagens com 2 grãos (V2G), percentual de vagens com 3 grãos (V3G) e rendimento de grãos (REND) expressos na Tabela 41 também não ocorreram diferenças significativas.

Tabela 40 – Número final de plantas (STD), número de grãos/planta (NGP) e peso de mil grãos (PMG) em função do manejo na cultura da soja (ano 2006/2007)

Manejos	STD (plantas.m ⁻²)	NGP	PMG (g)
PD	31,1 ns	77,00 ns	146,36 ns
PDE	29,4	82,85	144,30
PD+CS	30,5	92,70	148,58
PDE+CS	27,8	83,05	145,46
PDE+CI+CS	30,0	87,10	142,50
PDE+CI	27,2	79,60	145,64
Média	29,3	83,72	145,48
CV (%)	14,7	18,65	3,16

ns: Diferença não significativa.

Os dados encontrados neste trabalho para a cultura da soja são corroborados por Secco et al. (1996), que trabalhando com a cultura da soja, não observaram diferença no rendimento de grãos comparando vários sistemas de manejo de solo, entre eles o PD e a escarificação em plantio direto.

Tabela 41 – Percentual de vagens com 1 grão (V1G), percentual de vagens com 2 grãos (V2G), percentual de vagens com 3 grãos (V3G) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo na cultura da soja (ano 2006/2007)

Manejos	V1G (%)	V2G (%)	V3G (%)	REND (kg.ha ⁻¹)
PD	17,62 ns	69,57 ns	12,81 ns	2103,18 ns
PDE	18,80	68,57	13,52	2067,46
PD+CS	18,70	69,88	11,42	2318,61
PDE+CS	16,47	71,20	12,33	2287,52
PDE+CI+CS	14,81	73,25	11,94	2326,66
PDE+CI	17,62	68,57	13,81	2304,00
Média	17,34	70,02	12,64	2234,57
CV (%)	29,29	7,96	25,36	6,54

* Diferença não significativa.

Os rendimentos embora não tenham apresentado diferenças estatísticas entre os manejos na média estes foram 19,30 % inferiores a média atingida pela cultivar CD 212RR no ano agrícola de 2005/06 que foi de 2769 kg.ha⁻¹ (REUNIÃO..., 2006).

4.2.3 Girassol

Para a variável número de capítulos.m⁻² (Tabela 42) o maior número esteve no manejo PDE+CS e o menor no manejo PDE+CI. Quanto aos tipos de sulcadores não ocorreram diferença. No tratamento com retirada do sulcador (SSC) não ocorreram diferenças entre os manejos.

Tabela 42 – Número de capítulos.m⁻² em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008)

Tratamento	CSC	SSC	Médias
PD	A 4,44 ab	A 4,17 ns	4,31 ab
PDE	A 4,17 ab	A 4,03	4,10 ab
PD+CS	A 4,44 ab	B 4,03	4,24 ab
PDE+CS	A 5,28 a	B 4,31	4,79 a
PDE+CI+CS	A 4,17 ab	A 4,44	4,31 ab
PDE+CI	B 3,47 b	A 3,75	3,61 b
Média	A 4,33	A 4,12	
CV	27,48 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O diâmetro de capítulos (Tabela 43) foi maior no manejo PDE+CI, que não diferiu estatisticamente do PDE+CI+CS, PDE+CS, PD+CS e PDE. O menor rendimento foi no manejo PD. Novamente dentro do tratamento SSC não ocorreram diferenças entre os manejos. Dentre os tipos de sulcadores o maior diâmetro de capítulos foi com sulcador.

O manejo PD proporcionou rendimento de grãos de girassol (Tabela 44) significativamente inferior aos demais, que foram semelhantes entre si. Em ambos os sistemas de sulcamento não ocorreram diferenças entre os manejos. A presença do sulcador apresentou influência na produtividade da cultura do girassol, sendo que com excessão do manejo PDE em todos os outros o sistema com sulcador (CSC) propiciou maiores rendimentos que o sistema sem sulcador (SSC), tendo o sistema CSC obtido um maior rendimento de grãos com 2601 kg.ha⁻¹ contra 2312 kg.ha⁻¹ do SSC.

O ganho médio dos manejos com PDE em relação ao PD foi de 248 kg.ha⁻¹, o que equivale a um aumento de rendimento de 11,26%.

Tabela 43 – Diâmetro de capítulos (cm) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008)

Tratamento	CSC	SSC	Médias
PD	A 16,70 ab	B 15,15 ns	15,93 b
PDE	A 18,25 ab	A 18,03	18,14 a
PD+CS	A 17,59 ab	A 16,68	17,14 ab
PDE+CS	A 16,66 b	B 17,95	17,30 ab
PDE+CI+CS	A 18,97 a	B 17,52	18,25 a
PDE+CI	A 18,61 ab	A 18,63	18,62 a
Média	A 17,80	B 17,33	
CV	10,80 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Isso pode ser atribuído ao fato do mecanismo de sulcador do tipo CSC ter uma maior capacidade de penetração, podendo romper as camadas compactadas que são comumente encontradas em solos argilosos, minimizando os efeitos da densidade do solo e melhorando o leito de semeadura, favorecendo a cultura (MELLO & TAKAHASHI, 2000; SILVA et al., 2001). Estes dados confirmam que a presença de calcário e a mobilização do solo propiciam um melhor ambiente para o desenvolvimento do girassol tendo reflexo no rendimento de grãos.

Tabela 44 – Rendimento de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do girassol (ano 2007/2008)

Tratamento	CSC	SSC	Médias
PD	A 2298 ns	B 1876 ns	2078 b
PDE	A 2426	A 2560	2493 a
PD+CS	A 2806	B 2204	2505 a
PDE+CS	A 2714	B 2528	2621 a
PDE+CI+CS	A 2820	B 2482	2651 a
PDE+CI	A 2559	B 2223	2391 a
Média	A 2601	B 2312	
CV	14,26 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

4.2.4 Milho

Na cultura do milho (Tabela 45) 36 meses após a implantação dos tratamentos não se perceberam diferenças nas médias dos manejos. Entre os sistemas de sulcagem do solo também não ocorreram diferenças. Dentro do sistema CSC não ocorreu diferenças entre os manejos, mas no sistema SSC o maior rendimento foi no manejo PDE+CI+CS e o menor no manejo PD.

Tabela 45 – Rendimento de grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em função do manejo e tipo de sulcador na cultura do milho (ano 2008/2009)

Tratamento	CSC	SSC	Médias
PD	A 3932 ns	A 3011 b	3472 ns
PDE	A 3621	A 3961 ab	3791
PD+CS	A 4120	A 4100 ab	4150
PDE+CS	A 4139	A 4236 a	4188
PDE+CI+CS	A 4081	A 4265 a	4173
PDE+CI	A 3604	A 3268 ab	3436
Média	A 3930	A 3807	
CV	29,99 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Este fato pode ser atribuído à distribuição pluvial (Figura 4) ocorrida durante o ciclo da cultura, pois se observa que a partir do segundo mês do desenvolvimento vegetativo e durante todo o período reprodutivo o regime de chuvas encontrou-se abaixo do normal, sendo que, este elevado déficit hídrico coincidiu com o período da floração e

enchimento de grãos da cultura, condição em que o fator limitante foi a disponibilidade de água no solo.

Freitas (1994) destaca ainda que, por depender de vários fatores, principalmente a umidade do solo no período de crescimento das raízes, o efeito da compactação sobre a produção das culturas é difícil de ser quantificado.

O efeito da utilização do sulcador tipo facão guilhotina na semeadora não foi percebido nos manejos em que não ocorreu a operação de escarificação, ao passo que utilizando os discos a escarificação foi benéfica.

4.3 Relações de variáveis físicas e o rendimento de grãos das culturas

Comparando-se o somatório de rendimento das culturas com a densidade do solo verifica-se um maior rendimento no manejo PDE+CI+CS (Figura 11), sendo inferior nos manejos PD, PD+CS e PDE+CI, estes dados mostram uma relação direta de um maior rendimento com a menor densidade. Comportamento semelhante se observa também na densidade relativa do solo (Figura 12).

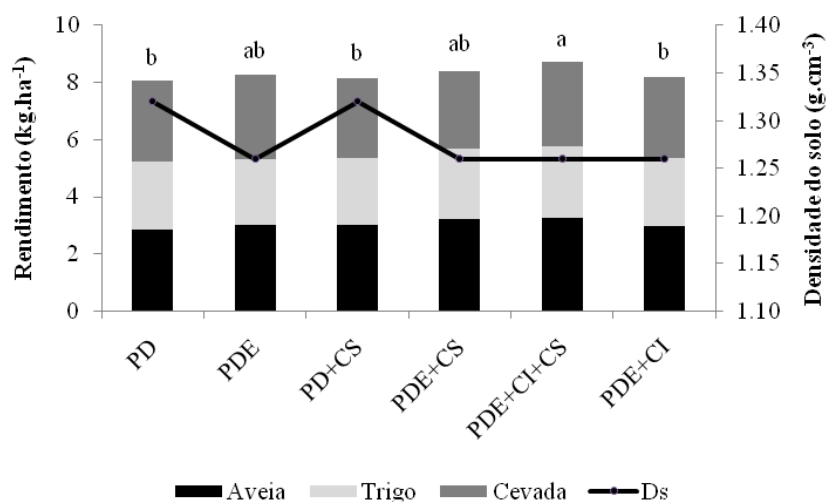


Figura 11: Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e densidade do solo em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Em relação a RP esta foi menor na CC e no PMP nos maiores rendimentos (Figura 14) e maior onde se teve os menores rendimentos.

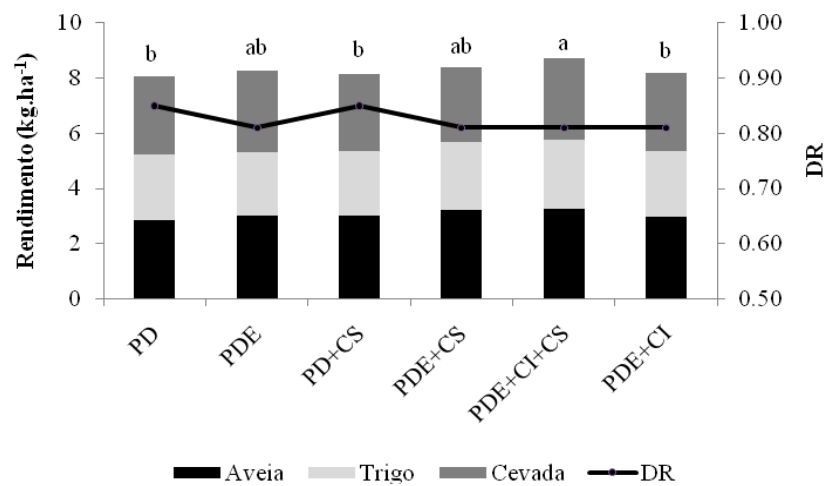


Figura 12: Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e densidade relativa do solo em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Em relação ao rendimento de grãos de girassol, o menor rendimento esteve relacionado com a maior densidade do solo (Figura 14) encontrada no manejo PD. Porém a calagem superficial no PD compensou este efeito.

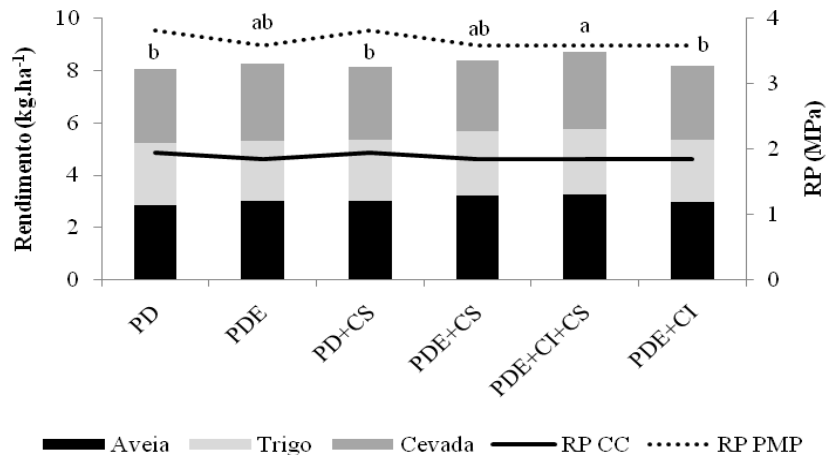


Figura 13: Relação entre rendimento somatório de grãos de aveia, trigo e cevada e RP na CC e PMP em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

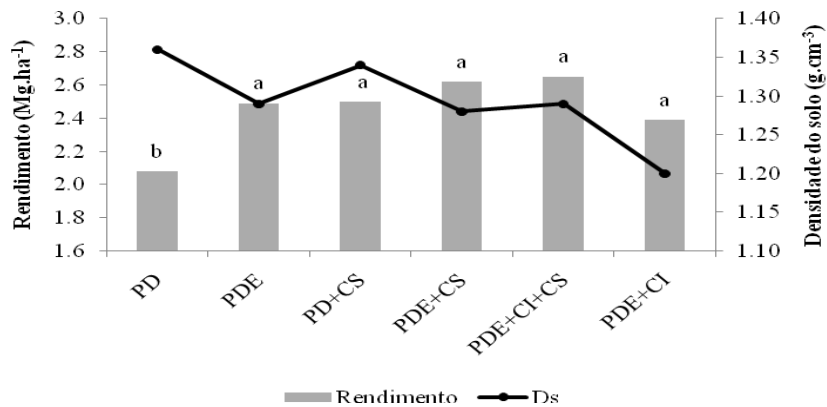


Figura 14: Relação entre rendimento de grãos de girassol e densidade do solo em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Na relação rendimento de grãos de girassol e densidade do solo o menor rendimento esteve relacionado com a maior densidade do solo (Figura 15) encontrada no manejo PD, no entanto ainda não sendo considerada restritiva, o mesmo encontrado para a DR. Para a variável RP na CC e no PMP os menores valores encontraram-se no manejo PDE+CI+CS, que também apresentou o maior rendimento não diferindo dos manejos PDE+CS, PDE+CI, PD+CS e PDE.

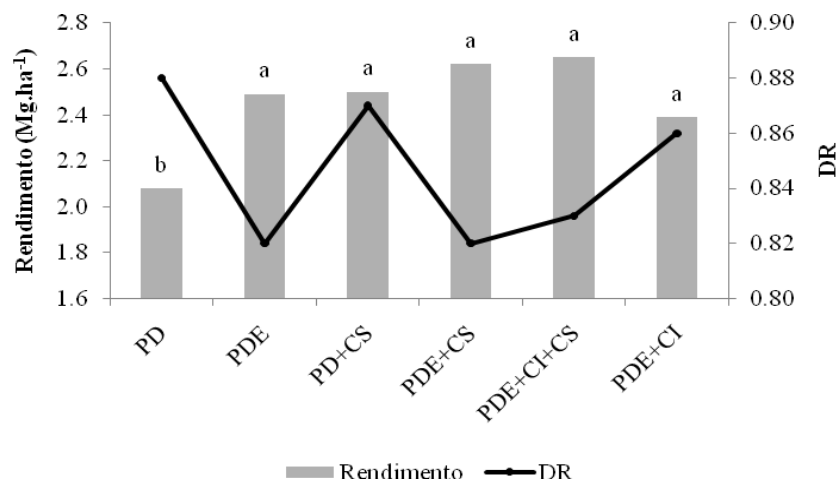


Figura 15: Relação entre rendimento de grãos de girassol e densidade relativa do solo em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

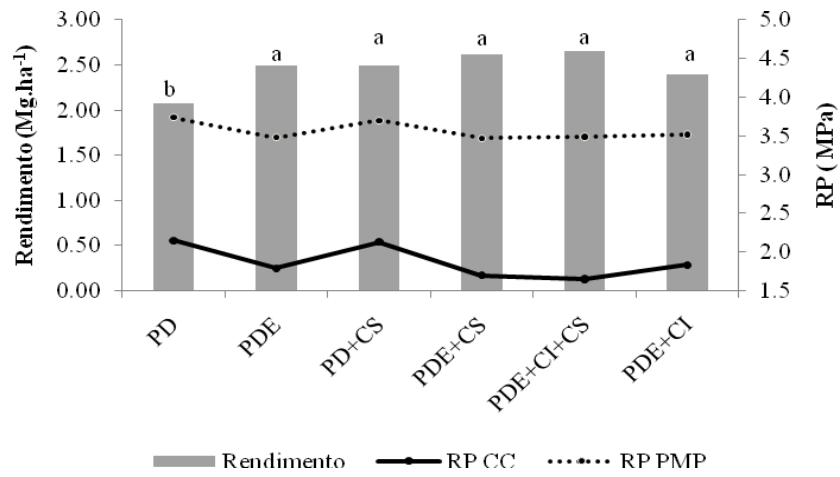


Figura 16: Relação entre rendimento de grãos de girassol e RP na CC e PMP em função de diferentes manejos. Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

4.4 Atributos químicos do solo

4.4.1 pH H₂O, Índice SMP e matéria orgânica do solo (MOS)

As variáveis pH em água, índice SMP e matéria orgânica do solo estão expressas no Apêndice 1. Em relação aos manejos na média das profundidades, se verificou um menor pH no manejo PD que não recebeu calcário e no PDE+CI que recebeu somente calcário incorporado. Os maiores pH em água foram nos manejos PD+CS, PDE+CS e PDE+CI+CS. O pH em água, como era de se esperar decresceu em profundidade. As maiores diferenças de pH em água apresentaram-se até os 5-10 cm de profundidade, sendo que depois ocorreu uma uniformização entre os tratamentos.

Este aspecto é ressaltado por Rossato et al. (2009), que realizaram um experimento com os cultivos de soja (2005/2006), milho (2006/2007), trigo (2007) e soja (2007/2008), em um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura franco arenosa, há quatro anos sob plantio direto, no município de Tupanciretã (RS), e avaliaram seis tratamentos, dentre os quais sem revolvimento com ou sem calcário, lavração com ou sem calcário, e escarificação com ou sem calcário, e encontraram resultados em que a partir de 5 cm de profundidade em ambos os manejos e na média dos manejos dentro das formas de aplicação de calcário ocorreu uma aproximação da variável pH em água.

Comparando o grupo de manejos que recebeu calcário em superfície com os que não receberam os valores do pH em H₂O, foram 14,81% superiores na camada de 0-5 cm, somente 4,11% na camada de 5-10 cm e desaparecendo nas outras camadas.

Para o índice SMP também ocorreu uma redução em relação ao aumento de profundidade e na média dos manejos sendo menor no PD. Em relação às camadas os maiores índices ocorreram nos manejos que receberam calcário na superfície e de uma forma mais pronunciada até os 5-10 cm, reduzindo esta variação nos 10-15 cm e praticamente desaparecendo nos 15-20 cm.

Novamente analisando o grupo de manejos que receberam calcário em superfície com os que não receberam, os valores do Índice SMP foram 11,55% superiores na camada de 0-5 cm, somente 1,40% na camada de 5-10 cm e desaparecendo nas outras camadas.

Para a MOS os teores foram semelhantes nos manejos de solo e decrescentes em profundidade como previsto. Percebe-se uma redução da MOS nos 5-10 cm dos manejos com mobilização do solo se comparados ao PD e PD+CS.

Nos manejos em que ocorre mobilização total ou parcial do solo, é comum a retirada total ou parcial da vegetação nativa para estabelecimento de atividades que deixam o solo exposto ao impacto direto das chuvas, trazendo como consequência o rompimento dos agregados (WOHLENBERG et al., 2004). Aliado a isso, o revolvimento da terra contribui para a redução do teor de matéria

orgânica, reconhecida como um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados (ROTH et al., 1991; GRIEVE et al., 2005).

Deve-se destacar que o fato descrito acima não ocorreu nos manejos que tiveram a operação de escarificação.

De acordo com Bronick & Lal (2005), a agregação resulta do rearranjo de partículas, floculação e cimentação mediado pelo C orgânico do solo, biota, ponte iônica, argila e carbonatos, sendo o C, ao mesmo tempo, agente de ligação e núcleo na formação dos agregados.

Este fato é corroborado por Oliveira et al. (2008), que avaliando características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra, concluíram que os horizontes superficiais demonstraram maior agregação e uma das razões para estes níveis de agregação podem estar relacionadas com os maiores teores de C orgânico encontrados nestes horizontes, uma vez que a matéria orgânica é agente primordial na formação e estabilização de agregados, e, na mata, o aporte constante de matéria orgânica concorre para a melhor agregação dos solos.

Um fato importante a ser destacado é que se verificou que as operações de manejo do solo não propiciaram redução da matéria orgânica do solo, somente proporcionando uma realocação em camadas mais profundas do solo, fato também observado por Klein et al. (2004).

4.4.2 Alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m)

Nos teores de alumínio trocável (Apêndice 2) os valores aumentam com o aumento da profundidade, considerando que os maiores valores na camada de 0-5 cm estão nos tratamentos que não receberam calcário em superfície 1,2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no PD e no PDE+CI e 0,6 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no PDE. Aos 5-10 cm ocorreu a presença de alumínio trocável em todos os manejos, ainda com a diferenciação comentada anteriormente. Nas demais camadas se verificaram uma uniformização para esta variável.

O efeito negativo da acidez e toxidez por Al na produção agrícola é menos acentuado em sistema PD, sendo que uma explicação pode ser a maior quantidade de ânions orgânicos complexantes, que diminuem as formas tóxicas do Al na solução do solo (SALET, 1998). A determinação do Al utilizada em laboratórios de análise de solo para fins de fertilidade indica o conteúdo do elemento no solo, mas não seleciona as formas tóxicas as plantas (CAMBRI, 2004).

Comparando o grupo de manejos que receberam calcário em superfície com os que não receberam, os valores do Al foram 94,00% inferiores na camada de 0-5 cm, 22,38% na camada de 5-10 cm e desaparecendo nas outras camadas.

A acidez potencial (H+Al) (Apêndice 2) foi de 13,7 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aos 0-5 cm e 19,4 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ aos 5-10 cm do PD, sendo crescente em profundidade. Na média das camadas a maior acidez potencial foi no manejo PD e as menores nos manejos PDE+CS e PDE+CI+CS. Para o H+Al o grupo de manejos que receberam calcário em superfície os valores foram 52,94% inferiores na camada de 0-5 cm, somente 8,08% na camada de 5-10 cm e desaparecendo nas outras camadas.

De acordo com Sousa et al. (1980), o principal efeito da acidez dos solos é a toxidez do Al, sendo a saturação por alumínio (m) o índice que melhor afere esse componente da acidez do solo.

A saturação por alumínio (Apêndice 2), diminuiu nos tratamentos com calcário em superfície nas camadas de 0-5 e 5-10 cm e sendo semelhante nas outras levando a crer que a colocação de calcário em profundidade propiciou uma correção localizada não expressa nas amostras de solos coletadas.

Aqui, novamente ocorreu situação semelhante ao Al, onde o grupo de manejos que receberam calcário em superfície com os que não receberam os valores do m foram 96% inferiores na camada de 0-5 cm, 22,34% na camada de 5-10 cm e desaparecendo as diferenças nas outras camadas. De acordo com a CQFSRS/SC (2004) os solos são classificados de acordo com a saturação de alumínio da seguintes forma: muito baixo menor de 1%, baixo de 1,1 a 10%, médio de 10,1 a 20% e alto superior a 20,1%. Seguindo está classificação a camada

de 0-5 cm tem os manejos PD+CS, PDE+CS, PDE+CI+CS estão classificados como muito baixo e os manejos PD e PDE+CI como médios. Na camada de 5-10 cm todos os tratamentos estão na faixa do alto; sendo que na camada de 15-20 ocorre uma uniformização de valores.

4.4.3 Fósforo e Potássio

Para o fósforo (P) (Apêndice 3) o comportamento foi de decréscimo nas médias em profundidade e também dentro dos manejos. O fósforo decresceu de 40 mg dm³ na camada de 0-5 cm para 4 mg dm³ na camada de 15-20 cm, sendo que a partir da camada de 10-15 cm praticamente não tem diferenças entre os manejos. Isto pode ser explicado pela afirmação de que o P é elemento pouco móvel, permanecendo no local onde foi depositado (FALLEIRO et al., 2003).

Outro motivo para menores valores de P disponível no solo em profundidade pode estar relacionado à ausência da adubação fosfatada em maiores profundidades (FARIA et al., 2010). De acordo com Addiscott & Thomas (2000), a ausência de revolvimento e a manutenção de resíduos culturais na superfície, contribuem para aumento dos teores desse nutriente no solo.

No potássio (K) (Apêndice 3) o comportamento foi semelhante ao do fósforo, reduzindo os teores de 376 mg dm^{-3} na camada de 0-5 cm para 86 mg dm^{-3} na camada de 15-20 cm. O maior teor de K foi encontrado nos 0-5 cm do PD. Estes resultados concordam daqueles encontrados por Mielniczuk (2005), os quais relatam diferenças no teor de potássio do solo, em decorrência dos sistemas de preparo adotados, sinalizando significativo aumento na semeadura direta quando comparada com sistemas com operações de aração e gradagem.

Convém ressaltar que a escarificação não foi capaz de melhorar a distribuição do P e do K em profundidade. Na camada de 0-5 cm os teores são considerados altos, na camada de 5-10 são médios e nas outras camadas baixos (CQFSRS/SC, 2004), onde o fato ocorre para todos os manejos.

4.4.4 Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)

Para cálcio e magnésio (Apêndice 4) o comportamento foi de valores decrescentes em profundidade. Os maiores valores de disponibilidade foram encontrados aos 0-5 cm para ambos os manejos e dentro dos manejos em que ocorreu a operação de colocação de calcário em superfície (PD+CS, PDE+CS e PDE+CS+CI). Nos 5-10

cm ocorreu uma aproximação entre os dados e nos 10-15 e 15-20 cm estas se tornaram semelhantes.

Comparando o grupo de manejos que receberam calcário em superfície com os que não receberam os valores de Ca e Mg foram 44,86% e 48,78% superiores na camada de 0-5 cm, uniformizando-se nas outras camadas.

4.4.5 Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (SB) e saturação por potássio (SK)

Em relação à CTC (Apêndice 5) está foi crescente em profundidade e dentro dos manejos as maiores foram no PD e PD+CS. De acordo com Carvalho et al. (2003), a análise envolvendo CTC e H + Al deve ser vista com reserva, pois é necessário lembrar que a CTC é, em última análise, o somatório de $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + H^+ + Al^{3+}$ e que solos com um mesmo valor de CTC apresentarão H + Al com valores distintos, dependendo do pH (ou da quantidade de bases presentes).

A saturação de bases (Apêndice 6) foi maior no grupo de manejos que recebeu calcário em superfície nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, sendo que nas profundidades de 10-15 cm e 15-20 cm os valores se aproximaram, sendo que, este comportamento também foi descrito por Rossato et al. (2009).

Na saturação por potássio (Apêndice 6) está foi semelhante na média dos manejos e dentro dos manejos semelhantes dentro das profundidades. Os teores foram decrescentes em profundidade.

4.4.6 Micronutrientes

Em relação aos micronutrientes (Apêndice 7) estes apresentaram teores considerados entre médio e alto. No enxofre todos os valores ficaram superiores a $5,1 \text{ mg dm}^3$ classificados como altos (CQFSRS/SC, 2004).

Para o boro (B) na camada de 0-5 cm com exceção do manejo PDE que o teor foi considerado médio ($0,3 \text{ mg dm}^3$), os restantes tiveram teores classificados como altos. Com o aumento da profundidade ocorreu uma diminuição nos teores de B, mas mantendo se como teores médios e altos (CQFSRS/SC, 2004).

De acordo com CQFSRS/SC (2004) no manganês (Mn) pode-se verificar no Apêndice 8 que em todos os manejos e profundidade os valores ficaram classificados como alto (superior a 5 mg dm^3). Este fato também ocorreu nos teores de zinco (Zn) e cobre (CU) que são demonstrados no Apêndice 8.

5 CONCLUSÕES

A hipótese inicialmente formulada foi comprovada de forma parcial, permitindo concluir que a conjugação (escarificação e injeção de calcário em profundidade) de operações é possível de ser realizada, sendo que uma escarificação em um Latossolo Vermelho distrófico húmico sob PD e melhora as condições físico-mecânicas do solo ao desenvolvimento das plantas com efeitos por até 18 meses.

Nas variáveis físicas a escarificação em plantio direto manteve uma redução na densidade do solo, com aumento de porosidade e diminuição da densidade relativa, também proporcionando uma redução no teor de água indisponível no solo às plantas os 18 meses.

A escarificação também proporciona redução da resistência mecânica do solo à penetração na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, embora nem todas as plantas tenham demonstrado essas diferenças.

A relação UG/LP reduziu de 1,03 para 0,90 propiciando uma menor perspectiva de compactação do solo em função da modificação da umidade ótima de compactação ficando abaixo do ponto ideal de umidade para a realização dos tratos culturais.

A melhoria nas condições químicas e físicas do solo nem sempre são refletidas em rendimento das culturas, sendo influenciadas pelas características climáticas vigentes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O equipamento avaliado apresentou eficácia em termos de descompactação e correção do solo na camada de 0-10 cm de profundidade, ou seja, verifica-se a necessidade de revisão na metodologia de utilização do equipamento, talvez com modificação do funcionamento do mesmo. A provável causa desta diferenciação de funcionamento deve-se ao fato de que o próprio modo de ação do escarificador provoca uma maior mobilização na camada até 10 cm e em maiores profundidades a distribuição de calcário é realizada de forma desuniforme, sendo mais concentrada onde ocorre o deslocamento da haste. Uma alternativa seria a utilização de uma chapa defletora logo abaixo da saída na base da haste, que proporcionaria uma maior área de contato do calcário-solo.

Outra alternativa seria utilizar maiores doses de calcário com PRNT diferenciado para propiciar que o efeito de correção perdurasse por mais tempo, conjugado com operações cruzadas (conforme o relevo permitir) com o implemento ocasionando uma maior uniformidade na distribuição do calcário.

Do ponto de vista químico, o pH em água, índice SMP aumentam nos manejos com aplicação de calcário nos diferentes tratamentos, diminuindo os teores de alumínio trocável, reduzindo a acidez potencial do solo e aumentando a saturação de bases, mas ficando estas alterações restritas a profundidade de 10 cm, sendo

considerada assim uma alternativa paliativa e não uma solução para o problema de acidificação em profundidade em solos sob plantio direto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T.M.; THOMAS, D. Tillage, mineralization and leaching: Phosphate. *Soil & Tillage Research*, v.53, p.255-273, 2000.

ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; FONTOURA, S.M.V; BAYER, C.; PASSOS, J.F.M. dos. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno alumínico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p. 963–975, 2006.

ALONÇO, A. dos S. *Influência da Incorporação de adubação e corretivos em profundidades na cultura do milho (Zea mays L.), sob déficit hídrico induzido em solo de Cerrado*. Santa Maria, UFSM, 1990. 115p. Tese de Mestrado.

ANDRADE, A.P.; MAFRA, A.L.; BALDO, G.R.; PICCOLLA, D.L.; BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.219-226, 2010.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, n.2, p.337-345, 2004.

ARRUDA, F. B.; ZULLO, J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.11, p.11-15, 1987.

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 29: p. 515-522, 2005.

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto na densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação de um nitossolo vermelho distroférico. *Energia na Agricultura*, v.18, n.2, p.22-33, 2003.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protein and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53:215-230, 2000.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDENER, W. R. *Física de suelos*. México: C.R.A.T. / A.I.D., 1973. 529p.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. *Soil physics*. 4^a Ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 498 p.

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

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, v.41, p.341-358, 1990.

BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; McKEENA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil water physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, 57, n.2, p. 437-447, 2005.

BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. *Plant roots*. 2nd ed. New York: M. Dekker, 1996. p.453-470.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, p.409-418, 1997.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A.P.; VÁZQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:103-110, 2007.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. *Ciência Rural*. v.30; p.91-95, 2000.

BERTOL, I.; ZOLDAN JUNIOR, W. A.; FABIAN, E.L; ZAVASCHI, E.; PEGORARO, R.; GONZÁLEZ, A. P. Efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de um Nitossolo Háplico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas. vol.32, n.2, p.747-757, 2008.

BERTOL, O. J.; AMADO, T. J. C.; SCHLOSSER, J. F.; REINERT D. J. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadura sob condições de preparo reduzido do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 21, p. 257-62, 1997.

BEUTLER, A. N. *Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agronômicas de soja e arroz de sequeiro*. Jaboticabal: UNESP, 2003. 126p. Tese Doutorado

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

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura de plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.24, n.1, p.142-149, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na

produtividade de arroz de sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.6, p.575-580, 2004.

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

BOHNEM, H.; MEURER, E. J.; BISSANI, C. Solos ácidos e solos afetados por sais. IN: MEURER, E. J. Ed. *Fundamentos de Química de Solo*. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285 p.

BOLLER, W. *Desenvolvimento de complementos para semeadoras em solo sob preparo reduzido*. Santa Maria, 1990. 146 p. Dissertação (Mestrado) – UFSM, 1990.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORREIA, G. F.; BORGES, E. V. S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em um latossolo Vermelho-escuro textura média. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, p.663-67, 1999.

BRADY, N. C.; WEIL, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. 14th Edition, Pearson Education, New Jersey, 2008. 965 p.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p. 605-614, 2006.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124:3-22, 2005.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, v. 33, p. 519-24, 1990.

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

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

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

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. *Bragantia*, Campinas, v.59, n.2, p.213-220, 2000.

CAMARA, R. K. *Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja*. Passo Fundo, 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - UPF, 2004.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CAMBRI, M.A. *Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto*. Piracicaba, 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

CARLESSO, R.; SANTOS, R. F. Crescimento de plantas de milho submetidas a déficit hídrico em solos de diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.27-33, 1999.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*. v. 70, p. 425 – 433, 1990.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.695-703, 2003.

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

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico sob dois sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. *Resumo expandido*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONCALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de um sistema de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p.137-147, 2006.

CEDDIA, M. B. *Efeitos do sistema de corte na produção de cana-de-açúcar e em propriedades físicas de solo de tabuleiros no Espírito Santo*. Seropédica, 1996. 74 p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ, 1996.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os

componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.317-326, 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. *Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 10.ed. Porto Alegre, SBRS/Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WOBETO, C. Sistemas de manejo do solo e propriedades físicas de um Latossolo Bruno: Efeitos de 20 anos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBRS, 2002. CD-ROM.

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, p.703-709, 1999.

De ROO, H. C. Subsoiling, plowing, and deep placement of lime or fertilizer in one operation. In.: *Agronomy Journal*. Madison 48: 476-7, 1956.

DECAGON DEVICES. *Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter*. USA, Decagon devices, 2000. 70 p.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Requisitos para a implantação e manutenção do sistema plantio direto. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. *Plantio direto no Brasil*. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p.19-27.

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. *Plant and Soil*, The Netherlands, v.98, n.3, p.303-312, 1987.

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

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C. E. G. R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2000. v.1 p.55-94.

DOSS, B. D. et al. Depth of lime incorporation for correction of subsoil acidity. In.: *Agronomy Journal*. Madison, v. 71, n.v. 4, p. 541-4, 1979.

DOSS, B. D.; LUND, L. F. Subsoil pH effects on growth and yield of cotton. In.: *Agronomy Journal*. Madison, v. 67, n.v. 2, p. 193-6, 1975.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P.R.S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. de F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 32, n. 3, jun. 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000300010&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832008000300010.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: 1997 212 p.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; OLIVEIRA, L. C. Increase of grain and green matter of corn by liming. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p. 275-280, 1998.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; KLEIN, V.A.; CERINI, J.B.; MACHADO, M.E. Toxidez de manganês em soja. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, RS. *Revista Plantio Direto*, v.15, p.28-37, 2006.

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.

FANCELLI, A. L.; FAVARIN, J. L. Desempenho da cultura do milho em plantio direto e convencional. In: FANCELLI, A.L. (Coord.) *Plantio direto no Estado de São Paulo*. Piracicaba : FEALQ/ESALQ, 1989. p.174-175.

FARIA, A.F.G de; SANTOS, A.A. dos; SANTOS, T.M. dos; BATISTELLA FILHO, F. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em topossequência na bacia do rio Araguaia, estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.517-524, 2010.

FEBRAPDP. *Evolução da área de plantio direto no Brasil e no Mundo*. 2009 <http://www.febrapdp.org.br/?i1=34eAcoBnLhRWY05WYsBXYIJXYa12&i2=4b8QYIJXYfde&i3=e46ARQBSZkBSYIJXwec&i4=d4127e&i5=34eAcoBnLhRWY05WYsBXYIJXYa12&m=1> acesso em 2 ago. 2010.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J. de; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, p. 161-70, 2001.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação permanente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p.637-645, 2007.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L.de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.8, p.947-53, 2003.

FREITAS, P. L., de Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J.N. Ed. *Experiências de Plantio Direto no Cerrado*. Goiânia: APDC, 1994. p. 199-213. 261p.

GEDIGA, K. Influence of subsoil compaction on the uptake of ^{45}Ca from the soil profile and on maize yield. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.19, n.2, p.351-355, 1991.

GRIEVE, I.C.; DAVIDSON, D.A.; BRUNEAU, P.M.C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. *Geoderma*, 125:39-48, 2005.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Advances in Soil Sciences*, New York, v. 6, p.65-100, 1987.

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

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

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

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 11-18, 2001.

INOUE, T. T.; ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; ESTEVES, N.; MIGNOSO, V.; LEITE, J. C. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférico após 13 anos de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 14. Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

JOHNSON, D. R. et al. Effect of Injections of Propane into Soil on Crop Growth. In.: *Agronomy Journal*. Madison, v. 61, n.v. 3, p. 371-4, 1969.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 33, n. 4, ago. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000400009&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832009000400009.

KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKÄNEN, J. IVERSEN, B. V.; DOUGLAS, J.T.; PAZ, A. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Science Society of American Journal*, 64:1749-1758, 2000.

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia: relação solo-planta*. São Paulo: Ceres, 1979, 262 p.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 5, p. 26–32, 2006.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Piracicaba, 1998. 150 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), USP-ESALQ, 1998.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 25, p. 395-8, 1995.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, vol.1, n.1, p.221-227, 2007.

KLEIN, V. A.; DALLMEYER, A. U.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; BOLLER, W.; FIOREZE, I.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; FÁVERO, F. Adaptação de um equipamento para incorporação de calcário em solos sob plantio direto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*. v.6, n.2. p.95-103, 2007

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, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; MASSING, J. P.; CAMARA, R. K.; BIASUZ Jr., I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, Santa Maria, 2004. *Resumos expandidos*. Santa Maria: UFSM, 2004. CDROM.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, v.38, n.2. p. 365-371, 2008.

KLEIN, V.A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, v. 39, n.9, p. 2475-2481, 2009.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. *Ciência Rural*. v.30; p.959-964, 2000.

KLEIN, V.A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, Santa Maria, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782010005000110&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 22 ago. 2010. Epub 30-Jul-2010. doi: 10.1590/S0103-84782010005000110.

LAL, R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. *Soil Management Support Service*, USDA, U.S. Agency for International Development. Ohio, Ohio State University, 1994. 78p. (Technical Monograph n° 21)

LAMPURLANÉS, J.; ANGÁS, P.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research*, 69, p. 27-40, 2001.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Advances in Soil Science*, v. 1, p. 277 – 294, 1985.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. 1ª Ed. Piracicaba : Edusp, 2005. 335p.

LIMA, C.G. da R.; CARVALHO, M. de P.; MELLO, L.M.M. de; LIMA, R.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de

forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, dez. 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000600002&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832007000600002.

LIMA, C.L.R. de; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ciência Rural*, v.37, n.4, p.1166-1169, 2007.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C. de; SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, L.F.C. de. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de Minas Gerais. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 33, n. 5, out. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000500002&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832009000500002.

LOYOLA, J.M.T.; PREVEDELLO, C.L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 783-787, 2003.

MACHADO, A.L.T.; REIS, A.V.; MORAES, M.L.B. de; ALONÇO, A. dos S. *Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais*. Pelotas: Editora da UFPel, 2ed., 2005. 299p.

MACHADO, A.L.T.; REIS, A.V. dos; MORAES, M.L.B. de; ALONÇO, A. dos S. *Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais*. Pelotas, Edição dos Autores, 2002. 221 p.

MACHADO, J.A.; PAULA SOUZA, D.M.de; BRUM, A.C.R. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 5, p. 187-189, 1981.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.1, p.163-170, 2006.

MARCOLIN, C.D. *Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto*. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo-RS, p.187, 2009. (Tese de Doutorado).

MARKING, S. The Paraplow: A performance profile. In.: *Soybean Digest*. 1986, p. 8-10.

MASLE, J.; FARQUHAR, G.D. Effects of soil strength on the relation of water-use-efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. *Plant Physiology*, v.86, p.32-38, 1988.

MASLE, J.; PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.14, p.643-656, 1987.

MATERECHERA, S. A.; ALSTON, A. M.; KIRBY, J. M.; DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 144, p. 297-303, 1992.

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, p.553-561, 2003.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C. M. Avaliação de mecanismos rompedores e rodas compactadoras de semadoras-adubadoras para cultura do milho (*Zea mays* L.) em semeadura direta In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29,

Fortaleza, 2000. *Resumos Expandidos*. Fortaleza: CONBEA, 2000. CD-ROM.

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

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Potafós, 2005. p. 165-176.

MIRANDA, L. N. de; MIRANDA, J. C. C. de; REIN, T. A.; GOMES, A. C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, p.563-572, 2005.

MOREIRA, J. A. A., SILVA, C. J. C. G. Características de retenção de água de um solo podzólico vermelho amarelo de Goiana, Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 22, n. 4, p. 411-8, 1987.

NHANTUMBO, A. B. J. C; CAMBULE, A. H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil & Tillage Research*, 87, p. 231-239, 2006.

NOGUEIRA, J. B. *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*. São Carlos: USP, EESC, 1998. 248 p.

OJENIYI, S.O.; DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostructure produced by tillage. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, v. 22, p. 339-343, 1979.

OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C.; FRANCHINI, J. C.; TORRES, E. Manejo do solo. In: LEITE, R. M. V. B. C; BRIGHENTI, A. M.;

CASTRO, C. *Girassol no Brasil*. Ed. Embrapa Soja, Londrina, 2005. 641p.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; CANTARUTTI, R. B. & BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema Plantio Direto. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V. & COSTA, L. M. Eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.393-486.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURTI, N.; RESCK, D.V.S. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após 20 anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:335-344, 2004.

OLIVEIRA, J. O. A. P.; VIDIGAL FILHO, P. S.; TORMENA, C. A.; PEQUENO, M. G.; SCAPIM, C. A.; MUNIZ, A. S.; SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.443-450, 2001.

OLIVEIRA, J.T. de; MOREAU, A.M.S. dos; PAIVA A. de Q.; MENEZES; A.A; COSTA, O.V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2821-2829, 2008.

ORELLANA, J. A; PILATTI, M. GRENON, D. A. Soil quality: an approach to physical state assessment. *Journal Sust. Agriculture*. v. 9, p. 91-107, 1997.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. *Las maquinas agricolas y su aplicación*. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1980. 490p.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 29, p. 717-728, 1991.

PETTER, R.L. 1990. *Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo*. Santa Maria. 144 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria.

PIERCE, F. J., FORTIN, M. C., STATON, M. J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 30, p. 149 - 165, 1992.

PLASTER, E. J. *Soil Science & Management*. 4th Edition, Delmar Learning, New York, 2003. 384 p.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.675-684, 1998.

PREVEDELLO, C.L. *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba: Salesward-discovery, 1996. 446 p.

RAIJ, B. van; FURLANI, P. R.; QUAGGIO, J. A.; PETTINELLI JR., A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 101-108, 1998.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA, M. V. P. Avaliação de um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo a penetração In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, Foz do Iguaçu, 2001. *Resumo expandido*. Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001. CD-ROM.

REICHARDT, K. *Água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, v.online, p.1-13, 2008.

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. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M., orgs. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, SBCS, 2007. v.5. p.49-134.

REYNOLDS, W.D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, p. 131-146, 2002.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL (34:2006: Pelotas). *Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2006/2007*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 237 p. (versão online)

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. *Ciência Rural*, v.30, n.4, p.263-268, 2000.

RICHARDS, J. E.; MISENER, G. C.; MILBURN, P.; McMILLIAN, L. P. Incorporation of limestone into naturally compacted subsoil during deep-ripping. *Soil & Tillage Research*. 36, 21-32, 1995.

ROSOLEM, C. A. *Relações solo-planta na cultura do milho*. Jaboticabal: Funep, 1995. 53 p.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.821-828, 1999.

ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSE, H. F.; MORAES, M. H. de. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, p.491-497, 1994.

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

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

RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, v. 22, p.305-18, 1974.

SALET, R. L. *Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 110p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia).

SALET, R.L. *Toxidez de alumínio no sistema plantio direto*. Porto Alegre, 1998. Tese (Doutorado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SAS INSTITUTE. *Statistical analysis systems user's guide*: version 6.12. USA, Cary, 1996.

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 32, n. 4, ago. 2008. Disponível

em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000400001&lng=pt&nrm=iso>. acesso em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-06832008000400001.

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

SCHULTE-KARRING, H. *Die meliorative boden bewirtschaftung*. R. Warlich Arweiler. 1973.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.797-804, 2004.

SECCO, D.; DA ROSS, C. O.; FIORIN, J. E.; PAUTZ, C. V.; PASA, L. Efeito de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1, Lages, 1996. *Resumo Expandido*. Lages: SBCS, p. 127-8. 1996.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V. R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 1, fev. 2009 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000100010&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 22 ago. 2010. doi: 10.1590/S0103-84782009000100010.

SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n. 1, p. 1 – 10, 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of American Journal*, v.58, p.1775-81, 1994.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. *Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo*. Jaboticabal: Funep, 2002. p. 1-18.

SILVA, A.P & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:884-888, 1997.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; RODRIGUES, L.N.; AZEVEDO, J.A. Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 4, p. 363-370, 2004.

SILVA, G.J.; MAIA, J.C. de S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p. 31 – 40, 2006.

SILVA, M. A. S da; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v. 35, n.3, p. 544-552, 2005.

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

SILVA, R. H. da; ROSOLEM, C. A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, p. 1269-75. 2001.

SILVA, V. R. da. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação*. Santa Maria, 2003. 171 p. Tese (Doutorado) – UFSM, 2003.

SILVA, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.1-8, 2002.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Science Society of America Journal*, v. 154, p. 269-80. 1992.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; LOBATO, E.; KLIEMANN, H.J. Avaliação de métodos para determinar as necessidades de calcário em solos de Cerrados de Goiás e do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.4, n.2, p.144-148, 1980.

STRECK, E. V. et al. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2 Ed., Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.19, p.111-119, 1991.

TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. IN: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; CAMARGO, F. A. O. Editores. *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre: Genesis, 2004. 328 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHEN, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros minerais*. Departamento de solos – Faculdade de Agronomia. UFRGS. Porto Alegre. 1995. 174 p.

TESKE, R.; ALMEIDA, J.A.; ALBERTON, A.; ERHART, J.; CORREIA, T. Caulinita, Argilominerais 2:1 e Interestratificados

Caulinita-Esmectita em Solos Derivados de Basalto do Extremo Sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. XXXI, Gramado, 2007. *Resumos.....* Gramado: SBCS; UFRGS, 2007. CD-ROM.

TORMENA, C.A. *Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciado por preparo pré-implantação, calagem e tráfego*. 1991. 155f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná.

TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.3, p.286-292, 1999a.

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

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.52, n.3, p.223-232, 1999b.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.2, p.305-314, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. *Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja*. Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)

VAN LIER, Q. de, LIBARDI, P. L. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, n. 2, p.535-542, 1997.

VASCONCELOS, R.F.B. de; CANTALICE, J.R.B.; SILVA, A.J.N da; OLIVEIRA, V.S de; SILVA, Y.J.A.B. da. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p. 639-648, 2010.

VIEIRA, M. L. *Mecanização Agrícola*. Apostila da Disciplina de Mecanização Agrícola do Curso de Agronomia da Universidade do Oeste de Santa Catarina. São José do Cedro, 2008. 116 p.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.6, p. 1271-1280, 2007.

VIEIRA, M. L. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo-RS, p.115, 2006. (Dissertação de Mestrado).

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Transaction of the ASAE*. St. Joseph, v. 4, p. 242-6, 1961.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo francoarenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.891-900, 2004.

WOLF, B.; SNYDER, G. *Sustainable soils: the place of organic matter in sustaining soils and their productivity*. New York: Food Product Press, 2003. 352 p.

ZOLDAN JUNIOR, W. A. *Rugosidade superficial do solo ocasionada por uma operação de escarificação aplicada após cinco anos e meio de uso de sistemas de manejo do solo, e suas relações com a erosividade da chuva e erosão hídrica em um Nitossolo Háptico*. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2006. 100p. (Dissertação de Mestrado).

APÊNDICE 1

APÊNDICE 1 - Dados de pH em água do solo, Índice SMP e teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	pH em água				
PD	4,8	4,6	4,5	4,4	4,6
PDE	5,0	4,8	4,7	4,5	4,8
PD+CS	5,8	4,9	4,6	4,4	4,9
PDE+CS	5,5	4,8	4,6	4,5	4,9
PDE+CI+CS	5,7	4,9	4,6	4,5	4,9
PDE+CI	4,7	4,6	4,5	4,5	4,6
Média	5,3	4,8	4,6	4,5	
	Índice SMP				
PD	5,0	4,7	4,6	4,5	4,7
PDE	5,3	5,1	4,9	4,6	5,0
PD+CS	6,0	4,8	4,5	4,7	5,0
PDE+CS	5,7	5,1	4,9	4,7	5,1
PDE+CI+CS	5,7	5,0	4,7	4,6	5,0
PDE+CI	5,1	4,9	4,8	4,7	4,9
Média	5,5	4,9	4,7	4,6	
	MOS				
	----- % -----				
PD	3,8	2,6	2,3	2,1	2,7
PDE	3,4	2,6	2,4	2,1	2,6
PD+CS	3,8	2,7	2,1	2,0	2,7
PDE+CS	3,6	2,5	2,5	2,1	2,7
PDE+CI+CS	3,3	2,4	2,7	2,1	2,6
PDE+CI	3,6	2,6	2,6	2,2	2,8
Média	3,6	2,6	2,4	2,1	

APÊNDICE 2

APÊNDICE 2 - Teores de alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m) em função do manejo e camadas (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	Al				
	----- cmol _c dm ³ -----				
PD	1,2	2,5	2,1	3,9	2,4
PDE	0,6	1,5	2,3	3,0	1,9
PD+CS	0,0	1,2	3,0	3,4	1,9
PDE+CS	0,1	1,8	2,2	3,2	1,8
PDE+CI+CS	0,1	1,9	3,1	3,5	2,2
PDE+CI	1,2	2,3	2,5	3,3	2,3
Média	0,5	1,9	2,5	3,4	
	H+Al				
	----- cmol _c dm ³ -----				
PD	13,7	19,4	21,8	24,4	19,8
PDE	9,7	12,3	15,4	21,8	16,8
PD+CS	4,4	17,3	24,4	19,4	16,4
PDE+CS	6,2	12,3	15,4	19,4	13,3
PDE+CI+CS	6,2	13,7	19,4	21,8	15,3
PDE+CI	12,3	15,4	17,3	20,5	16,4
Média	8,8	15,1	19,0	21,2	
	m				
	----- % -----				
PD	20	40	51	63	44
PDE	10	25	38	58	33
PD+CS	0	22	48	60	33
PDE+CS	1	29	38	56	31
PDE+CI+CS	1	29	47	58	34
PDE+CI	20	38	44	59	40
Média	9	31	44	59	

APÊNDICE 3

APÊNDICE 3 - Teores de fósforo (P) e potássio (K) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
P					
----- mg dm ³ -----					
PD	42	26	9	4	20
PDE	37	15	9	4	16
PD+CS	42	22	7	4	19
PDE+CS	49	20	7	4	20
PDE+CI+CS	36	18	9	4	17
PDE+CI	33	18	9	4	16
Média	40	20	8	4	
K					
----- mg dm ³ -----					
PD	425	231	157	104	229
PDE	394	182	104	80	190
PD+CS	373	190	92	76	183
PDE+CS	377	174	113	76	185
PDE+CI+CS	369	145	125	104	186
PDE+CI	316	194	117	76	176
Média	376	186	118	86	

APÊNDICE 4

APÊNDICE 4 - Teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em função do manejo e camadas (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	Ca				
	----- cmol _c dm ³ -----				
PD	2,3	2,1	1,8	1,2	1,9
PDE	2,9	2,6	2,3	1,2	2,3
PD+CS	5,6	2,5	1,8	1,3	2,8
PDE+CS	4,2	2,3	2,0	1,3	2,5
PDE+CI+CS	4,5	2,5	1,9	1,3	2,6
PDE+CI	2,7	2,1	1,8	1,2	2,0
Média	3,7	2,4	1,9	1,3	
	Mg				
	----- cmol _c dm ³ -----				
PD	1,4	1,1	1,0	0,8	1,1
PDE	1,6	1,5	1,3	0,8	1,3
PD+CS	3,4	1,2	1,2	0,9	1,7
PDE+CS	2,5	1,8	1,4	1,0	1,7
PDE+CI+CS	2,7	1,7	1,3	0,9	1,7
PDE+CI	1,4	1,2	1,1	0,9	1,2
Média	2,2	1,4	1,2	0,9	

APÊNDICE 5

APÊNDICE 5 - Capacidade de troca de cátions (CTC) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
CTC					
----- cmol _c dm ³ -----					
PD	18,6	23,1	25,0	26,7	23,4
PDE	15,3	16,8	19,2	24,0	18,8
PD+CS	14,3	21,5	27,7	21,7	21,3
PDE+CS	13,8	16,8	19,1	21,9	17,9
PDE+CI+CS	14,2	18,4	22,9	24,2	19,9
PDE+CI	17,2	19,2	20,5	21,7	19,7
Média	15,6	19,3	22,4	23,4	

APÊNDICE 6

APÊNDICE 6 - Saturação por bases (V) e saturação por potássio (SK) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	V				
	----- % -----				
PD	26	16	13	08	16
PDE	36	27	20	09	23
PD+CS	69	20	12	11	28
PDE+CS	55	27	19	11	28
PDE+CI+CS	57	25	15	10	27
PDE+CI	29	20	16	11	19
Média	45	23	16	10	
	SK				
	----- % -----				
PD	5,8	2,6	1,6	1,0	2,8
PDE	6,6	2,8	1,4	0,9	2,9
PD+CS	6,7	2,3	0,8	0,9	2,7
PDE+CS	7,0	2,7	1,5	0,9	3,0
PDE+CI+CS	6,6	2,0	1,4	1,1	2,8
PDE+CI	4,7	2,6	1,5	0,9	2,4
Média	6,2	2,5	1,4	1,0	

APÊNDICE 7

APÊNDICE 7 - Teor de enxofre (S) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	S (mg dm ³)				
PD	18	18	18	22	19
PDE	15	15	20	20	18
PD+CS	20	15	20	20	19
PDE+CS	18	18	20	24	20
PDE+CI+CS	18	20	22	26	22
PDE+CI	20	18	20	24	21
Média	18	17	20	23	

APÊNDICE 8

APÊNDICE 8 - Teores de boro (B), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) em função do manejo e profundidade (18 meses após o preparo, sendo a amostra formada por 5 sub-amostras)

Manejos	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	Média
	----- cm -----				
	B (mg dm ³)				
PD	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5
PDE	0,5	0,7	0,7	0,5	0,9
PD+CS	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
PDE+CS	0,7	0,9	0,5	0,3	0,6
PDE+CI+CS	0,5	0,5	0,3	0,3	0,4
PDE+CI	0,5	0,3	0,5	0,3	0,4
Média	0,5	0,5	0,4	0,3	
	Mn (mg dm ³)				
PD	10	07	06	28	13
PDE	25	22	20	19	22
PD+CS	06	09	09	10	09
PDE+CS	15	19	20	22	19
PDE+CI+CS	06	07	08	08	07
PDE+CI	34	25	25	25	27
Média	16	15	15	19	
	Zn (mg dm ³)				
PD	0,6	1,7	0,6	0,6	0,9
PDE	1,5	1,5	1,0	0,6	1,2
PD+CS	1,6	1,0	0,8	0,7	1,0
PDE+CS	0,6	1,6	0,9	0,7	0,9
PDE+CI+CS	1,5	0,9	0,7	0,8	1,0
PDE+CI	1,5	0,9	0,7	0,6	0,9
Média	1,2	1,3	0,8	0,7	
	Cu (mg dm ³)				
PD	2,3	1,6	2,0	2,4	2,1
PDE	1,7	1,6	2,0	2,2	1,9
PD+CS	1,9	2,0	2,6	2,6	2,3
PDE+CS	2,2	1,5	1,9	2,1	1,9
PDE+CI+CS	1,6	2,2	2,2	2,3	2,1
PDE+CI	1,7	2,0	2,1	2,3	2,0
Média	1,9	1,8	2,1	2,3	