

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**USO DE PLANTAS DE COBERTURA NA RECUPERAÇÃO DE SOLO
COMPACTADO**

JULIANO CARLOS CALONEGO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP
Junho – 2007

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**USO DE PLANTAS DE COBERTURA NA RECUPERAÇÃO DE SOLO
COMPACTADO**

JULIANO CARLOS CALONEGO

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura)

**BOTUCATU-SP
Junho – 2007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Calonego, Juliano Carlos, 1977-
C165u Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado / Juliano Carlos Calonego. - Botucatu : [s.n.], 2007.
 xiii, 125 f. : il.color gráfs, tabs.

 Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007
 Orientador: Ciro Antonio Rosolem
 Inclui bibliografia

 1. Soja. 2. Rotação de cultivos. 3. Solos - Estrutura. 4. Plantio direto. 5. Solos - Compactação. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

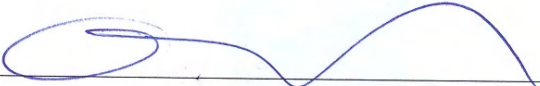
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “USO DE PLANTAS DE COBERTURA NA RECUPERAÇÃO DE SOLO
COMPACTADO”


ALUNO: JULIANO CARLOS CALONEGO

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM

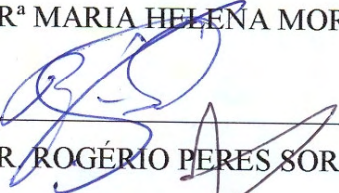
Aprovada pela Comissão Examinadora:



PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



PROF.ª DR.ª MARIA HELENA MORAES



PROF. DR. ROGÉRIO PERES SORATTO



PROF. DR. ÁLVARO PIRES DA SILVA



DR.ª SÔNIA CARMELA FALCCI DECHEN

Data de realização: 15 de junho de 2007

DEDICO

Aos meus pais, que foram e sempre serão os meus melhores professores e exemplos de conduta. A eles dedico todo o meu esforço como tentativa de retribuir em forma de orgulho todo o sacrifício de uma vida.

OFEREÇO

À minha esposa, Renata, companheira para a vida toda. Obrigado por estar sempre ao meu lado, me apoiando e me incentivando em todos os momentos. Obrigado pela paciência, amor, companheirismo e amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Quem confio todos os meus passos.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu/SP pelas condições oferecidas e pela possibilidade de realização deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Prof. Ciro pela orientação na realização desse trabalho e pelo tratamento sempre respeitoso e amigável.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Produção Vegetal e em especial aos funcionários de campo que sofreram junto comigo nas amostragens de solo deste experimento.

À professora Maria Helena Moraes pela ajuda e orientação nos procedimentos de análise física do solo.

Ao professor Álvaro Pires da Silva pela orientação na montagem dos equipamentos para extração de água no solo, e pelas dicas para determinação do IHO.

Ao técnico do laboratório de relação solo-planta, Dorival, pela amizade e pelos ensinamentos nos procedimentos de análise química deste trabalho.

Aos amigos José Salvador e Rodrigo Garcia.

Aos estagiários Rodrigo e Thomás.

Aos colegas de curso pelo companheirismo no decorrer destes anos.

Ao meu irmão e amigo Luciano.

À minha família pelo apoio e incentivo, e em especial aos meus sogros Gilberto e Yara, por direta ou indiretamente me incentivarem nos estudos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE APÊNDICES.....	XIII
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	4
3 INTRODUÇÃO	7
4 REVISÃO DE LITERATURA	10
4.1 Características de solos compactados	10
4.2 Crescimento das raízes em solo compactado	12
4.3 Manejo da compactação do solo em SSD	14
4.4 Intervalo hídrico ótimo – IHO.....	18
5 MATERIAL E MÉTODOS	20
5.1 Localização e características climáticas da área experimental	20
5.2 Características do solo e histórico da área experimental	22
5.3 Tratamentos e delineamento experimental	25
5.4 Cultivo de triticale e de girassol no primeiro ano do experimento (2003/2004).....	26
5.5 Manejo do solo com escarificador	27
5.6 Cultivo das espécies de cobertura no primeiro ano do experimento (2003/2004)	28
5.7 Cultivo da soja no primeiro ano do experimento (2003/2004)	29
5.8 Cultivo do triticale e do girassol no segundo ano do experimento (2004/2005)	30
5.9 Cultivo das espécies de cobertura no segundo ano do experimento (2004/2005)	31
5.10 Cultivo da soja no segundo ano do experimento (2004/2005)	32
5.11 Cultivo das espécies vegetais no terceiro ano do experimento 2005/2006).....	33
5.12 Coleta, preparo e análise das amostras de raízes	35
5.13 Coleta e preparo das amostras não deformadas	36
5.13.1 Determinação da curva característica da água no solo, densidade e porosidade do solo	37
5.13.2 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)	39
5.14 Coleta, preparo e análise das amostras de solo quanto ao teor de matéria orgânica (MO).....	42
5.15 Coleta, preparo e análise das amostras de agregados do solo	42

	Páginas
5.16 Produtividade da soja	44
5.17 Estudo estatístico	44
6 RESULTADOS	46
6.1 Raízes	46
6.1.1 Raízes das plantas de cobertura	46
6.1.2 Raízes da soja	50
6.2 Teor de matéria orgânica	54
6.3 Estabilidade de agregados	58
6.4 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total	64
6.5 Curva de retenção de água no solo e Índice “S”	72
6.6 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	82
6.7 Produtividade da soja.	105
7 CONCLUSÕES	109
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Quantidade de chuva e temperatura média mensal referente aos anos agrícolas 2003/2004 (A), 2004/2005 (B) e 2005/2006 (C), da Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.....	21
2	Curvas características da água no solo e índices <i>S</i> (Dexter, 2004), referentes à amostragem realizada para caracterização da área, nas profundidades de 0 a 5 cm; 7,5 a 12,5 cm; 15 a 20 cm; 27,5 a 32,5 cm e 47,5 a 52,5 cm.....	24
3	Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), nas profundidades de 7,5-12,5 cm (A) e 27,5-32,5 cm (B).....	24
4	Efeito da escarificação mecânica na resistência mecânica à penetração no perfil do solo.....	28
5	Densidade do comprimento radicular e massa das raízes das plantas de cobertura, referente à amostragem realizada no primeiro ano (A e B, respectivamente), no segundo ano (C e D, respectivamente) e no terceiro ano do experimento (E e F, respectivamente). NS e DMS = não significativo e diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente.....	49
6	Densidade do comprimento radicular da soja na linha e entre-linha de semeadura, referente à amostragem realizada no primeiro ano (A e B, respectivamente), no segundo (C e D, respectivamente) e no terceiro ano do experimento (E e F, respectivamente).....	53
7	Teor de matéria orgânica do solo, referente às amostras coletadas em cada tratamento, antes do cultivo da soja no primeiro (A) e no terceiro ano (B) do experimento.....	58
8	Teor de agregados maiores que 2 mm, nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, no primeiro (A) e no terceiro ano (B) de aplicação dos tratamentos.....	63
9	Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004), nos diferentes tratamentos envolvendo rotação de culturas e escarificação, nas profundidades de 0 a 5 cm (A); 7,5 a 12,5 cm (B); 15 a 20 cm (C); 27,5 a 32,5 cm (D) e 47,5 a 52,5 cm (E).....	78

Figura		Página
10	Curvas características da água no solo, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo rotação de culturas e escarificação, nas profundidades de nas profundidades de 0 a 5 cm (A); 7,5 a 12,5 cm (B); 15 a 20 cm (C); 27,5 a 32,5 cm (D) e 47,5 a 52,5 cm (E).....	79
11	Valores de <i>S</i> para as amostras coletadas após o manejo das plantas de cobertura no primeiro ano do experimento (2003/2004), nas profundidades de 0-5 cm (A), 7,5 a 12,5 cm (B), 15-20 cm (C), 27,5-32,5 cm (D), 47,5-52,5 cm (E). Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalária (7); triticales+escarificação (8).....	80
12	Valores de <i>S</i> para as amostras coletadas após o manejo das plantas de cobertura no terceiro ano do experimento (2005/2006), nas profundidades de 0-5 cm (A), 7,5 a 12,5 cm (B), 15-20 cm (C), 27,5-32,5 cm (D), 47,5-52,5 cm (E). Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalária (7); triticales+escarificação (8).....	81
13	Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 7,5 a 12,5 cm, no primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticales+milheto; (F) triticales+sorgo; (G) triticales+crotalária; (H) triticales+escarificação.....	99
14	Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 27,5 a 32,5 cm, no primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticales+milheto; (F) triticales+sorgo; (G) triticales+crotalária; (H) triticales+escarificação.....	100
15	Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 7,5 a 12,5 cm, no terceiro ano do experimento A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticales+milheto; (F) triticales+sorgo; (G) triticales+crotalária; (H) triticales+escarificação.....	101

Figura		Página
16	<p>Varição do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 27,5 a 12,5 cm, no terceiro ano do experimento A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticales+milheto; (F) triticales+sorgo; (G) triticales+crotalária; (H) triticales+escarificação.....</p>	102
17	<p>Densidade do solo crítica nas camadas de 0 a 20 cm (A) e 20 a 40 cm (B), no primeiro e no terceiro ano com repetição dos tratamentos. Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalaria (7) e triticales+escarificação (8).....</p>	103
18	<p>Porcentagem de amostras apresentando valores de densidade do solo (Ds) inferior à densidade do solo crítica (Dsc), no primeiro e no terceiro ano do experimento, nas camadas de 0 a 20 cm (A) e 20 a 40 cm (B) de profundidade. Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalaria (7) e triticales+escarificação (8).....</p>	104
19	<p>Produtividade de soja nas safras 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006.....</p>	108

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Propriedades químicas, físicas, granulométricas e dos agregados do solo da área experimental (Abril/2003).....	23
2	Valores da umidade gravimétrica do solo em amostras coletadas simultaneamente ao teste de RP, realizado após a escarificação do solo.....	28
3	Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou triticales, no primeiro ano do experimento (2003/2004).....	29
4	Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou ao triticales, no segundo ano do experimento (2004/2005).....	31
5	Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou ao triticales, no terceiro ano do experimento (2005/2006).....	33
6	Manejo de fungicidas e inseticidas na soja (safra 2005-2006).....	34
7	Resultados da análise do teor de matéria orgânica, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).....	57
8	Resultados da análise do teor de matéria orgânica, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).....	57
9	Resultados da análise de estabilidade de agregados, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).....	61
10	Resultados da análise de estabilidade de agregados, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).....	62
11	Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).....	68
12	Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).....	70
13	Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = g cm^{-3}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $RP = a \theta_v^b D_s^c$	90

Tabela	Página	
14	Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = g cm^{-3}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: RP = $a \theta_v^b D_s^c$	91
15	Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = g cm^{-3}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: RP = $a \theta_v^b D_s^c$	92
16	Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = g cm^{-3}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: RP = $a \theta_v^b D_s^c$	93
17	Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) em função da densidade ($D_s = g cm^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = MPa$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$	94
18	Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) em função da densidade ($D_s = g cm^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = MPa$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$	95
19	Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) em função da densidade ($D_s = g cm^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = MPa$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$	96
20	Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) em função da densidade ($D_s = g cm^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = MPa$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$	97

Tabela	Página
21	Estatística descritiva para os dados de densidade do solo referentes às amostras coletadas no primeiro (2003/2004) e no terceiro (2005/2006) ano de avaliação do experimento, nos oito tratamentos, no centro das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm.....
22	Produtividade da soja cultivada nos anos agrícolas de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006

98

107

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice		Página
1	Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo, referente às amostras coletadas no primeiro ano do experimento.....	122
2	Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo, referente às amostras coletadas no terceiro ano do experimento.....	123
3	Produtividade da soja cultivada no ano agrícola de 2006/2007.....	124
4	Produtividade de soja na safra 2006/2007.....	124
5	Fertilidade do solo no perfil do solo, avaliada antes da semeadura da soja no terceiro ano de condução do experimento. Valores de pH (A), H+Al (B), Mg trocável (C), Ca trocável (D) e K trocável (E). DMS (diferença mínima significativa); NS (não significativo) a 5 % de probabilidade pelo teste t.....	125

1 RESUMO

Objetivou-se com este trabalho avaliar as alterações na estrutura do solo e nas qualidades físicas e físico-hídricas com a utilização de espécies de cobertura com sistema radicular agressivo e volumoso, em esquemas de rotação de culturas em sistema semeadura direta, com o intuito de avaliar a possibilidade desse manejo ser indicado para substituir operações onerosas como a utilização de escarificadores mecânicos. As rotações de culturas utilizadas e repetidas por três anos consecutivos, em sistema semeadura direta, envolveram o cultivo de triticale e girassol no outono-inverno, associados com o cultivo de milho, sorgo forrageiro e crotalária júncea, como plantas de cobertura, antecedendo a soja. Além disso, comparou-se o efeito dessas seqüências de culturas com o tratamento envolvendo a escarificação mecânica do solo. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado (Botucatu-SP), nos anos agrícolas de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. Foram consideradas parcelas aquelas cultivadas com triticale e girassol, e subparcelas as cultivadas com milho, sorgo e crotalária júncea, e também as manejadas com escarificador. A escarificação do solo foi realizada apenas em uma ocasião, ou seja, logo após a colheita das culturas de inverno do primeiro ano (Setembro de 2003), mantendo a área escarificada sempre em pousio entre os cultivos de inverno e verão. Foram coletadas amostras de raízes, tanto das espécies de cobertura como da soja, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. As raízes das plantas de cobertura foram amostradas antes da dessecação

química. Já as raízes de soja foram amostradas na linha e na entrelinha de semeadura, quando a cultura apresentava-se no estágio R₂ de desenvolvimento. Para determinar a densidade do solo, a macro e a microporosidade, a porosidade total e a curva característica da água do solo, foram coletadas amostras indeformadas de solo, por meio de anéis volumétricos nas camadas de 0-5, 7,5-12,5, 15-20, 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram retiradas amostras nas profundidades de 7,5-12,5 e de 27,5-32,5 cm. As amostragens foram feitas antes de iniciar o experimento (em abril de 2003) para caracterização da área, e após o manejo das espécies de cobertura no primeiro e no terceiro ano do experimento (antes da semeadura da soja) em trincheiras abertas em cada parcela. Nas trincheiras abertas para coleta dos anéis volumétricos, também retiraram-se amostras deformadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm para determinar o teor de matéria orgânica (MO) do solo. Nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm coletaram-se torrões de solo para avaliação da estabilidade de agregados. A produtividade da soja foi determinada nos anos agrícolas de 2003-2004; 2004-2005; 2005-2006. O milho e o sorgo em sucessão ao triticale apresentaram a maior produção de raízes no primeiro e no terceiro ano de avaliação do experimento, principalmente nos primeiros 10 cm de profundidade. No segundo ano, o milho cultivado em sucessão ao triticale se destacou com maior exploração do sistema radicular em profundidade. Em geral, a escarificação do solo promoveu o menor crescimento das raízes de soja, já que os resultados foram iguais ou inferiores aos obtidos com o cultivo de plantas de cobertura. Observaram-se acréscimos entre 1,65 e 2,45 g dm⁻³ de MO com o tratamento envolvendo crotalária em relação aos demais, na camada de 0 a 5 cm de profundidade, já no primeiro ano de cultivo das plantas de cobertura. O menor aporte de material vegetal, tanto da parte aérea das plantas como radicular, fez com que o manejo envolvendo escarificação mecânica proporcionasse, na camada superficial, os menores incrementos no teor de MO. No primeiro ano de avaliação do experimento observou-se que o triticale, como safra de outono-inverno, aumentou a estabilidade dos agregados. Já escarificação do solo, com ausência do cultivo de plantas de cobertura, proporcionou menor teor de agregados maiores que 2 mm e menor diâmetro médio ponderado (DMP), porém, não havendo diferenças significativas em relação ao cultivo de crotalária e de sorgo. De maneira geral, o cultivo de espécies com sistema radicular fasciculado promoveu maior estabilização dos agregados do solo. O volume de macroporos de 0,13 m³ m⁻³, na camada de 7,5 a 12,5 cm,

proporcionado pela escarificação do solo, superou o limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ estabelecido como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento das plantas. Após três anos do início do experimento e da realização da escarificação do solo, pode-se afirmar que, na camada de 0 a 5 cm, os tratamentos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura proporcionaram curvas de retenção de água com característica de solo mais bem estruturado, pois obtiveram-se os maiores valores de S com os tratamentos envolvendo o cultivo de primavera. Após três anos do início do experimento, observou-se, na camada de 0 a 20 cm, que o IHO aumentou em todos os tratamentos testados. No entanto, a θ_{RP} continuou a ser o limite inferior do IHO. Nessa camada, os tratamentos envolvendo manejo mecânico da compactação foram os que promoveram as maiores amplitudes de IHO, mesmo após três anos da escarificação, principalmente nas áreas cultivadas com triticales no outono-inverno. Os tratamentos proporcionaram diferenças significativas quanto à produtividade de grãos de soja apenas no segundo ano do experimento, havendo maiores produtividades com o cultivo de triticales no outono-inverno e de crotalária na primavera. A escarificação mecânica promove melhores condições físicas e físico-hídricas, como redução da resistência à penetração e aumento da porosidade de aeração de forma imediata, porém a utilização de plantas de cobertura proporciona resultados semelhantes já no terceiro ano.

THE USE OF SOIL COVER CROPS TO RECOVER COMPACTED SOIL. Botucatu, 2007, 125 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Juliano Carlos Calonego

Adviser: Ciro Antonio Rosolem

2 SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the alterations in soil structure and physical and physical-hydraulic properties with the use of different cover crop species with aggressive root system, in crop rotation under no-tillage, to evaluate the possibility of this management as an alternative to mechanical operations with chiseling, that are very expensive. The crop rotations used and replicated for three consecutive years, under no-tillage, had triticale (*X Triticosecale* Wittmack) and sunflower (*Helianthus annuus*) as Autumn-Winter crops. Pearl millet (*Pennisetum glaucum*), forage sorghum (*Sorghum bicolor*) and sunn hemp (*Crotalaria juncea*) were used in Spring, before the soybean. These management systems were compared with the mechanical chiseling. The research was carried out during three cropping seasons (2003/2004, 2004/2005 and 2005/2006), in Botucatu, State of São Paulo, Brazil. The experiment was a complete randomized block with subdivided plots and four replications. The plots consisted of triticale and sunflower crops. The subplots consisted of pearl millet, forage sorghum and sunn hemp, besides of the mechanical chiseling management. The chiseling was carried out only, after the harvest of the Autumn-Winter crops in the first year (September of 2003), keeping the chiseling area without crops between the Autumn-Winter crops and the Summer crops. Cover crop roots and soybean roots were sampled in depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm. The cover crop roots were sampled before chemical desiccation. The soybean roots were sampled in the rows and in the spacing row of the tillage, in R2 stage of development. Soil bulk density, macro and micro

porosity, total porosity and the curve of soil water retention were determined using undisturbed samples collected at depths of 0-5, 7.5-12.5, 15-20, 27.5-32.5 and 47.5-52.5 cm. The least limit water range (LLWR) was calculated for the depths of 7,5-12,5 and 27,5-32,5 cm. Undisturbed samples were collected before starting the experiment (April of 2003) and after the cover crops desiccation, in the first and third year of the experiment, in trenches opened in each subplot. In these trenches, disturbed samples were collected in depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm, for organic matter analysis. The samples for aggregate stability analysis were collected in depths of 0-5 and 5-10 cm. Soybean grain yields were determined in 2003/2004, 2004/2005 and 2005/2006 harvests. The pearl millet and the forage sorghum, when used after the triticale, were the cover crops with more root production in the first and the third year of the experiment, mainly in the first 10 cm depth. In the second year, the pearl millet roots had greater occupation in the depths, when used after the triticale. The chiseling of soil promoted lesser soybean growth, therefore the results were the same or low with the cover crops. There were additions of organic matter between 1.65 and 2.45 g dm⁻³ in the soil cultivated with the sunn hemp, in relation to the others Spring managements, at the depth of 0-5 cm, already in first year of the experiment. The treatment with mechanical chiseling provided the less concentration of soil organic matter in the 0-5 cm layer, because of the less biomass of shoot and roots added to the soil. In the first year of the experiment, the triticale provided greater values of aggregate stability. The chiseling promoted lower percentage of aggregates with diameter superior to 2 mm and lower values of MWD. There were not significant differences with sunn hemp and forage sorghum tillage in the aggregate stability. In general, there was effect of crops with fasciculate roots in the aggregate stability. The macroporosity of 0.13 m³ m⁻³, at the depth of 7.5-12.5 cm, provided by the soil chiseling, improved to the limit of 0.10 m³ m⁻³, established as critical limit for air-filled porosity, because of the great development of the crops. In the third year of the experiment, the treatments with cover crops provided to soil curves of water retention with characteristics of a soil with better structure, at the depth of 0-5 cm. This was checked by the largest values of *S* in the treatments with cover crops in Spring tillage. After three years replicating the treatments, the results indicated that the LLWR increased in all managements in the layer of 0-20 cm, but the θ_{RP} was the lower limit of soil moisture. At the depth of 0-20 cm, the LLWR values were higher with the mechanical management, even after three years of the chiseling, mainly with

growing of triticale in Autumn-Winter. The treatments provided significant differences in the soybean yield only in the second year of the experiment, with highest soybean grain yields when triticale was used in Autumn-Winter and the sunn hemp in the Spring management. The mechanical chiseling provided better physical and physical-hydrical quality in the first moment, but with the cover crop treatments the results are alike in the third year.

Keywords: soybean, cover crop, no tillage, chiseling, least limit water range

3 INTRODUÇÃO

À medida que os ecossistemas naturais vão sendo substituídos por atividades agrícolas totalmente voltadas à produção comercial, as propriedades físicas do solo sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004), pois algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações na estrutura do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Por isso, tem aumentado o interesse em avaliar a qualidade física do solo, por ser considerado um componente fundamental na manutenção e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados utilizando-se diferentes propriedades físicas, como resistência à penetração das raízes, densidade do solo, estrutura, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, infiltração de água e desenvolvimento do sistema radicular. As modificações nestas propriedades, ocasionadas pelo manejo inadequado, resultam em decréscimo de produção e aumento da suscetibilidade do solo a erosão.

A qualidade física e estrutural do solo torna-se ainda mais importante para a cultura da soja, cuja demanda em N pela planta é quase que totalmente atendida pelo N₂ atmosférico, fixado simbioticamente por bactérias do grupo rizóbio, que necessitam de um ambiente com boa aeração, sem restrições à difusão do oxigênio, para que ocorra a formação de nódulos viáveis.

No intuito de atenuar os efeitos nocivos da compactação, o método mais difundido e utilizado é o mecânico (subsoladores e escarificadores), que rompem a camada compactada por meio da movimentação de hastes no solo. No entanto, este método apresenta elevado gasto de energia e tempo de execução, onerando os custos de produção das culturas. Além disso, a interferência mecânica das hastes do implemento altera a arquitetura dos poros, interrompendo a continuidade dos macroporos, que são os caminhos naturais para o crescimento das raízes em profundidade, para a difusão do O₂ no solo e trocas gasosas, além de facilitar a infiltração de água e reduzir o escoamento superficial, que é a causa maior de perdas de terra e de água.

Uma alternativa ao método mecânico seria a rotação de culturas com espécies de plantas que tenham sistema radicular profundo e vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência mecânica à penetração. Assim, os benefícios promovidos pelas raízes na estruturação do solo, e os canais resultantes de seu crescimento ("bioporos") podem promover melhores condições para o desenvolvimento das raízes da cultura sucessora, viabilizando o acesso à água e aos nutrientes contidos em camadas mais profundas, e com isso evitar possíveis perdas na produção, principalmente se ocorrerem períodos prolongados de déficit hídrico.

No Brasil, devido às condições favoráveis de temperatura e umidade, é possível, em grande parte do seu território, manter o solo cultivado praticamente o ano todo. Assim, a substituição de áreas mantidas anteriormente em pousio por sistemas de manejo com utilização mais intensa do solo, principalmente com a introdução de espécies com alta taxa fotossintética, e ausência de mobilização do solo, pode promover incrementos no teor de matéria orgânica, que irá agir na formação e estabilização dos agregados do solo e no aumento da macroporosidade.

Nesse contexto, a proposta do presente trabalho foi verificar o efeito do cultivo de diferentes sucessões de culturas na qualidade estrutural do solo, analisando possíveis modificações físicas e físico-hídricas, além do crescimento radicular das plantas e a produtividade da soja ao longo de três anos. Para verificar o efeito das plantas de cobertura na estruturação do solo, escolheu-se uma área para a realização do experimento com solo de textura muito argilosa, cultivada em sistema semeadura direta (SSD) por sete anos, e que apresentava camada adensada em subsuperfície. Os resultados obtidos com o cultivo de

plantas de cobertura foram sempre comparados com tratamentos envolvendo a escarificação mecânica.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Características de solos compactados

De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento ótimo das plantas (ANDREOLA et al., 2000). Nessas condições, o volume de solo explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004).

O surgimento de camadas compactadas em áreas agrícolas torna-se comum, seja pelas pressões externas exercidas sobre o solo, como tráfego de máquinas ou animais (LIMA et al., 2004), ou mesmo por um processo natural de acomodação das partículas constituintes do solo (CAMARGO & ALLEONI, 1997), fazendo com que ocorra uma reorganização dessas partículas, que passam a ocupar menor volume (DIAS JÚNIOR, 2000). Em áreas preparadas mecanicamente a compactação em subsuperfície pode ocorrer em virtude da pressão exercida pelos equipamentos de preparo do solo (grades e arados), no ponto de apoio das ferramentas no limite inferior da profundidade de trabalho (CENTURION & DEMATTÊ, 1985; PEDROTTI et al., 2001).

À medida que aumenta a compactação do solo ocorre a redução da porosidade total e o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração das raízes

(BORGES et al., 1999; MORAES et al., 1995), causando impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular e restringindo o movimento da água e do ar ao longo do perfil (RICHART et al., 2005). Segundo Marschner (1995), em solo compactado o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e em solo úmido, ocasiona falta de oxigênio para a respiração das raízes.

A redução da porosidade, e em especial da macroporosidade, dificulta a infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e as perdas de água e de terra, levando ao empobrecimento da fertilidade da camada arável. Assim, o crescimento superficial das raízes em solo compactado, ou seja, confinada nos primeiros centímetros do perfil, dificulta o abastecimento hídrico e nutricional das plantas (MORAES et al., 1995; STEINHARDT, 1983), ocasionando perda de produtividade (ALVARENGA et al., 1997). Portanto, a compactação do solo tem seu efeito na produtividade das culturas agravado em anos de baixos índices pluviométricos (TORRES & SARAIVA, 1999).

Torres et al. (1998), avaliando o desempenho da cultura da soja em um Nitossolo Vermelho eutrófico com diferentes níveis de compactação na camada de 8 a 16 cm, observaram que o efeito da compactação foi variável de ano para ano. Nos anos de melhor distribuição de chuvas, praticamente não ocorreu efeito da compactação sobre a produtividade da soja. No entanto, nos anos mais secos o rendimento da soja foi afetado entre valores de densidade do solo de 1,27 a 1,33 g dm⁻³.

Para Castro et al. (1987), o revolvimento do solo com equipamentos de preparo aumenta a suscetibilidade à compactação, pois a intensa mobilização dos solos traz como consequência sua desagregação superficial, sujeita à formação de uma fina crosta resultante da dispersão das partículas, e ainda outra camada subsuperficial compactada, resultante tanto da pressão exercida pelo peso dos implementos agrícolas, como pela ação direta dos pneus.

Já Richart et al. (2005) apontam para uma probabilidade maior do volume de macroporos atingir valores críticos em SSD, principalmente em solos argilosos, devido à ausência de mobilização do solo, e pela acomodação das partículas, seja por um processo natural ou por forças exercidas na superfície do solo.

Segundo Torres & Saraiva (1999) a concentração superficial de raízes em sistema convencional quase sempre está relacionada à queda de produtividade, o que pode não ocorrer em SSD, pois a manutenção da cobertura do solo com palha e o maior teor de matéria orgânica (MO) nesse sistema conservacionista mantém a umidade do solo, podendo proporcionar condições satisfatórias para o desenvolvimento das culturas.

Hakoyama et al. (1995) observaram que, em sistema convencional, a compactação do solo localiza-se entre 8 e 27 cm de profundidade. Já em SSD essa camada de maior densidade localiza-se mais superficialmente, entre 5 e 12 cm de profundidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Castro et al. (1987) e Pedrotti et al. (2001).

A maioria dos trabalhos aponta para uma compactação na camada superficial em SSD, em experimentos de curta duração (CASTRO, 1989; GILL et al., 1996; TORMENA et al., 2002; FERRERAS et al., 2001; VIEIRA & MUZILLI, 1984; BEUTLER et al., 2001). Entretanto, Henklain (1997), após 20 anos, observou menor densidade do solo e maior volume total de poros e macroporosidade em SSD, em comparação com outros métodos de preparo do solo.

Segundo Silva et al. (2002), o revolvimento e a desagregação do solo diminui substancialmente a capacidade do solo de receber carga (diminui a pressão de preconsolidação), sendo essa capacidade aumentada de 2 a 4 vezes no SSD. Este aspecto está relacionado com a permanência da continuidade dos poros, resultante da decomposição das raízes, liberação de exsudados radiculares, atividade biológica do solo mais efetiva, proporcionando maior estabilidade dos agregados (DEXTER, 1991). Segundo o autor, os "bioporos", derivados de raízes e de minhocas, fazem parte de processos naturais de melhoria das características do solo, devendo ser desenvolvidos e explorados, pois têm ótimo potencial para melhorar as características do solo a custos moderados.

4.2. Crescimento das raízes em solo compactado

As raízes das plantas crescem pela divisão celular na região do meristema apical e, subseqüentemente, pela expansão dessas células (VEPRASKAS, 1994). A pressão de turgor nas células que se alongam deve ser suficiente para se sobrepôr à resistência

da parede celular e à resistência mecânica do meio externo (CAMARGO & ALLEONI, 1997). No entanto, as raízes são órgãos flexíveis que se desenvolvem através do solo, seguindo, aparentemente os caminhos de menor resistência. Além disso, secretam uma mucilagem (ácidos orgânicos e polissacarídeos) que envolve a ponta das raízes, funcionando como lubrificante para facilitar a penetração no solo, além de proteger da dessecação (BENNIE, 1996; VEPRASKAS, 1994).

Em solos onde as raízes finas podem explorar canais radiculares e fissuras existentes, culturas com raízes pivotantes são mais afetadas pela compactação que aquelas com raízes fasciculadas mais finas (WHITELEY & DEXTER, 1982). Entretanto, raízes de maior diâmetro apresentam maior resistência ao encurvamento em solo compactado (WHITELEY & DEXTER, 1984), o que, segundo Henderson (1989), é importante em solos deficientes em macroporos, onde as raízes necessitam mais deformar o solo do que explorar fissuras.

O caminho natural do crescimento do sistema radicular no solo é pelos macroporos ou espaços vazios, que ocorrem entre os agregados do solo. Nos solos que não apresentam problemas de compactação esses macroporos quase sempre são interligados entre si (RICHART, et al. 2005). Essa condição foi confirmada por Vepraskas (1994) que observou que os solos que tinham maior proporção de agregados com diâmetro superior a 2 mm, e, conseqüentemente, com maior macroporosidade, apresentavam 30 % a mais de raízes de milho em profundidade.

A presença de camada impeditiva ao crescimento radicular faz com que as raízes se entortem e cresçam paralelamente à superfície do solo (JORGE, 1985), além de estimular a proliferação de raízes laterais finas (RUSSEL & GOSS, 1974), que na sua maioria encontram-se nos primeiros 15 cm do perfil do solo (COALE & GROVE, 1986).

Para Passioura (1991), a estrutura do solo exerce efeitos claros sobre o alongamento radicular, influenciando a habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. Segundo o autor, o alongamento radicular só será possível quando a pressão radicular for maior que a impedância mecânica oferecida pelo meio. No entanto, Zonta et al. (2006) argumentaram que a redução no alongamento das raízes não pode ser considerada uma diminuição do crescimento radicular, e sim uma alteração na distribuição espacial das raízes, já que em condições de limitação do crescimento em profundidade ocorre

intensa proliferação de eixos laterais finos, que contribuem para o aumento significativo da superfície específica radicular.

Para Bennie (1996), ao crescer a raiz exerce uma pressão contra as partículas do solo, afastando-as, para permitir o seu alongamento, porém, quando há presença de camada com estado de compactação superior à capacidade de penetração das raízes, ocorre a diminuição do seu comprimento e o aumento do diâmetro radicular, devido ao maior número de células por unidade de comprimento de raízes.

De acordo com Taylor (1974), as raízes das plantas, ao se desenvolverem, atravessam poros com diâmetros superiores aos seus, ou poros que foram aumentados pelo deslocamento das partículas do solo pelo seu crescimento, o qual será diminuído ou inexistente quando a pressão hidrostática das células das raízes não for capaz de vencer a resistência oferecida pelas camadas de compactação dos solos.

Porém, Merotto Júnior & Mundstock (1999) afirmaram que as raízes podem crescer em poros e pontos de menor resistência, mas são incapazes de reduzir seu diâmetro para penetrar em poros menores. Já Queiroz-Voltan et al. (2000) não constataram alterações anatômicas nas raízes de dois cultivares de soja em estado de compactação do solo de até $1,50 \text{ g cm}^{-3}$.

4.3 Manejo da compactação do solo em SSD

A estrutura do solo ideal para o cultivo de plantas é aquela que permite uma exploração maior do sistema radicular no perfil do solo, que apresenta um espaço poroso suficiente e contínuo para o movimento da água e dos gases, e resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento das raízes (RICHART et al., 2005).

A descompactação do solo pode ser promovida por processos mecânicos e/ou biológicos. No método mecânico dá-se preferência para equipamentos com hastes, pois operam abaixo da camada compactada, possuem menor superfície de contato e apresentam menor poder desagregador do solo, além de revolver pouco o solo, mantendo grande parte das vantagens promovidas pelo SSD (VERNETTI JÚNIOR & GOMES, 1999). Porém, benefícios importantes têm sido observados na estruturação do solo em médio e longo

prazo com a utilização de plantas de cobertura com alto potencial de fixação de carbono e que possuam sistema radicular volumoso e agressivo (DIAS JÚNIOR, 2000).

O arado escarificador é um equipamento provido de hastes que promove a descompactação do solo de baixo para cima, atingindo a profundidade de aproximadamente de 30 cm no perfil. Profundidades superiores a essa serão atingidas pelos subsoladores que exigem maior esforço de tração para execução das operações agrícolas e que não são comuns em áreas em SSD (KOCHHANN et al., 2000).

Considerado um manejo conservacionista, os escarificadores são equipamentos preferencialmente indicados para a descompactação mecânica, devido a formação de fissuras com mínima mobilização do solo, mantendo grande parte da cobertura morta e com pequeno impacto nos teores de matéria orgânica (TORRES et al., 1998), além de proporcionar alta rugosidade da superfície do terreno (SECCO & REINERT, 1997), reduzindo o escoamento superficial (VAZQUEZ & DE MARIA, 2003).

Nesse sentido, Torres e Saraiva (1998) afirmaram que a melhoria das condições físicas do solo tem reflexos positivos na produtividade da cultura soja, porém o aumento da porosidade total promovida pela ação de implementos mecânicos de mobilização do solo e de rompimento da compactação não garantem o maior crescimento das raízes, pois destroem a continuidade dos poros.

Entre os inconvenientes da escarificação mecânica pode-se citar a necessidade de tratores com alta potência. Estima-se que para cada haste do escarificador sejam necessários em torno de 25 HP, constituindo uma operação onerosa com alto gasto de energia, consumindo em torno de 20 L ha⁻¹ de combustível (KOCHHANN et al., 2000). Além disso, em condições de elevada quantidade de cobertura morta depositada na superfície do solo, em SSD, pode ocorrer o arraste da palha e seu acúmulo da mesma em pontos do terreno, reduzindo o efeito protetor da palhada, além de dificultar a operação de semeadura da cultura seguinte (TORRES & SARAIVA, 1999).

Após a escarificação, caso não sejam tomadas medidas preventivas como a utilização de plantas com sistema radicular abundante e que incremente o teor de MO para estabilizar os agregados do solo, a tendência é a acomodação das partículas do solo ocorrendo, com o passar do tempo, o retorno da compactação (KOCHHANN et al., 2000).

Segundo Araujo et al. (2004) e Busscher et al. (2002), apesar dos efeitos positivos da escarificação, existem evidências de que esses efeitos são de curta duração.

Uma alternativa para melhorar a qualidade estrutural do solo refere-se ao uso de rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, criando poros por onde as raízes da cultura subsequente possam crescer (SILVA & ROSOLEM, 2001a). Ehlers et al. (1983) também afirmam que em SSD os canais verticais contínuos servem como rotas, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando maior colonização das raízes em profundidade.

A agregação do solo é condicionada por substâncias agregantes, ou seja, por substâncias que possuem ação cimentante e aglutinadora, como a matéria orgânica (MIELNICZUK, 1999), que em SSD é incrementada em superfície pelo constante aporte de resíduos culturais, e em profundidade pela morte das raízes.

Os exsudados orgânicos liberados pelas raízes também possuem função cimentante das partículas do solo. Esse incremento dos compostos orgânicos, além do efeito direto na agregação do solo, serve de energia para a atividade microbiana, que libera moléculas orgânicas como subprodutos do metabolismo (ácidos húmicos e polissacarídeos) que também irão atuar como agentes aglutinadores dos grânulos minerais (MIELNICZUK, 1999). Essas moléculas atuam na estabilidade dos agregados pelas ligações de polímeros orgânicos com superfície inorgânica por meio de cátions polivalentes (CASTRO FILHO et al., 1998).

A agregação do solo também pode ter seu efeito acelerado pela exploração radicular no perfil do solo, que no processo de crescimento promove a aproximação das partículas, a medida que as raízes exercem pressão sobre as partículas minerais no seu avanço pelo espaço poroso. A absorção de água pelas raízes também causa secamento na região adjacente às raízes promovendo aumento na força de coesão entre as partículas (ZONTA et al., 2006).

Além do efeito físico, de facilitar o crescimento radicular em profundidade, esses bioporos apresentam microclima favorável ao crescimento das raízes, à medida em que há maior teor de MO, seja oriunda de exsudados radiculares ou mesmo do processo de decomposição das raízes mortas. A MO do solo exerce um importante papel no

desenvolvimento das raízes, pois funciona como fonte e reserva de nutrientes e na complexação de metais como o Al e Mn, reduzindo o efeito tóxico para a planta (SANTOS & CAMARGO, 1999).

Segundo Dexter (1991), os "bioporos" derivados de raízes e de minhocas fazem parte de processos naturais de melhoria das características do solo, devendo ser desenvolvidos e explorados, pois têm ótimo potencial para melhorar as características do solo a custos moderados.

Genro Júnior et al. (2004) não observaram nenhum efeito de plantas de cobertura com sistema radicular abundante e formador de poros biológicos, na redução da resistência mecânica do solo à penetração. No entanto, Abreu et al. (2004) ao avaliarem o efeito da escarificação mecânica (escarificador) e biológica (*Crotalaria spectabilis*) na redução da compactação de um Argissolo franco-arenoso, constataram que deve-se levar em consideração alterações das propriedades hídricas e mecânicas usadas como indicadoras da estrutura do solo. Usando o indicador condutividade hidráulica do solo (dependente da macroporosidade), observaram maior eficácia da escarificação biológica na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água. Em contrapartida, se o indicador for a resistência à penetração o resultado é inverso.

Séguy & Bouzinac (1995) obtiveram resultados satisfatórios usando safrinhas de sorgo e milho em períodos marginais de chuva, permitindo, além da proteção do solo, a intensificação da reciclagem de nutrientes que seriam lixiviados e o aumento da reestruturação dos solos por meio dos sistemas radiculares que exploram até 2 m de profundidade no perfil.

Rosolem et al. (2002) avaliaram o crescimento radicular de *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, girassol, milho e sorgo de guiné em vasos com camada subsuperficial compactada, e observaram que as espécies milho e sorgo de guiné apresentaram maior potencial para serem usadas como plantas de cobertura em solos compactados por apresentarem maior densidade de comprimento radicular que as outras espécies, em todos os níveis de compactação testados; constataram, porém, que o crescimento radicular dessas espécies foi afetado com o aumento da resistência do solo à penetração, o que não ocorreu, ou ocorreu suavemente, com as espécies *C. spectabilis* e *C. juncea*,

respectivamente, que tiveram valores de densidade de comprimento radicular quase que constante, mesmo com o aumento da compactação do solo.

Silva e Rosolem (2001b) verificaram que a compactação do solo piora a nutrição da soja, porém quando cultivada em sucessão à plantas de cobertura esse problema é amenizado. Os autores destacam as espécies aveia-preta, guandu e milho como plantas que favorecem o crescimento radicular da soja abaixo de camadas compactadas de solo.

Plantas que produzem raízes profundas, com crescimento inicial rápido e agressivo, podem recuperar solos fisicamente degradados. Porém, deve-se adotar a rotação adequada de culturas, para que os resultados sejam rapidamente evidenciados (NUERNBERG et al., 1986).

4.4 Intervalo hídrico ótimo - IHO

A tentativa de definição de limites críticos a partir dos quais ocorrem danos no desenvolvimento das culturas é uma condição difícil de ser conseguida, pois os fatores diretos que afetam o desenvolvimento das plantas (oxigênio, água, temperatura e impedimento mecânico) não são influenciados apenas pela estrutura do solo (densidade global, estado de agregação e porosidade), mas também pelas condições climáticas, que variam de ano para ano (DEXTER, 1988). Assim, mantendo-se um solo com uma mesma densidade por longos períodos, quando o ano for seco, o solo poderá ter maior resistência à penetração, menor disponibilidade de água e maior disponibilidade de O₂. Já em condições de maior umidade, a resistência à penetração poderá ser menor e a disponibilidade de água maior, porém, a concentração de O₂ poderá ser deficiente. Dessa forma, certa densidade do solo pode ser crítica num ano e não no outro (TORRES & SARAIVA, 1999).

O reconhecimento dessas interações sugere que a avaliação da qualidade física do solo deva ser feita por meio de parâmetros que integrem os atributos físicos do solo relacionados com o crescimento das plantas, tendo a água como uma variável de equilíbrio, amenizando ou agravando os efeitos da aeração e da resistência à penetração (LETEY, 1985).

O crescimento das plantas é afetado quando alguns atributos físicos do solo atingem valores-limite, como porosidade de aeração inferior a 10% (GRABLE &

SIEMER, 1968), resistência à penetração das raízes superior a 2 MPa (TAYLOR et al., 1966) e quantidade de água no solo que não esteja entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, ou seja, entre os potenciais de $-0,01$ MPa e $-1,5$ MPa respectivamente (CASSEL & NIELSEN, 1986).

A interação entre esses atributos em uma única variável foi quantificada por Silva et al. (1994) como “Least Limiting Water Range” que foi traduzido por Tormena et al. (1998) como “Intervalo Hídrico Ótimo” (IHO). Segundo esses autores, o crescimento das raízes é menos restrito dentro desse intervalo, que tem como limite superior o teor de água no solo na condição de capacidade de campo (θ_{CC}) ou o teor de água em que a porosidade de aeração é igual a 10% (θ_{PA}). Como limite inferior, pode-se ter o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou o teor de água em que a resistência do solo à penetração seja igual a 2,0 MPa (θ_{RP}). Na literatura encontram-se trabalhos que comprovam que os sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma frequência maior de situações de estresse por excesso ou falta de água (KAY, 1990; SILVA & KAY, 1996; LAPEN et al., 2004).

Os teores de água no solo para propiciar PA e RP adequadas são mais severamente afetados pelo aumento da D_s do que os teores de água na CC e no PMP, indicando que o IHO é um parâmetro mais sensível às mudanças estruturais no solo que a água disponível (AD) (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; BETZ et al., 1998; ZOU et al., 2000). Dessa forma, os teores de água no solo necessários para que não ocorram limitações ao crescimento vegetal, seja para atender as condições de água disponível (entre CC e PMP) ou a PA mínima e também uma RP não impeditiva, variam com o estado de compactação do solo, que pode ser medido por valores de densidade do solo (SILVA et al., 1994).

Carter et al. (1999) constataram que o IHO em SSD foi muito menor que no sistema convencional, devido ao fato da RP superar 2 MPa em maiores conteúdos de água, como consequência dos maiores valores de D_s . Já Cavalieri et al. (2006) verificaram efeito positivo do preparo do solo com escarificador no aumento do IHO na camada de 0 a 15 cm, discordando dos resultados obtidos por Araújo et al., (2004). No entanto, Sharma & Bhushan (2001) observaram que a adição de biomassa ao solo provocou aumento na θ_{PA} e decréscimo na θ_{RP} , resultando em aumento do IHO.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e características climáticas da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado da FCA/Unesp, em Botucatu-SP, nos anos agrícolas de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006. A localização geográfica dessa área está definida pelas seguintes coordenadas: latitude 22°49'S, longitude 48°25' WGrw e altitude de 786 m.

O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo CWa, que significa clima mesotérmico com inverno seco. A estação seca é bem definida e ocorre entre os meses de maio a setembro. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio entre 3 e 18 °C.

Na figura 1 estão apresentadas as quantidades de chuva e as temperaturas médias mensais nos anos agrícolas 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006, registradas pela estação agro-meteorológica localizada próxima à área experimental.

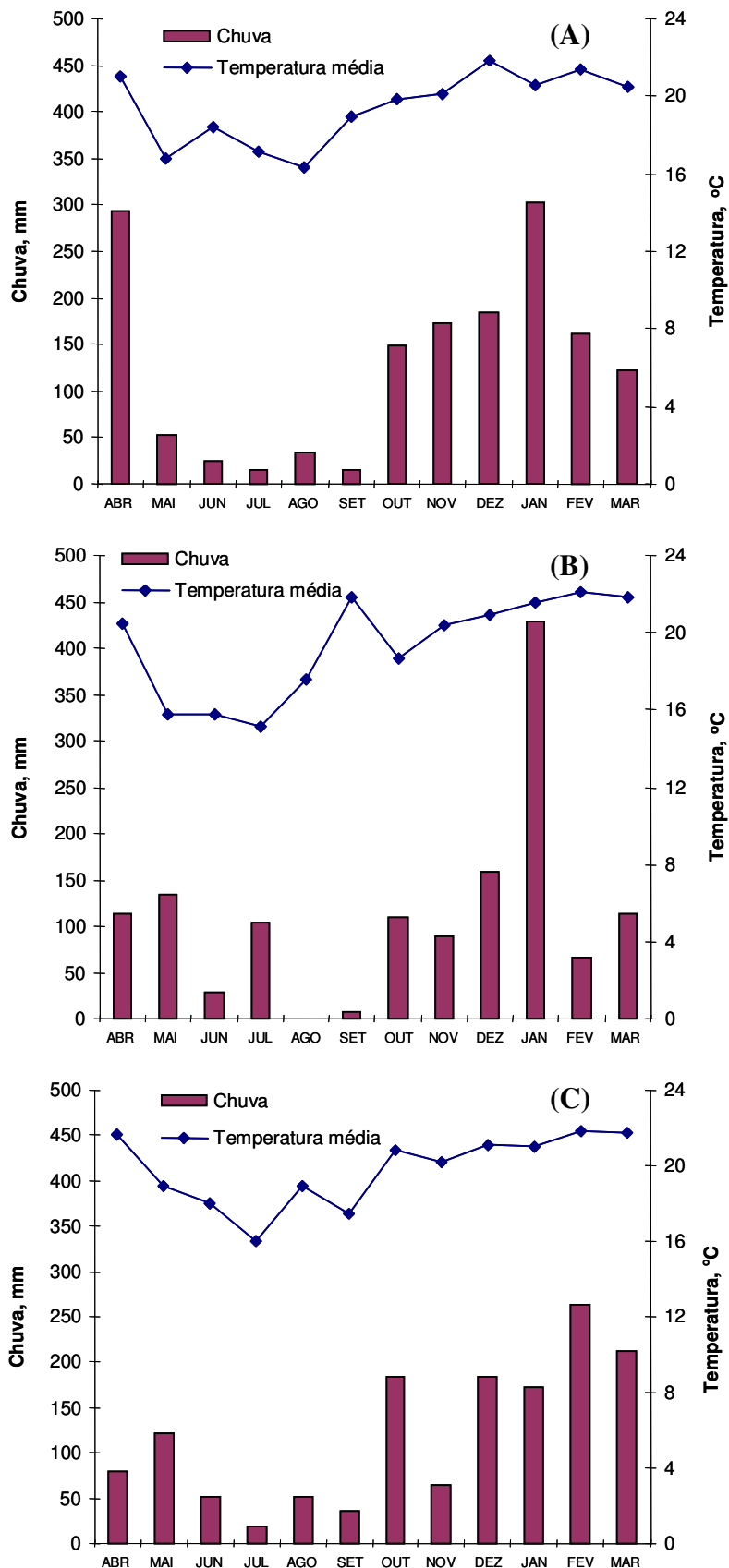


Figura 1. Quantidade de chuva e temperatura média mensal referente aos anos agrícolas 2003/2004 (A), 2004/2005 (B) e 2005/2006 (C), na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.

5.2 Características do solo e histórico da área experimental

O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférrico, estruturado, de textura argilosa por Carvalho et al. (1983) (EMBRAPA, 1999), com relevo suave ondulado.

A área vinha sendo cultivada por sete anos, em SSD, com a rotação soja/aveia-preta/milho/triticale, sendo a soja e o milho como culturas de verão, e a aveia-preta e o triticale como culturas de outono-inverno.

Em abril de 2003, após a colheita da soja e antes da demarcação das parcelas experimentais, foram abertas cinco trincheiras em locais representativos, escolhidos de maneira aleatória, para coleta de amostras deformadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm, e não deformadas nas profundidades de 0-5, 7,5-12,5, 15-20, 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Nas amostras deformadas determinou-se a granulometria, conforme descrito em Embrapa (1997) e realizou-se análise química para determinar a fertilidade do solo, de acordo Raij et al. (2001). Nas amostras não deformadas avaliou-se a densidade do solo, a macroporosidade, a microporosidade, a porosidade total e a curva característica de água no solo, pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado de acordo com o método proposto por Silva et al. (1994), coletando-se anéis volumétricos nas profundidades de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm.

Torrões de solo foram coletados nas camadas de 0-5 e 5-10 cm para avaliação da estabilidade de agregados via úmida (EMBRAPA, 1997 e KIEHL, 1979).

Para detectar uma possível camada de impedimento físico ao crescimento radicular, foi determinada a resistência mecânica à penetração (RP) ao longo do perfil, com penetrógrafo eletrônico, com célula de carga, desenvolvido por Santos e Lanças (1999). Um valor médio de RP foi obtido como resultado de 20 testes executados em pontos escolhidos aleatoriamente, procurando representar o mais fielmente possível toda a área experimental.

Os resultados das análises químicas, físicas e granulométricas estão apresentados na tabela 1. Nas figuras 2 e 3 constam a curva característica da água no solo e o IHO, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades químicas, físicas, granulométricas e dos agregados do solo da área experimental (Abril/2003).

Propriedades químicas											
Profundidade	pH CaCl_2	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	
(cm)		(g dm^{-3})	(mg dm^{-3})	-----($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$)-----							(%)
0-5	5,4	31,8	37,1	56,0	4,7	37,5	15,9	58,1	114,1	50,9	
5-10	4,6	27,2	25,9	91,0	3,0	28,4	11,2	42,6	133,6	31,9	
10-20	4,6	25,9	15,2	97,2	2,5	35,2	15,7	53,4	150,5	35,4	
20-40	4,8	22,4	3,3	68,7	1,1	46,3	15,0	62,4	131,1	47,6	
40-60	5,1	22,0	2,3	63,5	0,2	56,7	11,5	68,3	131,9	51,8	

Propriedades físicas						
Profundidade	RP	Umidade ⁽¹⁾	Densidade do solo	Porosidade		
				Total	Macro	Micro
(cm)	(MPa)	(g g^{-1})	(g cm^{-3})	-----($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)-----		
0-5	1,4	0,29	1,22	0,57	0,11	0,42
7,5-12,5	2,8	0,29	1,39	0,53	0,08	0,42
15-20	2,3	0,34	1,38	0,52	0,07	0,45
27,5-32,5	2,3	0,38	1,29	0,50	0,05	0,45
47,5-52,5	1,8	0,42	1,31	0,58	0,05	0,48

Distribuição granulométrica			
Profundidades	Areia	Argila	Silte
(cm)	-----(g kg^{-1})-----		
0-5	136,6	570,8	292,6
5-10	130,6	597,8	271,6
10-20	128,0	599,4	272,6
20-40	109,6	644,8	245,6
40-60	88,0	715,2	196,8

Estabilidade de Agregados				
Profundidades	Agregados >2mm	DMG	DMP	IEA
(cm)	(%)	----- (mm) -----		
0-5	43,1	2,66	1,77	93,10
5-10	35,0	2,41	1,95	94,17

⁽¹⁾ Umidade gravimétrica do solo no momento do teste de resistência à penetração.

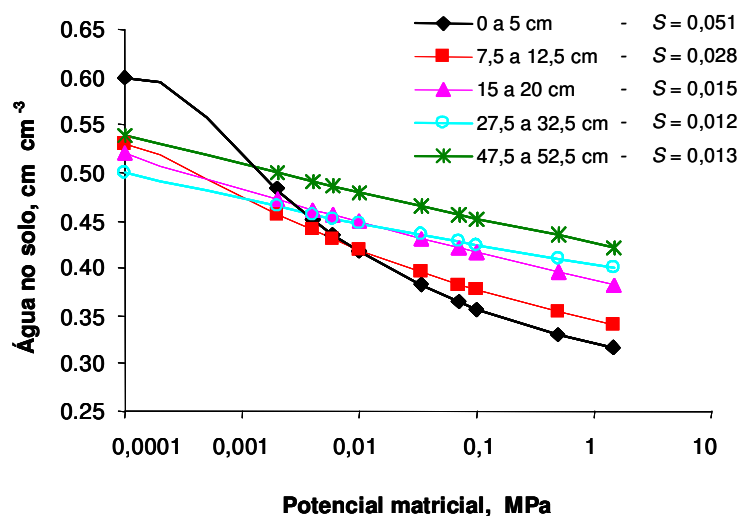


Figura 2. Curvas características da água no solo e índices S (Dexter, 2004), referentes à amostragem realizada para caracterização da área, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm.

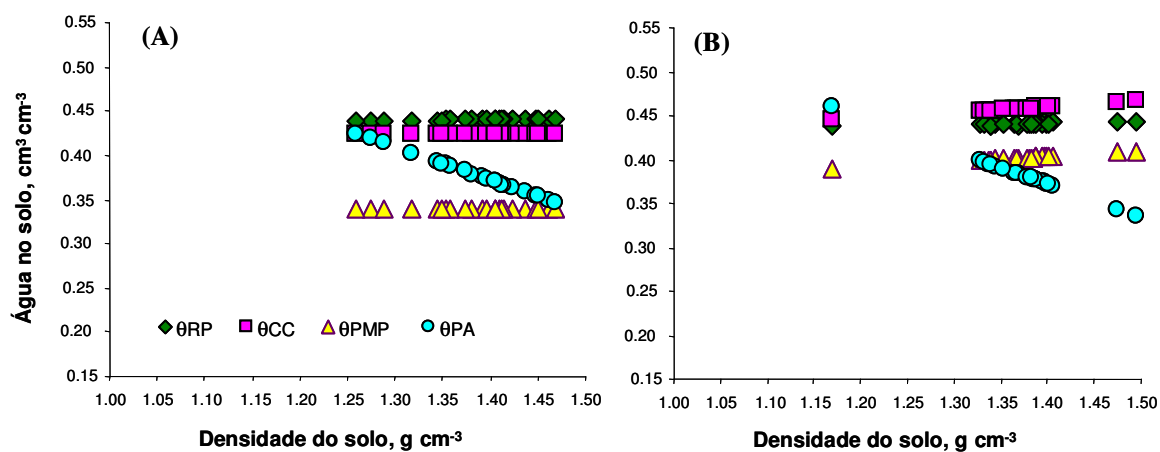


Figura 3. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), nas profundidades de 7,5-12,5 cm (A) e 27,5-32,5 cm (B).

5.3 Tratamentos e delineamento experimental

Os oito tratamentos foram constituídos pelas espécies graníferas triticales (X *Triticosecale* Wittmack) e girassol (*Helianthus annuus* L., var. Hélio 252) cultivadas no outono-inverno, combinadas com espécies de cobertura milheto (*Pennisetum glaucum* L., var. BN-2), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), cultivadas na primavera, antecedendo a cultura de verão (soja – *Glycine max* L. (Merril), var. Embrapa 48), além do manejo do solo com escarificador.

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, em um esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Foram consideradas parcelas aquelas cultivadas com triticales e girassol, e subparcelas as cultivadas com milheto, sorgo forrageiro e crotalária júncea, e também as escarificadas mecanicamente. A soja foi cultivada como safra de verão em todas as parcelas. Essa seqüência de cultivo foi repetida nas safras de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006. A escarificação do solo foi realizada apenas em uma ocasião, ou seja, após a colheita das culturas de outono-inverno no primeiro ano (Setembro de 2003), mantendo a área escarificada sempre em pousio entre os cultivos de inverno e de verão.

Cada parcela experimental foi demarcada com uma área útil de 256 m² (dimensões: 32 x 8 m). O tamanho da parcela proporcionou a instalação de 16 linhas de semeadura de girassol, com um espaçamento entrelinhas de 0,51 m, e 47 linhas de semeadura de triticales, com um espaçamento entrelinhas de 0,17 m. Nas subparcelas a área útil foi de 40 m² (dimensões: 8 x 5 m), sendo possível a semeadura de 29 linhas de milheto, sorgo e crotalária, com um espaçamento entrelinhas de 0,17 m. Já a soja foi semeada em cada subparcela com um espaçamento entrelinhas de 0,45 m, resultando em 11 linhas de semeadura.

Os carregadores entre os blocos, entre as parcelas e entre as subparcelas foram dimensionados com 4 m de largura, e foram semeados normalmente e considerados como bordaduras. Portanto, o experimento ocupou uma área total de 2944 m² (92 x 32 m).

5.4 Cultivo de triticale e de girassol no primeiro ano do experimento (2003/2004)

Em abril de 2003, após colheita da soja cultivada na área e coleta de amostras deformadas e não deformadas de solo para a caracterização inicial, foram demarcados os blocos e as parcelas experimentais, e em seguida (14/04/2003) semeadas as culturas de triticale e girassol.

Utilizou-se para a semeadura do girassol e do triticale a semeadora modelo Personale-DRILL-13, da empresa Semeato, equipada com discos de corte de palha com 16" de diâmetro e com discos sulcadores defasados (13" e 14" de diâmetro) para as sementes. As culturas foram semeadas com espaçamento entrelinhas de 0,17 e 0,51 m para o triticale e girassol, respectivamente.

As sementes foram tratadas com os fungicidas Carboxin – Thiram (200 mL 100 kg⁻¹ de sementes, do produto comercial Vitavax - SC).

Na semeadura do triticale utilizaram-se-se 80 kg ha⁻¹ de sementes (germinação = 69 %). A densidade de semeadura foi definida em, 230 sementes m⁻². O girassol foi semeado utilizando-se 7 kg ha⁻¹ de sementes (germinação = 82 %), para possibilitar uma população aproximada de 14 plantas m⁻². Tanto o triticale como o girassol foram cultivados sem adubação.

No dia 15/06/2003, fez-se uma pulverização com inseticida Metamidofós (0,5 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600) no girassol, para o controle da *Chlosyne lacinia saundersii* ("lagarta-preta-das-folhas"). Nesse mesmo dia também foi aplicado o fungicida Tebuconazole (0,75 L ha⁻¹ do produto comercial Folicur 200 CE), para o controle de antracnose no girassol.

A colheita das culturas de outono-inverno foi efetuada no dia 06/08/2003. Para a determinação da produtividade de grãos, foram colhidas, no caso do triticale, em cada parcela experimental, 9 linhas de 32 m de comprimento, com a colhedora de parcelas automotriz da marca Wintersteiger SeedMech, modelo Nursery Master Elite. Já o girassol teve os capítulos colhidos manualmente de 3 linhas de 32 m de cada parcela experimental. No próprio local foi efetuado o processo de trilha dos grãos de girassol com a colhedora automotriz utilizada na colheita do triticale. Em seguida, os capítulos que passaram pelo processo de trilha foram distribuídos uniformemente na área em que foram retirados, para

minimizar alterações na cobertura vegetal morta e na exportação de nutrientes, que poderiam ser provocadas com a retirada dos capítulos da área.

As produtividades de girassol e de triticale, com umidade dos grãos corrigida para 13%, foram de 900 e 2200 kg ha⁻¹, respectivamente.

5.5 Manejo do solo com escarificador

Em setembro de 2003 realizou-se a escarificação do solo utilizando um arado escarificador com sete hastes, montados em duas barras paralelas sobre um quadro porta-ferramentas. As hastes, inclinadas para frente formando um ângulo em torno de 20° a 25°, foram posicionadas espaçadas entre si de 0,60 m, em cada barra, resultando em um espaçamento efetivo entre sulcos de 0,30 m, com profundidade de descompactação de 0,30 m. Essa operação foi efetuada com o solo apresentando consistência friável.

Acoplado ao equipamento havia um rolo destorroador para quebrar os torrões maiores, diminuindo a rugosidade do terreno e eliminando a necessidade de realização de gradagem.

Após a realização do manejo mecânico, determinou-se novamente a RP, porém desta vez utilizando o penetrógrafo manual modelo “PENETROGRAPHER^{PAT} SC-60”, para verificar o efeito da escarificação na descompactação do solo. Para obter os valores médios de RP, utilizaram-se os valores obtidos em 24 e 72 pontos escolhidos aleatoriamente, por toda a área escarificada e não escarificada, respectivamente. Simultaneamente ao teste de RP, coletaram-se amostras deformadas de solo para determinar a umidade gravimétrica (Tabela 2), conforme EMBRAPA (1997). As médias dos valores de resistência à penetração das áreas com e sem escarificação, ao longo do perfil do solo, estão apresentadas na figura 4.

Figura 4. Efeito da escarificação na resistência mecânica à penetração no perfil do solo.

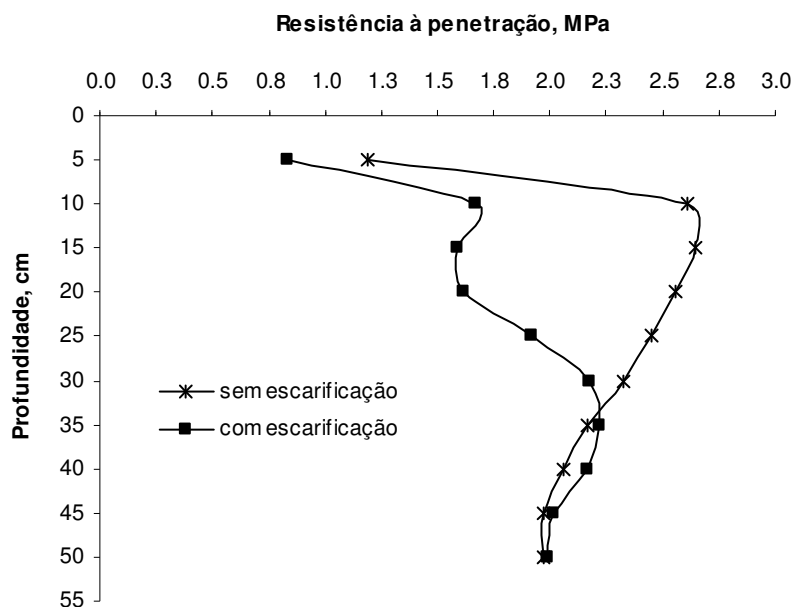


Tabela 2. Valores da umidade gravimétrica do solo em amostras coletadas simultaneamente ao teste de RP, realizado após a escarificação do solo.

Profundidades (cm)	Sem escarificação	Com escarificação
	-----(g g^{-1})-----	
0-5	0,210	0,215
5-10	0,197	0,204
10-20	0,231	0,236
20-40	0,281	0,270
40-50	0,314	0,333

5.6 Cultivo das espécies de cobertura no primeiro ano do experimento (2003/2004)

No dia 04/10/2003 foram semeadas, nas subparcelas, as espécies de cobertura: milho, sorgo forrageiro e crotalária júncea. Utilizou-se a semeadora Personale-DRILL-13/Semeato (descrita no item 5.5), com 13 linhas espaçadas em 0,17 m. A densidade de semeadura foi definida em, aproximadamente, 200 sementes m^{-2} de milho, sorgo e crotalária. Para isso, foram gastos 30 kg ha^{-1} de sementes de milho (germinação = 85%), 20 kg ha^{-1} de sementes de sorgo (germinação = 88%) e 20 kg ha^{-1} de sementes de crotalária júncea (germinação = 85%). Junto à semeadura, aplicou-se 40 kg ha^{-1} de N na forma de uréia.

Aos 57 DAE das espécies de cobertura, em 05/12/2003, fez-se a dessecação química das plantas com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,0 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG). A aplicação foi feita com pulverizador de barras, munidas com bicos tipo leque, modelo 110-04, marca Tej-Jet, espaçados em 0,5 m, com pressão de trabalho de 50 lbf cm⁻², e com volume de calda de 300 L ha⁻¹.

Após a dessecação não utilizou-se manejo mecânico da palhada e os restos vegetais tiveram acamamento natural. Esse procedimento foi adotado para minimizar a taxa de decomposição da cobertura sobre o solo.

Com o intuito de determinar a massa seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura, cultivadas em sucessão ao triticale ou girassol, foram coletadas, de cada subparcela, 4 linhas de plantas de 2 metros de comprimento, um dia antes da dessecação. O material foi colocado para secar em estufa de aeração forçada a 60 °C, e em seguida pesado (Tabela 3).

Tabela 3. Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou triticale, no primeiro ano do experimento (2003/2004).

Espécie de cobertura	Cultura de outono-inverno	
	Girassol	Triticale
	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Milheto	5,29	3,98
Sorgo forrageiro	4,06	5,05
Crotalária	3,40	4,13

5.7 Cultivo da soja no primeiro ano do experimento (2003/2004)

No dia 11/12/2003, semeou-se a soja (var. Embrapa 48), utilizando a semeadora Personale-DRILL-13/Semeato (descrita no item 5.5) com 5 linhas espaçadas de 0,45 m.

Na semeadura da soja foram aplicados 350 kg ha⁻¹ do formulado 0-20-10. Utilizaram-se, aproximadamente, 50 kg ha⁻¹ de sementes, com a semeadora regulada para semear 45 sementes m⁻² (Germinação = 89 %). As sementes foram tratadas com os fungicidas

Carboxin – Thiram (200 mL para cada 100 kg de sementes, do produto comercial Vitavax - SC), com os micronutrientes cobalto e molibdênio (200 mL para cada 100 kg de sementes do produto comercial Profol – Cobol) e com inoculante (produto comercial Biomax). Aos 25 DAE, fez-se a determinação da densidade populacional final da soja, que foi de 40 plantas m⁻².

No dia 06/01/2004, com a soja no estágio vegetativo V3, fez-se a aplicação do herbicida seletivo Cloransulam-Metil (47,6 g ha⁻¹ do produto comercial Pacto) para o controle de plantas daninhas de folhas largas. Após três dias dessa aplicação, fez-se uma nova pulverização com herbicida para o controle de plantas daninhas de folhas estreitas, utilizando o graminicida Haloxifop-R, Éster Metílico (400 mL ha⁻¹ do produto comercial Verdict R).

Ainda com as plantas no estágio vegetativo, no dia 10/02/2004, foi aplicado o inseticida Deltamethrin (0,75 L ha⁻¹ do produto comercial Decis 25 CE) para o controle de insetos desfolhadores. No final do ciclo da soja, no dia 10/03/2004, fez-se outra pulverização com inseticida, utilizando Metamidofós (1,0 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600) para controle do percevejo-verde (*Nezara viridula*) e da largarta-da-soja (*Anticarsa gemmatilis*). Aplicou-se, também, o fungicida Tebuconazole (1 L ha⁻¹ do produto comercial Folicur 200 CE) para controlar as doenças de final de ciclo (ferrugem asiática e oídio)

No dia 20/04/2004, efetuou-se a colheita dos grãos com a colhedora de parcelas, coletando-se as três linhas centrais, de 8 m de comprimento, de cada subparcela.

5.8 Cultivo do triticale e do girassol no segundo ano do experimento (2004/2005)

No dia 29/04/2004, iniciou-se o segundo ano de condução do experimento no campo, com a semeadura do girassol e do triticale.

As culturas de outono-inverno foram mantidas livres de plantas daninhas. Para isso, foi realizada capina manual no girassol, devido à inexistência de herbicida seletivo registrado para essa cultura. Já no triticale, aplicou-se o herbicida latifolicida 2,4 D, na dose de 0,75 L ha⁻¹ de produto comercial Aminol. A aplicação foi realizada com pulverizador manual, tipo “costal”, sendo as áreas cultivadas com girassol protegidas por cortinas de plástico para evitar possíveis danos pela deriva.

Para controlar a infestação da lagarta-preta-das-folhas do girassol, no dia 13/06/2004, foi aplicado o inseticida Metamidofós (0,6 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600). No mesmo dia, também aplicou-se o fungicida Tebuconazole (0,5 L ha⁻¹ do produto comercial Folicur 200 CE), para o controle de antracnose.

Aos 135 dias após a semeadura (DAS), efetuou-se a colheita das culturas de outono-inverno, seguindo os mesmos procedimentos do ano anterior, descrito no item 5.5.

As produtividades de girassol e de tritcale, com os teores de água nos grãos corrigidos para 13 %, foram de 1207 e de 3325 kg ha⁻¹, respectivamente.

5.9 Cultivo das espécies de cobertura no segundo ano do experimento (2004/2005)

No segundo ano do cultivo das espécies de cobertura repetiram-se os procedimentos do ano anterior, como descrito no item 5.6. No entanto, só foi possível realizar a semeadura no dia 16/10/2004, devido ao atraso na ocorrência das primeiras chuvas de primavera.

Aos 50 DAE das espécies de cobertura, em 06/12/2004, realizou-se a semeadura da soja (item 5.10) em meio às plantas de cobertura. No dia seguinte realizou-se a dessecação com herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,0 L ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG), aplicado com pulverizador de barras motomecanizado.

Assim como realizado no ano anterior, um dia antes da dessecação, foi coletado material para determinar a produção de matéria seca pelas espécies de cobertura (Tabela 4).

Tabela 4. Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou ao tritcale, no segundo ano do experimento (2004/2005).

Espécie de cobertura	Cultura de outono-inverno	
	Girassol	Triticale
	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Milheto	2,99	2,68
Sorgo forrageiro	1,68	1,86
Crotalária	1,74	2,69

5.10 Cultivo da soja no segundo ano do experimento (2004/2005)

A semeadura soja foi realizada um dia antes da dessecação das espécies de cobertura, ou seja, no dia 06/12/2004. Esse procedimento foi adotado para diminuir o atraso do plantio da soja, pois seriam necessários, no mínimo, sete dias para que as plantas de cobertura perdessem água o suficiente para evitar o “embuchamento” da semeadora. Ao realizar a semeadura da soja com as plantas de cobertura vivas, as mesmas apresentavam-se tenras e quebradiças, facilitando a atuação dos discos de corte da palha da semeadora.

Utilizou-se uma densidade de 40 sementes m^{-2} (germinação = 90 %). As sementes foram tratadas com fungicida, inoculante e micronutrientes (Co e Mo), sendo os mesmos produtos e doses utilizadas no ano anterior, assim como repetiu-se, também, a adubação de semeadura.

No dia 07/01/2005, aplicou-se o herbicida Lactofen (latifolicida, pós-emergente, seletivo) na dose de 0,75 L ha^{-1} do produto comercial Cobra. Para o controle de plantas daninhas de “folhas estreitas” aplicou-se, no dia 19/01/2005, o graminicida Fenoxaprop-P-etil, com 1,0 L ha^{-1} de produto comercial Podium S.

Para controlar a infestação de insetos desfolhadores, fez-se, no dia 24/01/2005, pulverização com inseticida Deltamethrin, na dose de 0,5 L ha^{-1} de produto comercial (Decis 25 CE). O controle preventivo da ferrugem asiática foi realizado com pulverizações, nos dias 25/02/2005 e 20/03/2005, do fungicida Pyraclostrobin + Epoxiconazole, na dose de 0,5 L ha^{-1} de produto comercial (Opera). Nesses mesmos dias preparou-se uma outra calda contendo inseticida Monocrotophos, que foi aplicado na dose de 0,75 L ha^{-1} do produto comercial Agrophos 400, para o controle de percevejo-verde e largarta-da-soja.

No dia 15/04/2005, foi realizada a dessecação química das plantas com herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate, na dose de 2,0 L ha^{-1} de produto comercial Roundup WG, para facilitar a colheita mecanizada, já que houve grande infestação de plantas daninhas no final do ciclo da soja, e para antecipar em pelo menos 10 dias a colheita de grãos, e a semeadura da safra de outono-inverno. No dia 24/04/2004, colheu-se a soja com a colhedora de parcelas Wintersteiger SeedMech, modelo Nursery Master Elite.

5.11 Cultivo das espécies vegetais no terceiro ano do experimento (2005/2006)

Dois dias após a colheita da soja da safra 2004/2005 realizou-se, no dia 26/04/2005, a semeadura do girassol e do triticale, iniciando o terceiro ano do experimento. As culturas foram semeadas e conduzidas repetindo os procedimentos adotados nas safras anteriores. No dia 03/09/2005, realizou-se a colheita do triticale (mecanizada) e do girassol (manual), conforme descrito no item 5.5. As produtividades médias do girassol e do triticale, com o teor de água nos grãos corrigidos para 13 %, foram de 742 e de 2295 kg ha⁻¹, respectivamente.

No dia 21/09/2005 aplicou-se o herbicida pós-emergente, não seletivo, Glyphosate (dose de 1,7 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG), para controle das plantas infestantes na área experimental. No dia seguinte foram semeadas as espécies de cobertura com a semeadora Personale-DRILL-13/Semeato, com espaçamento de 0,17 m entrelinhas, com mesma densidade de sementes dos anos anteriores (conforme item 5.6) e adubadas com 40 kg ha⁻¹ de N, por meio de uréia.

As plantas de cobertura foram manejadas quimicamente no dia 23/11/2006, utilizando Glyphosate, na dose de 1,7 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG.

Para determinar a massa seca de material vegetal produzida por cada espécie de cobertura, foram coletadas as plantas de 4 linhas de 2 metros de comprimento de cada parcela, um dia antes da dessecação. O material foi colocado para secar em estufa de aeração forçada a 60 °C, e em seguida pesado (Tabela 5).

Tabela 5. Massa de matéria seca vegetal produzida pelas espécies de cobertura, cultivadas em sucessão ao girassol ou ao triticale, no terceiro ano do experimento (2005/2006).

Espécie de cobertura	Cultura de outono-inverno	
	Girassol	Triticale
	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Milheto	6,07	3,46
Sorgo forrageiro	4,13	2,99
Crotalária	3,86	2,63

No dia 09/12/2005 realizou-se a semeadura da soja (var. Embrapa 48), do terceiro ano do experimento, utilizando a mesma semeadora-adubadora (Personale-DRILL-13/Semeato), com 5 linhas espaçadas em 0,45 m.

Utilizou-se uma densidade de 35 sementes m^{-2} (germinação = 90 %), as quais foram tratadas com fungicida, inoculante e com os micronutrientes cobalto e molibdênio, conforme descrito no item 5.7. Por ocasião da semeadura foram aplicados 300 kg ha^{-1} do formulado 0-20-20.

Para o manejo das plantas daninhas fez-se, um dia antes da semeadura da soja, a aplicação do herbicida Paraquat + Diuron, na dose de 2,5 L ha^{-1} do produto comercial Gramocil, com mistura no tanque de 250 mL ha^{-1} de espalhante adesivo. Com 25 DAE da soja (09/01/2006), aplicou-se o herbicida latifolicida seletivo, Bentazon, na dose de 1,5 L ha^{-1} do produto comercial Basagram. No dia 11/01/2006 aplicou-se o herbicida graminicida seletivo, Setoxydim, na dose de 1,25 L ha^{-1} do produto comercial Poast.

Para evitar danos à cultura por ataques de pragas e doenças, foram feitas aplicações de inseticidas e fungicidas de acordo a tabela 6.

Tabela 6. Manejo de fungicidas e inseticidas na soja (safra 2005-2006).

Data	Estádio de desenvolvimento da soja*	Fungicida	Inseticida
27/01/2006	V6	Tebuconazole (0,5 L ha^{-1} de Orius®)	Deltamethrin (0,3 L ha^{-1} de ®Keschet)
21/02/2006	R3	Tebuconazole (0,5 L ha^{-1} de Orius®)	Metamidofós (0,5 L ha^{-1} de Metamidofós Fersol 600®)
15/03/2006	R5	Pyraclostrobin + Epoxiconazole (0,5 L ha^{-1} de Opera ®)	Metamidofós (0,5 L ha^{-1} de Metamidofós Fersol 600®)

* Conforme Fehr et al. (1971).

A colheita mecanizada foi realizada no dia 17/04/2006 com a mesma colhedora de parcelas do ano anterior, colhendo-se as plantas de 3 linhas de 8 metros de comprimento de cada subparcela.

5.12 Coleta, preparo e análise das amostras de raízes

Foram coletadas amostras de raízes, tanto das espécies de cobertura como da soja, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, nos três anos de condução do experimento.

As raízes das plantas de cobertura foram amostradas antes da dessecação química, ou seja, nos dias 02 e 03/12/2003, 04 e 05/12/2004 e nos dias 21 e 22/11/2005, sendo coletadas quatro subamostras aleatórias em cada subparcela.

Já as raízes de soja foram amostradas na linha e na entrelinha de semeadura, quando a cultura apresentava-se no estágio R₂ de desenvolvimento, segundo escala proposta por Fehr et al. (1971), ou seja, entre os dias 09 e 11/02/2004, 12 e 16/02/2005 e entre os dias 10 e 13/02/2006, no primeiro, segundo e terceiro anos de condução do experimento, respectivamente. As amostras tanto da linha como da entrelinha de semeadura foram compostas por três subamostras coletadas aleatoriamente em cada subparcela, sempre tomando cuidado para não realizar amostragem em local onde foram abertas as trincheiras para coleta de amostras não deformadas.

Para amostragem de raízes até 20 cm de profundidade, utilizou-se um trado coletor composto por um cilindro de aço com 100 mm altura, com diâmetro interno de 75 mm e a espessura da parede de 3 mm. Fez-se uma abertura oblonga no cilindro coletor com 100 mm de comprimento por 20 mm de largura, para permitir a retirada das porções de solo + raízes. Esse cilindro foi fixado a uma haste de aço maciça com 30 mm de diâmetro por 800 mm de comprimento, a qual recebeu os golpes de marreta. No entanto, em maiores profundidades, esses equipamentos não suportaram o impacto, havendo constante rompimento nos pontos de solda. Assim, para amostragem das camadas de 20-40 e de 40-60 cm foi utilizado um tubo de aço com 900 mm de comprimento por 60 mm de diâmetro, e com espessura de parede de 2 mm.

Após a coleta, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -2°C, para em seguida serem lavadas e analisadas.

Antes da lavagem das raízes, as amostras foram colocadas em recipientes contendo água para acelerar o descongelamento e amolecer os torrões de solo para

facilitar o processo de lavagem. Após o descongelamento dos torrões, as amostras foram despejadas em peneiras com malha de 1 mm e lavadas com jatos de água dirigidos para a retirada de todo o solo das amostras. Utilizou-se pinça para separar as raízes de impurezas, como pedras, caules e folhas. Em seguida, as raízes, ainda contendo impurezas, foram colocadas em bacias com água, para que os fragmentos mais leves flutuassem e com isso fossem facilmente retirados com pequenas peneiras. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos, submersas em solução aquosa contendo 30 % de álcool etílico para aumentar o tempo de conservação, e armazenadas sob refrigeração a 2 °C.

As amostras de raízes foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica (modelo Scanjet 4C/T, marca HP), na resolução de 250 dpi, e tiveram suas imagens digitalizadas e analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” versão 3.8-b (Regente Instrument Inc., Quebec, Canadá), para determinar a densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo), baseado no método de Tennant (1975). Em seguida as amostras de raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60 °C por 48h, para determinação da massa seca produzida.

5.13 Coleta e preparo das amostras não deformadas

Para determinar a densidade do solo, a macro e a microporosidade, a porosidade total e a curva característica da água do solo, foram coletadas amostras indeformadas de solo, por meio de anéis volumétricos com 5,0 cm de altura por 4,8 cm de diâmetro interno, nas camadas de 0-5, 7,5-12,5, 15-20, 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm, sendo uma amostra por profundidade. Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram retiradas 8 amostras por ponto de amostragem, nas profundidades de 7,5-12,5 e de 27,5-32,5 cm.

As amostras foram retiradas antes de iniciar o experimento (em abril de 2003) para caracterização da área, e após o manejo das espécies de cobertura do primeiro e do terceiro ano do experimento (antes da semeadura da soja), entre os dias 4 e 12/12/2003 e entre os dias 25/11/2005 e 05/12/2005, em trincheiras abertas com dimensões aproximadas de 30 cm de largura por 60 cm de comprimento e 60 cm de profundidade, utilizando um suporte de aço para os anéis (“castelinho”) e marreta de 1 kg. Ao fechar as trincheiras, uma estaca indicativa foi colocada para evitar a realização de novas amostragens nesse mesmo local.

Após a coleta das amostras, ainda no campo, foi retirado o excesso de solo dos bordos dos anéis, com o auxílio de um estilete. Em seguida, os anéis volumétricos foram vedados com tampas plásticas para evitar possíveis danos e deformações, e armazenados em refrigerador a 2 °C, até serem processados.

5.13.1 Determinação da curva característica da água no solo, densidade e porosidade do solo

Para determinar a curva característica da água no solo (CR), a densidade (D_s), a macroporosidade (M_p), a microporosidade (m_p) e a porosidade total do solo (P_t), foram utilizados os métodos descritos em EMBRAPA (1997).

As amostras não deformadas foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Para evitar perda de solo, foi colocado um tecido de poliéster, que permite apenas a passagem de água, no fundo de cada anel e fixado com atilho de borracha. Após 72 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo ocupados pela água, iniciou-se a drenagem das amostras, submetendo-as às tensões de 0,002; 0,004; 0,006; 0,01; 0,03; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa.

Para obter os potenciais matriciais (Ψ_m) de 0,002, 0,004 e 0,006 MPa utilizou-se mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979). Os potenciais mátricos de -0,01, -0,033, -0,1, -0,5 e de -1,5 MPa foram obtidos por meio de pressões aplicadas às amostras colocadas sobre placas porosas em câmara de Richards (KLUTE, 1986). A extração de água das amostras nas câmaras de Richards foi realizada por meio de compressor com capacidade para 20 bar.

A água retida no solo em cada potencial foi determinada pesando as amostras no ponto de saturação, ou seja, no ponto de maior Ψ_m ($\Psi_m = 0$) e após aplicação de cada tensão. Após extração de água com tensão de 1,5 MPa e pesagem, as amostras foram colocadas para secar a 105 °C, por 48 horas, em estufa de aeração forçada, para em seguida serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido. De posse da umidade volumétrica obtida em cada potencial matricial, a CR foi determinada por meio de ajuste dos dados originais, utilizando a função (Equação 1) proposta por van Genuchten

(1980), e o software SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). A equação considera o potencial mátrico (Ψ), como variável independente e a umidade volumétrica (θ), como variável dependente.

$$\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: θ_v = umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial ($m^3 m^{-3}$); θ_r = umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1,5 MPa ($m^3 m^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($m^3 m^{-3}$); Ψ = potencial matricial (MPa); α , n , m = coeficientes da equação.

Com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105 °C, e com volume conhecido das amostras, calculou-se a Pt (EMBRAPA, 1997). Para calcular a Ds, dividiu-se a massa das amostras secas a 105 °C pelo volume do anel volumétrico (BLAKE & HARTGE, 1986).

A Mp e a mp foram determinadas utilizando o teor de água retida nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,006 MPa, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos, sendo que a água restante representa o volume de microporos (EMBRAPA, 1997). Portanto, conhecendo a Pt e a mp foi possível calcular a MP ($Pt = Mp + mp$).

Para determinar a CR, Ds, Mp, mp e Pt das 25 amostras coletadas para caracterização da área, processaram-se as amostras de uma só vez. Já para as amostras coletadas no primeiro e no terceiro ano do experimento, as 160 amostras coletadas em cada época de amostragem foram separadas em grupos de 32 unidades.

Após o ajuste das curvas de retenção utilizando a equação proposta por Genuchten (1980) (Equação 1), foi possível determinar o índice S para cada curva de retenção de água no solo, de acordo Dexter (2004), utilizando a equação 2.

$$S = (-n(\theta_s - \theta_r))((1 + 1/m)^{-(1+m)}) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: S = coeficiente angular da curva de retenção de água no ponto de inflexão; θ_r = umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1,5 MPa ($m^3 m^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($m^3 m^{-3}$); n, m = coeficientes da curva de retenção de água no solo (Equação 1).

5.13.2 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

O IHO foi determinado conforme descrito em Silva et al. (1994), calculando um valor de IHO para cada amostra, em função da densidade do solo. Para evitar restrições ao crescimento das plantas, valores críticos de umidade do solo foram associados quanto ao potencial mátrico, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração, representados, respectivamente, pelo teor de água na capacidade de campo, ou teor de água do solo no potencial matricial de $-0,01$ MPa (θ_{cc}) (HAISE et al., 1955); pelo teor de água no ponto de murcha permanente, ou teor de água do solo no potencial de $-1,5$ MPa (θ_{PMP}) (RICHARDS, 1965); pelo teor de água do solo em que a resistência à penetração (θ_{RP}) atinge 2 MPa (TAYLOR et al., 1966); e pelo teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10% (GRABLE & SIEMER, 1968).

No laboratório, as amostras foram devidamente preparadas e saturadas por meio de uma lâmina de água em uma bandeja, cobrindo 2/3 da altura das amostras.

Para obter a curva de retenção de água objetivando determinar o IHO, as amostras foram divididas em 8 grupos de 64 (2 profundidades x 32 subparcelas). Cada grupo de amostras foi submetido a uma das seguintes tensões: 0,002; 0,004; 0,006 MPa em mesas de tensão adaptada; e 0,01; 0,033; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa em câmaras de pressão descritas em Klute (1986). O tempo para equilíbrio variou desde 48 horas para a menor tensão, até quarenta dias para a maior tensão aplicada às amostras. Após atingir o equilíbrio as amostras foram submetidas ao teste de resistência à penetração e, em seguida, secas em estufa a 105 °C, por 48 horas, para determinar a umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997). A umidade

volumétrica (θ_v) foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

Com o gradiente de tensão ao qual as amostras foram submetidas, obteve-se um gradiente de umidade e conseqüentemente um gradiente de RP, sendo este o princípio das curvas de retenção de água e de resistência à penetração do solo para determinar o IHO.

Para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} utilizou-se o modelo matemático referente à equação 3, proposta por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, a qual incorpora a variável D_s na função empregada por Ross et al. (1991).

$$\theta_v = \exp(a + b D_s) \Psi^c \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: θ_v = umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$); Ψ = potencial matricial; a, b, c = coeficientes da equação.

Diferentemente da metodologia utilizada para determinar a CR, descrita no item 5.13.1, em que a mesma amostra foi submetida às diferentes tensões, para obter os limites do IHO foi necessário ter uma amostra para cada tensão utilizada, para estabelecer um gradiente de umidade entre as amostras. Portanto, foram coletadas 8 amostras por ponto de amostragem, já que ao serem avaliadas quanto à RP no penetrógrafo eletrônico as amostras são desestruturadas, não podendo ser mais utilizadas.

O penetrógrafo utilizado (Marconi-modelo MA 933) é composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg acoplada na extremidade de um braço mecânico, movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma haste metálica, com diâmetro de 6 mm e com ponteira cônica com semi-ângulo de 30° e área da base de $0,1256 cm^2$, foi utilizada para penetrar as amostras. A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de $1,0 cm min^{-1}$ até a profundidade de 4,0 cm. As medidas obtidas a partir da superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade foram descartadas, pois a resistência aumenta até determinada profundidade e depois se torna constante (TORMENA et al., 1998). Foi obtido um valor de RP a cada segundo de penetração da ponteira, obtendo um total de 180 valores (3 cm por amostra), dos quais foi retirado um valor médio de RP por amostra. As leituras

foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt”.

O valor crítico de umidade do solo (θ) para que a RP não ultrapasse 2,0 MPa (θ_{RP}), para cada amostra com densidade conhecida foi obtido pela relação funcional entre a RP, teor volumétrico de água (θ_v) e densidade do solo (D_s), ajustando os dados originais por meio da equação 4, proposta por Busscher (1990).

$$RP = d\theta_v^e D_s^f \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: RP = resistência à penetração (MPa); θ_v = teor volumétrico de água da amostra ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$); d, e, f = coeficientes da equação.

Assim, para obter o valor de θ_{RP} , substitui-se RP, na equação 3, pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

Por fim, o valor de θ_{PA} foi obtido por meio da equação 5.

$$\theta_{PA} = \theta_{SAT} - 0,1 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: θ_{PA} = teor de água do solo em que a porosidade de aeração é igual a 10% ($0,1 m^3 m^{-3}$); $\theta_{SAT} = (1 - D_s/2,65)$, sendo D_s o valor da densidade do solo ($g cm^{-3}$) e 2,65 o valor da densidade média das partículas em solos argilosos ($g cm^{-3}$) (Imhoff et al., 2001).

O IHO foi calculado utilizando a planilha eletrônica do Excel[®], proposta por Leão & Silva (2004), pela diferença entre o limite superior e inferior dos teores de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados, sendo o limite superior o menor valor θ_v entre θ_{CC} e θ_{PA} , e o limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} . Para o ajuste das equações 3 e 4 e obtenção dos coeficientes a, b, c, d, e, f, utilizou-se o software estatístico SigmaPlot 8.0.

5.14 Coleta, preparo e análise das amostras de solo quanto ao teor de matéria orgânica (MO)

Nas trincheiras abertas para coleta dos anéis volumétricos, foram também retiradas amostras deformadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. Para reduzir a variabilidade espacial, retirou-se solo das quatro paredes de cada trincheira, com auxílio de uma espátula, compondo uma amostra de, aproximadamente, 1 kg. Essas amostras foram colocadas em sacos plásticos abertos e colocadas para secar ao ar. Após secagem, as amostras foram destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, antes de serem submetidas às análises químicas.

A MO foi determinada pelo método de Walkley & Black adaptado e descrito por Raij et al. (2001).

5.15 Coleta, preparo e análise das amostras de agregados do solo

No perfil exposto pelas trincheiras foram retirados, com o auxílio de espátula, torrões de solo com dimensões aproximadas de 5 cm de altura por 15 cm de comprimento e 10 cm de largura, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper & Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936). O aparelho que movimentava verticalmente 4 conjuntos de peneiras imersos em água consta de um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade, tendo uma polia com eixo excêntrico, com 30 ciclos por minuto (MULLER, 2002). Ligado ao eixo excêntrico ha uma haste vertical com a função de sustentar quatro jogos de peneira e de mergulhar cada jogo em um tanque contendo água. Os jogos de peneiras são ajustados de tal forma que, quando ocorrer a oscilação vertical (3,5 cm), a amostra de solo depositada inicialmente no tamis superior mergulhe totalmente e depois suba até aflorar acima

do nível da água. É importante frisar que foi evitada a queda de água sobre as amostras pela borda superior da peneira, o que ocorre caso o nível da água esteja elevado ou o curso de deslocamento esteja desajustado, ou ainda, quando há bolhas de ar entre as peneiras.

Cada conjunto foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm. A análise de agregados foi realizada em duplicata, sendo possível processar 2 amostras por vez, já que o aparelho contém 4 conjuntos de peneiras.

Três subamostras de 25 gramas foram retiradas de cada amostra, duas para o tamisamento e uma para determinar o teor de água do solo no momento da avaliação.

As amostras para tamisamento, após serem pesadas, foram umedecidas levemente por meio de um borrifador de água. Esperou-se 10 minutos para que a umidade dentro dos agregados fosse uniformizada, e em seguida depositou-se as amostras na peneira superior do conjunto (malha de 2 mm).

O tamisamento mecânico em água foi realizado por 15 minutos. Após esse tempo de peneiramento, supõe-se que os falsos agregados se desfaçam inteiramente e que os agregados verdadeiros, vão passando para as peneiras inferiores onde serão retidos pelas malhas menores que suas dimensões. Finalmente, o material contido em cada peneira é passado para potes de alumínio, com ajuda de jatos de água, levado para secar em estufa a 105 °C por 48h, e pesado em balança com precisão de centésimo de grama. Uma sexta classe de agregados foi considerada como agregados menores que 0,105 mm, pela diferença entre massa de solo inicial e o somatório de solo retido em cada peneira.

Obtido o peso de solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, por meio da determinação do teor de água do solo, os valores de DMP (diâmetro médio ponderado) e DMG (diâmetro médio geométrico) foram calculados através das equações 6 e 7, respectivamente. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados (IEA), utilizando a equação 8 (CASTRO FILHO et al., 1998) e a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm.

Quanto maior for a porcentagem de agregados grandes, retidos nas peneiras com malhas maiores, maior será o DMP. O DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. O IEA representa a medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados. Quanto maior a quantidade de agregados

menores que 0,105 mm, menor será o IEA. Essas propriedades foram calculadas por meio das seguintes equações.

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (\text{xi} \cdot \text{wi}) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: x_i = diâmetro médio das classes; w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$\text{DMG} = \frac{\exp \sum_{i=1}^n \text{wp} \cdot \log \text{xi}}{\sum_{i=1}^n \text{wi}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: w_p = peso dos agregados de cada classe (g).

$$\text{IEA} = ((\text{peso da amostra seca} - \text{wp25})/\text{peso da amostra seca}) \cdot 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: w_{p25} = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

5.16 Produtividade da soja

A produtividade da soja foi determinada com base na produção de grãos obtida em 3 linhas de 8 m de comprimento em cada parcela experimental, sendo o teor de água dos grãos corrigido para 13%, e os valores convertidos em kg ha^{-1} .

5.17 Estudo Estatístico

Os dados originais foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas estatisticamente pelo teste t, no nível de 5 % de probabilidade, para as variáveis: matéria orgânica, estabilidade de agregados, produtividade, crescimento

radicular, porosidade e densidade do solo, de acordo com procedimentos propostos por Gomes (1990).

O ajuste do modelo matemático para determinar a curva característica da água no solo foi realizado utilizando o software SWRC (Soil Water Retention Curve – versão 3.00 beta) desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). Os limites do IHO referentes à curva de retenção e a resistência à penetração foram ajustados utilizando o software Sigma Plot 8.0. O IHO foi calculado utilizando planilha eletrônica do Excel desenvolvida por Leão & Silva (2004).

6 RESULTADOS

6.1 Raízes

6.1.1 Raízes das plantas de cobertura

A densidade de comprimento radicular e a massa da matéria seca das raízes das plantas de cobertura, cultivadas em sucessão às culturas de outono-inverno (girassol e triticales), e antecedendo a soja, nos três anos agrícolas em que foi realizado o experimento, estão apresentadas na figura 5.

No primeiro e no terceiro ano observa-se a separação dos tratamentos envolvendo plantas de cobertura em três grupos quanto à produção de raízes, ou seja, o milho e o sorgo em sucessão ao triticales com maior produção, o milho e o sorgo em sucessão ao girassol com produção intermediária, e a crotalária, tanto em sucessão ao triticales quanto ao girassol, com reduzida produção de raízes, sendo a sucessão girassol/crotalária o tratamento que proporcionou a menor produção de raízes da planta de cobertura.

O maior crescimento de raízes de milho em relação a outras espécies como aveia preta, guandu, mucuna preta, sorgo e tremoço azul, em solos contendo camada subsuperficial compactada, também foi constatado por Silva & Rosolem (2001). Rosolem et al. (2002), cultivando diferentes espécies em vasos contendo camada intermediária

compactada, verificaram que o milho e a crotalaria foram as espécies com maior e menor crescimento radicular, respectivamente, abaixo da camada com maior resistência à penetração.

A separação das espécies de cobertura em grupos, quanto ao crescimento radicular, ficou menos evidente no segundo ano do experimento, devido à menor produção de raízes em superfície, provavelmente, em razão dos baixos índices pluviométricos por ocasião do cultivo das plantas de cobertura no mês de outubro de 2004 (Figura 1), que também ocasionou menor produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 5). No entanto, observou-se maior exploração do perfil do solo pelas raízes de milho, quando cultivado em sucessão ao triticale, com diferenças significativas até na camada amostrada de 20 a 40 cm de profundidade.

Considerando que a colonização do perfil solo por raízes é uma forma de aumentar o teor de matéria orgânica em subsuperfície a médio ou longo prazo, visando a estruturação de solos degradados, além de criar canais que facilita a infiltração de água e o crescimento radicular das espécies com menor vigor de penetração em solos compactados, evidencia-se por meio dos resultados obtidos na figura 5 a necessidade de introduzir no sistema de rotação espécies com sistema radicular fasciculado.

Quanto à distribuição do sistema radicular das plantas de cobertura no perfil do solo nos três anos de coleta de amostras, observa-se que no primeiro ano houve menor exploração das camadas subsuperficiais em relação ao segundo e ao terceiro ano do experimento. A maior concentração das raízes na camada de 0 a 5 cm no primeiro ano do experimento pode ter ocorrido em razão dos maiores índices pluviométricos (Figura 1) entre os meses de outubro e novembro de 2003 (325 mm) em relação aos anos seguintes (200 e 260 mm, em 2004 e 2005, respectivamente).

A manutenção do solo em condições hídricas ideais permite que a planta tenha as suas exigências em água e nutrientes atendidas, e com isso apresente maior crescimento da parte aérea, resultando em maior área fotossintética. Moreira & Siqueira (2002) afirmam que até 60 % do C fotoassimilado pode ser consumido pelo sistema radicular, sendo metade deste, em média, utilizado pela respiração, e o restante para formação de tecidos, mucigel e exsudação radicular. Segundo Matthew et al. (2001), as raízes recém-formadas (mais jovens) e, portanto, mais próximas à superfície do solo, são as que recebem a maior parte do C direcionado ao sistema radicular.

A presença de solo compactado na camada de 5 a 10 cm de profundidade, constatada por ocasião da amostragem realizada para caracterização da área, antes de iniciar o experimento, também contribuiu para o confinamento das raízes nos primeiros centímetros do perfil do solo.

A maior exploração das raízes das plantas de cobertura em profundidade, nos dois últimos anos de realização do experimento, pode ser explicada pela menor umidade do solo em superfície devido aos menores índices pluviométricos, além das melhorias das condições estruturais do solo proporcionadas pelas rotações de culturas. Os solos mais bem estruturados normalmente favorecem o desenvolvimento radicular, pois o caminho natural do crescimento das raízes no solo é através dos macroporos ou espaços vazios entre os agregados, que em solos não compactados são interligados (VEPRASKAS, 1994).

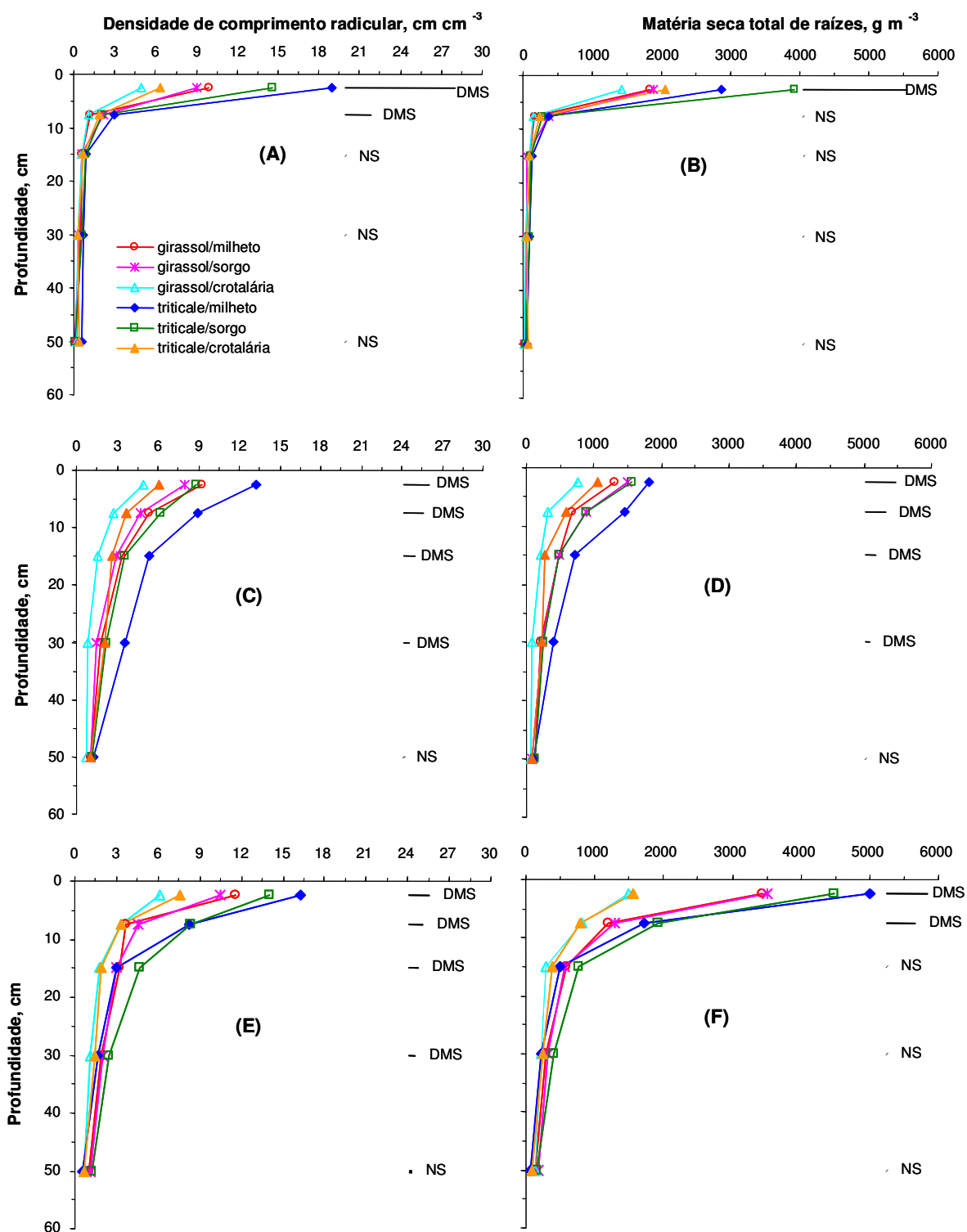


Figura 5. Densidade de comprimento radicular e massa da matéria seca de raízes das plantas de cobertura, referente às amostragens realizadas no primeiro ano (A e B, respectivamente), no segundo ano (C e D, respectivamente) e no terceiro ano do experimento (E e F, respectivamente). NS e DMS = não significativo e diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

6.1.2 Raízes da soja

Em geral, a escarificação do solo promoveu o menor crescimento das raízes de soja, já que os resultados foram iguais ou inferiores aos obtidos com o cultivo de plantas de cobertura (Figura 6). Uma das explicações para esse resultado seria que, com o rompimento da compactação do solo, ocorreu a redução da proliferação de raízes laterais, comum quando há limitações físicas à penetração das raízes no perfil do solo (ZONTA et al., 2006). Além disso, a ausência de cultivo de plantas de cobertura no tratamento envolvendo escarificação do solo proporcionou uma quantidade menor de palha sobre o solo durante o cultivo da soja, o que, provavelmente, prejudicou a conservação da umidade do solo, principalmente na camada superficial (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990; SALTON & MIELNICZUK, 1995), podendo ter influenciado na menor produção de raízes (COALE & GROVE, 1986).

No primeiro ano do experimento (safra 2003/2004), a densidade de comprimento radicular da soja na linha de semeadura (Figura 6 A), na camada de 0 a 5 cm, foi maior quando cultivada em sucessão aos tratamentos triticale/milheto; triticale/sorgo; girassol/milheto; e girassol/sorgo. Na entrelinha de semeadura (Figura 6 B), o crescimento radicular da soja com a sucessão girassol/sorgo foi inferior às sucessões triticale/sorgo, triticale/milheto e girassol/milheto, porém superior aos tratamentos envolvendo crotalária ou escarificação.

Nesse mesmo ano de avaliação do experimento, a sucessão triticale/milheto foi o tratamento que promoveu o maior crescimento radicular da soja nas camadas de 5 a 10 cm e 10 a 20 cm, na linha e na entrelinha, sendo que na camada de 10 a 20 cm a densidade do comprimento radicular na entrelinha de semeadura não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos triticale/sorgo e triticale/milheto. Em profundidade, ou seja, na camada de 20 a 40 cm, o tratamento triticale/milheto voltou a promover maior crescimento radicular da soja na posição de entrelinha.

O maior crescimento das raízes da soja nessas camadas, envolvendo essas sucessões de culturas, deve-se, provavelmente, ao maior crescimento radicular das culturas anteriores, que ao morrerem deixaram canais no solo, orientando o crescimento em profundidade das raízes da cultura sucessora, promovendo a exploração mais uniforme do

perfil do solo (RUSSEL, 1981; TORRES & SARAIVA, 1999). Ehlers et al. (1983) também afirmam que em SSD os canais verticais contínuos servem como rotas, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando maior colonização das raízes em profundidade.

Além do efeito físico desses canais em facilitar o crescimento radicular em profundidade, esses bioporos apresentam um microclima favorável ao crescimento das raízes, na medida em que há maior teor de MO, seja oriunda de exsudados radiculares ou mesmo do processo de decomposição das raízes mortas. A MO do solo exerce um importante papel no desenvolvimento das raízes, pois funciona como fonte e reserva de nutrientes e na complexação de metais como o Al e Mn, reduzindo o efeito tóxico para a planta (SANTOS & CAMARGO, 1999).

Quanto à escarificação, Torres & Saraiva (1999) argumentam que o aumento da porosidade total promovida pela ação de implementos mecânicos de mobilização do solo e de rompimento da compactação não garantem o maior crescimento das raízes, pois destroem a continuidade dos poros.

Portanto, uma alternativa para contornar o problema da compactação refere-se ao uso de rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, aumentando a resistência à penetração crítica (a partir da qual não ocorre crescimento radicular) determinada por penetrômetros ou penetrográfos, pois esses equipamentos perfuram o solo de forma linear, sem acompanhar a trajetória dos canais existentes, os quais podem ser explorados pelas raízes.

No segundo ano de avaliação do experimento (safra 2004/2005), o crescimento radicular da soja até 40 cm de profundidade, na linha de semeadura (Figura 6 C), foi novamente maior com o tratamento triticale/milheto, não havendo diferenças significativas quando comparado ao tratamento triticale/sorgo nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e de 10 a 20 cm, e aos tratamentos triticale/sorgo e girassol/milheto na camada de 20 a 40 cm. Na posição de amostragem referente à entrelinha da cultura (Figura 6 D), a densidade do comprimento radicular da soja foi maior com tratamento triticale/sorgo nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm, sendo que nas camadas de 5 a 10 cm e de 10 a 20 cm não houve diferença significativa em relação ao tratamento triticale/milheto. Já a menor produção de raízes de soja na entrelinha ocorreu com os tratamentos envolvendo escarificação.

No último ano de avaliação do experimento (safra 2005/2006), diferenças significativas quanto ao crescimento radicular da soja na linha de semeadura ocorreram apenas na camada de 10 a 20 cm (Figura 6 E), com maior densidade de raízes nos tratamentos envolvendo o cultivo de milho como planta de cobertura, independente do cultivo de girassol ou triticale como espécie de outono-inverno. Na entrelinha de semeadura houve, na camada de 0 a 5 cm (Figura 6 F), menor produção de raízes com os tratamentos com ausência de espécies de monocotiledôneas, com sistema radicular fasciculado, no sistema de rotação, ou seja, com os tratamentos girassol/crotalária e escarificação/crotalária.

Comparando os tratamentos que em geral proporcionaram as maiores densidades do comprimento radicular da soja, tanto na linha como na entrelinha de semeadura, ou seja, triticale/milho, triticale/sorgo e girassol/milho, observa-se que, na camada de 0 a 5 cm, ocorreu um crescimento em torno de 30 a 40 % a mais de raízes de soja na entrelinha em relação à linha de semeadura no primeiro ano de avaliação do experimento (Figura 6 A e 6 B). No entanto, essas diferenças foram diminuindo, ou até mesmo se anulando com a repetição dos tratamentos nos anos seguintes.

A redução na superioridade de produção de raízes de soja na entrelinha em relação a linha de semeadura, pode estar relacionado com a melhoria das condições estruturais do solo, com essas rotações de culturas, pois, a presença de camada impeditiva ao crescimento radicular faz com que as raízes se entortem e cresçam paralelamente à superfície do solo (JORGE, 1985), além de estimular a proliferação de raízes laterais finas (RUSSEL & GOSS, 1974), que na sua maioria encontram-se nos primeiros 15 cm do perfil do solo (COALE & GROVE, 1986).

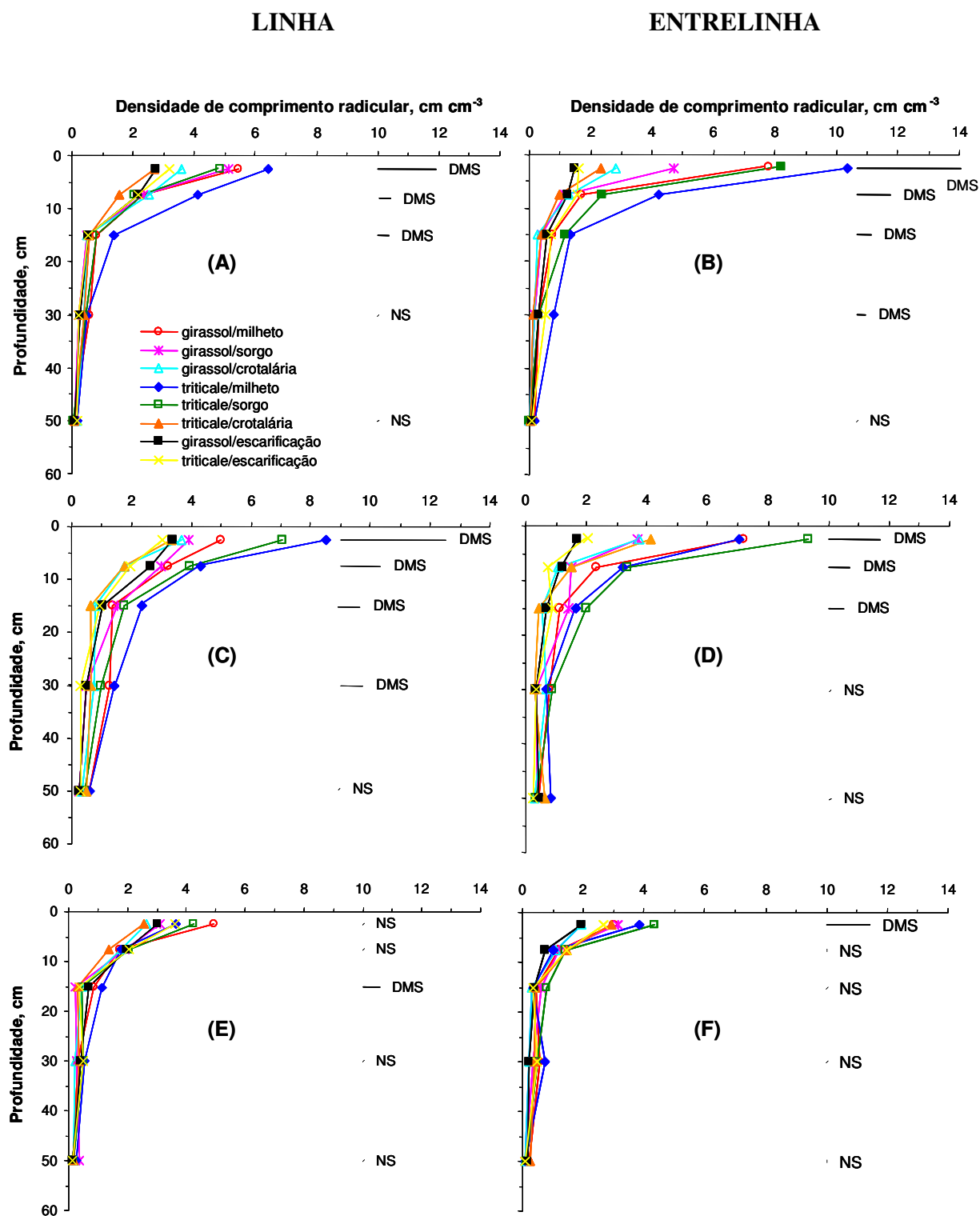


Figura 6. Densidade de comprimento radicular da soja na linha e na entrelinha de semeadura, referente às amostragens realizadas no primeiro ano (A e B), no segundo (C e D) e no terceiro ano do experimento (E e F).

6.2 Teor de matéria orgânica

Os resultados de teor de matéria orgânica (MO) do solo referente às amostragens realizadas após o manejo das plantas de cobertura e antes do cultivo da soja no primeiro e no terceiro ano do experimento estão apresentados nas tabelas 7 e 8, respectivamente. O cultivo de diferentes espécies na safra de outono-inverno (girassol ou triticale) não interferiu significativamente nos resultados de MO, mesmo após três anos de rotação de culturas.

No primeiro ano de avaliação dos tratamentos não constatou-se diferenças significativas no teor de MO (Tabela 7) com o cultivo das diferentes espécies de plantas de cobertura ou com a escarificação do solo, cuja área foi mantida em pousio após o cultivo de outono-inverno. Porém, observou-se um acréscimo de 1,65 a 2,45 g dm⁻³ de MO com o tratamento envolvendo crotalária em relação aos demais, na camada de 0 a 5 cm de profundidade. Essas diferenças, mesmo não sendo significativas estatisticamente, devem ser consideradas, visto que representam cerca de 0,48 a 0,71 Mg ha⁻¹ de carbono orgânico incorporados ao solo, logo no primeiro ano após a implantação dos manejos. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Lovato et al. (2004), que enfatizam a importância da introdução de leguminosas no sistema de rotação para o incremento no teor de MO no solo.

Após três anos com repetição dos tratamentos (Tabela 8), observou-se, novamente na camada de 0 a 5 cm, maior teor de MO com o tratamento envolvendo crotalária, mesmo não sendo significativamente diferente dos tratamentos com cultivo de sorgo e de milho, porém foi superior ao manejo com escarificação do solo, cujas parcelas permaneceram em pousio entre os cultivos de outono-inverno e de verão durante três anos agrícolas. O menor aporte de material vegetal, tanto da parte aérea das plantas como radicular, fez com que esse manejo proporcionasse, na camada superficial, os menores incrementos no teor de MO, quando comparado aos valores iniciais de caracterização da área (Tabela 1), assim como aos resultados obtidos no primeiro ano de avaliação do experimento (Tabela 7), corroborando resultados encontrados na literatura (TORMENA, et al., 2004; FRANZLUEBBERS, 2002; ARAÚJO et al., 2004).

No entanto, observando a figura 7, pode-se inferir que, em futuras avaliações, diferenças significativas poderão ocorrer, inclusive com interações entre as espécies de outono-inverno e o manejo de primavera, se forem mantidos os tratamentos. Esta suposição está baseada nos resultados apresentados na figura 7 B, em que o teor de MO no tratamento girassol/crotalária se destacou dos demais, em todas as camadas avaliadas, assim como no tratamento triticale/milheto, nas camadas de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm.

Os incrementos no teor de MO do solo entre a primeira coleta para caracterização da área (Tabela 1) e a última, ou seja, com três anos de repetição das rotações de culturas (Tabela 8), em SSD, ocorreram em todos os tratamentos, o que está de acordo com Reeves (1997), que afirma que nos sistemas com mínimo revolvimento do solo, verifica-se aumento nos teores de matéria orgânica do solo, principalmente na superfície. Segundo Tormena et al. (2004), essa concentração da MO na superfície em SSD é importante para a qualidade do solo, uma vez que diferentes tipos de estresses relacionados com aplicação de agroquímicos, fertilizantes, chuva e tráfego de máquinas incidem diretamente sobre o solo. De acordo com Franzluebber (2002b), a concentração de MO nas camadas superficiais, em SSD, permite maior estabilidade do sistema poroso, o que segundo Dias Júnior (2000), aumenta a capacidade do solo em suportar cargas sem sofrer compactação adicional (maior pressão de preconsolidação), pois aumenta a força de união entre as partículas, aumentando a estabilidade dos agregados, além de diluir a carga aplicada sobre o solo, diminuindo o efeito compactador.

Os sistemas de manejo que proporcionam aumentos no estoques de MO no solo, além de promoverem expressivas melhorias na qualidade do solo, resultam na retirada de CO₂ da atmosfera (BAYER, 2000), contribuindo para a mitigação do efeito estufa (SAMPSON & SCHOLLES, 2000). Segundo Follett (2001), o SSD constitui uma prática agrícola que promove o aumento do teor de carbono orgânico no solo (COS), tanto pelo aporte constante de material vegetal, como pela redução da taxa de decomposição da MO.

Considerando que a matéria orgânica do solo possui cerca de 58 % de carbono orgânico (RAIJ et al., 1991), foi possível calcular a quantidade de carbono incorporado ao solo. Na camada de 0 a 20 cm de profundidade, que foi a camada que apresentou os maiores incrementos de MO com três anos de rotação de culturas, quando comparam-se apenas os resultados obtidos nas áreas cultivadas com milho, sorgo e crotalária, além da área manejada com escarificador e mantida em pousio, independente da

espécie de outono-inverno, observa-se que os incrementos nas quantidades de carbono orgânico no perfil do solo foram da ordem de 2,3, 2,8, 3,9 e 2,2 Mg ha⁻¹ de carbono orgânico, respectivamente.

Esses resultados equivalem em média, a aproximadamente, 0,77, 0,93, 1,30 e 0,73 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, inferiores aos obtidos por Lovato et al. (2004), que foram da ordem de 3,92 a 6,90 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, considerando a camada de 0 a 17,5 cm, em experimento de 16 anos em SSD, em condições de clima subtropical do Sul do país. Porém, foram superiores aos relatados por West & Post (2002), que verificaram, em média, aumentos no teor de COS em torno de 0,57 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (na camada de 0 a 30 cm), em revisão realizada sobre o assunto, utilizando dados de 67 experimentos em SSD de longa duração, realizados em diferentes, inclusive no Brasil.

Tabela 7. Resultados da análise do teor de matéria orgânica, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).

Tratamentos	Teor de Matéria Orgânica (g dm ⁻³)				
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm	20 a 40 cm	40 a 60 cm
Cultivo de inverno (CI)					
Girassol	32,3	27,6	26,3	22,8	22,3
Triticale	31,7	27,42	25,56	22,5	22,1
Manejo de primavera (MP)					
Milheto	31,9	26,2	24,7	22,1	22,0
Sorgo	31,6	28,2	26,1	22,1	22,0
Crotalária	33,5	27,7	26,6	23,1	22,2
Escarificação	31,1	27,98	26,38	23,2	22,0
Valor de F⁽¹⁾					
Cultivo de inverno	0,55 ns	0,61 ns	1,90 ns	0,23 ns	0,37 ns
Manejo de primavera (MP)	1,42 ns	1,69 ns	1,24 ns	1,11 ns	0,62 ns
CI x MP	0,31 ns	2,06 ns	1,13 ns	1,53 ns	0,26 ns
CV (%)					
Cultivo de inverno	5,83	5,38	10,83	3,95	5,56
Manejo de primavera (MP)	9,35	8,93	8,76	8,74	7,23

⁽¹⁾ ns: não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

Tabela 8. Resultados da análise do teor de matéria orgânica, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).

Tratamentos ⁽¹⁾	Teor de Matéria Orgânica (g dm ⁻³)				
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	10 a 20 cm	20 a 40 cm	40 a 60 cm
Cultivo de inverno (CI)					
Girassol	35,3	29,4	27,6	23,1	21,9
Triticale	35,4	29,8	27,9	23,7	22,8
Manejo de primavera (MP)					
Milheto	35,8 ab	28,9	27,0	23,9	22,9
Sorgo	35,5 ab	29,9	27,6	22,5	22,1
Crotalária	36,6 a	30,2	28,7	24,0	22,3
Escarificação	33,3 b	29,8	27,6	23,2	21,9
Valor de F⁽²⁾					
Cultivo de inverno	0,01 ns	1,63 ns	0,50 ns	1,05 ns	0,33 ns
Manejo de primavera (MP)	2,32 *	1,02 ns	1,01 ns	2,47 ns	0,44 ns
CI x MP	0,91 ns	0,73 ns	0,56 ns	1,09 ns	1,43 ns
CV (%)					
Cultivo de inverno	4,01	7,51	5,08	8,26	4,82
Manejo de primavera (MP)	11,51	5,95	7,21	12,70	5,52

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %.

⁽²⁾ ns e * = não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

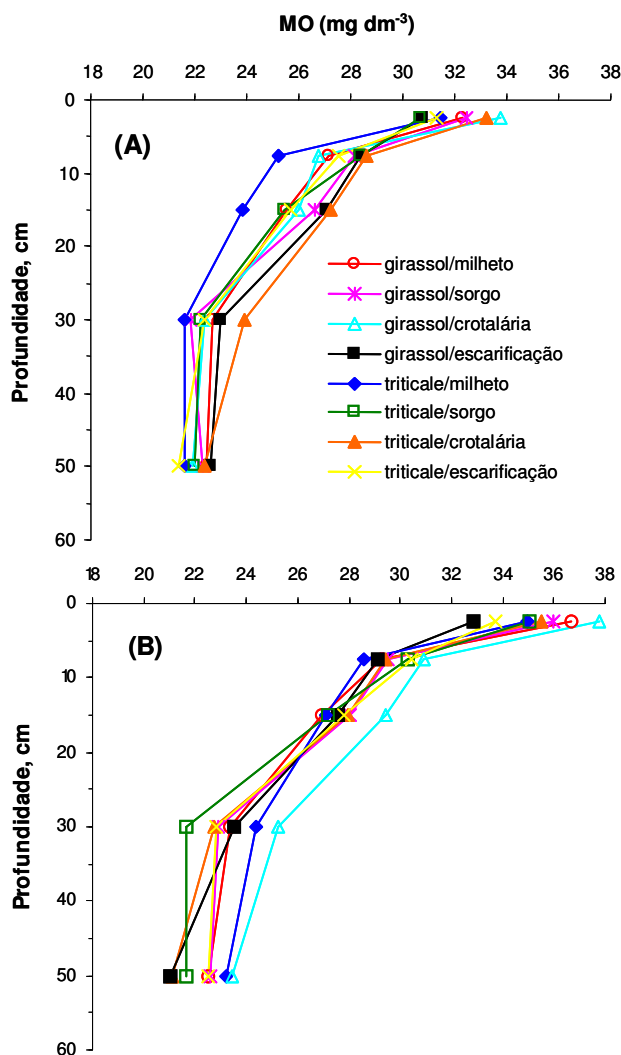


Figura 7. Teor de matéria orgânica do solo, referente às amostras coletadas em cada tratamento, antes do cultivo da soja no primeiro (A) e no terceiro ano (B) do experimento.

6.3 Estabilidade de agregados

A avaliação da estabilidade dos agregados no primeiro ano do experimento (Tabela 9) revelou que o cultivo de triticale como espécie de outono-inverno resultou em maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm, maior DMG e maior DMP, na camada de 0 a 5 cm, além de maior DMP na camada de 5 a 10 cm, significando uma estruturação melhor do solo com a utilização dessa gramínea. Quanto ao manejo de primavera, os resultados foram significativos apenas na camada subsuperficial de 5 a 10 cm, revelando que a escarificação do solo e a ausência do cultivo de plantas de cobertura proporcionou

menor porcentagem de agregados maiores que 2 mm e menor DMP, porém, não havendo diferenças significativas em relação ao cultivo de crotalária e de sorgo.

A ação mecânica das hastes do escarificador, apesar de não revolver o solo, promove a ruptura da estrutura do solo, que tem a ação desagregadora intensificada com a utilização do rolo destorroador, que quebra os torrões para diminuir a rugosidade do terreno para facilitar o processo de semeadura. Essa ação desagregadora foi maior em subsuperfície do que em superfície devido, provavelmente, ao maior teor de matéria orgânica na camada superficial (Figura 7 A), auxiliando na estabilidade dos agregados. Na literatura encontram-se relatos apontando alguns inconvenientes da escarificação do solo, como a redução nos teores de matéria orgânica a qual reflete na redução da estabilidade da estrutura e em recompactação do solo (BUSSCHER et al., 2002).

Na avaliação realizada após três anos do início do experimento (Tabela 10), constatou-se maior estruturação do solo em todos os tratamentos, comparando com os resultados obtidos antes de iniciar o experimento e no primeiro ano de aplicação dos tratamentos. Essa maior estruturação do solo está relacionada com o aporte de MO (item 6.2), pois segundo resultados apresentados por Oliveira et al. (2004), há correlação altamente significativa entre o aumento no teor de MO e o aumento da estabilidade de agregados até 10 cm de profundidade.

Entre os tratamentos, observou-se, após três anos de repetição das rotações de culturas (Tabela 10), diferenças significativas apenas em relação ao cultivo de triticale em comparação ao de girassol, em que a gramínea proporcionou maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm na camada de 0 a 5 cm.

As diferenças encontradas na estruturação do solo com o cultivo de triticale em relação ao girassol, tanto no primeiro como no terceiro ano de avaliação do experimento, podem ser explicadas pelo efeito que as raízes apresentam na agregação do solo, já que obteve-se, em geral, maior crescimento radicular tanto na amostragem realizada na cultura da soja, como das plantas de cobertura, em parcelas cultivadas com essa gramínea. Os pesquisadores explicam esses resultados em função da maior densidade de raízes das monocotiledôneas em relação às dicotiledôneas, e pela melhor distribuição do sistema radicular que favorece a uniformização da distribuição dos exsudados no solo

(MIELNICZUK, 1999). O maior efeito de raízes de monocotiledôneas em relação às dicotiledôneas na estruturação do solo foi constatado por Castro Filho et al. (1998). Os autores observaram que com a rotação milho/trigo/milho a estabilidade do solo, na profundidade de 0 a 10 cm, foi 20 % superior comparada com a rotação soja/trigo/soja.

Apesar de não haver diferenças significativas para a interação entre o cultivo de outono-inverno e o manejo de primavera, o efeito das espécies de monocotiledôneas na estruturação do solo está representado na figura 8 A., em que no primeiro ano de avaliação do experimento, os tratamentos com ausência de espécies com sistema radicular fasciculado, ou seja, com girassol/crotalária e girassol/escarificação, proporcionaram menores quantidades de agregados com diâmetro superior a 2 mm na camada de 0 a 5 cm. Já no tratamento em que a escarificação do solo foi feita em parcelas cultivadas com triticales, a descompactação do solo não proporcionou desagregação em sua superfície. O efeito benéfico do triticales na estabilidade dos agregados do solo fica claro quando comparam-se os tratamentos girassol/crotalária e triticales/crotalária, em que a presença da espécie com sistema radicular fasciculado como cultura de outono-inverno proporcionou aumentos de, aproximadamente, 10 % na quantidade de agregados maiores que 2 mm nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade.

Quanto aos resultados de estabilidade de agregados nas parcelas escarificadas, constatou-se que o efeito desagregador da descompactação mecânica, observado na primeira avaliação, foi recuperado apenas com o cultivo de outono-inverno e de verão por três anos consecutivos (Figura 8 B).

Tabela 9. Resultados da análise de estabilidade de agregados, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).

Tratamentos ⁽¹⁾	Agregados >2mm	DMP ⁽³⁾	DMG ⁽⁴⁾	IEA ⁽⁵⁾
	(g g ⁻¹)	----- (mm) -----		(%)
0 a 5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,82 b	4,18 b	3,50 b	97,13
Triticale	0,88 a	4,43 a	4,10 a	98,21
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,87	4,40	3,93	97,05
Sorgo	0,88	4,42	3,83	97,79
Crotalária	0,84	4,28	3,79	97,82
Escarificação	0,80	4,12	3,64	98,02
Valor de F ⁽²⁾				
Cultivo de inverno	5,57 *	5,60 *	5,71 *	3,01 ns
Manejo de primavera (MP)	1,61 ns	1,63 ns	0,22 ns	0,46 ns
CI x MP	1,00 ns	0,79 ns	0,52 ns	0,34 ns
CV (%)				
Cultivo de inverno	20,65	16,94	44,64	3,12
Manejo de primavera (MP)	11,11	9,14	8,92	1,23
5 a 10 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,79	4,09	3,08 b	96,54
Triticale	0,82	4,17	3,78 a	97,67
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,84 a	4,29 a	3,65	97,35
Sorgo	0,82 ab	4,20 ab	3,00	97,02
Crotalária	0,80 ab	4,10 ab	3,50	96,89
Escarificação	0,75 b	3,91 b	3,56	97,18
Valor de F				
Cultivo de inverno	1,02 ns	0,52 ns	4,45 *	2,99 ns
Manejo de primavera (MP)	2,06 *	2,21 *	0,76 ns	0,09 ns
CI x MP	0,84 ns	0,76 ns	0,36 ns	0,56 ns
CV (%)				
Cultivo de inverno	15,07	12,31	57,63	3,29
Manejo de primavera (MP)	17,29	11,02	24,21	1,58

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %. ⁽²⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ⁽³⁾ Diâmetro médio ponderado. ⁽⁴⁾ Diâmetro médio geométrico. ⁽⁵⁾ Índice de estabilidade de agregados.

Tabela 10. Resultados da análise de estabilidade de agregados, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).

Tratamentos ⁽¹⁾	Agregados >2mm (g g ⁻¹)	DMP ⁽³⁾	DMG ⁽⁴⁾	IEA ⁽⁵⁾ (%)
		------(mm)-----		
0 a 5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,91 b	4,57	4,04	97,83
Triticale	0,96 a	4,81	3,93	98,63
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,93	4,70	4,00	97,84
Sorgo	0,91	4,58	4,15	98,28
Crotalária	0,93	4,67	3,83	98,29
Escarificação	0,96	4,82	3,96	98,51
Valor de F ⁽²⁾				
Cultivo de inverno	2,33 *	2,42 ns	0,68 ns	1,40 ns
Manejo de primavera (MP)	0,38 ns	0,41 ns	1,03 ns	0,17 ns
CI x MP	0,49 ns	0,48 ns	0,85 ns	0,17 ns
CV (%)				
Cultivo de inverno	15,28	14,03	7,55	2,28
Manejo de primavera (MP)	6,14	5,79	8,47	0,88
5 a 10 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,94	4,74	4,13	98,86
Triticale	0,96	4,83	4,05	98,94
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,93	4,69	3,98	98,66
Sorgo	0,96	4,85	4,24	98,93
Crotalária	0,95	4,80	4,14	98,99
Escarificação	0,95	4,80	3,99	99,00
Valor de F				
Cultivo de inverno	2,32 ns	2,34 ns	0,24 ns	0,15 ns
Manejo de primavera (MP)	1,00 ns	1,10 ns	0,62 ns	0,47 ns
CI x MP	2,54 ns	2,80 ns	2,45 ns	0,73 ns
CV (%)				
Cultivo de inverno	6,79	5,87	5,44	0,25
Manejo de primavera (MP)	4,45	4,03	8,68	0,45

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %. ⁽²⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ⁽³⁾ Diâmetro médio ponderado. ⁽⁴⁾ Diâmetro médio geométrico. ⁽⁵⁾ Índice de estabilidade de agregados.

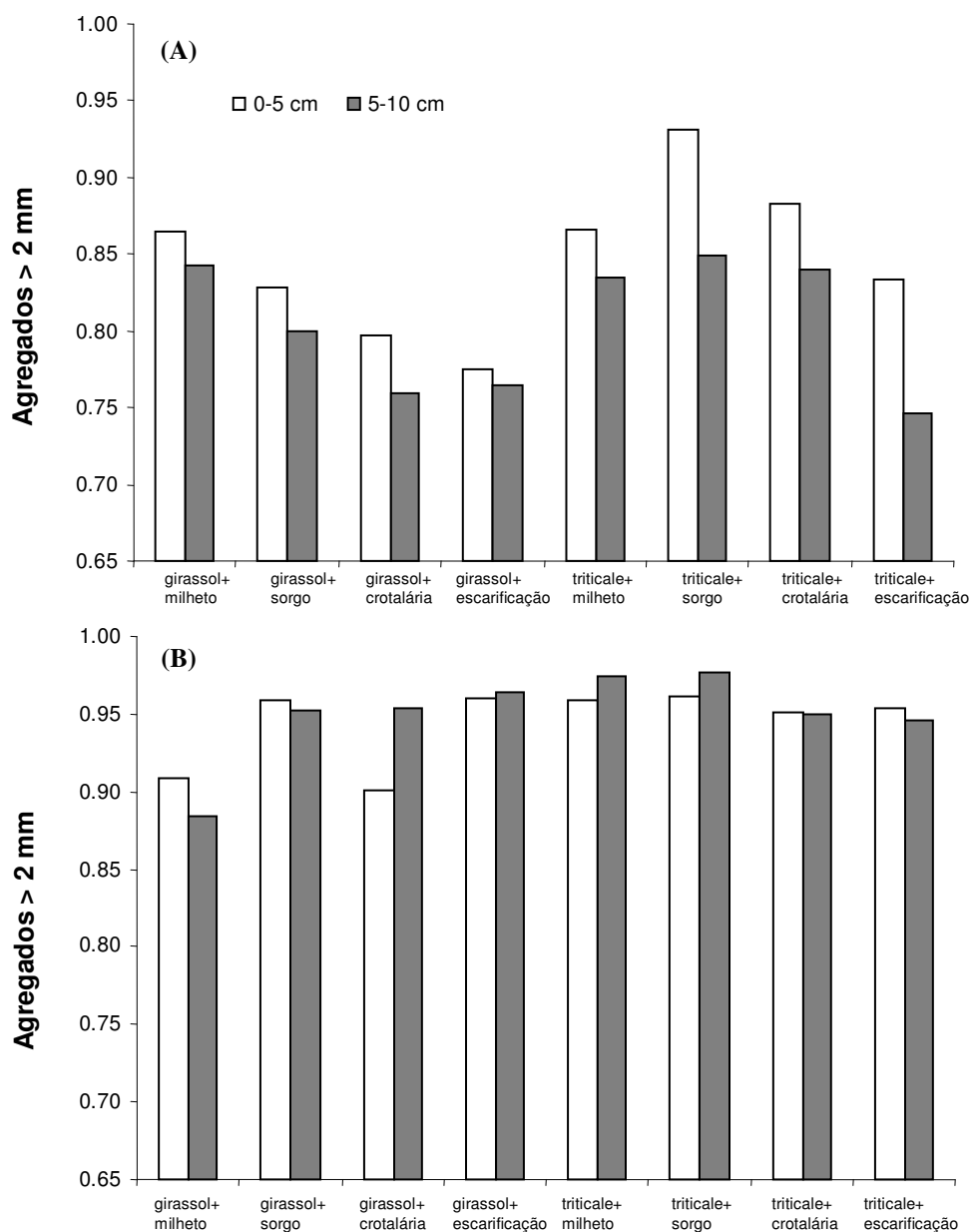


Figura 8. Teor de agregados maiores que 2 mm, nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, no primeiro (A) e no terceiro ano (B) de aplicação dos tratamentos.

6.4 Densidade do solo, macro, microporosidade e porosidade total

Os resultados referentes à porosidade total (Pt), macro (Mp) e microporosidade (mp), além da densidade do solo (Ds), das amostras coletadas em cinco profundidades no perfil do solo, antes do cultivo a soja, no primeiro e no terceiro ano do experimento, estão apresentados nas tabelas 11 e 12, respectivamente.

Em nenhuma das épocas de amostragem observou-se interação significativa entre o cultivo de outono-inverno e o manejo de primavera. As espécies de outono-inverno também não diferiram significativamente quanto a essas variáveis analisadas. No entanto, comparando os manejos de primavera constatou-se, no primeiro ano de avaliação, efeitos significativos da escarificação do solo no aumento da porosidade total e da macroporosidade na camada de 7,5 a 12,5 cm de profundidade, sendo que os tratamentos envolvendo o cultivo de espécies de cobertura não diferiram entre si. Resultados semelhantes foram obtidos por Secco et al. (2005), na camada de 7 a 14 cm, onde os autores observaram menor macroporosidade em SSD contínuo por vários anos, em solo de textura argilosa, em relação a área escarificada ou cultivada em sistema de cultivo convencional, com aração e gradagem.

O volume de macroporos de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na camada de 7,5 a 12,5 cm, proporcionado pela escarificação do solo, superou o limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ estabelecido por Grable & Siemer (1968) como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento das plantas. Tormena et al. (2002) também observaram diferenças no volume de macroporos entre áreas mantidas em SSD e escarificadas, na camada de 0 a 10 cm, em um solo de textura argilosa. Os autores constataram macroporosidade média de $0,14$ e $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como resultado da escarificação e da manutenção da área em SSD sem intervenção mecânica, respectivamente. Segundo Torres & Saraiva (1999), em solos de textura argilosa é comum encontrar reduzida macroporosidade, ou seja, abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, devido à menor superfície específica das partículas. A probabilidade do volume de macroporos atingir valores críticos aumenta em solos argilosos conduzidos em SSD devido à ausência de mobilização do solo, e pela acomodação das partículas seja naturalmente ou por forças exercidas na superfície do solo (RICHART et al., 2005).

As maiores diferenças nos resultados de porosidade total e macroporosidade obtidos no manejo com escarificador em relação ao cultivo de plantas de cobertura ocorreram justamente na camada mais compactada, apontada nos testes de resistência à penetração realizada por ocasião da caracterização da área (Tabela 1). Porém, não se constatou efeito da escarificação na redução da densidade do solo, como também observado por Abreu et al. (2004). Segundo Evans et al. (1996), a densidade do solo, determinada pela técnica do anel volumétrico, é uma medida relativamente não sensível aos efeitos da escarificação sobre o solo. Para Abreu et al. (2004), a D_s do solo mostra-se como um parâmetro menos confiável para detectar a compactação do solo do que a resistência mecânica à penetração das raízes.

A microporosidade do solo também não foi influenciada no primeiro ano de aplicação dos tratamentos. Segundo Hillel (1982), em solos compactados ocorre a redução do volume de poros totais e de macroporos, enquanto o volume de microporosidade permanece praticamente inalterado. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pela compactação do solo. Já Silva et al. (1986) verificaram que, com o aumento do nível da compactação houve, aumento da microporosidade à custa da diminuição da macroporosidade.

Na avaliação realizada antes do cultivo da soja no terceiro ano de condução do experimento (Tabela 12), observou-se, na camada superficial do solo (0 a 5 cm), maior proporção de macroporos com o cultivo de plantas de cobertura em relação à escarificação, e menor densidade do solo, principalmente quando utilizou-se a crotalária como espécie de cobertura, mesmo não havendo diferenças estatísticas quanto à porosidade total. Esse resultado provavelmente está relacionado com o incremento no teor de MO entre o primeiro e o terceiro ano de condução do experimento, que foi maior nos tratamentos envolvendo cultivo de plantas de cobertura, principalmente com a utilização dessa leguminosa (Tabelas 7 e 8).

A MO exerce influência direta na densidade do solo por possuir menor densidade de partículas, e indireta na medida que favorece a estruturação de solos compactados, pois, devido ao seu efeito cimentante, une as partículas individualizadas do solo em macroagregados, reduzindo a obstrução do espaço poroso (KIEHL, 1979).

A maior macroporosidade em solos estruturados ocorre devido à maior proporção de macroagregados, pois a aproximação de macroagregados resulta em espaços maiores que os encontrados com a aproximação de microagregados ou partículas individualizadas, aumentando a aeração do solo.

Outra explicação para a maior macroporosidade em solos cultivados por três anos consecutivos com plantas de cobertura, em relação ao tratamento escarificado no primeiro ano do experimento e mantido em pousio entre o cultivo de inverno e de verão, está relacionada com a colonização de raízes, principalmente na camada superficial do solo, pois, ao morrerem, as raízes deixam canais no solo, também conhecidos como bioporos, que favorecem a difusão de oxigênio, as trocas gasosas e a infiltração de água (ABREU et al., 2004).

Já em camadas mais profundas do solo, ou seja, 15 a 20 cm e 27,5 a 32,5 cm, constatou-se maior efeito da escarificação do solo em relação ao cultivo de plantas de cobertura na redução da compactação do solo, pois observou-se maior macroporosidade e menor microporosidade com a intervenção mecânica em relação à biológica, provavelmente, devido à menor colonização de raízes em profundidade.

Ao avaliar a camada de 7,5 a 12,5 cm, a qual apresentava-se em maior estado de compactação antes de iniciar o experimento (Tabela 1), pode-se verificar que, logo após a escarificação do solo, ou seja, na avaliação realizada logo após o manejo das plantas de cobertura no primeiro ano de condução do experimento, o manejo mecânico proporcionou o melhor efeito na descompactação do solo, levando em consideração o efeito no aumento da macroporosidade (Tabela 11). No entanto, passados três anos da realização desse manejo, observou-se que mantendo as parcelas escarificadas em pousio entre o cultivo de outono-inverno e de verão, ocorreu a redução da macroporosidade de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 11), o que demonstra uma tendência de acomodação das partículas do solo no espaço poroso, revelando que com o passar do tempo uma nova operação de escarificação será necessária, corroborando resultados obtidos por Ralisch et al. (2001) e Tavares Filho et al. (2006), que concluíram que o efeito residual da escarificação é pouco duradouro.

Para Abreu et al. (2004), o efeito da mobilização do solo sobre a macroporosidade não persiste devido à reconsolidação ocorrida em solos mobilizados e que recebem sucessivos ciclos de umedecimento e secagem. Para Kochhann et al. (2000), a

persistência dos efeitos da escarificação na descompactação de solo está relacionada com o cultivo de plantas com sistema radicular abundante, que ocupam as fendas geradas no solo pela operação mecânica, assegurando a estabilidade dos agregados.

Por outro lado, com três anos de cultivo de plantas de cobertura, independente da espécie utilizada, houve incremento no volume de macroporos. Assim, fica claro o efeito benéfico do cultivo de plantas de cobertura na estruturação do solo e na recuperação, a médio ou longo prazo, de solos compactados, enquanto que a ação mecânica de descompactação proporciona resultados imediatos, porém não duradouros. Tavares Filho et al. (2006) atentaram quanto à necessidade de se fazer um estudo minucioso da relação custo/benefício antes de realizar essa operação mecanizada para resolver supostos problemas de compactação em áreas em SSD, já que o custo é relativamente alto em função da maior potência requerida de trator.

Tabela 11. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004).

	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade (g cm ⁻³)
	Total	Micro	Macro	
0 a 5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,55	0,46	0,10	1,22
Triticale	0,55	0,46	0,09	1,22
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,57	0,47	0,10	1,19
Sorgo	0,55	0,47	0,08	1,24
Crotalária	0,55	0,45	0,10	1,19
Escarificação	0,55	0,46	0,08	1,25
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,04 ns	0,63 ns	0,12 ns	0,01 ns
Manejo de primavera (MP)	0,90 ns	0,59 ns	0,39 ns	0,46 ns
CI x MP	0,53 ns	0,93 ns	0,28 ns	0,93 ns
CV				
Cultivo de inverno	1,06	5,39	20,63	0,75
Manejo de primavera (MP)	5,33	5,25	37,51	6,45
7,5 a 12,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,51	0,44	0,07	1,27
Triticale	0,53	0,45	0,08	1,27
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,52 b	0,44	0,08 b	1,28
Sorgo	0,49 b	0,44	0,05 b	1,26
Crotalária	0,51 b	0,45	0,06 b	1,30
Escarificação	0,56 a	0,43	0,13 a	1,25
Valor de F				
Cultivo de inverno	1,94 ns	1,62 ns	0,35 ns	0,01 ns
Manejo de primavera (MP)	3,86 *	0,85 ns	5,20 *	0,99 ns
CI x MP	0,07 ns	0,82 ns	0,08 ns	0,18 ns
CV				
Cultivo de inverno	10,26	6,62	30,60	0,14
Manejo de primavera (MP)	14,45	4,79	75,43	4,98

(Continua)

Tabela 11. (Continuação)

Tratamentos	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade (g cm ⁻³)
	Total	Micro	Macro	
15 a 20 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,50	0,45	0,05	1,29
Triticale	0,52	0,45	0,07	1,26
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,51	0,45	0,06	1,27
Sorgo	0,52	0,45	0,07	1,27
Crotalária	0,49	0,45	0,05	1,31
Escarificação	0,52	0,45	0,07	1,24
Valor de F				
Cultivo de inverno	3,61 ns	0,45 ns	2,29 ns	2,02 ns
Manejo de primavera (MP)	0,74 ns	0,03 ns	0,78 ns	1,13 ns
CI x MP	3,19 ns	1,80 ns	0,35 ns	2,45 ns
CV				
Cultivo de inverno	14,05	3,85	87,70	7,86
Manejo de primavera (MP)	6,37	0,97	51,14	5,87
27,5 a 32,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,53	0,45	0,08	1,26
Triticale	0,53	0,48	0,05	1,26
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,52	0,46	0,06	1,27
Sorgo	0,54	0,47	0,06	1,24
Crotalária	0,54	0,47	0,07	1,26
Escarificação	0,54	0,47	0,07	1,27
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,04 ns	0,98 ns	2,15 ns	0,01 ns
Manejo de primavera (MP)	0,19 ns	0,29 ns	0,05 ns	0,21 ns
CI x MP	0,19 ns	0,86 ns	0,38 ns	0,43 ns
CV				
Cultivo de inverno	0,46	16,27	73,54	0,63
Manejo de primavera (MP)	3,26	3,15	16,60	3,16
47,5 a 52,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,56	0,46	0,10	1,16
Triticale	0,56	0,48	0,09	1,17
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,56	0,48	0,08	1,19
Sorgo	0,57	0,47	0,10	1,14
Crotalária	0,55	0,47	0,08	1,16
Escarificação	0,56	0,46	0,10	1,17
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,12 ns	1,02 ns	1,01 ns	1,01 ns
Manejo de primavera (MP)	0,38 ns	1,70 ns	0,63 ns	0,63 ns
CI x MP	0,02 ns	0,73 ns	0,10 ns	0,10 ns
CV				
Cultivo de inverno	1,86	8,80	33,93	1,78
Manejo de primavera (MP)	3,34	4,66	26,86	5,16

Tabela 12. Resultados de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006).

Tratamentos	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Densidade (g cm^{-3})
	Total	Micro	Macro	
0 a 5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,55	0,41	0,14	1,14
Triticale	0,54	0,40	0,14	1,16
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,55	0,40	0,15 ab	1,14 ab
Sorgo	0,55	0,41	0,14 ab	1,15 ab
Crotalária	0,55	0,39	0,16 a	1,09 b
Escarificação	0,52	0,41	0,11 b	1,23 a
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,42 ns	1,15 ns	0,08 ns	0,24 ns
Manejo de primavera (MP)	1,96 ns	0,83 ns	2,05 *	2,49 *
CI x MP	0,74 ns	0,23 ns	0,46 ns	0,37 ns
CV				
Cultivo de inverno	3,72	8,01	8,92	4,32
Manejo de primavera (MP)	7,99	6,82	46,39	13,94
7,5 a 12,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,54	0,43	0,11	1,28
Triticale	0,53	0,43	0,10	1,30
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,55	0,44	0,11	1,28
Sorgo	0,53	0,44	0,09	1,31
Crotalária	0,54	0,43	0,12	1,29
Escarificação	0,53	0,43	0,11	1,27
Valor de F				
Cultivo de inverno	1,72 ns	0,01 ns	0,89 ns	0,31 ns
Manejo de primavera (MP)	0,77 ns	1,35 ns	0,80 ns	0,73 ns
CI x MP	0,60 ns	0,21 ns	0,42 ns	0,10 ns
CV				
Cultivo de inverno	5,08	2,33	26,83	2,71
Manejo de primavera (MP)	3,40	4,77	25,39	4,13

Continua

	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade (g cm ⁻³)
	Total	Micro	Macro	
15 a 20 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,54	0,43	0,11	1,27
Triticale	0,54	0,44	0,10	1,31
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,53	0,44 b	0,09 b	1,30
Sorgo	0,55	0,46 a	0,09 b	1,33
Crotalária	0,54	0,42 c	0,12 a	1,26
Escarificação	0,54	0,42 c	0,12 a	1,27
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,696 ns	0,428 ns	1,254 ns	1,905 ns
Manejo de primavera (MP)	1,078 ns	12,733 *	3,655 *	1,540 ns
CI x MP	1,116 ns	1,021 ns	1,308 ns	1,042 ns
CV				
Cultivo de inverno	3,30	2,43	26,89	54,94
Manejo de primavera (MP)	4,10	13,23	45,91	49,39
27,5 a 32,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,54	0,46	0,08	1,26
Triticale	0,54	0,45	0,08	1,27
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,53	0,47 a	0,07 c	1,27
Sorgo	0,54	0,46 ab	0,08 ab	1,25
Crotalária	0,53	0,45 b	0,08 ab	1,28
escarificação	0,54	0,44 b	0,10 a	1,24
Valor de F				
Cultivo de inverno	1,218 ns	1,504 ns	0,018 ns	0,24 ns
Manejo de primavera (MP)	1,304 ns	8,257 *	6,333 *	1,483 ns
CI x MP	0,448 ns	1,132 ns	0,993 ns	0,144 ns
CV				
Cultivo de inverno	2,58	3,54	2,70	1,79
Manejo de primavera (MP)	2,66	8,29	50,87	4,46
47,5 a 52,5 cm				
Cultivo de inverno (CI)				
Girassol	0,56	0,47	0,09	1,22
Triticale	0,56	0,47	0,09	1,23
Manejo de primavera (MP)				
Milheto	0,56	0,46	0,10	1,22
Sorgo	0,56	0,47	0,09	1,23
Crotalária	0,55	0,46	0,09	1,22
escarificação	0,56	0,47	0,09	1,22
Valor de F				
Cultivo de inverno	0,63 ns	0,31 ns	0,01 ns	0,07 ns
Manejo de primavera (MP)	1,22 ns	1,06 ns	0,50 ns	0,03 ns
CI x MP	1,38 ns	1,18 ns	1,69 ns	1,76 ns
CV				
Cultivo de inverno	2,56	2,67	1,88	1,56
Manejo de primavera (MP)	3,58	4,94	17,28	0,98

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %. ns e * = não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

6.5 Curva de retenção de água no solo e Índice “S”

Nas curvas de retenção de água do primeiro ano de avaliação do experimento, pode-se observar que, na camada de 0 a 5 cm (Figura 9 A), o tratamento “triticale+milheto” proporcionou a maior retenção de água com o solo saturado ($\Psi = 0$), até o potencial matricial de -0,006 MPa, indicando a presença de maior volume de poros totais e de macroporos (REICHARDT & TIMM, 2004), apesar de essas diferenças não serem estatisticamente significativas, conforme apresentado na tabela 10 (ver item 6.4).

Segundo Reeve & Carter (1991), solos compactados caracterizam-se por apresentar menor retenção de água nas baixas tensões (0 a 0,01 MPa), devido à redução promovida na porosidade, principalmente no volume de macroporos, que ficam preenchidos com água gravitacional nos maiores potenciais matriciais (potenciais menos negativos). Em compensação, é comum o aumento na retenção de água nos menores potenciais (potenciais mais negativos) devido ao incremento na microporosidade, aumentando o volume de água capilar. Portanto, solos com essa característica apresentam a curva de retenção de água com menor coeficiente angular (S), ou seja, menor ângulo formado pela tangente que passa pelo ponto de inflexão (DEXTER, 2004).

O comportamento da curva de retenção de água referente ao tratamento “triticale+milheto”, na camada de 0 a 5 cm, é típico de solo menos compactado (REICHARDT & TIMM, 2004), apresentando o maior valor de S entre os tratamentos avaliados ($S = 0,051$) (Figura 12 A). Dexter (2004), estudando o coeficiente angular no ponto de inflexão da curva de retenção, concluiu que o valor do índice S apresenta relação direta e indireta com a MO e com a compactação do solo, respectivamente. Assim, maiores valores de S indicam a existência de solos com melhor qualidade estrutural.

A curva de retenção de água referente ao tratamento “triticale+milheto”, que é uma curva típica de solo menos degradado (REICHARDT & TIMM, 2004; DEXTER, 2004), pode estar relacionado à maior concentração de raízes de milho, com essa sucessão de culturas, que pode estar atuando na estruturação do solo, principalmente na camada superficial (Figura 5).

Entre as curvas de retenção de água da camada de 7,5 a 12,5 cm (Figura 9 B), a curva referente ao tratamento “triticale+milheto” novamente se destacou pela

maior retenção de água em baixas tensões, indicando maior volume de macroporos. No entanto, o tratamento “triticale+escarificação” foi o que promoveu a curva de retenção de água com características de solo menos compactado, pois proporcionou a maior umidade do solo saturado, significando maior porosidade total, além de resultar em menor retenção de água em médias e altas tensões (maiores que 0,01 MPa), revelando redução na proporção de microporos. Outro indício de redução da compactação com esse tratamento foi a menor retenção de água no ponto de murcha permanente (PMP), ou seja, no potencial matricial de - 1,5 MPa.

Para Brady & Weil, (1999) e Cavalieri et al. (2006), o aumento na densidade do solo promove aumento da água retida no PMP, pois após o solo ser submetido à tensão de 1,5 MPa, a água restante apresenta-se em um fino filme, retida por adsorção (com alta energia), ao redor dos colóides do solo. Assim, quanto maior o adensamento, maior será a quantidade de partículas por unidade de volume, aumentando a superfície de adsorção e, conseqüentemente, a umidade volumétrica do solo (BERG et al., 1997).

Aplicando o conceito do índice S para identificar solos mais ou menos degradados estruturalmente, o comportamento das curvas de retenção de água referentes aos tratamentos “triticale+milheto” e “triticale+escarificação”, na camada de 7,5 a 12,5 cm, comprovam a melhor qualidade física do solo com esses tratamentos, nessa camada, logo no primeiro ano de avaliação do experimento, pois proporcionaram os maiores valores de S (0,054 e 0,055, respectivamente) (Figura 11 B). No entanto, todos os tratamentos promoveram valores de S superiores ao calculado com os dados da curva de retenção para caracterização da área (Figura 2).

Na camada de 15 a 20 cm, fica evidente o maior estado de compactação do solo com o tratamento “girassol+crotalária”, devido ao menor volume de água em condições de solo saturado (Figura 9 C), promovendo o menor valor de S (0,017) (Figura 11 C), ou seja, muito próximo ao encontrado com os dados da curva de retenção de água para caracterização da área, nessa profundidade ($S = 0,015$) (Figura 2). Para Dexter (2004), valores de S inferiores a 0,020 estão claramente associados com solos com propriedades físicas muito pobres.

Por outro lado, o efeito da escarificação ficou evidente nessa camada (15 a 20 cm), principalmente com o tratamento “triticale+escarificação”, proporcionando uma

curva de retenção típica de solo menos compactado (Figura 9 C). Apesar de não promover um incremento na capacidade máxima do solo em reter água, ou seja, em aumentar a porosidade total, reduziu a retenção de água em microporos, ou seja, em potenciais matriciais inferiores a $-0,006$ MPa, além de promover a menor umidade do solo no PMP. Com isso, o tratamento “triticale+escarificação” promoveu o maior valor de S nessa camada (0,040), no primeiro ano de avaliação do experimento (Figura 11 C). Para Dexter (2004), o valor de S igual a 0,035 é o limite mínimo para caracterizar o solo como tendo boa qualidade estrutural.

Porém, ao comparar as curvas de retenção de água da camada de 27,5 a 32,5 cm (Figura 10 D), verifica-se que o tratamento “triticale+milheto” promoveu uma curva de retenção com comportamento de solo com pior qualidade estrutural, comprovado pelo menor valor de S (0,019) (Figura 11 D). Assim, pode-se afirmar que, com apenas um cultivo de milho em sucessão ao triticale, ou seja, envolvendo apenas espécies monocotiledôneas, o efeito na estruturação do solo limita-se aos primeiros 20 cm de profundidade.

Na camada de 47,5 a 52,5 cm, ocorreu menor efeito dos tratamentos na diferenciação das curvas de retenção de água (Figura 9 E), sendo que os valores S se concentraram acima de 0,020 e abaixo de 0,035, classificando o solo como de pobre qualidade estrutural (DEXTER, 2004). No entanto, os valores foram superiores aos encontrados na caracterização da área ($S = 0,013$), que seguindo o mesmo critério de classificação da qualidade física, significa solos estruturalmente muito pobres.

Após três anos da realização da escarificação do solo e da repetição das rotações de culturas, pode-se observar, na camada de 0 a 5 cm, menor umidade do solo saturado com o manejo envolvendo escarificação do solo (Figura 10 A). Esse resultado, como já discutido no item 6.4, pode estar relacionado à acomodação do solo devido à manutenção da área escarificada em pousio entre o cultivo de outono-inverno e de primavera, fazendo com que a ausência de cultivo nessa época tenha favorecido a reorganização das partículas do solo, que acabaram ocupando o espaço poroso.

A manutenção da área em pousio acelera o processo de compactação, pois a ausência de cobertura morta sobre a superfície do solo faz com que as gotas da chuva incidam diretamente sobre a superfície do terreno com alta energia, provocando a desestruturação do solo e a dispersão das partículas primárias que acabam migrando para os primeiros milímetros abaixo da superfície (1 a 5 mm), onde se acomodam no espaço poroso,

resultando na formação de uma camada adensada, constituindo o selamento superficial (SCHAEFER et al., 2002).

Além disso, a ausência de raízes também aumenta a susceptibilidade do solo à compactação, já que as mesmas auxiliam direta e indiretamente na estruturação do solo, aproximando as partículas por meio do crescimento pelo espaço poroso e liberando exsudados radiculares que atuam como agente cimentante para a formação dos macroagregados.

O menor incremento no teor de MO nos tratamentos com escarificação (Tabelas 6 e 7), principalmente na camada superficial, pode ter influenciado na capacidade máxima de retenção de água, após três anos do início do experimento. Segundo Kiehl (1979), a MO apresenta alta capacidade de reter água por possuir elevada superfície específica, podendo reter até 20 vezes o seu peso. O efeito da MO na estruturação do solo também contribui na dinâmica de retenção de água, já que atua na formação de agregados estáveis, reduzindo a obstrução do espaço poroso, aumentando e diminuindo a proporção de macroporos e microporos, respectivamente.

Comparando as curvas de retenção dos oito tratamentos, da camada de 0 a 5 cm, do primeiro e do terceiro ano de condução do experimento (Figuras 9 A e 10 A, respectivamente), verifica-se que houve redução da retenção de água nas médias e altas tensões, sugerindo uma diminuição da proporção de poros pequenos, responsáveis em reter a água com maior energia. Segundo Reichardt & Timm (2004), o aumento gradual da tensão resulta em um esvaziamento de poros progressivamente menores, até que, nas tensões muito altas, apenas poros muito pequenos conseguem reter água.

Uma evidência clara do efeito do cultivo de plantas de cobertura por três anos consecutivos na estruturação do solo e na redução do estado de compactação, está demonstrada na figura 10 A (camada de 0 a 5 cm), onde pode-se verificar que houve redução no teor de água do solo na maior tensão aplicada (1,5 MPa), em relação aos resultados obtidos por ocasião da caracterização da área (Figura 2) e no primeiro ano de avaliação do experimento (Figura 9 A), principalmente nos tratamentos envolvendo o cultivo de primavera por três anos consecutivos. No entanto, não houve incremento no volume de água disponível (retida entre os potenciais matriciais de -0,01 e -1,5 MPa), já que também houve redução no

teor de água retida na capacidade de campo (-0,01 MPa), resultado do aumento no volume de macroporos, o que reduziu a retenção de água capilar, corroborando resultados obtidos por Cavalieri et al. (2006).

Desta forma, após três anos do início do experimento e da realização da escarificação do solo, pode-se afirmar que, na camada de 0 a 5 cm, os tratamentos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura proporcionaram, independente do cultivo de outono-inverno, curvas de retenção de água com característica de solo mais bem estruturado, em relação aos tratamentos com escarificação e sem plantas de cobertura, pois os maiores valores de S foram obtidos com os tratamentos envolvendo o cultivo de primavera (Figura 12 A), com o tratamento “triticale+milheto” resultando em maior valor de S ($S = 0,080$).

Ainda comparando os resultados da curva de retenção de água obtidas no primeiro e no terceiro ano de avaliação do experimento, verifica-se que, na camada de 7,5 a 12,5 cm, após três anos de repetição das sucessões de culturas (Figura 10 B), aumentou a umidade de saturação em todos os tratamentos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura, sem ocorrer alteração na umidade de saturação nos tratamentos escarificados. Entretanto, evidencia-se efeito residual da escarificação do solo no tratamento “girassol+escarificação”, pela menor retenção de água entre os potenciais matriciais de -0,006 e -0,1 MPa, significando redução na proporção de microporos no volume de poros totais.

Quando comparam-se os valores de S das curvas da figura 10 B, observa-se que os tratamentos “triticale+milheto” e “girassol+escarificação” foram os que proporcionaram maior estruturação do solo, resultando em maiores índices S (0,053 e 0,051, respectivamente) (Figura 12 B). Em contrapartida, o tratamento “triticale+sorgo” foi o único que promoveu S menor que 0,035, significando baixa qualidade estrutural (DEXTER, 2004).

O efeito residual da escarificação do solo no tratamento “girassol+escarificação” também pode ser observado na camada de 15 a 20 cm (Figura 10 C), sendo que nessa profundidade observou-se também efeito da sucessão “triticale+crotalária” na estruturação do solo, reduzindo a retenção de água em microporos e no PMP. Em compensação, o cultivo de sorgo, principalmente em sucessão ao triticale resultou, novamente, em maior retenção de água em médias e altas tensões, indicando maior adensamento do solo nessa camada.

Ao calcular os valores de S das curvas de retenção de água na camada de 15 a 20 cm (Figura 12 C), obteve-se o maior valor do coeficiente angular para o tratamento “triticale+crotalária” ($S = 0,070$) e o menor valor para o tratamento “triticale+sorgo” ($S = 0,040$).

Na camada de 27,5 a 32,5 cm, ocorreu menor retenção de água no solo, nas tensões maiores que 0,01 MPa, com os tratamentos envolvendo escarificação do solo (Figura 10 D). Isso indica menor volume de água capilar e higroscópica, sugerindo que, mesmo após três anos do manejo com escarificador, persistem os efeitos da descompactação no limite máximo de atuação do equipamento, já que esses resultados são típicos de solos com menor proporção de microporos em relação ao volume de poros totais. Quando se comparam os valores de S , observa-se que o tratamento “triticale+escarificação” proporcionou o maior coeficiente angular entre as curvas de retenção, no ponto de inflexão, ou seja, $S = 0,041$ (Figura 12 D).

O maior efeito da escarificação na descompactação do solo em profundidade, mesmo após três anos do início do experimento, e da realização do manejo mecânico, possivelmente está relacionado à menor colonização das raízes em profundidade, reduzindo o efeito das plantas de cobertura na estruturação do solo. Além disso, ocorre menor reorganização das partículas do solo nessa camada, devido as cargas aplicadas em superfície serem dissipadas nos primeiros centímetros do perfil, além da menor intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem, já que nessa profundidade o solo se mantém úmido por mais tempo.

Na camada de 47,5 a 52,5 cm observa-se grande semelhança entre as curvas de retenção de água (Figura 10 E), devido à pequena presença de raízes nessa camada, além das hastes do escarificador não terem atingindo essa profundidade. Os valores calculados de S concentraram-se todos na faixa entre 0,020 e 0,035 (Figura 12 E), que segundo Dexter (2004), classifica o solo como de qualidade física pobre.

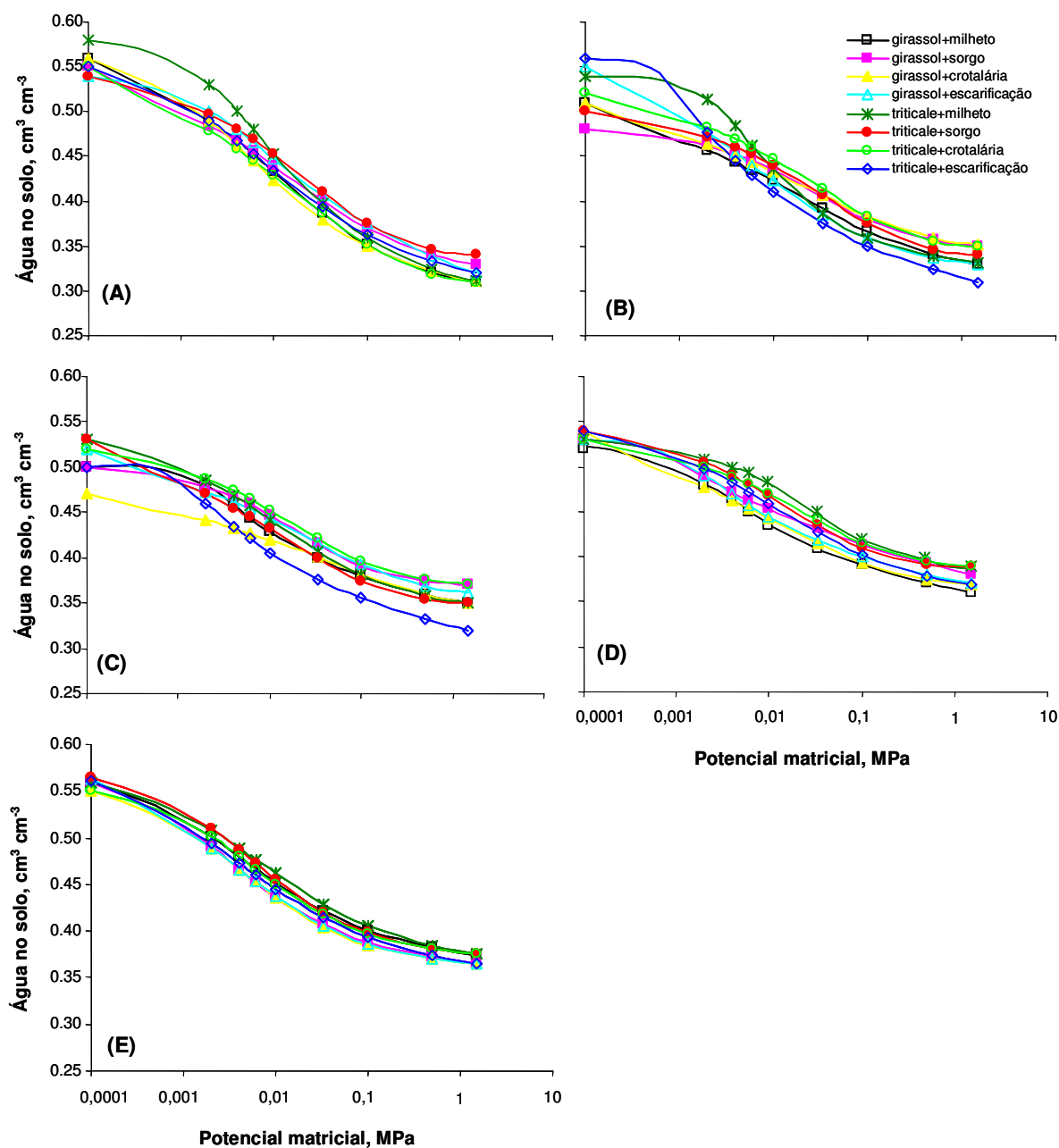


Figura 9. Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada no primeiro ano do experimento (2003/2004), nos diferentes tratamentos envolvendo rotação de culturas e escarificação, nas profundidades de 0 a 5 cm (A); 7,5 a 12,5 cm (B); 15 a 20 cm (C); 27,5 a 32,5 cm (D) e 47,5 a 52,5 cm (E).

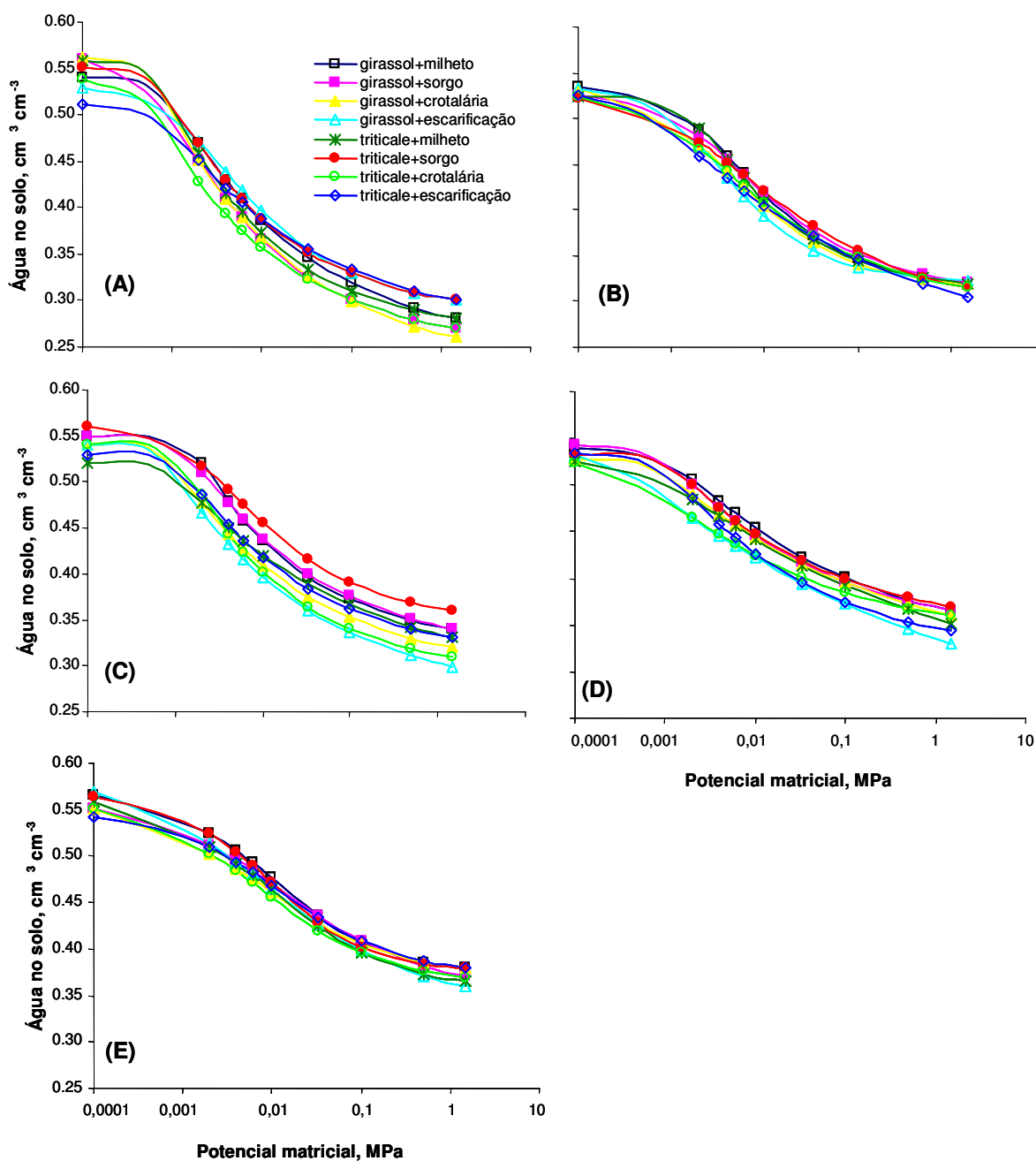


Figura 10. Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada no terceiro ano do experimento (2005/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo rotação de culturas e escarificação, nas profundidades de 0 a 5 cm (A); 7,5 a 12,5 cm (B); 15 a 20 cm (C); 27,5 a 32,5 cm (D) e 47,5 a 52,5 cm (E).

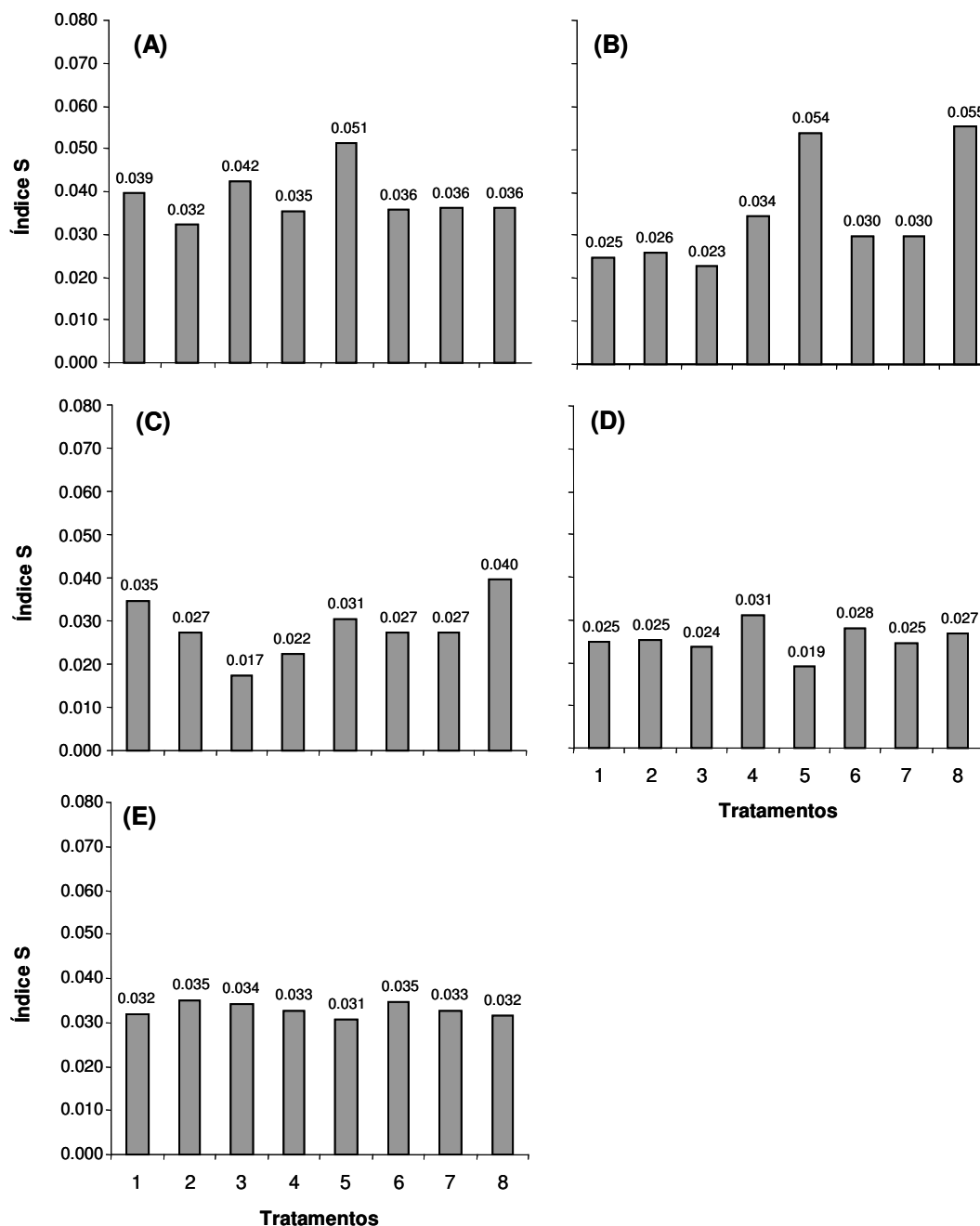


Figura 11. Valores de S para as amostras coletadas após o manejo das plantas de cobertura no primeiro ano do experimento (2003/2004), nas profundidades de 0-5 cm (A), 7,5 a 12,5 cm (B), 15-20 cm (C), 27,5-32,5 cm (D), 47,5-52,5 cm (E). Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticale+milheto (5); triticale+sorgo (6); triticale+crotalária (7); triticale+escarificação (8).

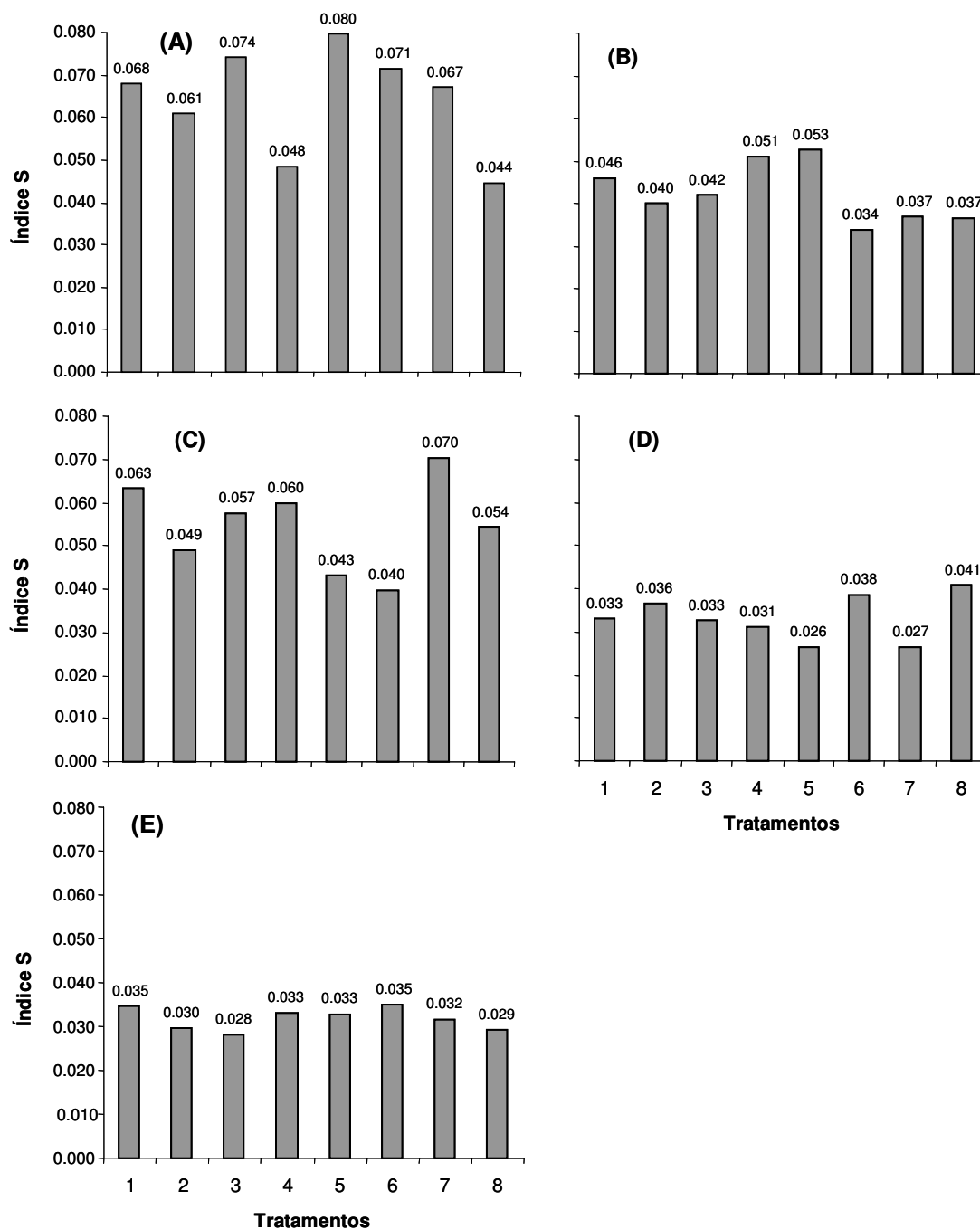


Figura 12. Valores de S para as amostras coletadas após o manejo das plantas de cobertura no terceiro ano do experimento (2005/2006), nas profundidades de 0-5 cm (A), 7,5 a 12,5 cm (B), 15-20 cm (C), 27,5-32,5 cm (D), 47,5-52,5 cm (E). Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalária (7); triticales+escarificação (8).

6.6 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Os coeficientes da equação que ajusta os valores de resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ_v) e da densidade do solo (Ds) (equação 7), referentes às amostras coletadas no primeiro ano de avaliação do experimento e nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm estão apresentados nas tabelas 13 e 14, respectivamente. Nas tabelas 15 e 16 estão os coeficientes referentes à amostragem realizada no terceiro ano de avaliação, das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente.

Os sinais positivos e negativos dos coeficientes demonstram que a RP variou positivamente com a Ds e negativamente com a θ_v , respectivamente, estando em concordância com os resultados encontrados na literatura (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF, 2002; MÜLLER, 2002; ARAÚJO et al., 2004). A elevação da resistência com a redução da θ_v e aumento da Ds pode ser atribuída ao aumento na coesão e fricção entre as partículas (SOJKA et al., 2001).

Nas tabelas 17 e 18 encontram-se os coeficientes resultantes do ajuste da θ_v em função da Ds e do Ψ (Equação 6), das amostras coletadas no primeiro ano de avaliação, das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente. Os coeficientes referentes ao ajuste do modelo estatístico dos dados obtidos na amostragem realizada no terceiro ano de condução do experimento, também nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm estão apresentados nas tabelas 19 e 20, respectivamente.

Os coeficientes indicam que tanto a θ_{CC} como θ_{PMP} variaram positivamente com a Ds e negativamente com o Ψ . Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Tormena et al. (1998), que argumentam que a Ds influencia a retenção de água decorrente de sua influência na porosidade total e na distribuição dos tamanhos dos poros. Segundo Kertzman (1996), o aumento da retenção de água na CC com o aumento da Ds deve-se à redução do diâmetro dos macroporos entre os agregados, resultando em redução da PA e aumento na retenção de água devido ao incremento na microporosidade.

Já o aumento do conteúdo de água no PMP em resposta ao aumento da Ds não está relacionado com a porosidade do solo, mas sim com a textura muito argilosa do solo. Em condições de altas tensões (PMP) a água fica retida com muita energia em películas

muito finas ao redor das partículas individuais do solo (BRADY & WEIL, 1999). Assim, com o aumento da D_s aumenta o número de partículas disponíveis para a retenção de água por unidade de volume de solo (BERG et al., 1997), que terá seu efeito intensificado em solos de textura argilosa devido à elevada superfície de contato das partículas de argila em relação às outras frações granulométricas do solo.

Como era de se esperar, a D_s teve uma relação negativa com PA (Figuras 13, 14, 15 e 16), como também foi observado por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Com o adensamento do solo ocorre a acomodação das partículas nos macroporos, ocupando o espaço que seria ocupado por ar. De acordo com Tormena et al. (1998), em solos com textura muito argilosa é comum a ocorrência de estresse por aeração insuficiente.

No primeiro ano de avaliação do experimento, observou-se reduzida amplitude do IHO, em todos os tratamentos, tanto na camada de 0 a 20 cm como na de 20 a 40 cm (Figuras 13 e 14, respectivamente), devido ao limite inferior de água no solo estar muito próximo ao limite superior, em todas, ou em quase todas, as amostras com D_s determinada. Na camada de 20 a 40 cm, o cultivo de crotalária, tanto em sucessão ao girassol como ao triticale, promoveu IHO igual a zero (Figura 14), já que o limite inferior de água no solo igualou, ou até mesmo superou, o limite superior, em todas as amostras com D_s determinada.

De acordo Topp et al. (1994) é comum a ocorrência de valores muito baixos, ou até nulos, de IHO em solos de textura muito argilosa, como é o caso desse trabalho, que segundo Kay (1990), aumenta a probabilidade de ocorrência de limitações físicas para o crescimento das raízes no solo.

Em todos os tratamentos, e nas duas camadas avaliadas no primeiro ano de experimento, o conteúdo de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) foi sempre inferior ao IHO, caracterizando solos degradados (LETEY, 1985). Por esse motivo, Silva et al. (1994) apontam o IHO como uma ferramenta de análise da estrutura do solo mais sensível que o conceito de água disponível.

No primeiro ano de avaliação do experimento, independente da camada avaliada, o IHO teve como limite inferior o teor de água para manter a RP em 2 MPa (θ_{RP}) em 100 % das amostras dentro do IHO, superando a θ_{PMP} em toda a amplitude de D_s

encontrada. Esse resultado é típico de solos adensados, que necessitam estar com umidade elevada para que a RP não atinja o valor limitante, estando de acordo com os relatos de Topp et al. (1994), Silva et al. (1994), Müller (2002), Beutler et al. (2006), nos quais a RP foi o fator que mais frequentemente reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo, mesmo nos mais baixos valores de Ds.

Segundo Carter et al. (1999), o IHO em SSD é inferior ao encontrado em cultivos convencionais em decorrência da RP atingir 2 MPa em valores elevados de umidade, devido à elevada Ds encontrada no sistema conservacionista. Betz et al. (1998) e Cavalieri et al. (2006) também verificaram maiores valores do IHO em solo sob preparo convencional e escarificado, possibilitando um ambiente físico favorável ao crescimento das raízes.

Tormena et al. (1998), ao determinarem o IHO em um LATOSSOLO VERMELHO com 800 g kg^{-1} de argila, observaram que a θ_{RP} foi o limite inferior de água no solo a partir de valores de Ds acima de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e com umidade do solo superior a $0,24 \text{ cm cm}^{-3}$, o que não ocorreu nos resultados deste experimento, pois na maioria dos tratamentos a menor Ds foi superior a $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e com θ_{RP} muito superiores a essa (maiores que $0,34 \text{ g cm}^{-3}$), principalmente na camada de 20 a 40 cm, onde há maior teor de argila.

Até mesmo nos tratamentos com escarificação, onde as menores Ds foram de 1,05 e $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ (“girassol+escarificação” e “triticale+escarificação”, respectivamente), a θ_{RP} foi o limite inferior do IHO. Assim, comparando com os resultados obtidos por Tormena et al. (1998), em que a θ_{RP} passou a ser o limite inferior do IHO com Ds de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e com umidade volumétrica de $0,24 \text{ cm cm}^{-3}$, pode-se concluir que, logo após a escarificação do solo, esse manejo não foi eficiente em aumentar o IHO para alcançar os valores encontrados na literatura, já que na mesma Ds ($1,10 \text{ g cm}^{-3}$) a θ_{RP} foi muito mais alta, ou seja, de $0,35 \text{ g cm}^{-3}$. Porém, a escarificação do solo promoveu maior IHO em relação à avaliação realizada para caracterização da área (IHO = 0) e aos demais tratamentos com cultivo de plantas de cobertura.

No entanto, em SSD com o cultivo de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo e vigoroso, devido aos canais deixados com a morte dessas raízes, os quais orientam o crescimento radicular em profundidade da cultura sucessora, a RP

limitante para o crescimento das plantas pode ser superior à RP limitante em sistemas convencionais, em que a mobilização do solo causa a interrupção da continuidade dos macroporos e dos canais. Assim, se fosse considerada uma RP limitante superior a 2 MPa para os manejos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura, certamente aumentaria o IHO nesses tratamentos.

Quanto ao limite superior do IHO nas duas camadas avaliadas, a θ_{CC} foi o limite máximo de água no solo em 100 % das amostras contidas dentro do IHO, em todos os tratamentos avaliados. Somente nos tratamentos envolvendo escarificação, e na camada de 0 a 20 cm, é que θ_{PA} assumiu o limite superior de água no solo, nos valores de $D_s \geq$ que 1,28 e 1,27 g cm⁻³, nos tratamentos “girassol+escarificação” e “triticale+escarificação”, respectivamente. Nesses valores de D_s a umidade volumétrica do solo máxima para permitir o mínimo de 10 % de PA, considerada como limitante para o desenvolvimento das plantas, foi de, aproximadamente, 0,42 cm cm⁻³. A θ_{PA} foi o limite superior do IHO em 9 e 25 % das amostras contidas dentro IHO nos tratamentos escarificados e com triticale e girassol como culturas de outono-inverno, respectivamente.

Tormena et al. (1998) obtiveram resultados semelhantes em solo de textura muito argilosa, ou seja, a θ_{PA} passou a ser o limite superior do IHO, substituindo a θ_{CC} , com a D_s de 1,28 g cm⁻³, com a umidade volumétrica do solo em torno de 0,42 cm cm⁻³.

A substituição da θ_{CC} como limite superior do IHO pela θ_{PA} , na camada de 0 a 20 cm, nos tratamentos manejados mecanicamente, ocorreu não devido a alterações nas proporções dos tamanhos de poros com o aumento da D_s , pois o comportamento das curvas (inclinação das retas) “ $\theta_{CC} \times D_s$ ” e “ $\theta_{PA} \times D_s$ ” foram pouco alteradas. Porém, fez com que o limite inferior do IHO determinado pela θ_{RP} ocorresse em menores valores de umidade do solo, em relação aos demais tratamentos com cultivo de espécies de cobertura e sem escarificação, diminuindo as necessidades de incremento da umidade do solo com o aumento da D_s , para que a condição pré-estabelecida de RP igual a 2 MPa fosse mantida. Esse efeito é típico de solos escarificados devido ao grande número de fraturas criadas no solo pelo manejo mecânico, diminuindo a inclinação da curva “ $\theta_{RP} \times D_s$ ”, evitando que essa curva, que constitui o limite inferior do IHO, cruzasse a curva “ $\theta_{CC} \times D_s$ ”

(limite superior do IHO) antes de θ_{PA} ser limitante, aumentando a densidade do solo crítica (Dsc).

A Dsc, no conceito de IHO, é a densidade do solo em que o IHO iguala-se a zero, ou seja, em que o limite inferior de água no solo iguala-se ao limite superior (SILVA et al., 2004). Nos dois tratamentos envolvendo escarificação, seja com o cultivo de girassol ou de triticale no outono-inverno, as densidades críticas foram as mais elevadas (Figura 17). No tratamento “girassol + escarificação” e no tratamento “triticale + escarificação” essas densidades foram de 1,31 e 1,33 g cm⁻³, respectivamente. Esses valores de Dsc são semelhantes à encontrada por Müller (2002) em NITOSSOLO VERMELHO com 590 g cm⁻³ de argila na camada de 10 a 20 cm (Dsc = 1,33 g cm⁻³), e superior à Dsc de 1,28 g cm⁻³ encontrada por Tormena et al. (1998) em LATOSSOLO VERMELHO, com 800 g cm⁻³ de argila na camada de 0 a 10 cm.

Cavaliere et al. (2006) também observaram maior Dsc em tratamentos envolvendo solos manejados mecanicamente, em relação ao solo sem preparo, o que segundo os autores, reduz a probabilidade de ocorrência de amostras com densidades superiores à Dsc, diminuindo a probabilidade da planta permanecer em condições de estresse.

Na camada de 20 a 40 cm, independente do tratamento estudado, o IHO apresentou-se ainda mais reduzido em comparação à camada 0 a 20 cm, devido ao efeito restritivo da RP, alcançando o valor limite de 2 MPa em elevados teores de umidade, mesmo nos menores valores de Ds ($\theta_{RP} \geq 0,40$ cm cm⁻³), confirmando a suposição de Tormena et al (1998) que previam maior impacto da RP no IHO em maiores profundidades no perfil. Nessa camada não foi observado efeito da escarificação nos valores do IHO, referentes às amostras coletadas logo após a realização desse manejo mecânico, provavelmente por ter sido o limite máximo de atuação do equipamento (27,5 a 32,5 cm), e portanto o efeito descompactador foi localizado somente na extremidade de cada ponteira.

Nas figuras 15 e 16 constam os IHO referentes à amostragem realizada após o manejo das plantas de cobertura cultivadas antes da semeadura da soja no terceiro ano do experimento (em dezembro de 2005), nas mesmas camadas já avaliadas anteriormente, ou seja, no centro da camada de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente.

Após três anos do início do experimento, observou-se na camada de 0 a 20 cm que o IHO aumentou em todos os tratamentos testados. No entanto, a θ_{RP} continuou a ser o limite inferior do IHO, com exceção do tratamento “triticale+escarificação”, em que nos menores valores de D_s (1,02 e 1,04 g cm⁻³) o IHO foi determinado pela AD, ou seja, pela θ_{CC} e pela θ_{PMP} , caracterizando solo menos restritivo ao desenvolvimento das plantas.

Nessa camada, os tratamentos envolvendo manejo mecânico da compactação foram os que promoveram as maiores amplitudes de IHO, mesmo após três anos da escarificação, principalmente para as áreas cultivadas com triticale no inverno.

Porém, a escarificação do solo promoveu maior desuniformidade entre as amostras, aumentando a dispersão dos resultados de D_s entre as 32 amostras coletadas para determinar o IHO (Tabela 21). Com os tratamentos “girassol+escarificação” e “triticale+escarificação” obtiveram-se os menores valores mínimos de D_s (1,09 e 1,02 g cm⁻³, respectivamente) e de primeiro quartil (1,19 e 1,17 g cm⁻³, respectivamente), porém com valor de mediana acima da média, além de altos valores de D_s máxima (1,42 e 1,49 g cm⁻³, respectivamente) e de terceiro quartil (1,33 e 1,40 g cm⁻³, respectivamente), conferindo maiores valores de coeficientes de variação (7,15 e 10,08 %, respectivamente). Cavalieri et al. (2006) também observaram, na camada de 0 a 15 cm, efeito dos implementos mecânicos no aumento da dispersão dos valores de D_s à medida que aumentou a mobilização do solo.

Como limite superior do IHO na camada de 0 a 20 cm (Figura 15), a θ_{CC} foi o limite superior de água no solo nos valores mais baixos de D_s , sendo que, de uma maneira geral, a partir da D_s em torno de 1,28 g cm⁻³ a θ_{PA} passou a limitar o IHO. Isso ocorre em razão do aumento dos valores de D_s promover incremento na proporção de microporos e redução da macroporosidade, aumentando o teor de água capilar (retida nos microporos). Assim, a partir da D_s de 1,28 g cm⁻³ o teor de água retida na capacidade de campo não permitiu uma porosidade de aeração de no mínimo 10 %, sendo necessário o secamento do solo ($\theta_v < 0,42$ cm cm⁻³) para que essa exigência fosse atendida.

Na camada 20 a 40 cm (Figura 16), observa-se pela área hachurada nos gráficos que os tratamentos com escarificação do solo e os que possuem cultivo de sorgo, independente do cultivo de outono-inverno, foram os tratamentos que permitiram maior

amplitude do IHO, comparando com a avaliação realizada para caracterização da área (Figura 3 B) e antes do cultivo da soja no primeiro ano do experimento (Figura 14).

O efeito da escarificação no incremento do IHO em profundidade, mesmo que as hastes do equipamento não tenham atingido eficientemente essa camada, pode ter ocorrido devido a um efeito indireto desse manejo, que ao romper a camada compactada mais em superfície possibilitou uma ocupação maior das raízes das plantas cultivadas no outono-inverno e no verão ao longo do perfil, aumentando a estruturação do solo.

Já o efeito do sorgo no aumento do IHO pode estar relacionado à maior exploração do perfil do solo pelo sistema radicular dessa espécie de cobertura, como comprovado pela figura 5 E, quando em sucessão ao cultivo de triticale como safra de outono-inverno.

No entanto, observou-se que, com a repetição dos manejos por três anos consecutivos, houve um aumento da Dsc na maioria dos tratamentos testados (Figura 17), tanto na camada de 0 a 20 cm (Figura 17 A), como na de 20 a 40 cm (Figura 17 B), com exceção do tratamento “girassol+milheto” na camada de 20 a 40 cm, em que o IHO foi igual a zero, mesmo nas menores Ds encontradas, e no tratamento “triticale+escarificação” na camada de 0 a 20 cm, em que Dsc permaneceu em $1,33 \text{ g cm}^{-3}$.

A maior Dsc foi obtida repetindo por três anos o cultivo de girassol como safra de outono-inverno e com a utilização da crotalária como espécie de cobertura antecedendo a soja. Esse tratamento permitiu um valor de Dsc igual a $1,37 \text{ g cm}^{-3}$, em virtude da baixa necessidade de aumento no teor de volumétrico de água para manter a RP em 2 MPa em função do aumento da Ds. Esse elevado valor de Dsc permitiu que 97 % das amostras coletadas para determinação do IHO estivessem com Ds abaixo da Dsc (Figura 18 A), o que, de acordo com Silva e Kay (1997), reduz a probabilidade de ocorrência de condições altamente restritivas ao crescimento radicular.

Esse tratamento (“girassol+crotalária”) foi o mesmo que propiciou os maiores teores de MO na camada de 10 a 20 cm (Figura 7 B), a qual apresenta funções benéficas na estruturação do solo e consequentemente na redução da RP.

Os tratamentos “triticale+milheto” e triticale+crotalária” também propiciaram elevadas freqüências de amostras com $D_s < D_{sc}$, com 94 % e 90 % das 32 amostras coletadas.

Considerando os valores de Dsc como ferramenta para avaliar o efeito dos tratamentos na qualidade estrutural do solo, pode-se afirmar que os tratamentos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura por três anos consecutivos, propiciaram, na camada de 0 a 20 cm, os mesmos resultados obtidos com os tratamentos com a intervenção mecânica, sendo que com o cultivo de primavera antecedendo a soja obtiveram-se os maiores incrementos nos valores de Dsc (Figura 17 A).

Dessa forma, pode-se afirmar que se esses manejos forem repetidos por mais alguns anos, ocorrerão, em futuras avaliações, resultados cada vez mais favoráveis para os tratamentos com escarificação biológica em relação à mecânica, sendo necessária a indicação de uma nova escarificação do solo nessas áreas manejadas no SSD e mantidas em pousio entre o cultivo de outono-inverno e verão. Essa afirmação se reforça com as evidências apresentadas na figura 18 A, em que com o tratamento “triticale+escarificação” a porcentagem de amostras com Ds inferior à Dsc, na camada de 0 a 20 cm, passou de 88 % para 56 % entre o primeiro e o terceiro ano do experimento. Os resultados de macroporosidade e as curvas de retenção de água (índice *S*), discutidos nos itens 6.4 e 6.5, respectivamente, reforçam essas evidências.

Em contrapartida, na camada de 20 a 40 cm, apesar de ter ocorrido aumento nos valores de Dsc na maioria dos tratamentos com o cultivo de espécies de cobertura, os valores ainda permaneceram inferiores aos encontrados nos tratamentos manejados com escarificador, que também apresentaram incrementos da Dsc nessa camada (Figura 17 B). Por essa razão, os tratamentos escarificados permitiram maior frequência de amostras com Ds abaixo da Dsc, ou seja, com 68 % e 62 %, nos tratamentos “girassol+escarificação” e “triticale+escarificação”, respectivamente (Figura 18 B), corroborando resultados obtidos por Cavalieri et al. (2006), que obtiveram uma frequência de 56 % das amostras com Ds menor que a Dsc em solos escarificados, contra 25 % no tratamento sem intervenção mecânica, na profundidade de 15 a 30 cm.

Tabela 13. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
a	0,0208	0,0100	2,0728	0,0472
b	-3,8393	0,3871	-9,9178	<0,0001
c	5,3069	0,5868	9,0434	<0,0001
$r^2 = 0,84^{**}$				
girassol + sorgo				
a	0,0171	0,0054	3,1764	0,0035
b	-4,0170	0,2560	-15,6922	<0,0001
c	5,1657	0,6368	8,1117	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
girassol + crotalária				
a	0,0211	0,0101	2,0948	0,0450
b	-4,0888	0,3601	-11,3544	<0,0001
c	4,4563	0,8005	5,5666	<0,0001
$r^2 = 0,85^{**}$				
girassol + escarificação				
a	0,0110	0,0061	1,8051	0,0814
b	-4,5426	0,4347	-10,4494	<0,0001
c	4,2021	0,6183	6,7964	<0,0001
$r^2 = 0,83^{**}$				
triticale + milho				
a	0,0095	0,0062	1,5377	0,1350
b	-4,8718	0,5345	-9,1141	<0,0001
c	4,4088	0,7507	5,8730	<0,0001
$r^2 = 0,81^{**}$				
triticale + sorgo				
a	0,0091	0,0046	1,9905	0,0560
b	-4,8010	0,3912	-12,2722	<0,0001
c	4,2352	0,8134	5,2066	<0,0001
$r^2 = 0,88^{**}$				
triticale + crotalária				
a	0,0073	0,0034	2,1297	0,0418
b	-4,6910	0,3720	-12,6091	<0,0001
c	5,7379	0,5333	10,7597	<0,0001
$r^2 = 0,90^{**}$				
triticale + escarificação				
a	0,0111	0,0046	2,3860	0,0238
b	-4,6573	0,3264	-14,2702	<0,0001
c	3,1960	0,5550	5,7590	<0,0001
$r^2 = 0,91^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 14. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
a	0,0120	0,0061	1,9752	0,0578
b	-4,9700	0,4413	-11,2618	<0,0001
c	4,9007	0,4933	9,9342	<0,0001
$r^2 = 0,85^{**}$				
girassol + sorgo				
a	0,0078	0,0045	1,7298	0,0943
b	-5,1745	0,5097	-10,1522	<0,0001
c	6,7159	0,7131	9,4178	<0,0001
$r^2 = 0,82^{**}$				
girassol + crotalária				
a	0,0486	0,0251	1,9371	0,0625
b	-4,2293	0,4893	-8,6440	<0,0001
c	1,7524	0,6854	2,5568	0,0161
$r^2 = 0,73^{**}$				
girassol + escarificação				
a	0,0159	0,0091	1,7395	0,0926
b	-4,8458	0,4947	-9,7958	<0,0001
c	3,8255	0,7230	5,2913	<0,0001
$r^2 = 0,82^{**}$				
triticale + milho				
a	0,0080	0,0035	2,2850	0,0298
b	-6,2081	0,4383	-14,1646	<0,0001
c	2,9771	0,4966	5,9948	<0,0001
$r^2 = 0,90^{**}$				
triticale + sorgo				
a	0,0065	0,0027	2,4254	0,0217
b	-5,9194	0,4030	-14,6873	<0,0001
c	4,8451	0,3742	12,9481	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
triticale + crotalária				
a	0,0208	0,0152	1,3685	0,1817
b	-5,1226	0,6989	-7,3291	<0,0001
c	2,0039	1,6408	1,2213	0,2318
$r^2 = 0,71^{**}$				
triticale + escarificação				
a	0,0085	0,0064	1,3358	0,1920
b	-5,7006	0,6917	-8,2417	<0,0001
c	4,1774	0,9784	4,2697	0,0002
$r^2 = 0,76^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 15. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
a	0,0009	0,0010	0,8973	0,3769
b	-5,4453	0,6253	-8,7076	<0,0001
c	10,3317	2,8610	3,6112	0,0011
$r^2 = 0,81^{**}$				
girassol + sorgo				
a	0,0028	0,0019	1,4665	0,1533
b	-5,2510	0,5006	-10,4887	<0,0001
c	6,7007	0,9000	7,4455	<0,0001
$r^2 = 0,86^{**}$				
girassol + crotalária				
a	0,0161	0,0140	1,1461	0,2611
b	-4,5999	0,5729	-8,0287	<0,0001
c	1,2625	1,8940	0,6666	0,5103
$r^2 = 0,78^{**}$				
girassol + escarificação				
a	0,0007	0,0006	1,1029	0,2791
b	-5,6994	0,6774	-8,4131	<0,0001
c	9,6695	0,8520	11,3486	<0,0001
$r^2 = 0,89^{**}$				
triticale + milho				
a	0,0050	0,0036	1,3855	0,1765
b	-5,1608	0,4330	-11,9194	<0,0001
c	4,3410	1,5345	2,8289	0,0084
$r^2 = 0,92^{**}$				
triticale + sorgo				
a	0,0031	0,0019	1,6142	0,1173
b	-4,9148	0,3173	-15,4883	<0,0001
c	7,1206	1,6478	4,3213	0,0002
$r^2 = 0,94^{**}$				
triticale + crotalária				
a	0,0012	0,0009	1,3457	0,1888
b	-6,0335	0,5244	-11,5060	<0,0001
c	6,0271	1,2023	5,0132	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
triticale + escarificação				
a	0,0034	0,0025	1,3735	0,1801
b	-4,6104	0,5260	-8,7657	<0,0001
c	7,4610	0,8058	9,2597	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 16. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
a	0,0605	0,0304	1,9906	0,0560
b	-4,4275	0,3751	-11,8039	<0,0001
c	0,2948	1,2415	0,2375	0,8140
$r^2 = 0,87^{**}$				
girassol + sorgo				
a	0,0028	0,0026	1,0759	0,2909
b	-5,6350	0,7617	-7,3980	<0,0001
c	8,8795	1,5971	5,5597	<0,0001
$r^2 = 0,77^{**}$				
girassol + crotalária				
a	0,0558	0,0368	1,5149	0,1406
b	-4,2660	0,5615	-7,5979	<0,0001
c	1,1131	1,1670	0,9538	0,3481
$r^2 = 0,70^{**}$				
girassol + escarificação				
a	0,0013	0,0009	1,4388	0,1609
b	-5,9991	0,5245	-11,4382	<0,0001
c	9,1204	1,0450	8,7277	<0,0001
$r^2 = 0,89^{**}$				
triticale + milho				
a	0,0444	0,0257	1,7300	0,0943
b	-3,9762	0,4374	-9,0902	<0,0001
c	2,9643	0,9607	3,0857	0,0044
$r^2 = 0,79^{**}$				
triticale + sorgo				
a	0,0028	0,0020	1,4257	0,1646
b	-6,4238	0,5680	-11,3088	<0,0001
c	5,4685	1,2693	4,3083	0,0002
$r^2 = 0,87^{**}$				
triticale + crotalária				
a	0,0155	0,0077	2,0034	0,0546
b	-5,3065	0,4794	-11,0687	<0,0001
c	1,5950	0,6808	2,3428	0,0262
$r^2 = 0,84^{**}$				
triticale + escarificação				
a	0,0078	0,0046	1,7022	0,0994
b	-5,1100	0,5118	-9,9834	<0,0001
c	4,8644	0,6875	7,0754	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 17. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
d	-1,5312	0,1067	-14,3509	<0,0001
e	0,3207	0,0819	3,9146	0,0005
f	-0,0528	0,0042	-12,6736	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
girassol + sorgo				
d	-1,7213	0,1538	-11,1907	<0,0001
e	0,4583	0,1196	3,8319	0,0006
f	-0,0581	0,0033	-17,5198	<0,0001
$r^2 = 0,92^{**}$				
girassol + crotalária				
d	-1,4178	0,1286	-11,0270	<0,0001
e	0,2512	0,0980	2,5645	0,0158
f	-0,0462	0,0031	-14,7918	<0,0001
$r^2 = 0,89^{**}$				
girassol + escarificação				
d	-1,7061	0,0991	-17,2150	<0,0001
e	0,4661	0,0768	6,0685	<0,0001
f	-0,0524	0,0039	-13,3168	<0,0001
$r^2 = 0,89^{**}$				
triticale + milho				
d	-1,6547	0,1428	-11,5872	<0,0001
e	0,4294	0,1114	3,8527	0,0006
f	-0,0496	0,0040	-12,4648	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
triticale + sorgo				
d	-2,2712	0,2529	-8,9809	<0,0001
e	0,9057	0,1958	4,6267	<0,0001
f	-0,0531	0,0046	-11,4838	<0,0001
$r^2 = 0,84^{**}$				
triticale + crotalária				
d	-1,5613	0,0658	-23,7302	<0,0001
e	0,3530	0,0487	7,2453	<0,0001
f	-0,0487	0,0026	-18,3843	<0,0001
$r^2 = 0,90^{**}$				
triticale + escarificação				
d	-1,7619	0,1340	-13,1501	<0,0001
e	0,4827	0,1074	4,4940	0,0001
f	-0,0603	0,0038	-15,9772	<0,0001
$r^2 = 0,91^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 18. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no primeiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Parâmetro	Valor do coeficiente	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
d	-1,2756	0,0792	-16,1143	<0,0001
e	0,2163	0,0627	3,4481	0,0017
f	-0,0399	0,0036	-11,1670	<0,0001
$r^2 = 0,85^{**}$				
girassol + sorgo				
d	-1,7044	0,0749	-22,7599	<0,0001
e	0,5974	0,0596	10,0304	<0,0001
f	-0,0326	0,0021	-15,3922	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
girassol + crotalária				
d	-1,3564	0,0977	-13,8898	<0,0001
e	0,2786	0,0777	3,5856	0,0012
f	-0,0396	0,0032	-12,2222	<0,0001
$r^2 = 0,86^{**}$				
girassol + escarificação				
d	-1,2481	0,1188	-10,5079	<0,0001
e	0,1823	0,0906	2,0129	0,0535
f	-0,0442	0,0031	-14,1806	<0,0001
$r^2 = 0,88^{**}$				
triticale + milho				
d	-1,2338	0,1118	-11,0375	<0,0001
e	0,2139	0,0863	2,4789	0,0192
f	-0,0362	0,0027	-13,4708	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
triticale + sorgo				
d	-1,4422	0,0897	-16,0817	<0,0001
e	0,3703	0,0712	5,2038	<0,0001
f	-0,0412	0,0027	-15,2889	<0,0001
$r^2 = 0,90^{**}$				
triticale + crotalária				
d	-1,2250	0,1585	-7,7287	<0,0001
e	0,1816	0,1228	1,4789	0,1499
f	-0,0356	0,0029	-12,3444	<0,0001
$r^2 = 0,85^{**}$				
triticale + escarificação				
d	-1,2702	0,1111	-11,4372	<0,0001
e	0,2363	0,0886	2,6673	0,0124
f	-0,0372	0,0032	-11,5486	<0,0001
$r^2 = 0,84^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 19. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0 a 20 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
d	-2,0070	0,2487	-8,0712	<0,0001
e	0,6669	0,1954	3,4136	0,0019
f	-0,0639	0,0041	-15,6595	<0,0001
$r^2 = 0,92^{**}$				
girassol + sorgo				
d	-1,7031	0,1257	-13,5455	<0,0001
e	0,4241	0,0952	4,4541	0,0001
f	-0,0618	0,0034	-18,4266	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
girassol + crotalária				
d	-1,5146	0,2227	-6,8018	<0,0001
e	0,2714	0,1762	1,5399	0,1344
f	-0,0613	0,0046	-13,3968	<0,0001
$r^2 = 0,83^{**}$				
girassol + escarificação				
d	-2,0005	0,2054	-9,7397	<0,0001
e	0,6382	0,1572	4,0612	0,0003
f	-0,0646	0,0066	-9,7881	<0,0001
$r^2 = 0,83^{**}$				
triticale + milho				
d	-1,4781	0,2794	-5,2914	<0,0001
e	0,2341	0,2195	1,0663	0,2951
f	-0,0679	0,0042	-16,0299	<0,0001
$r^2 = 0,93^{**}$				
triticale + sorgo				
d	-1,7660	0,1883	-9,3787	<0,0001
e	0,4635	0,1425	3,2536	0,0029
f	-0,0640	0,0032	-20,1334	<0,0001
$r^2 = 0,96^{**}$				
triticale + crotalária				
d	-1,4707	0,2206	-6,6671	<0,0001
e	0,2376	0,1690	1,4063	0,1703
f	-0,0604	0,0035	-17,4112	<0,0001
$r^2 = 0,94^{**}$				
triticale + escarificação				
d	-1,6950	0,1274	-13,3033	<0,0001
e	0,4028	0,0972	4,1445	0,0003
f	-0,0599	0,0060	-10,0258	<0,0001
$r^2 = 0,86^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 20. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 20 a 40 cm de profundidade, referente à amostragem realizada no terceiro ano do experimento: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Parâmetro	Valor	Erro padrão	t	P > t
girassol + milho				
d	-1,0771	0,2181	-4,9381	<0,0001
e	0,0553	0,1721	0,3216	0,7501
f	-0,0495	0,0037	-13,4501	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
girassol + sorgo				
d	-1,7735	0,2057	-8,6201	<0,0001
e	0,6139	0,1640	3,7445	0,0008
f	-0,0481	0,0037	-12,8410	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
girassol + crotalária				
d	-0,9565	0,1925	-4,9688	<0,0001
e	-0,043	0,1509	-0,285	0,7777
f	-0,0451	0,0037	-12,0957	<0,0001
$r^2 = 0,85^{**}$				
girassol + escarificação				
d	-1,7712	0,1449	-12,2207	<0,0001
e	0,5558	0,1160	4,7935	<0,0001
f	-0,0503	0,0031	-15,9768	<0,0001
$r^2 = 0,91^{**}$				
triticale + milho				
d	-1,0869	0,1496	-7,2643	<0,0001
e	0,0417	0,1189	0,3505	0,7285
f	-0,0482	0,0037	-13,1134	<0,0001
$r^2 = 0,87^{**}$				
triticale + sorgo				
d	-1,2889	0,1341	-9,6135	<0,0001
e	0,2285	0,1066	2,1440	0,0405
f	-0,0462	0,0031	-14,8092	<0,0001
$r^2 = 0,89^{**}$				
triticale + crotalária				
d	-0,9738	0,1261	-7,7228	<0,0001
e	-0,0432	0,0975	-0,4432	0,6609
f	-0,0397	0,0029	-13,8231	<0,0001
$r^2 = 0,88^{**}$				
triticale + escarificação				
d	-1,6238	0,1364	-11,9089	<0,0001
e	0,4524	0,1100	4,1132	0,0003
f	-0,0491	0,0041	-12,1176	<0,0001
$r^2 = 0,88^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Tabela 21. Estatística descritiva para os dados de densidade do solo referentes às amostras coletadas no primeiro (2003/2004) e no terceiro (2005/2006) ano de avaliação do experimento, nos oito tratamentos, no centro das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

	Tratamentos*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
primeiro ano - camada de 0 a 20 cm								
n° amostras	32	32	32	32	32	32	32	32
Média (g cm ⁻³)	1,28	1,26	1,29	1,26	1,27	1,27	1,31	1,24
Mediana (g cm ⁻³)	1,28	1,26	1,29	1,28	1,28	1,27	1,35	1,24
Primeiro quartil (g cm ⁻³)	1,19	1,21	1,26	1,17	1,20	1,24	1,20	1,19
Terceiro quartil (g cm ⁻³)	1,39	1,30	1,35	1,35	1,32	1,31	1,41	1,30
Mínimo (g cm ⁻³)	1,13	1,12	1,16	1,05	1,14	1,16	1,10	1,06
Máximo (g cm ⁻³)	1,49	1,38	1,45	1,43	1,44	1,38	1,48	1,35
CV (%)	8,15	4,77	5,28	8,63	5,95	3,99	8,88	5,93
primeiro ano - camada de 20 a 40 cm								
n° amostras	32	32	32	32	32	32	32	32
Média (g cm ⁻³)	1,25	1,25	1,24	1,30	1,29	1,23	1,27	1,24
Mediana (g cm ⁻³)	1,23	1,23	1,27	1,31	1,30	1,24	1,28	1,23
Primeiro quartil (g cm ⁻³)	1,16	1,19	1,20	1,26	1,24	1,16	1,25	1,20
Terceiro quartil (g cm ⁻³)	1,40	1,29	1,29	1,35	1,33	1,29	1,31	1,31
Mínimo (g cm ⁻³)	1,02	1,11	1,02	1,13	1,16	1,06	1,15	1,07
Máximo (g cm ⁻³)	1,46	1,40	1,39	1,41	1,44	1,40	1,37	1,37
CV (%)	9,83	6,18	7,30	5,72	5,31	6,81	3,88	6,22
terceiro ano - camada de 0 a 20 cm								
n° amostras	32	32	32	32	32	32	32	32
Média (g cm ⁻³)	1,28	1,31	1,27	1,26	1,28	1,32	1,30	1,29
Mediana (g cm ⁻³)	1,28	1,29	1,28	1,28	1,29	1,32	1,32	1,32
Primeiro quartil (g cm ⁻³)	1,26	1,25	1,24	1,19	1,25	1,29	1,25	1,17
Terceiro quartil (g cm ⁻³)	1,32	1,39	1,30	1,33	1,31	1,35	1,34	1,40
Mínimo (g cm ⁻³)	1,19	1,20	1,14	1,09	1,21	1,20	1,23	1,02
Máximo (g cm ⁻³)	1,37	1,42	1,38	1,42	1,39	1,40	1,38	1,49
CV (%)	3,19	5,50	4,00	7,15	2,93	3,41	3,30	10,08
terceiro ano - camada de 20 a 40 cm								
n° amostras	32	32	32	32	32	32	32	32
Média (g cm ⁻³)	1,27	1,24	1,28	1,23	1,26	1,25	1,29	1,24
Mediana (g cm ⁻³)	1,26	1,24	1,28	1,25	1,25	1,26	1,27	1,21
Primeiro quartil (g cm ⁻³)	1,25	1,21	1,23	1,20	1,23	1,21	1,26	1,18
Terceiro quartil (g cm ⁻³)	1,29	1,29	1,33	1,27	1,31	1,31	1,31	1,31
Mínimo (g cm ⁻³)	1,15	1,13	1,17	1,07	1,14	1,10	1,16	1,12
Máximo (g cm ⁻³)	1,37	1,33	1,37	1,31	1,41	1,34	1,49	1,41
CV (%)	3,39	3,95	4,25	4,85	5,07	4,83	4,95	6,27

*Tratamentos: (1) girassol+milheto; (2) girassol+sorgo; (3) girassol+crotalaria; (4) girassol+escarificação; (5) triticale+milheto; (6) triticale+sorgo; (7) triticale+crotalaria e (8) triticale+escarificação.

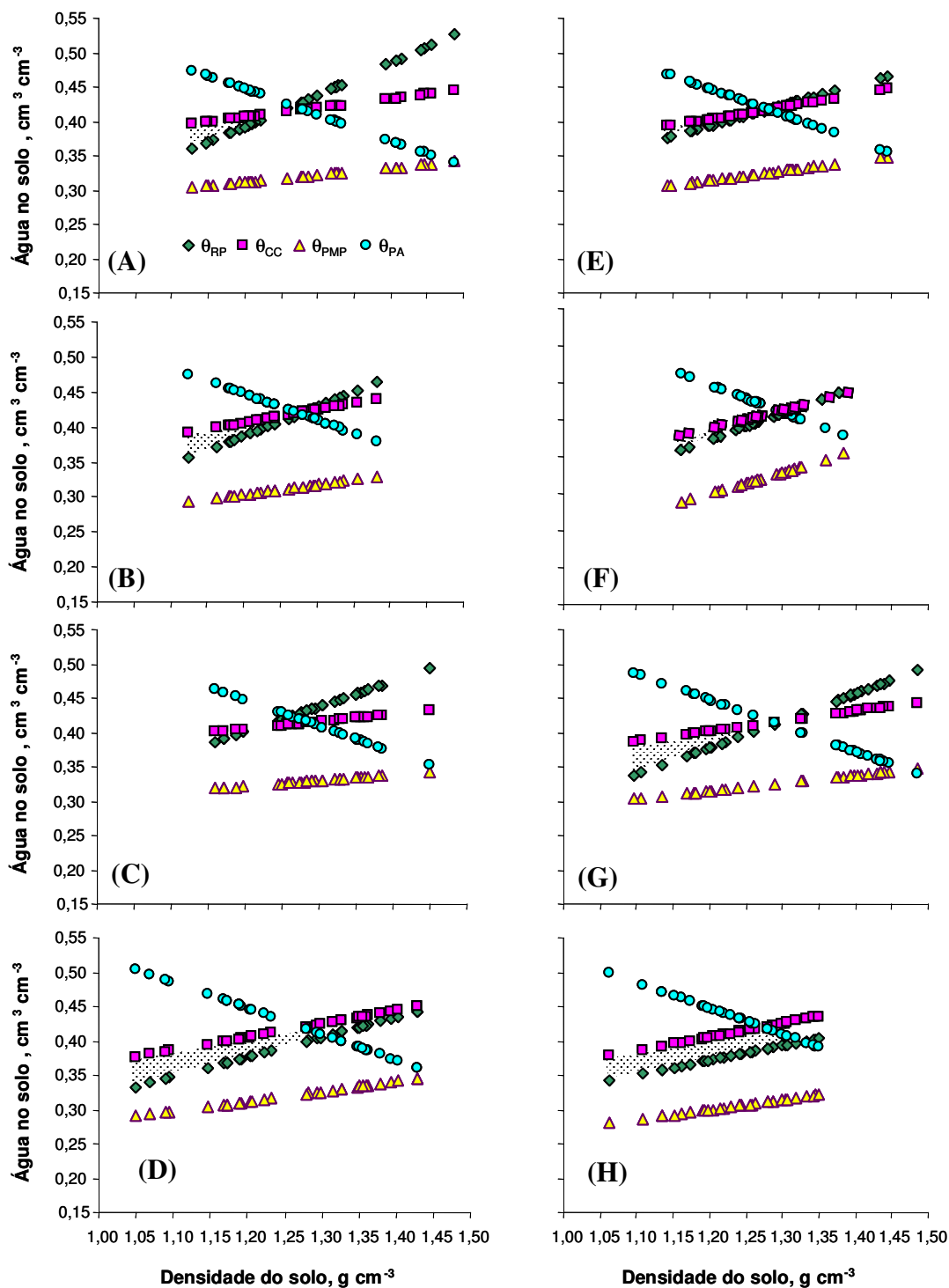


Figura 13. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 7,5 a 12,5 cm, no primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticale+milheto; (F) triticale+sorgo; (G) triticale+crotalária; (H) triticale+escarificação.

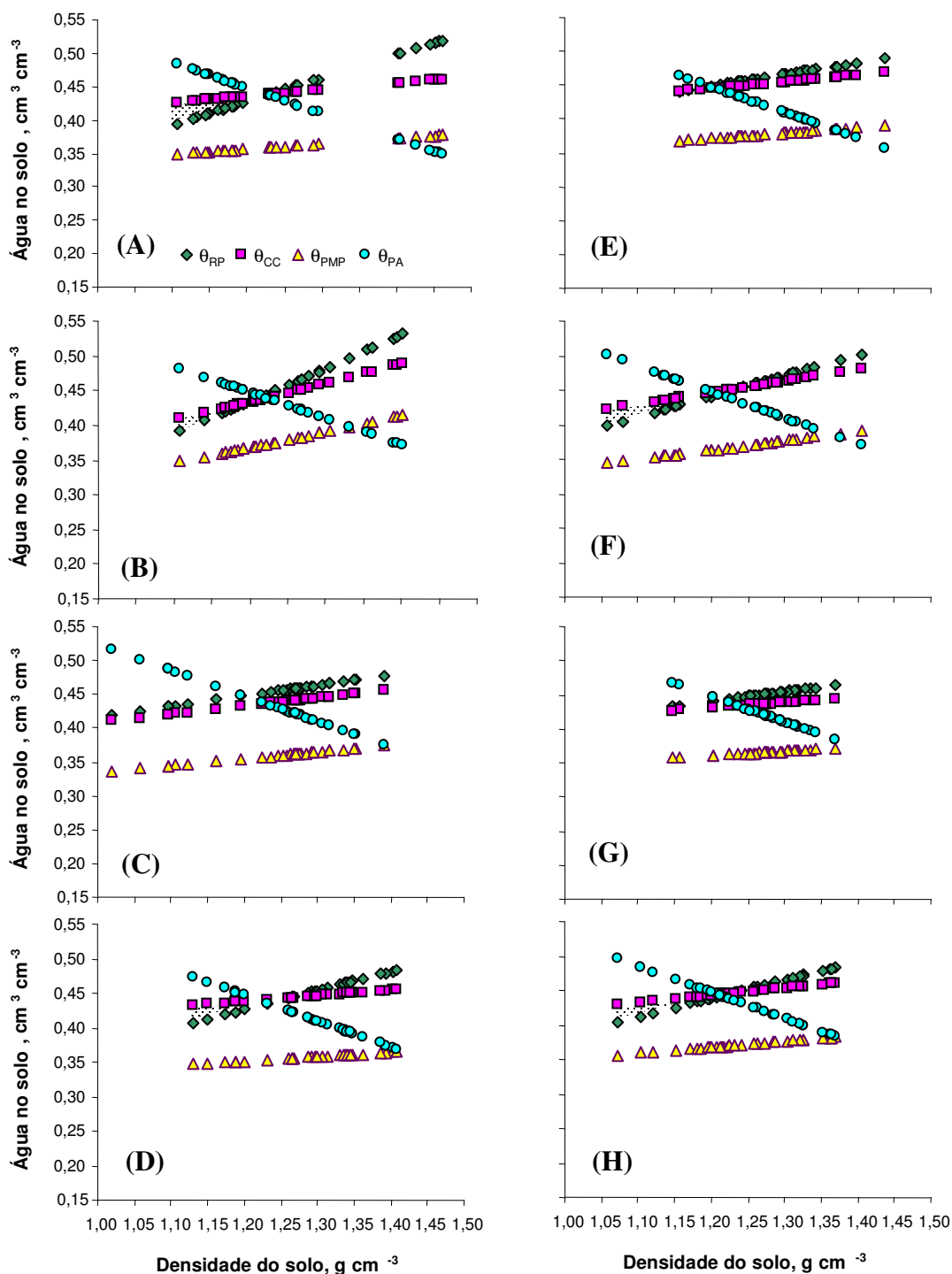


Figura 14. Variação do conteúdo de água, em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 27,5 a 32,5 cm, no primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticales+milheto; (F) triticales+sorgo; (G) triticales+crotalária; (H) triticales+escarificação.

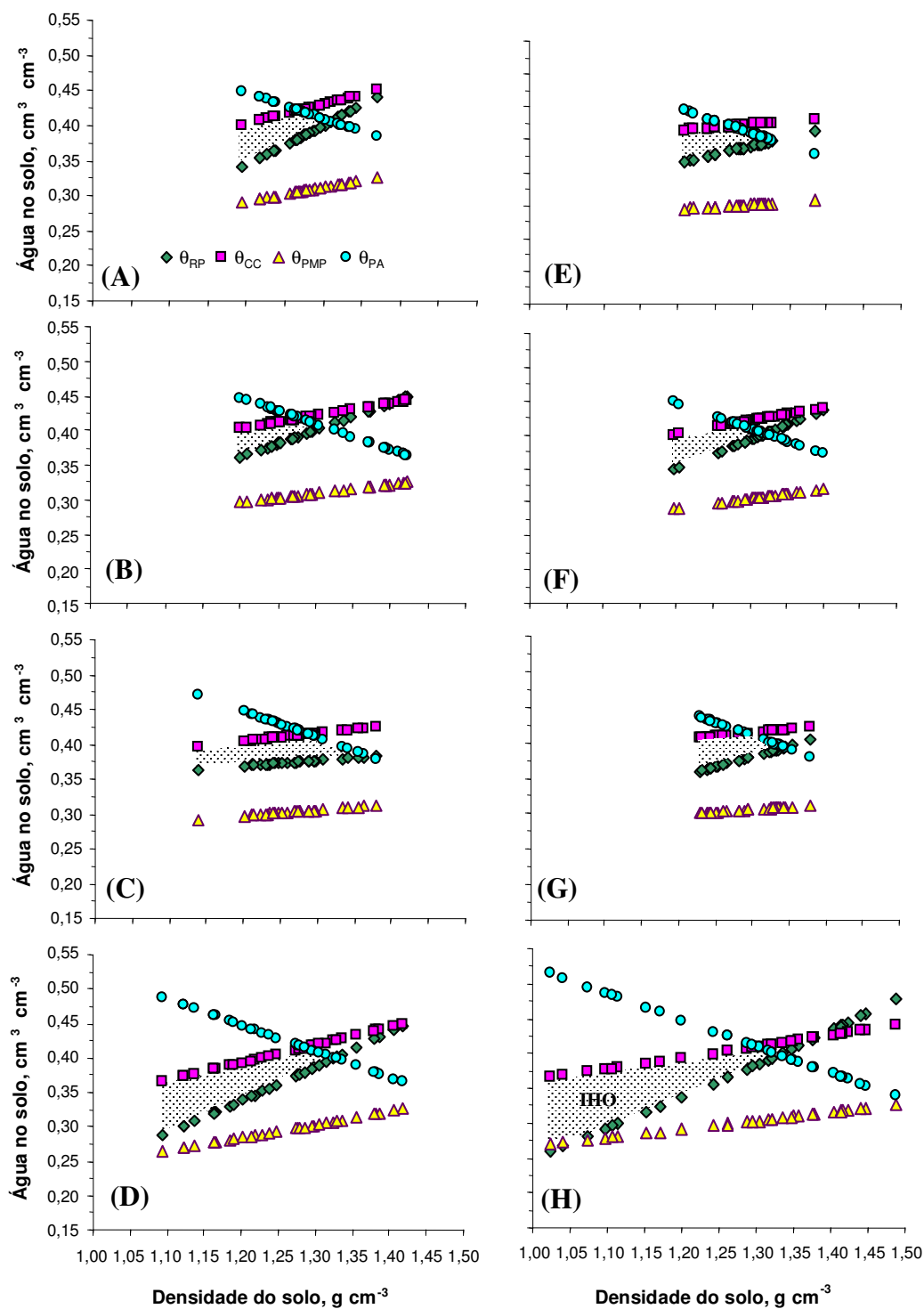


Figura 15. Variação do conteúdo de água, em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 7,5 a 12,5 cm, no terceiro ano do experimento A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticale+milheto; (F) triticale+sorgo; (G) triticale+crotalária; (H) triticale+escarificação.

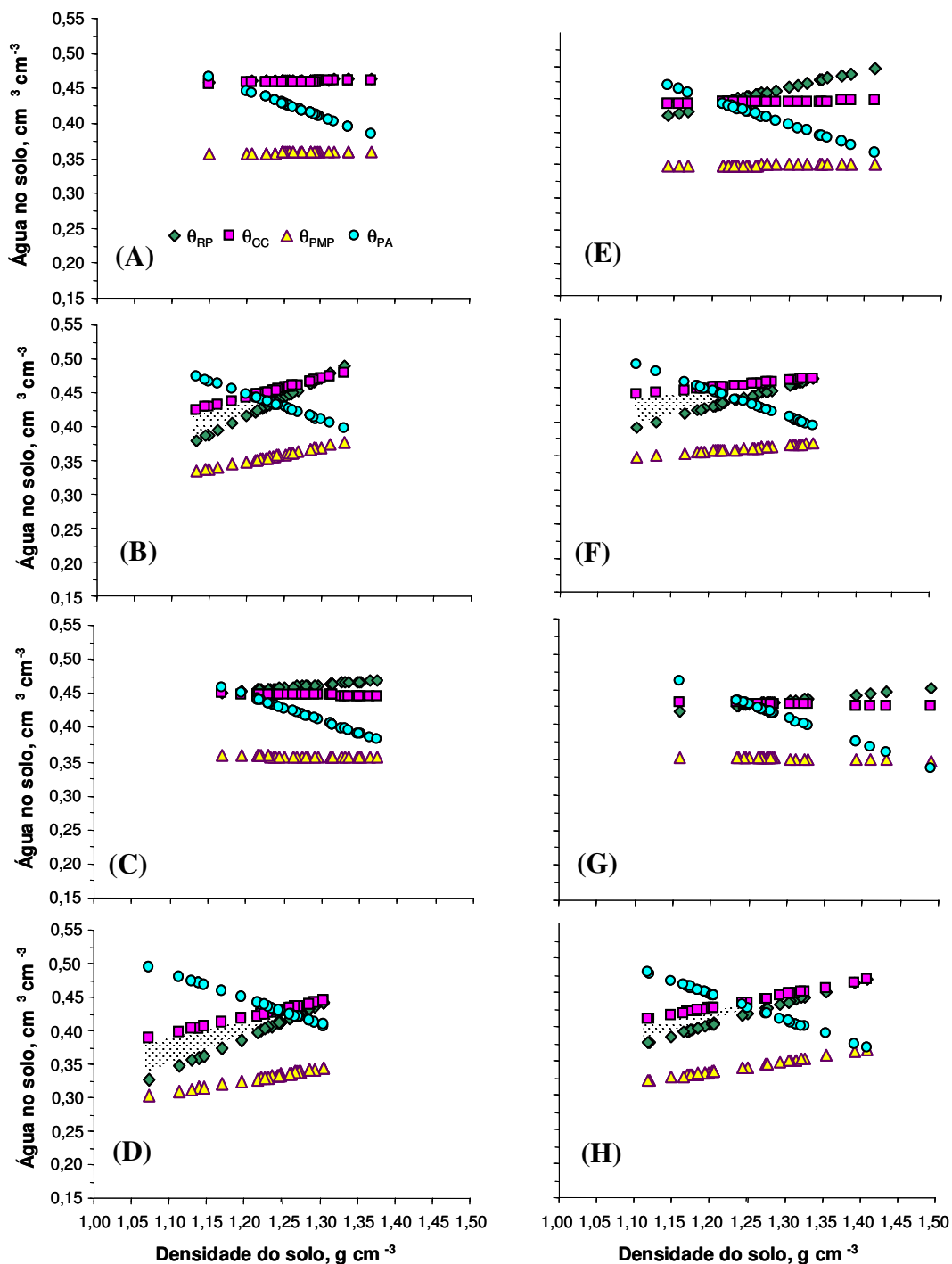


Figura 16. Variação do conteúdo de água, em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na profundidade de 27,5 a 32,5 cm, no terceiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) girassol+milheto; (B) girassol+sorgo; (C) girassol+crotalária; (D) girassol+escarificação; (E) triticale+milheto; (F) triticale+sorgo; (G) triticale+crotalária; (H) triticale+escarificação.

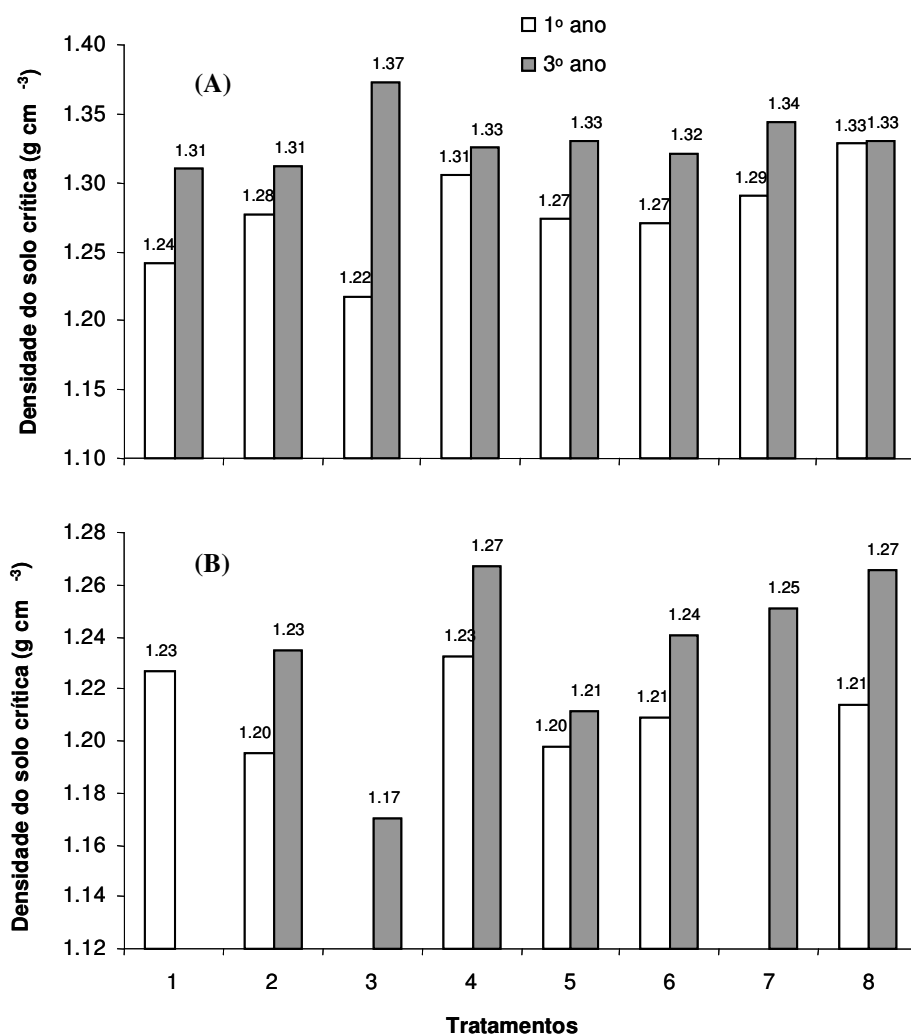


Figura 17. Densidade do solo crítica nas camadas de 0 a 20 cm (A) e 20 a 40 cm (B), no primeiro e no terceiro ano com repetição dos tratamentos. Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalaria (7) e triticales+escarificação (8).

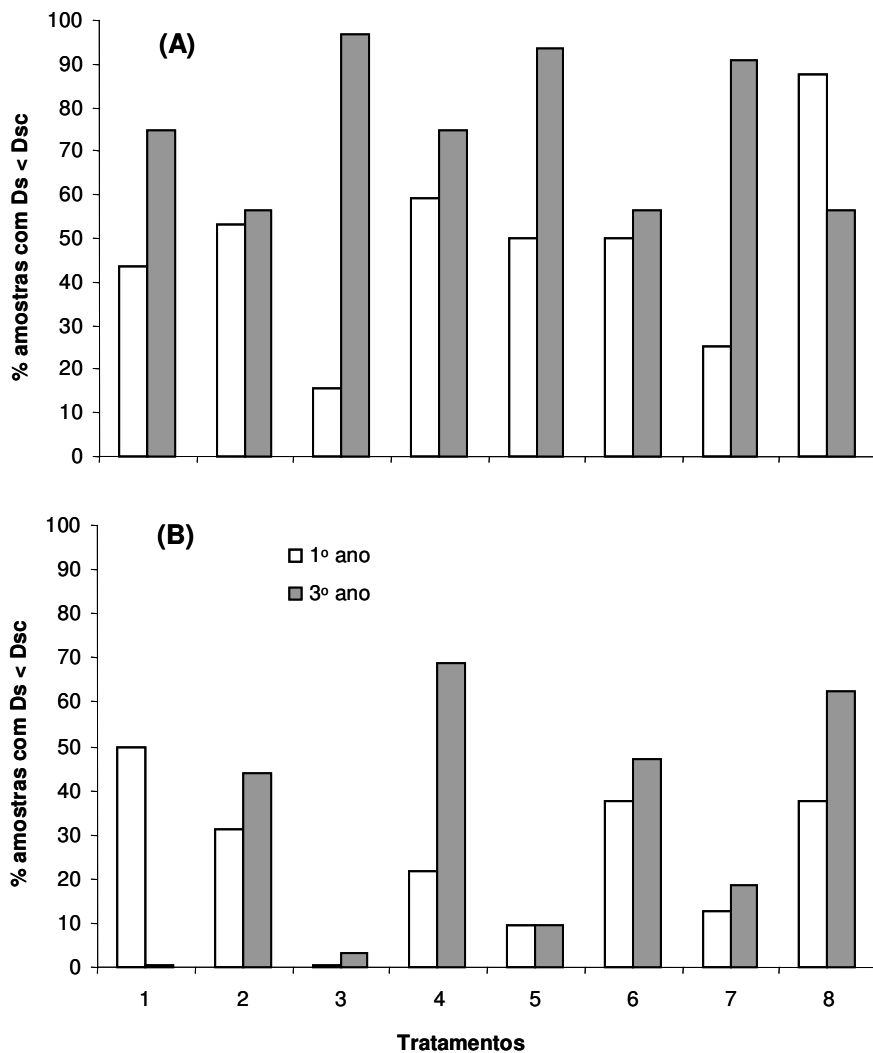


Figura 18. Porcentagem de amostras apresentando valores de densidade do solo (Ds) inferior à densidade do solo crítica (Dsc), no primeiro e no terceiro ano do experimento, nas camadas de 0 a 20 cm (A) e 20 a 40 cm (B) de profundidade. Tratamentos: girassol+milheto (1); girassol+sorgo (2); girassol+crotalária (3); girassol+escarificação (4); triticales+milheto (5); triticales+sorgo (6); triticales+crotalaria (7) e triticales+escarificação (8).

6.7 Produtividade da soja

Na tabela 22 constam os resultados de produtividade da soja nos três anos agrícolas em que foi avaliado o experimento (2003/2004; 2004/2005; 2005/2006). Em nenhum ano agrícola houve interação significativa entre o cultivo de outono-inverno e o manejo de primavera.

No primeiro ano (2003/2004) não houve diferença significativa quanto à produtividade de soja entre os tratamentos avaliados. Porém, observou-se que os tratamentos envolvendo escarificação produziram, em média, 225, 505 e 251 kg ha⁻¹ a mais de grãos, em relação aos tratamentos envolvendo o cultivo das espécies de cobertura milheto, sorgo, e crotalária júncea, respectivamente. Essa maior produtividade, mesmo não sendo estatisticamente significativa, pode estar relacionada ao rompimento da camada mais adensada do solo, como comprovado pelo aumento do IHO (Figura 13D e 13H), da Dsc (Figura 17 A) e da macroporosidade (Tabela 11), registrada no centro da camada de 0 a 20 cm.

A melhoria nas condições físicas do solo para o crescimento das raízes de soja, no primeiro ano após a escarificação, fez com que a planta diminuísse a produção de raízes laterais (Figura 6A e 6B), comum quando há limitações físicas à penetração das raízes no perfil do solo (ZONTA et al., 2006). Essa economia em fotoassimilados para a produção de raízes pode ter sido convertida em fitomassa da parte aérea e, conseqüentemente, em produtividade de grãos.

Já no segundo ano agrícola (2004/2005), observou-se um efeito positivo, estatisticamente comprovado, do cultivo de triticale como cultura de outono-inverno na produtividade de grãos de soja. Apesar de não terem sido feitas avaliações estruturais do solo nesse ano, esse resultado pode ter sido reflexo da melhor estruturação do solo promovido por esse cereal de inverno, até 10 cm de profundidade, como indicam os valores de estabilidade de agregados já no primeiro ano de avaliação do experimento (Tabela 9).

Quanto ao manejo de primavera, a crotalária júncea promoveu no segundo ano com repetições dos tratamentos, ganhos de produtividade na ordem de 303, 611 e 353 kg ha⁻¹, em relação à média dos tratamentos envolvendo milheto, sorgo e escarificação, respectivamente. Além disso, pode-se observar na figura 19 que o tratamento “triticale+crotalária” se destacou em relação aos demais com produtividade de grãos na ordem

de 3190 kg ha⁻¹, mesmo não havendo interação significativa entre o cultivo de outono-inverno e o manejo de primavera. Esse resultado pode estar relacionado com o maior teor de MO na camada de 0 a 5 cm, observados já no primeiro ano de aplicação desse tratamento (Figura 7A) e que manteve-se maior no terceiro ano (Figura 7B), levando a acreditar que também foi maior no segundo ano de avaliação. O maior teor de MO pode ter aumentado a retenção de água no solo, suprindo as exigências hídricas da planta, principalmente nesse segundo ano agrícola em que as chuvas foram muito mal distribuídas durante o ciclo da soja (dezembro a março) (Figura 1B).

No terceiro ano de avaliação do experimento, as produtividades de soja foram muito semelhantes, não havendo diferenças entre os tratamentos. Além disso, comparando com os resultados dos anos anteriores, a produtividade de grãos foi muito superior. Esse aumento pode estar relacionado com a ótima distribuição das chuvas durante o ciclo da cultura (Figura 1C) e também pela melhoria na qualidade estrutural do solo, referente aos resultados de porosidade do solo, em especial pelo incremento na macroporosidade, além do aumento do IHO e da Dsc, principalmente nas camadas mais superficiais do solo.

Trabalhos encontrados na literatura como de Bertol & Fischer (1997) relatam que o preparo do solo por meio de um escarificador com rolo destorroador proporcionam maior produtividade de grãos de soja em relação aos demais tratamentos, incluindo o sistema plantio direto. Os autores atribuem esse ganho de produtividade em virtude das melhores condições do espaço poroso. No entanto, os resultados de produtividade de soja do atual experimento revelam que produtividades semelhantes às obtidas em área escarificada podem ser alcançadas em áreas manejadas em SSD, com o cultivo de planta de cobertura com sistema radicular agressivo e vigoroso, capaz de melhorar a qualidade estrutural do solo. Câmara e Klein (2005) também verificaram ausência de resposta na produtividade de grãos de soja com o manejo envolvendo escarificação solo, em comparação aos tratamentos mantidos em SSD sem a intervenção mecânica, mesmo havendo redução da resistência à penetração com a utilização do escarificador.

Apesar dos maiores valores de IHO, com os tratamentos envolvendo escarificação do solo, e em especial com o tratamento “triticale+escarificação”, no terceiro ano de condução do experimento (Figura 15H), essas diferenças não foram suficientes para proporcionarem ganhos de produtividade de soja em relação aos demais tratamentos. Portanto,

a utilização do IHO para a avaliação da qualidade estrutural do solo não relacionou-se diretamente com a produtividade da soja (cultura estudada). Assim, seria necessário acompanhar, com avaliações constantes (se possível diárias), os teores de água no solo durante o ciclo da cultura, para saber a frequência de tempo em que as plantas permaneceram com a umidade do solo às margens do IHO. Assim, mesmo que um tratamento resulte em maior IHO, pode haver condições não favoráveis para o crescimento das plantas, pois diferenças quanto à quantidade e persistência de palha, porcentagem de cobertura do solo, aporte de MO, entre outros fatores, influenciam no comportamento físico-hídrico do solo.

Tabela 22. Produtividade da soja cultivada nos anos agrícolas de 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 .

Tratamentos ⁽¹⁾	Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Cultivo de inverno (CI)			
Girassol	1966	2426 b	3634
Triticale	2093	2740 a	3640
Manejo de primavera (MP)			
Milheto	2050	2597 ab	3572
Sorgo	1770	2289 b	3589
Crotalária	2024	2900 a	3787
escarificação	2275	2547 b	3602
Valor de F ⁽²⁾			
Cultivo de inverno	1,63 ns	8,38 *	0,01 ns
Manejo de primavera (MP)	4,29 ns	5,36 *	2,04 ns
CI x MP	0,48 ns	0,99 ns	0,84 ns
CV			
Cultivo de inverno	17,75	34,34	10,45
Manejo de primavera (MP)	28,80	27,46	7,80

(1) Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %.

(2) ns e *: não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F,

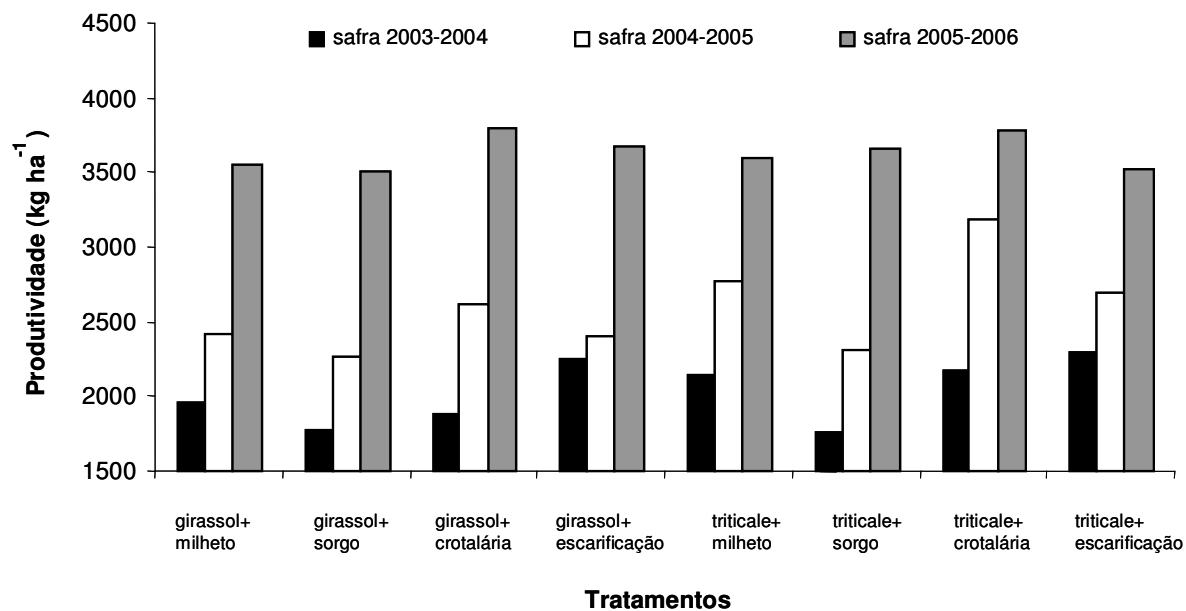


Figura 19. Produtividade de soja nas safras 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006.

7 CONCLUSÕES

A ausência de plantas com sistema radicular fasciculado na rotação de culturas resulta em solos menos estruturados em superfície, e a escarificação do solo em sucessão ao triticales promove menor desestruturação do solo do que em sucessão ao girassol.

O cultivo de plantas de cobertura por três anos consecutivos, e em especial o cultivo de *Crotalaria juncea*, possibilita maiores incrementos no teor de matéria orgânica no solo na camada de 0 a 5 cm, resultando na redução da densidade do solo em superfície.

A escarificação mecânica promove melhores condições físicas e físico-hídricas, como redução da resistência à penetração e aumento da porosidade de aeração de forma imediata, enquanto que a utilização de plantas de cobertura proporciona resultados semelhantes já no terceiro ano.

O cultivo de triticales como cultura de outono-inverno e o cultivo de milho ou crotalária como plantas de cobertura proporcionaram melhores qualidades físicas e físico-hídricas do solo.

O índice S apresenta-se como uma ferramenta de análise físico-hídrica do solo sensível às alterações ocorridas na estrutura do solo, principalmente na camada de 0 a 5 cm, onde obtiveram-se os maiores valores de S com os manejos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura em relação à escarificação mecânica após três anos repetindo os tratamentos.

Os maiores valores de IHO para o manejo do solo envolvendo escarificação mecânica, não resultam em ganhos de produtividade de soja, o que deixa claro a necessidade de avaliar a frequência com que a umidade do solo permanece dentro do IHO durante o ciclo da cultura.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Produção e matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres**. v. 44, n. 254, p. 421-431, 1997.

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e ou mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.857-865, 2000.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A.C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.495-504, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.599-607, 2000.

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plants Roots: the hidden half**. 2. ed. New York: MARCEL DEKKER, 1996. p. 453-470.

BERG, M. van der; KLAMT, E.; van REEUWIJK & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v.78, p.161-180, 1997.

BERTOL, O.J. & FISCHER, I.I. Semeadura direta versus sistemas de preparo reduzido: efeito na cobertura do solo e no rendimento da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, v.17, p. 87-96, 1997.

BETZ, D.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, 62:1384-1393, 1998.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. da; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.639-645, 2006.

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, n. 1, p. 167-177, 2001.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison : America Society of Agronomy, 1986. p.363-375.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em latossolo vermelho-escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n. 9, p. 1663-1667, 1999.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 12.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 881p.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.91-98, 1990.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil Tillage Research**, v.68, p.49-57, 2002.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, v. 35, p. 813-819, 2005.

CAMARGO, D.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Piracicaba : USP/ESALQ, 1997. 132p.

CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, v.164, n.2, p.101-110, 1999.

CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médici”**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1983. 95p. (Boletim técnico, 1)

CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part.1. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 901-926.

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

CASTRO, O.M. de; CAMARGO, O.A.de; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; CANTARELLA, H. Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional. **Boletim Científico**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 23 p. (Boletim científico, 11)

CASTRO, O.M. de. Compactação do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A.L. **Plantio direto no estado de São Paulo**. Piracicaba: FEALQ/ESALQ, 1989. p. 129-139.

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

CENTURION, J.F.; DEMATÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 263-266, 1985.

COALE F. J.; GROVE J.H. Effect of soil potassium availability on soybean root and shoot growth under unrestrained rooting conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 9, p. 1565-1584, 1986.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, n.1, p.199-238, 1988.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil Tillage Research**. v. 20, p. 87-100, 1991.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3, p.201-214, 2004.

DIAS JÚNIOR, M. S. . Compactação do Solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 55-94.

DOURADO NETO, D.; van Lier, Q.J.; Botrel, T.A.; Libardi, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.1, p.92-102, 1990.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats tilled and untilled loess soil. **Soil Tillage Research**. v. 3, p. 261-275, 1983.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EVANS, S.D.; LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B.; MOCRIEF, J.F.; NELSON, G.A. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture and corn yield. **Soil Tillage Research**, v.38, p.35-46, 1996.

FEHR, W.R., CAVINESS, C.E., BURMOOD, D.T., PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v. 11, p.29-31, 1971.

FERRERAS, L.A.; DE BATISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.161-170, 2001.

FOLLETT, R.F. Soil Management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil Tillage Research**, v. 61, p.77-92, 2001.

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil Tillage Research**, v. 66, p.95-106, 2002a.

FRANZLUEBBERS, A.J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil Tillage Research**, v. 66, p.197-205, 2002b.

GENRO JÚNIOR, S.A., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-897, 1980.

GILL, K.S.; GAJRI, P.R.; CHOUDHARY, J. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. **Soil Tillage Research**. v. 39, p. 213-227, 1996.

GOMES, F.P. **Curso de Estatística Experimental**. 13 ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1990. 468p.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**. v. 32, p. 180-186, 1968.

HAISE, H.R.; HASS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3 atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15- and 26- atmosphere percentage. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.34, p. 20-25, 1955.

HAKOYAMA, S.; YOSHIDA, K.; NAKAGAWA, J.; MORAES, M.H.; IWAMA, H.; IGUITA, K.; NAKAGAWA, J. Efeitos da semeadura direta e do preparo convencional em algumas propriedades físicas do solo. São Paulo: **Científica**. v. 23, n. 1, p. 17-30, 1995.

HENDERSON, C.W. Lupin as biological plough: evidence for, and effects on wheat growth and yield. Australia: **Journal of Experimental Agriculture**, v. 29, p. 99-102, 1989.

HENKLAIN, J.C. Influência do tempo no manejo do sistema de semeadura direta e suas implicações nas propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. Resumos. Rio de Janeiro: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1997. 1 CD.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic Press, 1982. 264p.

IMHOFF, S del C. **Indicadores de qualidade estrutura e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. Piracicaba, 2002, 94 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

JORGE, J.A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. p. 89-118.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advance in Soil Science**, v.12, p. 1-51, 1990.

KEMPER, W.D.; W.S. CHEPIL. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E., (Ed.), **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KERTZMAN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo roxo provocadas pela compactação do solo**. São Paulo, 1996, 190 p., Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

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

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part. 1, p. 635-662.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; BERTON, A.L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 20 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19)

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel[®] algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Science Agricola**, v. 61, n.6, p.649-654. 2004.

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

LIMA, C.L.R., SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P.; Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 945-951, 2004.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.175-187, 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London, Academic Press, 1995. p. 508-536.

MATTHEW, C.; van LOO, E.N.; THON, E.R.; DAWSON, L.A.; CARE, D.A. Understanding shoot and root development. In: *International grassland ecosystems: na outlook into 21st century*, 19., São Paulo, 2001. **Proceedings**. São Paulo, 2001. p.19-27.

MEROTTO JÚNIOR, 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. **Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. In: Gabriel A. Santos; Flávio Anastácio de Oliveira Camargo. (Org.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais*. 1ª ed. Porto Alegre: Genesis, 1999, p. 1-8.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, v.54, n. 2, p. 393-403, 1995.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 625p.

MÜLLER, M.M.L. **Influência do monocultivo na cana-de-açúcar e nas propriedades físicas e químicas de um Nitossolo Vermelho e um Neossolo Quartzarênico.** Botucatu, 2002, 120 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas.

NUERNBERG, N. J.; STAMMEL, J. G.; CABEDA, M. S. V. Efeito de sucessão de culturas e tipos de adubação em características físicas de um solo da encosta basáltica sul-rio-grandense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 185-190, 1986.

OLIVEIRA, G.C., DIAS JÚNIOR, M.S., RESCKN, D.V.S., CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 327-336, 2004.

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

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, 2001.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 5, p. 929-938, 2000.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

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

REEVE, J.M.; CARTER, A.D. Water release characteristics. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Eds.). **Soil analysis: physical methods.** New York: M. Dekker, 1991. p.111-160.

REEVES, D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil Tillage Research**, v. 43, p.131-167, 1997.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Editora Manole, 2004. 478 p.

RICHARDS, L.A. **Physical conditions of water in soil.** In: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., ENSMINGE, L.E.; CLARK, F.E., (Ed). **Methods of soil analysis - Physical and**

mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSA, 1965. p.128-152.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. **Compactação de solo: Causas e efeitos**. Semina Ciência Agrária, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil Tillage Research**, v. 65, p. 109-115, 2002.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.923-927, 1991.

RUSSEL, R.S. Plant root systems – their function and interaction with the soil. In: Symposium on the soil / root system, 1981, Londrina. **Proceedings...** Londrina: Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR, 1981.

RUSSEL, R.S.; GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility – The response of roots to mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.22, p.305-318, 1974.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado de Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.313-319, 1995.

SAMPSON, R.N., SCHOLLES, R.J. Additional human-induced activities – Article 3.4. In.: WATSON, R.T; NOBLE, I.R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N.H.; VERARDO, D.J.; DOKKEN, D.J. (Eds.), **Land Use, Land-use Change, and Forestry, A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 377 p. 2000.

SANTOS, C.A. dos; LANÇAS, K.P. Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico. **Revista Energia na Agricultura**, v. 14, p. 55-61, 1999.

SANTOS, G; CAMARGO, F. 1999. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. de; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 669-678, 2002.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediatos e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho escuro sob PD. **Engenharia Agrícola**, v.16, n.3, p.52-61, 1997.

SECCO, D.; ROS, C.O. da; SECCO, J.K.; Fiorin, J.E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.407-414, 2005.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S. **O plantio direto no cerrado úmido**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1995, p. 1-2. (Informações agronômicas, v. 69)

SHARMA, P.K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil Tillage Research**, v. 60, p.143-152, 2001.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v.184, n.2, p.323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 884-888, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 9, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 253-260, 2001a.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 10, p. 1269-1275, 2001b.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n. 6, p. 855-860, 2002.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.M. 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.; BUSSCHER, W.J.; LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulky density, and water content relations of a Durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Science**, v.166, p.520-529, 2001.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P., FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Científica Rural**, v.9, n.1, p.23-31, 2004.

STEINHARDT, G.C. **Compactação do solo: um problema oculto**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 3p. (Informações Agronômicas, v.21)

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I.C. de B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M. de C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p. 996-999, 2006.

TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E.W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p.271-291.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.

TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995-1.001, 1975.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa, Agriculture and Agr-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2)

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.1023-1031, 2004.

TORRES, E. & SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (Circular técnica, 23)

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; PICCININ, J.L.; FARIAS, J.R.B. ; GALERANI, P.R.; GAZZIERO, D.L.P. . **Avaliação de sistemas de preparo do solo, rotação de culturas e semadura da soja**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 1998 (Série Documentos).

VASQUEZ, E.V. & DE MARIA, I.C. Influencia del Laboreo sobre la rugosidad del suelo y la retención de agua en un Ferrasol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Resumo expandido**. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CDROM

VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R. (Ed.). **Plant environment interactions**. New York : M. Dekker, 1994. p.263-287.

VERNETTI JÚNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S. **Plantio direto: uma opção de manejo para a produção agrícola sustentável**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 69p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 58).

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n. 7, p. 873-882, 1984.

WEST, T.O.; POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation - a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1930-1946, 2002.

WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and notilled soil. **Soil Tillage Research**, v. 2, p. 379-393, 1982.

WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. The behavior of roots encountering cracks in soil. I. Experimental methods and results. **Plant Soil**, v.77, p. 141-149, 1984.

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

ZONTA, E.; BRASIL, F. da; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. da. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, v.38, n.5, p.947-958, 2000.

APÊNDICE

Apêndice 1. Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo ⁽¹⁾, referente às amostras coletadas no primeiro ano do experimento.

Tratamentos	Parâmetros ⁽²⁾					R ²
	α	n	m	θ_r	θ_s	
Profundidade 0 a 5 cm						
girassol + milho	0,0057	0,5698	1,2346	0,300	0,561	0,999**
girassol + sorgo	0,0004	0,4458	3,1182	0,324	0,551	0,996**
girassol + crotalária	0,0442	0,8400	0,4647	0,289	0,559	0,999**
girassol + scarificação	0,0505	1,0037	0,2096	0,248	0,542	0,996**
triticale + milho	0,0349	1,0633	0,3545	0,282	0,579	0,999**
triticale + sorgo	0,0008	0,5726	2,6801	0,337	0,538	0,998**
triticale + crotalária	0,0004	0,4572	3,3253	0,305	0,552	0,995**
triticale + escarificação	0,0256	0,7047	0,5639	0,296	0,548	0,998**
Profundidade 7,5 a 12,5 cm						
girassol + milho	0,0006	0,4377	2,4452	0,322	0,507	0,995**
girassol + sorgo	0,0017	0,6813	1,6138	0,347	0,481	0,990**
girassol + crotalária	0,0003	0,4276	3,1177	0,345	0,512	0,995**
girassol + scarificação	0,0149	0,6047	0,9935	0,321	0,549	0,997**
triticale + milho	0,0351	1,6605	0,2931	0,320	0,541	0,997**
triticale + sorgo	0,0001	0,5501	6,0819	0,339	0,499	0,995**
triticale + crotalária	0,0001	0,5020	5,8067	0,348	0,522	0,995**
triticale + escarificação	0,2082	4,5490	0,0506	0,263	0,558	0,999**
Profundidade 15 a 20 cm						
girassol + milho	0,0705	2,9816	0,0868	0,320	0,502	0,999**
girassol + sorgo	0,0026	0,7303	1,6074	0,368	0,500	0,995**
girassol + crotalária	0,0003	0,4336	2,4660	0,341	0,472	0,999**
girassol + scarificação	0,0003	0,4273	3,1369	0,355	0,518	0,995**
triticale + milho	0,0127	0,6872	0,8023	0,340	0,531	0,984**
triticale + sorgo	0,0001	0,4419	6,4032	0,349	0,530	0,998**
triticale + crotalária	0,0025	0,6170	1,6276	0,367	0,522	0,995**
triticale + escarificação	0,1286	4,7978	0,0443	0,275	0,499	0,997**
Profundidade 27,5 a 32,5 cm						
girassol + milho	0,5221	2,6039	0,0513	0,291	0,520	0,995**
girassol + sorgo	0,2488	3,5558	0,0353	0,297	0,531	0,993**
girassol + crotalária	0,0001	0,4059	5,8555	0,368	0,539	0,996**
girassol + scarificação	0,1277	2,0768	0,1090	0,335	0,530	0,999**
triticale + milho	0,0149	0,7019	0,4371	0,381	0,531	0,985**
triticale + sorgo	0,0004	0,5683	4,3323	0,389	0,538	0,998**
triticale + crotalária	0,0002	0,5265	4,6716	0,389	0,529	0,998**
triticale + escarificação	0,0110	0,6301	0,8120	0,357	0,540	0,999**
Profundidade 47,5 a 52,5 cm						
girassol + milho	0,0648	0,8882	0,4219	0,359	0,560	0,996**
girassol + sorgo	0,0918	0,9841	0,3964	0,353	0,559	0,996**
girassol + crotalária	0,0377	0,8191	0,6638	0,359	0,551	0,997**
girassol + scarificação	0,0426	0,7189	0,6995	0,357	0,562	0,996**
triticale + milho	0,0422	0,8210	0,4552	0,357	0,559	0,983**
triticale + sorgo	0,0297	0,8110	0,6620	0,368	0,565	0,998**
triticale + crotalária	0,0360	0,8737	0,5669	0,367	0,550	0,997**
triticale + escarificação	0,0810	0,8430	0,4100	0,347	0,561	0,998**

⁽¹⁾ $(\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m)$

Apêndice 2. Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo, referente às amostras coletadas no terceiro ano do experimento.

Tratamentos	Parâmetros ⁽¹⁾					R ²
	α	n	m	θ_r	θ_s	
Profundidade 0 a 5 cm						
girassol + milho	0,1286	4,9223	0,0592	0,248	0,540	0,999**
girassol + sorgo	0,1354	1,4078	0,2740	0,254	0,561	0,998**
girassol + crotalaria	0,1999	3,8764	0,0752	0,228	0,562	0,999**
girassol + scarificação	0,0633	1,2729	0,3257	0,286	0,530	0,997**
triticale + milho	0,1624	4,6281	0,0760	0,261	0,559	0,997**
triticale + sorgo	0,1368	4,3979	0,0804	0,282	0,551	0,996**
triticale + crotalaria	0,2412	3,9298	0,0774	0,246	0,538	0,998**
triticale + escarificação	0,1336	2,1075	0,1315	0,271	0,511	0,997**
Profundidade 7,5 a 12,5 cm						
girassol + milho	0,0342	1,0909	0,4779	0,311	0,535	0,994**
girassol + sorgo	0,0387	1,0441	0,4092	0,306	0,525	0,987**
girassol + crotalaria	0,0243	0,8350	0,7850	0,315	0,532	0,998**
girassol + scarificação	0,0482	1,2245	0,5206	0,320	0,533	0,959**
triticale + milho	0,0514	1,8427	0,2454	0,308	0,524	0,996**
triticale + sorgo	0,0357	0,8057	0,4177	0,286	0,522	0,991**
triticale + crotalaria	0,0678	1,0202	0,3305	0,293	0,523	0,989**
triticale + escarificação	0,1892	1,5847	0,1178	0,239	0,525	0,978**
Profundidade 15 a 20 cm						
girassol + milho	0,0739	5,9692	0,0578	0,320	0,550	0,996**
girassol + sorgo	0,0850	2,6235	0,1133	0,312	0,549	0,992**
girassol + crotalaria	0,1386	4,8965	0,0598	0,294	0,541	0,997**
girassol + scarificação	0,1583	4,7195	0,0572	0,266	0,542	0,998**
triticale + milho	0,1231	4,9691	0,0450	0,287	0,519	0,998**
triticale + sorgo	0,0398	1,0794	0,3911	0,346	0,561	0,996**
triticale + crotalaria	0,0994	6,2357	0,0568	0,291	0,539	0,998**
triticale + escarificação	0,1037	5,9319	0,0493	0,304	0,531	0,997**
Profundidade 27,5 a 32,5 cm						
girassol + milho	0,0805	1,5954	0,1539	0,328	0,540	0,970**
girassol + sorgo	0,1130	2,0422	0,1272	0,335	0,544	0,959**
girassol + crotalaria	0,1311	3,1705	0,0579	0,305	0,527	0,983**
girassol + scarificação	0,3986	2,7220	0,0427	0,214	0,533	0,979**
triticale + milho	0,1292	1,2261	0,1281	0,276	0,526	0,984**
triticale + sorgo	0,0985	3,6091	0,0720	0,341	0,533	0,999**
triticale + crotalaria	0,1817	1,1386	0,2178	0,333	0,523	0,983**
triticale + escarificação	0,1133	2,1742	0,1283	0,316	0,534	0,979**
Profundidade 47,5 a 52,5 cm						
girassol + milho	0,0043	0,6707	1,3889	0,376	0,565	0,992**
girassol + sorgo	0,0119	0,6845	0,6920	0,354	0,551	0,998**
girassol + crotalaria	0,0031	0,5564	1,7125	0,376	0,552	0,996**
girassol + scarificação	0,0161	0,6580	0,7257	0,344	0,569	0,996**
triticale + milho	0,0037	0,5929	1,4586	0,360	0,558	0,991**
triticale + sorgo	0,0065	0,7538	1,2664	0,378	0,564	0,989**
triticale + crotalaria	0,0096	0,6709	1,0382	0,364	0,551	0,998**
triticale + escarificação	0,0133	0,7763	0,6913	0,370	0,542	0,986**

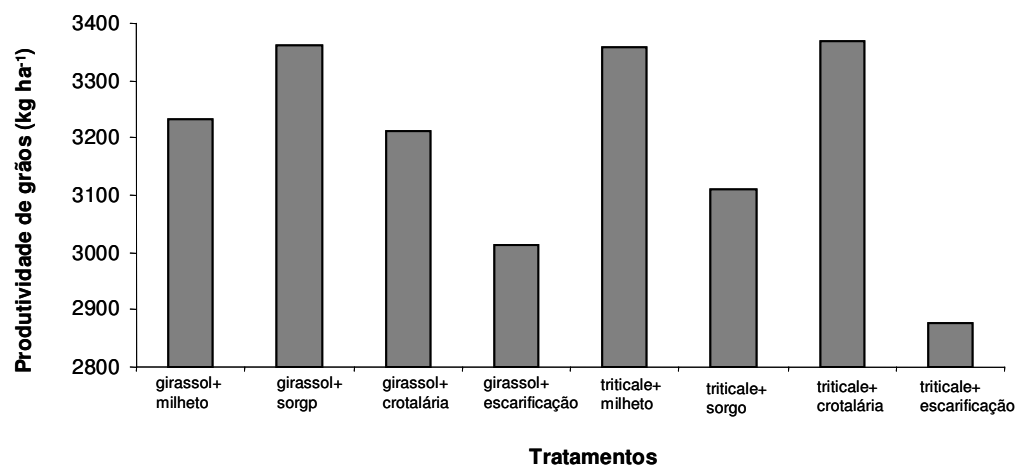
⁽¹⁾ $\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m$

Apêndice 3. Produtividade da soja cultivada nos ano agrícola de 2006/2007.

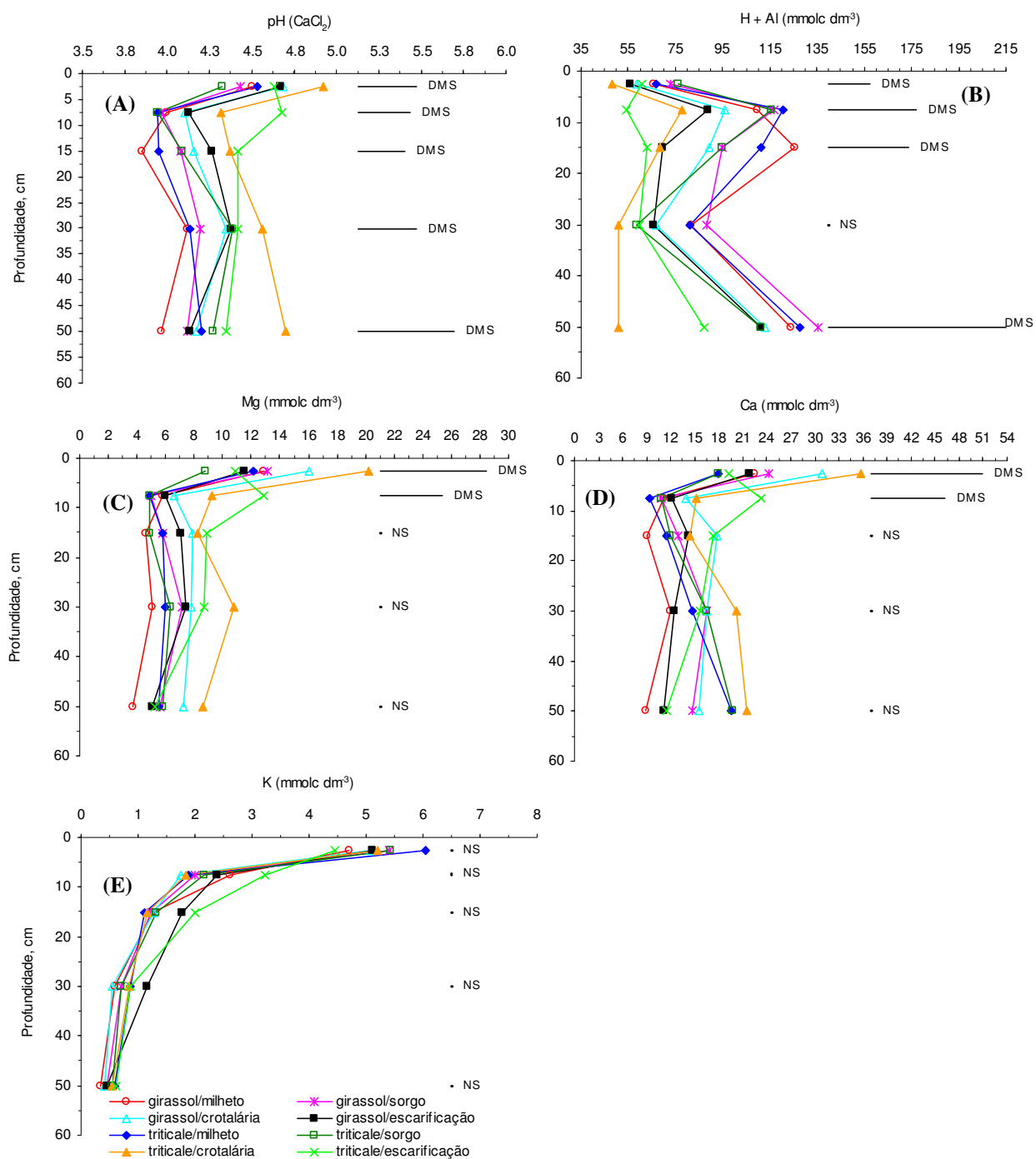
Tratamentos ⁽¹⁾	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Cultivo de inverno (CI)	
Girassol	3205
Triticale	3179
Manejo de primavera (MP)	
milheto	3294 a
sorgo	3237 a
crotalária	3290 a
escarificação	2945 b
Valor de F ⁽²⁾	
Cultivo de inverno	0,061 ns
Manejo de primavera (MP)	2,461 *
CI x MP	0,899 ns
CV	
Cultivo de inverno	2.48
Manejo de primavera (MP)	15.95

(1) Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5 %.

(2) ns e *: não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F,



Apêndice 4. Produtividade de soja na safra 2006/2007.



Apêndice 5. Fertilidade do solo no perfil do solo, avaliada antes da semeadura da soja no terceiro ano de condução do experimento. Valores de pH (A), H+Al (B), Mg trocável (C), Ca trocável (D) e K trocável (E). DMS (diferença mínima significativa); NS (não significativo) a 5 % de probabilidade pelo teste t.