

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DE SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**RECUPERAÇÃO FÍSICA DE UM ARGISSOLO COMPACTADO E SUAS
IMPLICAÇÕES SOBRE O SISTEMA SOLO-MÁQUINA-PLANTA**

**Henrique Debiasi
(Tese)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DE SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**RECUPERAÇÃO FÍSICA DE UM ARGISSOLO COMPACTADO E SUAS
IMPLICAÇÕES SOBRE O SISTEMA SOLO-MÁQUINA-PLANTA**

Henrique Debiasi
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)
Mestre em Engenharia Agrícola (UFSM)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Janeiro de 2008

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

D286r Debiasi, Henrique
 Recuperação física de um Argissolo compactado e suas
 implicações sobre o sistema de solo-máquina-planta /
 Henrique Debiasi — Porto Alegre : H. Debiasi, 2008.

 xxii, 263 f.; il.

 Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em
 Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade
 Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

 1. Solo : Degradação física do solo : Argissolo Vermelho :
 semeadura direta : compactação do solo I. Título.

 CDD: 631.4

HENRIQUE DEBIASI
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Mestre em Engenharia Agrícola - UFSM

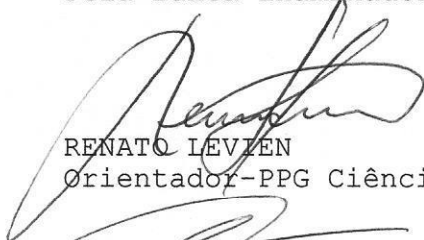
TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

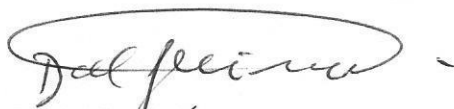
Aprovado em: 09.01.2008
Pela Banca Examinadora



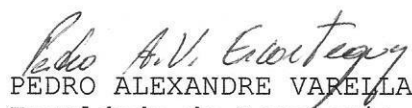
RENATO LEVIEN
Orientador-PPG Ciência do Solo



CARLOS RICARDO TREIN
Departamento de Solos/UFRGS

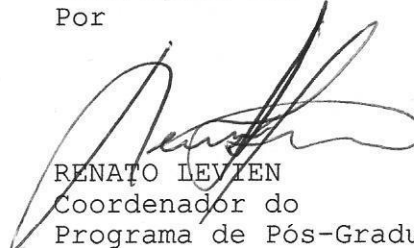


DALVAN JOSÉ REINERT
Departamento de Solos/UFSM



PÉDRO ALEXANDRE VARELLA ESCOSTEGUY
Faculdade de Agronomia e
Medicina Veterinária - UPF

Homologado em: 10.01.2008
Por



RENATO LEVIEN
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo



GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

“Força Henrique, força....”

Aos meus pais, Sérgio e Maria Inês,
e a minha irmã Fernanda

Ofereço.

“Amor, tudo vai dar certo, falta pouco...”

A Brenda, minha namorada

Dedico

*"Você não sabe o quanto eu caminhei
pra chegar até aqui...
Percorri milhas e milhas antes de dormir
eu nem cochilei...
Os mais belos montes escalei...
nas noites escuras de frio chorei...
...meu caminho só meu Pai pode mudar...
Meu caminho só meu Pai..".*
(Toni Garrido/Lazão/Da Gama/Bino)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por tudo de bom que nela tem me proporcionado.

A UFRGS e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de cursar o doutorado.

Ao Prof. Renato Levien, não só pela amizade, pelos conhecimentos transmitidos e por ter confiado em mim, mas também por ser um exemplo de dedicação profissional, competência e entusiasmo pelo que faz. Nunca esqueceu que estudante de pós-graduação é, antes de mais nada, colega de profissão, tratando a todos com respeito. Espero que continuemos a partir de agora, de alguma forma, trabalhando juntos.

Ao Prof. Carlos Ricardo Trein, pela disponibilidade em ajudar a qualquer momento e pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

Às pessoas que, enquanto professores, colaboraram para a minha formação. Essa lembrança estende-se a todos os docentes com que tive oportunidade de interagir, desde o ensino fundamental e médio no Colégio João Batista Rotta, em Espumoso/RS, passando pela graduação em Agronomia e mestrado em Engenharia Agrícola na UFSM e, finalmente, ao doutorado no PPGCS/UFRGS.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

Ao amor da minha vida, Brenda Tonon. Brendinha, você é o que tenho de mais lindo e importante nessa vida. Só sua presença e sorriso já seriam uma grande ajuda para a elaboração dessa Tese. Mas você foi mais longe... Obrigado pelo amor e carinho incondicionais mesmo nos momentos mais difíceis dessa caminhada, pela força, pelas orações e por compreender a minha ausência.

Aos meus pais, Sérgio e Maria Inês Debiasi, pela vida, pelo amor e

carinho que nunca faltaram, pelas orações, pela constante preocupação em ajudar e, principalmente, por compreender a minha ausência.

A Fernanda Debiasi, minha querida irmã, por todo o apoio dado a mim nesse período e também pela compreensão.

Aos meus nonos, Alberto e Nair, pelas orações e pela alegria mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus futuros sogros Oriverto e Audinir Tonon, pelo apoio nos momentos difíceis e por me ajudarem na minha futura carreira profissional.

A todos os colegas e amigos do PPGCS, principalmente àqueles com quem convivi mais diretamente: André Amaral, Andressa Silveira, Carla Cepik, Christina Venzke, Karina Kamimura, Jeane Portella, José Baptista, Luis de França Neto, Luciléia Gilles, Michelly Tomazzi, Miriam Vergara, Mirla Weber, Osmar Conte, Regilene Souza e Samuel Figueiredo.

À colega e eterna amiga Tatiana Cardoso Alves (*in memoriam*), agradeço por ter me ensinado tanta coisa em tão pouco tempo de convivência no PPGCS.

Aos bolsistas de iniciação científica: Guilherme Menegati, Tobias Rossi, Bernardo Dalcin, Michael Mazurana, Graziane Boakowicz e Jonatas Müller, pela valorosa contribuição nos trabalhos de campo e laboratório que originaram essa tese.

Aos funcionários Ozébio e Celso (EEA/UFRGS), Adão (Laboratório de Química), Antônio (Laboratório de Biogeoquímica Ambiental) e Márcio Silveira (Laboratório de Física de Solo), pela grande ajuda no experimento de campo e determinações laboratoriais. Também ao secretário do PPGCS, Jader Amaro, pela competência e dedicação.

Muito obrigado

RECUPERAÇÃO FÍSICA DE UM ARGISSOLO COMPACTADO E SUAS IMPLICAÇÕES SOBRE O SISTEMA SOLO-MÁQUINA-PLANTA^{1/}

Autor: Henrique Debiasi

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

RESUMO

A compactação é uma das principais causas da degradação física do solo. Com o objetivo de avaliar a eficiência de diferentes alternativas para a recuperação física do solo, vem sendo conduzido, desde 2002, um experimento em Eldorado do Sul (RS), sobre um Argissolo Vermelho, franco-argilo-arenoso, caracterizado por um elevado grau de compactação inicial e que se constituía em um campo natural degradado. Os tratamentos, manejados sob semeadura direta, englobam três coberturas de inverno (pousio, aveia preta e aveia preta + ervilhaca, substituída em 2006 por nabo forrageiro), duas profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo e duas condições de tráfego de rodados de trator (com e sem). Em 2006, escarificou-se um bloco adjacente ao experimento, manejado em semeadura direta há quatro anos, sobre a qual foram implantadas duas coberturas de inverno (nabo forrageiro e aveia preta), sob tráfego controlado. No verão, semeia-se milho e soja, em rotação anual e sob semeadura direta, mesmo na área escarificada no inverno. Avaliou-se parâmetros relacionados ao solo, ao conjunto trator/semeadora e às plantas. Independentemente das coberturas de inverno, a conversão do campo natural degradado a um sistema de produção de grãos em semeadura direta reduziu o grau de compactação do solo. Essas melhorias, considerando a superfície do solo, foram maiores na ausência de tráfego e quando do emprego de plantas de cobertura de inverno e de maiores profundidades de atuação da haste. Em relação às demais coberturas, um cultivo com nabo forrageiro foi suficiente para diminuir o grau de compactação até a camada de 0,18 m. A escarificação resultou na maior redução do grau de compactação em relação aos demais tratamentos. As medidas que reduziram o grau de compactação do solo diminuíram também a capacidade de suporte de carga e a força de tração requerida pelas hastes sulcadoras, aumentando, porém, a suscetibilidade do solo à compactação adicional. A patinação dos rodados tratórios não foi afetada pela escarificação, porém, atingiu valores mais elevados para aveia preta. Sob deficiências hídricas moderadas, a produtividade do milho e da soja foi maior para as plantas de cobertura de inverno, sem ser afetada pelas profundidades de atuação da haste. A escarificação diminuiu a produtividade de grãos das culturas de verão. Considerando o sistema solo-máquina-planta, o uso de plantas de cobertura de inverno em semeadura direta, sem mobilização anterior mediante escarificação, mostrou ser viável para reduzir o grau de compactação do solo e/ou os efeitos negativos deste processo.

^{1/}

Tese de doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (263 f.). Janeiro, 2008. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

PHYSICAL RECUPERATION OF A COMPACTED PALEUDULT OF SOUTHERN BRAZIL AND ITS EFFECTS ON SOIL-MACHINE-PLANT SYSTEM^{1/}

Author: Henrique Debiasi
Advisor: Prof. Dr. Renato Levien

ABSTRACT

Compaction is one of the most important causes of soil physical degradation. To evaluate the effectiveness of different alternatives for soil physical recuperation, a field experiment in completely randomized blocks has been carried out since 2002 on a highly compacted sandy clay loam Paleudult in southern Brazil (Rio Grande do Sul State). Initially, the soil was under degraded native permanent grassland. Treatments under no-tillage have involved winter fallow and two winter cover crops (black oats and black oats + vetch, which was changed in 2006 by oilseed radish – *Raphanus sativus* L.) in the plots, two driller chisel-type furrow opener working depth in the subplots, and two traffic conditions (with and without tractor wheel traffic) in the sub-subplots. After four years under no-tillage, one of the experimental blocks was chiseled by a chisel plow in 2006. Two cover crops (black oats and oilseed radish) and two traffic conditions (with and without tractor wheel traffic) were evaluated in the chiseled block. In summer, soybeans and corn were drilled in all blocks under no-tillage. Annual crop rotation between soybeans and corn was observed. Parameters related to soil, tractor-driller performance and plant growth were determined. Regardless winter covers, conversion of degraded native grassland to a grain production system under no-tillage reduced the soil compaction degree. On soil surface, these improvements were higher in absence of tractor wheel traffic and under cropping systems with winter cover crops, as well as using higher furrow opener working depths. In comparison with the remainder winter crops tested, cropping of oilseed radish during one season was sufficient to diminish the compaction degree to 0.18 m depth. Major decreases in the soil compaction degree were achieved through chisel plowing. Bearing capacity of the soil and driller opener furrow draft requirements were reduced by all compaction control practices, while soil susceptibility to re-compaction was significantly increased. Chisel plow did not affect wheel tractor slippage, but this parameter reached higher values when tractor-driller worked on black oats residues. Under moderated water deficit, higher soybean and corn grain yields were obtained for winter cover crops treatments. However, only little benefits of using higher chisel type opener furrow working depth on grain yields could be detected. Considering soil-machine-plant system, using winter cover crops under no-tillage and without previous chiseling seems to be viable to reduce soil compaction degree and/or the negative consequences deriving from this process.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (263 p.). January, 2008. Financial support by CNPq.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 Estrutura do solo | 4 |
| 2.2 Conceituação e descrição do processo de compactação do solo..... | 8 |
| 2.3 Compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas..... | 12 |
| 2.4 Efeitos da compactação do solo sobre as culturas e o desempenho das máquinas agrícolas | 18 |
| 2.5 Indicadores do estado de compactação do solo | 22 |
| 2.6 Compressibilidade do solo | 25 |
| 2.7 Alternativas para o controle da compactação do solo..... | 33 |
| 2.7.1 Plantas de cobertura de solo | 34 |
| 2.7.2 Mobilização do solo | 40 |
| 2.7.2.1 Escarificação..... | 40 |
| 2.7.2.2 Uso de hastes sulcadoras para a deposição do fertilizante | 45 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL | 48 |
| 3.1. Localização da área experimental | 48 |
| 3.2 Histórico da área experimental..... | 48 |
| 3.3 Tratamentos | 50 |
| 3.4 Implantação e condução das culturas | 53 |
| 3.4.1 Culturas de inverno | 53 |
| 3.4.2 Culturas de verão..... | 54 |
| 3.5 Máquinas e implementos agrícolas utilizados | 55 |
| 3.6. Avaliações realizadas..... | 57 |
| 4. ESTUDO I: PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO AFETADAS POR PRÁTICAS DE MANEJO DA COMPACTAÇÃO | 58 |
| 4.1 Introdução | 58 |

| | |
|---|------------|
| 4.2 Material e métodos | 60 |
| 4.2.1 Experimento de campo | 60 |
| 4.2.2 Avaliações realizadas | 60 |
| 4.2.2.1 Massa seca das plantas de coberturas de inverno | 60 |
| 4.2.2.2 Propriedades físicas | 60 |
| 4.2.2.3 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas | 64 |
| 4.2.3 Análise estatística dos dados..... | 65 |
| 4.3 Resultados e discussão | 67 |
| 4.3.1 Massa seca da parte aérea das coberturas de inverno | 67 |
| 4.3.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas em semeadura direta. | 70 |
| 4.3.3 Propriedades físicas | 76 |
| 4.3.3.1 Semeadura direta | 76 |
| 4.3.3.2 Escarificação..... | 98 |
| 4.3.3.3 Comparação entre a área sob semeadura direta e escarificada..... | 105 |
| 4.4 Conclusões | 109 |
| 5. ESTUDO II: CAPACIDADE DE SUPORTE E COMPRESSIBILIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO | 111 |
| 5.1 Introdução | 111 |
| 5.2 Material e métodos | 114 |
| 5.2.1 Experimento de campo | 114 |
| 5.2.2 Avaliações realizadas | 114 |
| 5.2.3 Obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (MCSCS)..... | 119 |
| 5.2.4 Análise estatística dos dados..... | 120 |
| 5.3 Resultados e discussão | 120 |
| 5.3.1 Semeadura direta | 120 |
| 5.3.2 Escarificação..... | 135 |

| | |
|--|------------|
| 5.3.3. Comparação entre a área sob semeadura direta e escarificada..... | 138 |
| 5.4 Conclusões..... | 144 |
| 6. ESTUDO III: FORÇA DE TRAÇÃO DEMANDADA POR HASTES SULCADORAS DE ADUBO E PATINAGEM DE RODADOS TRATÓRIOS AFETADOS POR PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO | 146 |
| 6.1 Introdução | 146 |
| 6.2 Material e métodos | 149 |
| 6.2.1 Experimento de campo | 149 |
| 6.2.2 Avaliações realizadas | 149 |
| 6.2.2.1 Demanda de força de tração da haste sulcadora para adubo | 149 |
| 6.2.2.2 Profundidade máxima e área da seção transversal do sulco produzido pela haste sulcadora de adubo | 153 |
| 6.2.2.3 Força de tração por área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora..... | 154 |
| 6.2.2.4 Força de tração por profundidade de sulco..... | 154 |
| 6.2.2.5 Patinagem das rodas motrizes do trator | 155 |
| 6.2.2.6 Teor de água na semeadura das culturas de verão..... | 155 |
| 6.2.3 Análise estatística dos dados..... | 156 |
| 6.3 Resultados e discussão | 157 |
| 6.3.1 Semeadura direta | 157 |
| 6.3.2 Escarificação..... | 179 |
| 6.4 Conclusões..... | 189 |
| 7. ESTUDO IV: PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO E SOJA E SUA RELAÇÃO COM PRÁTICAS DE MANEJO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO | 191 |
| 7.1 Introdução | 191 |
| 7.2 Material e métodos | 194 |
| 7.2.1 Experimento de campo | 194 |
| 7.2.2 Avaliações realizadas | 194 |

| | |
|--|------------|
| 7.2.2.1 População de plantas | 195 |
| 7.2.2.2 Produtividade e componentes da produção..... | 195 |
| 7.2.3 Análise estatística dos dados..... | 196 |
| 7.3 Resultados e discussão | 197 |
| 7.3.1 Safra 2005/2006 | 197 |
| 7.3.2 Safra 2006/2007 | 210 |
| 7.3.2.1 Semeadura direta | 210 |
| 7.3.2.2 Escarificação..... | 222 |
| 7.4 Conclusões..... | 229 |
| 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 230 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 234 |
| 10. APÊNDICES | 256 |

RELAÇÃO DE TABELAS

| | |
|---|----|
| 1. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento (Beutler, 2005). | 48 |
| 2. Caracterização física do solo, antes da instalação do experimento..... | 49 |
| 3. Produção de massa seca da parte aérea das coberturas de inverno, na área sob semeadura direta. | 68 |
| 4. Produção de massa seca da parte aérea das coberturas de inverno, na área escarificada (2006)..... | 69 |
| 5. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e de suas respectivas frações (particulada – MOP e associada aos minerais – MOM) na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de avaliação (junho/2006). | 71 |
| 6. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e suas respectivas frações (particulada - MOP e associada aos minerais - MOM) na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão antecessora à amostragem e da profundidade de avaliação. | 75 |
| 7. Densidade do solo e porosidade total em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação, considerando as entrelinhas não trafegadas das culturas de verão..... | 77 |
| 8. Macro e microporosidade do solo em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação, considerando as entrelinhas não trafegadas das culturas de verão..... | 80 |
| 9. Teor gravimétrico de água do solo no momento da determinação da resistência do à penetração, em função das coberturas de inverno e da camada e época de avaliação..... | 84 |
| 10. Densidade, porosidade total, macro e microporosidade do solo, avaliadas em novembro de 2006 e na área sob semeadura direta, afetadas pelo tráfego de rodados de trator. | 96 |
| 11. Densidade, porosidade total, macro e microporosidade do solo, avaliadas antes e depois da escarificação, em função do tráfego de rodados de trator, das coberturas de inverno e da camada estudada. | 99 |

| | |
|--|-----|
| 12. Teor gravimétrico de água do solo no momento da determinação da resistência do à penetração na área escarificada, em função das coberturas de inverno e da camada e época de avaliação. | 102 |
| 13. Comparação dos valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade obtidos na área escarificada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, independentemente da condição de tráfego (novembro/2006). | 106 |
| 14. Comparação dos valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade obtidos na área escarificada e trafegada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno e sem tráfego (novembro/2006). | 107 |
| 15. Tensão de pré-consolidação do solo nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão conduzidas sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação..... | 122 |
| 16. Índice de compressibilidade do solo nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão conduzidas sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação..... | 130 |
| 17. Parâmetros relacionados à capacidade de suporte e compressibilidade do solo, avaliados nas entrelinhas das culturas de verão em novembro de 2006 e na área sob semeadura direta, afetados pelo tráfego de rodados de trator. | 133 |
| 18. Capacidade de suporte e compressibilidade do solo na área escarificada, afetados pelo tráfego de rodados de trator, pelas coberturas de inverno e pela camada avaliada. | 136 |
| 19. Comparação dos valores de tensão de pré-consolidação e índice de compressibilidade obtidos na área escarificada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, independentemente da condição de tráfego (novembro/2006). | 139 |
| 20. Comparação dos valores de tensão de pré-consolidação e índice de compressibilidade obtidos na área escarificada e trafegada com os determinados para a área sob semeadura direta plantas de cobertura de inverno e sem tráfego (novembro/2006)..... | 142 |
| 21. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada. | 158 |

| | |
|--|-----|
| 22. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada..... | 158 |
| 23. Teor de água do solo no momento da semeadura do milho e da soja (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, em função da cobertura de inverno, da camada avaliada e da cultura de verão. | 160 |
| 24. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno, do tráfego e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada..... | 162 |
| 25. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada..... | 162 |
| 26. Força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego. | 164 |
| 27. Força de tração específica ($N\ cm^{-1}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego..... | 168 |
| 28. Força de tração específica ($N\ cm^{-1}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas e do tráfego..... | 170 |
| 29. Força de tração específica ($N\ cm^{-2}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego..... | 171 |
| 30. Força de tração específica ($N\ cm^{-2}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas e do tráfego..... | 173 |
| 31. Patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura do milho e da soja na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo. | 176 |

| | |
|--|-----|
| 32. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área escarificada, em função das coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator..... | 180 |
| 33. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área escarificada, em função das coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator..... | 181 |
| 34. Teor de água do solo no momento da semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das coberturas de inverno e profundidades de avaliação..... | 182 |
| 35. Força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas de cobertura de inverno e do tráfego de rodados de trator..... | 183 |
| 36. Força de tração específica ($N\ cm^{-1}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator..... | 184 |
| 37. Força de tração específica ($N\ cm^{-2}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator..... | 185 |
| 38. Patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das coberturas de inverno..... | 188 |
| 39. Número de plantas de soja por m^2 medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2005/2006), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 198 |
| 40. Produtividade de grãos de soja (safra 2005/2006) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 200 |
| 41. Componentes da produção de grãos de soja (safra 2005/2006) na área sob semeadura direta, afetados pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 204 |
| 42. Número de plantas de milho por m^2 medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2005/2006), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 205 |

| | |
|---|-----|
| 43. Produtividade de grãos de milho (safra 2005/2006), afetada pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo. | 207 |
| 44. Componentes da produção de grãos de milho (safra 2005/2006), afetados pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 209 |
| 45. Número de plantas de soja por m ² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 211 |
| 46. Produtividade de grãos de soja (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 214 |
| 47. Componentes da produção de soja (safra 2006/2007) determinados na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 215 |
| 48. Número de plantas de milho por m ² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 218 |
| 49. Produtividade de grãos de milho (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo..... | 219 |
| 50. Componentes da produção de milho (safra 2006/2007) determinados na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo. | 221 |
| 51. Número de plantas de soja por m ² medido na área escarificada aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno..... | 222 |
| 52. Produtividade de grãos de soja (safra 2006/2007) na área escarificada, em função das coberturas de inverno..... | 223 |
| 53. Componentes da produção de soja (safra 2006/2007) determinados na área escarificada, em função das coberturas de inverno. | 225 |
| 54. Número de plantas de milho por m ² medido na área escarificada aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno..... | 226 |

| | |
|--|-----|
| 55. Produtividade de grãos de milho (safra 2006/2007) na área escarificada, afetada pelas coberturas de inverno..... | 227 |
| 56. Componentes da produção de milho (safra 2006/2007) determinados na área escarificada, em função das coberturas de inverno..... | 228 |

RELAÇÃO DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| 1. Penetrômetro utilizado para determinação da resistência do solo à penetração em outubro de 2005 e junho e novembro de 2006. | 63 |
| 2. Penetrômetro utilizado para determinação da resistência do solo à penetração em outubro de 2005 e junho e novembro de 2006. | 63 |
| 3. Aspecto visual da aveia preta nas parcelas sob semeadura direta (a,c) e escarificadas (b,d), aos 21 (a,b) e aos 60 dias após a semeadura (c,d). | 70 |
| 4. Resistência do solo à penetração, em função das coberturas de inverno, avaliada em outubro de 2005 (a), junho de 2006 (b) e maio de 2007 (c).. | 83 |
| 5. Resistência do solo à penetração, em função das épocas de avaliação.. | 86 |
| 6. Relação entre o índice de cone (0,0-0,06 m) e a densidade do solo (0,03-0,06 m), em função das coberturas de inverno, considerando a área sob semeadura direta e a avaliação realizada em junho de 2006..... | 88 |
| 7. Resistência do solo à penetração em função da profundidade de deposição do adubo, nas avaliações realizadas em outubro/2005 (a), junho/2006 (b) e maio/2007 (c)..... | 94 |
| 8. Resistência do solo à penetração, em função do tráfego de rodados de trator.. | 97 |
| 9. Comparação dos valores de resistência do solo à penetração obtidos antes (Aesc) com os determinados após a escarificação (novembro/2006) nas regiões trafegadas (Desc CT) e não trafegadas (Desc ST)..... | 101 |
| 10. Resistência do solo à penetração na área escarificada, em função das épocas de avaliação (a) e do tráfego de rodados de trator (b).. | 103 |
| 11. Comparação entre os valores de resistência do solo à penetração (maio/2007) obtidos na área escarificada e sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), em ambas as condições de tráfego (a), bem como entre a área escarificada trafegada - CT e sob PLCSD não trafegada - ST (b)..... | 108 |
| 12. Anéis utilizados para a coleta de amostras de solo indeformadas destinadas à realização do ensaio de compressão uniaxial. | 115 |

| | |
|--|-----|
| 13. Prensa oedométrica utilizada no ensaio de compressão uniaxial..... | 116 |
| 14. Curva de compressão do solo, ilustrando a metodologia de Pacheco Silva para determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p). | 118 |
| 15. Relação da tensão de pré-consolidação com a densidade do solo na área sob semeadura direta, considerando todos os tratamentos, profundidades e tensões de água sob as quais as amostras foram equilibradas. | 123 |
| 16. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo ajustados em separado para as coberturas de inverno em semeadura direta, considerando a camada de 0,03-0,06 m (a) e a de 0,12-0,15 m (b)..... | 127 |
| 17. Relação do índice de compressibilidade com a densidade do solo na área sob semeadura direta, considerando todos os tratamentos, profundidades e tensões de água sob as quais as amostras foram equilibradas. | 131 |
| 18. Relação entre a tensão de pré-consolidação e a densidade do solo, determinada em separado para a área escarificada (Esc) e para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), considerando as zonas não trafegadas por rodados de trator e ambas as camadas estudadas (0,03-0,06 m e 0,12-0,15 m)..... | 140 |
| 19. Relação entre índice de compressibilidade e a densidade do solo, determinada em separado para a área escarificada (Esc) e para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), considerando as zonas não trafegadas por rodados de trator e ambas as camadas estudadas (0,03-0,06 m e 0,12-0,15 m)..... | 141 |
| 20. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo ajustados para área escarificada (Esc), em comparação aos obtidos para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD) na camada de 0,03-0,06 m (a) e para a aveia preta em semeadura direta (aveia) na camada de 0,12-0,15 m (b)..... | 143 |
| 21. Extensômetros instalados no suporte da haste sulcadora (extraído de Cepik, 2006). | 150 |
| 22. Extensômetros de tensão (R1 e R3) e de compressão (R2 e R4) (extraído de Cepik, 2006). | 150 |
| 23. Datalogger utilizado para o armazenamento dos dados de força de tração medida nas hastes sulcadoras de adubo. | 151 |
| 24. Posição da haste sulcadora de adubo e seu respectivo suporte durante a calibração dos extensômetros de resistência elétrica. | 152 |

| | |
|---|-----|
| 25. Exemplo de reta de calibração dos extensômetros de resistência elétrica..... | 152 |
| 26. Perfilômetro de varetas utilizado para a determinação da profundidade máxima do sulco e área da secção transversal de solo mobilizado pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura das culturas de verão..... | 154 |
| 27. Vista das parcelas ocupadas por aveia preta (a) e nabo forrageiro (b) durante a semeadura do milho, mostrando a massa de resíduos presentes na superfície do solo..... | 178 |
| 28. Evapotranspiração potencial e volume de chuvas referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão na safra 2005/2006..... | 199 |
| 29. Evapotranspiração potencial e volume de chuvas referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão na safra 2006/2007..... | 212 |

RELAÇÃO DE APÊNDICES

| | |
|--|-----|
| 1. Croqui do experimento, safra 2005/2006..... | 257 |
| 2. Croqui do experimento, safra 2006/2007..... | 258 |
| 3. Profundidades máximas do sulco e área da secção transversal de solo mobilizada pelas hastes sulcadoras na semeadura das culturas de verão, para todos os anos de condução do experimento..... | 259 |
| 4. Número de tráfegos de rodados de trator na área sob semeadura direta, em função do tratamento e da época considerada..... | 259 |
| 5. Teor de água do solo na camada de 0,0-0,15 m das áreas sob semeadura direta e escarificada, medido imediatamente antes do tráfego de rodados de trator realizado na semeadura das culturais de inverno e verão..... | 259 |
| 6. Teores de nutrientes e pH em água do solo, medidos na camada de 0,0-0,12 m nas parcelas componentes do bloco 5, antes da escarificação (maio/2006)..... | 260 |
| 7. Teores de nutrientes e pH em água do solo medido na camada de 0,0-0,12 m, em função das coberturas de inverno e da época de avaliação..... | 260 |
| 8. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob semeadura direta, para os fatores coberturas de inverno, tráfego de rodados de trator e épocas de avaliação..... | 261 |
| 9. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob semeadura direta, para o fator profundidade de atuação da haste sulcadora para o adubo..... | 261 |
| 10. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob escarificação, para os fatores coberturas de inverno, tráfego de rodados de trator e épocas de avaliação..... | 262 |
| 11. Exemplo de perfil transversal de solo mobilizado obtido em uma condição onde a profundidade crítica de atuação da haste foi ultrapassada..... | 262 |
| 12. Principais estádios fenológicos da cultura da soja nas safras 2005/06 e 2006/07, e sua respectiva época de ocorrência, em dias após a semeadura..... | 263 |

| | |
|---|-----|
| 13. Principais estádios fenológicos da cultura do milho nas safras 2005/06 e 2006/07, e sua respectiva época de ocorrência, em dias após a semeadura..... | 263 |
|---|-----|

1. INTRODUÇÃO GERAL

O solo constitui-se em um sistema aberto e, como tal, está sujeito à ação de fatores externos, que o modificam no decorrer do tempo. Essas modificações persistem até que as características e propriedades físicas, químicas, biológicas e mecânicas do solo atinjam um estado de equilíbrio. Este equilíbrio é dinâmico, uma vez que ele pode ser alterado, desde que um ou mais fatores externos sejam modificados. No contexto da agropecuária, o homem atua continuamente sobre o solo e, dessa forma, interfere no estado de equilíbrio do solo. Em geral, a interferência humana vem ocorrendo mediante práticas de manejo que conduziram milhões de hectares de terras a um rápido processo de degradação física, química e/ou biológica, ocasionando prejuízos econômicos e ambientais e preocupações relacionadas à segurança alimentar.

O tema central desta tese focaliza a degradação física que, segundo estimativas da FAO, é a responsável por cerca de 4% da área de solos degradados no mundo. Embora pequeno, este valor corresponde a 68 milhões de hectares, o que equivale a quase toda a área cultivada com grãos no Brasil. Além disso, a degradação física é, possivelmente, uma das causas iniciais de outros tipos de degradação, como a erosão hídrica. A compactação do solo, ocasionada pelo tráfego ou pastejo intenso em solos úmidos e/ou desestruturados, é o principal fator que leva à degradação física.

O aumento no grau de compactação do solo é acompanhado por incrementos na sua densidade e resistência mecânica, bem como por reduções na porosidade total em função da diminuição no volume de macroporos, na capacidade de infiltração de água, na aeração e na condutividade hidráulica. Estas modificações podem refletir diminuição da produtividade das culturas, aumento dos custos de produção e das emissões de gases causadores do efeito estufa, assim como poluição e alteração do regime dos recursos hídricos

superficiais. A compactação afeta ainda o desempenho das máquinas agrícolas; por um lado, prejudica a qualidade do trabalho e aumenta a força de tração demandada pelos implementos de mobilização do solo; por outro, diminui as perdas de potência na interface solo/dispositivo de tração.

Existem diversas alternativas que podem ser adotadas visando à recuperação física de solos com elevado grau de compactação. A mobilização do solo através da escarificação, seguida da adoção do sistema de semeadura direta, é uma prática que alivia a compactação a curto prazo, desagregando e desprotegendo a superfície do solo em um nível inferior comparativamente ao preparo convencional. Contudo, esta prática é econômica e energeticamente dispendiosa, e nem sempre resulta em aumentos na produtividade das culturas. Ao mesmo tempo, os seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo, em geral, têm perdurado por períodos curtos (meses).

Dessa forma, tem crescido o interesse por outras práticas de controle da compactação, como o emprego, em semeadura direta, de sistemas de rotação de culturas que contemplem plantas de cobertura de inverno. Está comprovado pela pesquisa que esta prática melhora a qualidade física do solo, principalmente, no que se refere à estabilidade dos agregados. Entretanto, ainda não está bem esclarecido qual é o potencial que o uso repetido destas espécies de plantas apresenta na recuperação física de áreas caracterizadas por um elevado grau de compactação, sob sistema de semeadura direta e sem mobilização prévia. As principais preocupações relacionam-se ao tempo necessário para que a recuperação ocorra e à produtividade das culturas econômicas implantadas durante o verão. A concentração do tráfego de rodados no mesmo local (tráfego controlado) e o uso de hastes sulcadoras para a deposição do adubo trabalhando a profundidades maiores do que 0,1 m podem acelerar a recuperação e minimizar os efeitos negativos da compactação sobre as culturas de verão. No entanto, a eficiência estas medidas no controle da compactação, como complemento ao uso de plantas de cobertura de inverno sob semeadura direta, ainda não está comprovada.

Os efeitos das medidas de controle da compactação anteriormente citadas podem se estender para além da recuperação física do solo, trazendo vantagens ou desvantagens adicionais. A produtividade das culturas, a compressibilidade do solo e o desempenho do conjunto trator/semeadora-

adubadora podem ser influenciados tanto por alterações nos atributos físicos do solo ocasionadas pelas práticas de controle da compactação, quanto por outros efeitos produzidos por estas medidas, como a modificação no teor de matéria orgânica ou a presença de resíduos em superfície. Embora seja de fundamental importância quando da tomada de decisão, os impactos induzidos pelas medidas de controle da compactação sobre os demais componentes de um dado sistema de produção são ainda pouco conhecidos.

Assim, esta pesquisa baseia-se na hipótese geral de que, em relação ao solo e ao desempenho das plantas e máquinas agrícolas, o uso de sistemas de rotação de culturas, em semeadura direta e sem mobilização prévia, e que incluam plantas de cobertura de inverno, associado ao tráfego controlado e ao aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo, é viável para a recuperação física de um solo com elevado grau de compactação inicial. Para testar essa hipótese, o objetivo geral é investigar as alterações provocadas pelas plantas de cobertura de inverno, pela escarificação, pelo tráfego de rodados de trator e pela profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo sobre algumas propriedades físicas e mecânicas de um Argissolo com elevado grau de compactação inicial, bem como sobre o desempenho do conjunto trator/semeadora-adubadora e a produtividade das culturas de milho e soja.

A presente tese foi dividida em quatro estudos. O estudo I trata do efeito das plantas de cobertura de inverno, da escarificação, do tráfego de rodados de trator e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo sobre as propriedades físicas de um Argissolo com elevado grau de compactação inicial. No estudo II, são discutidas as alterações ocasionadas pelas medidas de controle da compactação na capacidade de suporte (tensão de pré-consolidação) e na suscetibilidade do solo à compactação (índice de compressibilidade). O desempenho do conjunto trator/semeadora-adubadora e sua relação com as práticas de controle da compactação investigadas é o tema central do estudo III. Por fim, o estudo IV é dedicado à análise dos efeitos exercidos pelas medidas de redução do grau de compactação sobre a produtividade de grãos do milho e da soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura do solo

A recomendação de qualquer prática visando à recuperação da qualidade física do solo requer o conhecimento de aspectos básicos relacionados à sua estrutura, definida por Dexter (1988) como sendo a forma pela qual os diversos componentes do solo e, conseqüentemente, suas propriedades, arrajam-se no espaço. Uma estrutura do solo adequada às plantas é aquela que, além de ser estável, propicia a existência de poros para o armazenamento de água disponível às plantas, para a infiltração e transmissão de água e para a aeração, bem como não haja resistência ao crescimento das raízes (Oades, 1984). Dexter (1988) considera que a estrutura ideal deve ser tal que 10% dos poros sejam maiores que 30 μm para aeração e infiltração rápida de água, bem como haja um máximo de volume de poros entre 30 e 0,2 μm de diâmetro para armazenamento de água disponível às plantas. Além disso, o mesmo autor salienta que uma boa estrutura diminui as perdas de solo, água, nutrientes e moléculas de agrotóxicos e, ainda, facilita as operações de preparo do solo.

A estruturação do solo envolve a formação e estabilização de agregados (Dexter, 1988). Um dos modelos mais utilizados para explicar a formação e estabilização de agregados é a teoria da hierarquia de agregação, proposta por Tisdall & Oades (1982) e descrita com detalhes por Dexter (1988). Segundo esta teoria, a agregação se desenvolve em três níveis principais. O primeiro nível é constituído por partículas de argila floculada, formando estruturas de tamanho menor que 20 μm . A união das argilas floculadas entre si e com outras partículas minerais (areia e silte) e orgânicas forma os microagregados, que se caracterizam por um diâmetro inferior a 250 μm . O

nível hierárquico seguinte é representado pelos macroagregados (diâmetro maior do que 250 μm), os quais são formados pela união dos microagregados. A desagregação de um determinado nível hierárquico implica a destruição de todos os níveis acima do mesmo (Oades, 1993). Deste modo, a flocculação das argilas está na base do processo de agregação do solo, uma vez que, se ela for dispersa, os micro e macroagregados deixarão de existir (Oades, 1984; Dexter, 1988). Conforme Sparks (1995), a flocculação das argilas é inversamente proporcional à espessura da dupla camada difusa (DCD), a qual depende do pH do solo (quanto mais próximo do ponto de carga zero, menor a espessura da DCD), da valência e concentração dos cátions (maior valência e concentração, menor é a espessura da DCD) e do raio iônico hidratado dos eletrólitos (maior raio iônico hidratado, maior espessura da DCD).

A destruição de um nível hierárquico resulta ainda na eliminação da porosidade gerada pelos níveis acima do mesmo, o que é denominado de princípio da exclusão da porosidade (Oades, 1993). Desta forma, agregados pertencentes a níveis hierárquicos inferiores são mais densos (Dexter, 1988) e, portanto, apresentam um maior número de pontos de contato entre as partículas (Imhoof, 2002; Braida, 2004). Isto justifica as conclusões de Hadas (1987), que observou que agregados maiores são menos resistentes à ruptura.

A hierarquia de agregação do solo foi comprovada por Oades & Waters (1991). Estes autores concluíram que, em solos onde a matéria orgânica (MOS) é o principal agente cimentante, o rompimento dos agregados, à medida que a energia aplicada aos mesmos aumenta, ocorre seguindo a uma ordem determinada pelo tamanho dos mesmos. Ou seja, os macroagregados foram fragmentados a microagregados e, com o incremento da energia aplicada, estes foram reduzidos às partículas elementares de areia e silte e à argila flocculada. Porém, quando a estabilização dos agregados é dominada por agentes cimentantes minerais, como os óxidos de ferro e alumínio presentes nos Latossolos, a teoria da hierarquia da agregação pode não ser totalmente aplicável, uma vez que, nestas condições, a destruição dos macroagregados resultou na liberação de areia, silte e argila flocculada, sem indicação de uma fração estável de microagregados.

A dinâmica de formação e estabilização dos agregados, sob o ponto de vista da hierarquia de agregação, pode ser explicada tendo como base o

modelo conceitual de Goldchin et al. (1997), o qual se baseia na MOS e suas respectivas frações físicas. Segundo este modelo, a fração particulada da MOS (MOP), caracterizada por um baixo grau de humificação e pela semelhança química e morfológica ao material do qual é originada, entra no solo principalmente através de resíduos da parte aérea e das raízes das plantas e, imediatamente, começa a ser atacada pela biota do solo. A produção de mucilagens e outras substâncias orgânicas pelos microrganismos do solo propicia a adesão de partículas minerais à superfície da MOP. Este processo vai se intensificando no decorrer do tempo e, juntamente com o aumento do comprimento das hifas fúngicas, resulta na formação de macroagregados (250-2000 μm) que contêm no seu interior MOP. A MOP contida no interior dos macroagregados vai sendo rapidamente decomposta pelos microrganismos, de modo que a mesma é fragmentada em pedaços menores. Conseqüentemente, os macroagregados também vão sendo fragmentados, dando origem a microagregados (53-250 μm). Diante disso, pode-se depreender que a macroagregação é um processo transiente, que depende do aporte contínuo de resíduos orgânicos. Os microagregados também contêm em seu interior MOP, que continua sendo decomposta pelos microrganismos do solo. As mucilagens e polissacarídeos produzidos a partir da decomposição da MOP mantêm os microagregados estáveis. A produção destes compostos vai diminuindo devido à decomposição da MOP localizada no interior do microagregado e, ao mesmo tempo, os produtos oriundos da atividade microbiológica também vão sendo atacados por microrganismos. Quando a síntese microbiológica de agentes cimentantes torna-se menor do que a decomposição dos mesmos, os microagregados se desestabilizam, sendo fragmentados em microagregados menores (entre 20 e 53 μm). Esta classe de microagregados é formada por argila floculada e partículas de silte ligadas por material orgânico altamente humificado e/ou biologicamente processado.

É importante salientar que existem outros processos relacionados à formação e estabilização dos agregados, entre os quais se destacam os ciclos de umedecimento e secamento, a ação da macro e mesofauna do solo e o crescimento das raízes (Dexter, 1988). Destes, o mais importante parece ser a ação do sistema radicular das plantas. Em primeiro lugar, o crescimento das raízes aproxima as partículas minerais e orgânicas e, ao mesmo tempo, produz

bioporos que podem se constituir em planos de fraqueza que facilitam a formação de agregados por fragmentação (Dexter, 1991). Além disso, as raízes, ao unirem os microagregados através do emaranhamento físico e da produção de exsudatos, aumentam a estabilidade dos macroagregados (Silva & Mielniczuk, 1997a,b). De acordo com Goldchin et al. (1997), macroagregados maiores que 2000 μm somente são estabilizados mediante a união mecânica de macroagregados menores através das raízes e das hifas fúngicas que se encontram a elas associadas.

Levando-se em consideração o modelo de Goldchin et al. (1997), verifica-se que a MOS se distribui em diferentes compartimentos no solo. Segundo Roscoe & Machado (2002), a MOS leve livre é constituída por materiais orgânicos em estágios iniciais de decomposição e, por isso, localizados na superfície dos agregados ou nos espaços existentes entre os mesmos. Essa fração apresenta apenas um mecanismo de proteção contra o ataque microbiano, a recalcitrância molecular (resistência intrínseca da molécula orgânica a ser decomposta), sendo assim o compartimento mais suscetível à decomposição e a variações sazonais. As frações localizadas no interior dos agregados, sem interação direta com as partículas minerais, compõem a MOS leve oclusa. Este compartimento é mais estável do que a MOS leve livre pois, além da recalcitrância molecular, dispõe da proteção física por oclusão para resistir à decomposição microbiana, a qual dificulta o acesso dos microrganismos e suas enzimas ao material orgânico, além de diminuir a disponibilidade de oxigênio. A fração pesada da MOS é composta por substâncias orgânicas altamente humificadas e ligadas quimicamente à superfície das argilas. Além da recalcitrância molecular e da proteção física, a fração pesada apresenta proteção coloidal, de forma que os microrganismos têm dificuldade em remover o substrato orgânico da superfície onde se encontra adsorvido.

Os compartimentos da MOS envolvidos na estabilização dos diferentes níveis hierárquicos que compõem a estrutura do solo têm sido estudados através de técnicas de fracionamento físico (Conceição, 2006). Dentre os métodos físicos, o de mais simples execução é o fracionamento granulométrico, que se baseia na separação da MOS de acordo com o tamanho das partículas que a compõe (Roscoe & Machado, 2002). Segundo

estes autores, o fracionamento granulométrico permite a separação da MOS em dois compartimentos: a MOS macrorgânica ou particulada (MOP) e a MOS associada aos minerais (MOM).

A MOP corresponde à fração retida na peneira de 53 μm juntamente com a areia, sendo possível identificar, neste compartimento, fragmentos de material vegetal, hifas fúngicas e exoesqueletos da fauna (Roscoe & Machado, 2002). A MOP se assemelha às frações leve livre e oclusa, porém nem toda a MOS referente a estes compartimentos é recuperada na peneira de 53 μm (Conceição, 2006). Conforme este autor, parte da MOS leve oclusa encontra-se em agregados tamanho silte e argila, não sendo retida, portanto, na peneira de 53 μm . Em solos de regiões tropicais, a MOP comporta de 2 a 25% do C orgânico total do solo (Roscoe & Machado, 2002), sendo a fração que responde de forma mais rápida e intensa a modificações nas práticas de manejo (Conceição et al., 2005). A MOM, por sua vez, engloba as frações mais humificadas e que passam pela peneira de 53 μm juntamente com o silte e a argila, correspondendo predominantemente à fração pesada (Roscoe & Machado, 2002).

2.2 Conceituação e descrição do processo de compactação do solo

A compactação constitui-se em uma das principais causas da degradação da qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas. Hillel (1982) define a compactação como sendo o processo de redução de volume (compressão) de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual se encontra relacionado à expulsão de ar. Segundo o mesmo autor, a compressão de um solo saturado é denominada de consolidação, e envolve a saída de água. Assim, a velocidade com a qual um solo se compacta ou consolida depende da permeabilidade do mesmo à água e ao ar. A condição física resultante é referida por Hakansson et al. (1988) como sendo o grau ou estado de compactação.

De acordo com a profundidade em que ocorre, a compactação pode ser superficial ou subsuperficial. Devido às diferenças marcantes nas causas, efeitos, persistência e formas e/ou dificuldades para correção entre estes dois

processos, Jorajuría Collazo (2005) propõe tratar a compactação superficial e subsuperficial como dois problemas distintos. Conforme este autor, a compactação superficial é aquela que ocorre sobre (selamento superficial e formação de crostas) ou no interior da camada arável (horizonte Ap), enquanto que a compactação subsuperficial ocorre abaixo desta camada, em função da transmissão das tensões aplicadas na superfície do solo. As diferenças nas causas e efeitos destes dois processos serão discutidas nos itens 2.3. e 2.4, respectivamente. A compactação subsuperficial é muito mais persistente do que a superficial (Alakukku et al., 2003; Hamza & Anderson, 2005), pois os efeitos dos agentes descompactantes naturais, como os ciclos de umedecimento e secamento, a MOS e a atividade biológica das raízes e macro e meso fauna do solo, são atenuados com o aumento da profundidade (Jorajuría Collazo, 2005). As alternativas artificiais para eliminar a compactação subsuperficial (escarificação e subsolagem), são econômica e energeticamente dispendiosas, tecnicamente difíceis de serem realizadas (exigem um baixo teor de água em todo o perfil a ser mobilizado), nem sempre eficientes e podem tornar o subsolo ainda mais suscetível à recompactação (Alakukku et al., 2003; Jorajuría Collazo, 2005).

Independentemente da profundidade considerada, a compressão do solo somente ocorre quando a tensão efetiva, produzida pela aplicação de uma carga na sua superfície, ultrapassar a resistência ao cisalhamento existente nos pontos de contato entre as partículas, provocando a movimentação e acomodação das mesmas (Braidá, 2004). Isso vale mesmo quando o agente compactante é o impacto da gota de chuva, uma vez que a formação de crostas envolve a ruptura dos agregados (Brandão et al., 2006) e, em decorrência, o cisalhamento nos pontos de contato entre as partículas do solo. As tensões aplicadas ao solo incidem sobre suas partículas sólidas e sobre a água e o ar contidos em seus poros (Pinto, 2002). Entende-se por tensão efetiva (σ') aquela que atua sobre as partículas sólidas, sendo obtida através da equação proposta em 1954 por Terzaghi & Jelinek, válida para solos saturados (Caputo, 1988):

$$\sigma' = \sigma - \mu \tag{1}$$

Onde:

- σ = tensão total aplicada;
- μ = pressão da água contida dos poros ou pressão neutra.

De acordo com a equação (1), as tensões aplicadas a um solo saturado são, num primeiro momento, suportadas pela solução do solo, gerando pressões neutras de magnitude igual a σ . Nesta condição, $\sigma' = 0$, e o solo não se deforma. Se as condições permitirem drenagem, as pressões neutras promovem a saída de água dos poros e, assim, $\sigma > \mu$ e $\sigma' > 0$, e o solo se deforma até que a porosidade diminua de forma a novamente anular $\sigma' (\sigma = \mu)$. Para condições não saturadas, a equação (1) foi modificada em 1961 por Bishop (Williams & Shaykewich, 1970):

$$\sigma' = \sigma + \chi |\Psi_m| \quad (2)$$

Onde:

- χ = valor entre 0 e 1, proporcional ao grau de saturação do solo;
- Ψ_m = potencial matricial da água no solo.

A equação (2) evidencia que Ψ_m age de forma equivalente à tensão aplicada à superfície do solo. Ou seja, para um mesmo grau de saturação (χ constante), a diminuição no Ψ_m aumenta σ' . O valor χ representa a proporção do Ψ_m que contribui para o aumento da σ' (Williams & Shaykewich, 1970). Assim, considerando Ψ_m constante, o aumento no grau de saturação resulta num incremento de σ' . Cabe salientar que quanto maior for σ' , maior será a resistência do solo à deformação e, portanto, a tensão que deve ser aplicada para comprimi-lo (Baumgartl & Horn, 1991; Zhang et al., 1997).

A resistência do solo ao cisalhamento é determinada através da equação de Coulumb (Sánchez-Girón, 1996):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

Onde:

- τ = resistência do solo ao cisalhamento (kPa);

- c = coesão (kPa);
- σ = tensão normal ao plano de cisalhamento (kPa);
- ϕ = ângulo do atrito interno do solo (graus).

A coesão é definida como sendo a propriedade através da qual as partículas e agregados do solo se mantêm unidos entre si (Head, 1982). Solos argilosos, densos, ricos em cátions bi e trivalentes e em agentes cimentantes (óxidos de ferro e alumínio e MOS) caracterizam-se por uma maior coesão (Sánchez-Girón, 1996). A MOP, devido ao seu baixo grau de empacotamento, pode diminuir o número de pontos de contato entre as partículas (Soane, 1990), resultando numa menor coesão. De acordo com Sánchez-Girón (1996), a coesão intragregados aumenta com a redução da umidade do solo, devido a uma maior aproximação entre as partículas do solo. A coesão inter-agregados, por sua vez, relaciona-se à existência de forças de tensão superficial nas interfaces água/ar. O número destas interfaces e, conseqüentemente, a coesão interagregados, aumenta com o incremento da umidade até um determinado limite, quando a água satura uma grande porcentagem de poros. Nesta situação, as interfaces ar/água diminuem e a coesão interagregados decresce.

Para que ocorra o movimento relativo entre as partículas e/ou agregados do solo, a tensão efetiva aplicada deve ser suficiente para vencer, além da coesão, o atrito que se processa entre os componentes da fase sólida do solo. Para Head (1982), a força de atrito depende das condições da interface corpo-superfície (forma, rugosidade, dureza e lubrificação), sendo representada pelo coeficiente de atrito, que corresponde à tangente do ângulo de atrito interno (ϕ). Solos arenosos (Braidá, 2004), com baixos teores de água (Boeni, 2000; Secco, 2003; Silva, 2003b) e densos (Secco, 2003), apresentam, em geral, maiores valores de ϕ . O efeito da MOS sobre o ϕ ainda não se encontra bem esclarecido pela pesquisa. Conforme Soane (1990), a MOS, especialmente aquelas frações com menor grau de decomposição, ao recobrir as partículas minerais e se colocar nos espaços existentes entre as mesmas, aumenta a fricção e, conseqüentemente, o ϕ . Para Zhang et al. (1997), o aumento da fricção se deve ao aumento da força de retenção da água ocasionada pelos maiores teores de MOS. Em solos de textura média e argilosa, a MOS poderá elevar o ϕ ao favorecer a formação de agregados

maiores e mais resistentes (Baumgartl & Horn, 1991; Braida, 2004). Porém, Braida (2004) salienta que, em solos arenosos, as partículas orgânicas, por serem de menor tamanho e dureza que as minerais, podem reduzir o atrito.

2.3 Compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas

Os efeitos negativos do tráfego sobre as características e propriedades físicas do solo são bem documentados pela bibliografia disponível. Quando as tensões efetivas aplicadas pelo tráfego de máquinas agrícolas ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo, observa-se uma grande redução do volume de macroporos (Tormena et al., 1998; Kulli et al., 2003; Silva et al., 2003; Tarawally et al., 2004; Servadio et al., 2005; Schäffer et al., 2007), enquanto que o de microporos permanece inalterado (Tormena et al., 1998) ou até mesmo aumenta (Tarawally et al., 2004; Schäffer et al., 2007). Quando o tráfego não é muito intenso e/ou realizado sob condições de solo seco, os macroporos podem ser reduzidos a mesoporos (Tarawally et al., 2004). A compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas modifica ainda a geometria do espaço poroso. Servadio et al. (2005) concluíram que o tráfego diminuiu a proporção dos poros alongados de maior tamanho (que são os mais efetivos na transmissão de água) em relação aos circulares e irregulares de menor tamanho. Após o tráfego, os poros orientaram-se paralelamente à superfície do solo, sem continuidade vertical, tornando-os menos efetivos para a infiltração de água e crescimento radicular em profundidade. Em geral, o tráfego de máquinas agrícolas também aumenta a densidade do solo e diminuiu a porosidade total (Jorajuria & Draghi, 1997; Tormena et al., 1998; Mosaddeghi et al., 2000; Kulli et al., 2003; Silva et al., 2003; Tarawally et al., 2004; Servadio et al., 2005; Botta et al., 2006b) o que, no entanto, nem sempre ocorre (Schäffer et al., 2007), evidenciando que estes são indicadores menos sensíveis da compactação ocasionada pelo tráfego.

Em função das alterações anteriormente descritas, o tráfego resulta no aumento da resistência mecânica do solo à penetração (Jorajuria & Draghi, 1997; Tarawally et al., 2004; Servadio et al., 2005; Botta et al., 2006b; Botta et al., 2007; Veiga et al., 2007), na diminuição da capacidade de infiltração de água (Li et al., 2007) e da condutividade hidráulica saturada (Silva et al., 2003;

Servadio et al., 2005). A compactação pelo tráfego de máquinas, ao alterar o arranjo poroso do solo, modifica a curva característica de água no solo. Tarawally et al. (2004) encontraram que a realização de sete tráfegos de um trator com massa total de 10 Mg e pressão de contato pneu/solo de 83 kPa aumentou o volume de água retido no ponto de murcha permanente (PMP) sem alterar a umidade correspondente à capacidade de campo (CC). Resultados semelhantes foram obtidos por Li et al. (2007). Já Kulli et al. (2003) observaram que a água retida na zona radicular (até 0,35 m) foi drasticamente reduzida por quatro tráfegos de uma colhedora de beterraba (massa total igual a 28,52 Mg e pressão de contato pneu/solo equivalente a 165 kPa) devido à modificação ocasionada pelo mesmo nos padrões de infiltração de água no solo. A compactação do solo pelo tráfego resultou em fluxos preferenciais através de canais produzidos pela meso e macrofauna ou de fissuras ocasionadas pelos ciclos de umedecimento e secamento, de forma que água foi conduzida a camadas mais profundas, inacessíveis às raízes.

As propriedades mecânicas do solo também são modificadas pelo tráfego de máquinas agrícolas. Em geral, observa-se que a capacidade de suporte de carga de solo, estimada pela tensão de pré-consolidação, é maior em áreas submetidas ao tráfego de rodados de tratores e colhedoras (Silva et al., 2003; Cepik, 2006). Já a suscetibilidade do solo à compactação, expressa pelo índice de compressibilidade diminui (Schäffer et al., 2007) ou não é afetado (Lima, 2004; Cepik, 2006) pelo tráfego. Da mesma forma, a resistência do solo ao cisalhamento é maior em áreas submetidas ao tráfego (Radford et al., 2000; Barbosa et al., 2004). No entanto, estas alterações somente ocorrem quando a tensão aplicada for maior que a resistência do solo à deformação (Berli et al., 2004; Schäffer et al., 2007).

A intensidade do processo de compactação do solo pelo tráfego, assim como a profundidade que o mesmo atinge, depende, em primeiro lugar, da magnitude e forma de aplicação das tensões pelas máquinas agrícolas (Hamza & Anderson, 2005). Embasados na equação de Boussinesq modificada em 1934 por Fröhlich, Alakukku et al. (2003) afirmam que a magnitude das tensões transmitidas ao solo pelos rodados depende da pressão de contato rodado-solo quando se considera a superfície do mesmo (0,0-0,1 m), e da pressão de contato e da carga sobre o eixo para a camada de 0,1-1 m. O

aumento da carga sobre o eixo de 5 para 10 Mg, mantendo-se constante a pressão de contato, incrementou as tensões transmitidas à camada de 0,1 a 1 m. O mesmo efeito foi observado quando a pressão de contato rodado-solo passou de 150 a 300 kPa, mantendo-se constante a carga sobre o eixo. Porém, as diferenças provocadas pelas pressões de contato nas tensões que chegam à camada de 0,1 a 1 m vão diminuindo à medida que a profundidade aumenta, de forma que, a partir de 1 m, as tensões parecem depender apenas da carga sobre o eixo. Chamen et al. (2003) acrescentam que a pressão de contato determina o nível inicial de tensão na superfície do solo, enquanto que a carga sobre o eixo define a taxa com que as tensões diminuem em profundidade.

O modelo teórico de distribuição das tensões em profundidade em função da pressão de contato e da carga sobre eixo foi comprovado em trabalho realizado por Jorajuria & Draghi (1997). Estes autores avaliaram a compactação produzida por dois tratores com pressão de contato rodado-solo semelhantes (73 kPa), porém cargas sobre o eixo diferentes (2,3 e 4,1 Mg). O índice de cone foi semelhante entre os dois tratamentos até 0,30 m de profundidade. Porém, em camadas mais profundas, o índice de cone foi maior para o trator com maior carga sobre o eixo. Aumentos na profundidade de transmissão das tensões em função do incremento da carga sobre o eixo também foram detectados por Wiermann et al. (1999). Para uma carga sobre o eixo de 86 kN, Keller & Arvidsson (2004) encontraram que a tensão medida a 0,3 m de profundidade aumentou com o incremento da pressão de inflação dos pneus, evidenciando que a pressão de contato também tem efeito na compactação subsuperficial.

O nível de deformação do solo relaciona-se também ao número de passadas realizadas no mesmo local. Na superfície do solo (0,0-0,20 m), os maiores incrementos no grau de compactação ocorrem logo após as primeiras passadas (Jorajuria & Draghi, 1997; Hamza & Anderson, 2003; Botta, 2005). No entanto, à medida que os tráfegos vão se sucedendo, o aumento no grau de compactação comparativamente às áreas sem tráfego atinge profundidades maiores (Jorajuria & Draghi, 1997; Mosaddeghi et al., 2000; Kulli et al., 2003; Streck et al., 2004; Botta, 2005; Botta et al., 2006b). Tal fato pode ser relacionado ao aumento da magnitude das tensões transmitidas às camadas

inferiores do solo, o que foi comprovado por Schäffer et al. (2007). Os autores encontraram que as tensões medidas no centro da linha de tráfego a uma profundidade de 0,32 m passaram de 80 kPa na primeira para 120 kPa na sétima passada do rodado dianteiro de uma colhedora de grãos, o qual apresentava uma pressão de contato de 120 kPa e suportava uma carga total de 3,5 Mg. Diante desse panorama, Jorajuria Collazo (2005) adverte que um grande número de passadas de um trator leve pode ocasionar compactação subsuperficial em níveis semelhantes a poucas passadas de um trator pesado, o que foi confirmado nos trabalhos de Jorajuria & Draghi (1997) e Botta (2005).

A pressão de contato pode ser reduzida através da diminuição no peso sobre o eixo e/ou do aumento na área de contato rodado - solo (Raper, 2005). O incremento da área de contato, por sua vez, pode ser obtido mediante o emprego de rodados de maiores dimensões (esteiras ou pneus mais largos e/ou de maior diâmetro), de um número maior de rodas por eixo ou do aumento na flexibilidade da carcaça dos pneus (Canillas & Salokhe, 2001). A forma mais acessível de aumentar a flexibilidade da carcaça e, desse modo, a área de contato com o solo, é reduzir a pressão de inflação dos pneus ao valor mínimo necessário para a carga que incide sobre os mesmos (Chamen et al., 2003). Os pneus radiais são mais flexíveis que os diagonais, resultando assim em uma maior área de contato com o solo (Raper, 2005). Hillel (1982) assinala ainda que rodados mais flexíveis, além de aumentarem a área de contato pneu-solo, são capazes de absorver parte da pressão aplicada, mediante a sua deformação.

A distribuição das tensões na área de contato solo-rodado não é uniforme, de maneira que as mesmas se concentram em alguns pontos, como sob as garras dos pneus (Bailey et al., 1995; Radford et al., 2000; Alakukku et al., 2003), no centro da linha de tráfego (Keller et al., 2002; Schäffer et al., 2007) ou sob os roletes da esteiras (Keller et al., 2002). Tensões superiores ao valor médio, considerando a área de contato pneu/solo, também podem ser geradas pela transferência de peso do eixo dianteiro e do implemento para o eixo traseiro, enquanto o trator desenvolve esforço de tração (Alakukku et al., 2003). Os mesmos autores ressaltam que a redução da pressão de inflação, bem como o emprego de pneus radiais, promove uma distribuição mais uniforme das tensões na área de contato solo-rodado, pois os pneus

conseguem se adaptar melhor às irregularidades do terreno.

Além do uso de tratores mais leves, a carga sobre os rodados pode ser reduzida aumentando-se o número de eixos (configuração em tandem) ou o número de rodas por eixo (Alakukku et al., 2003). Conforme estes autores, a divisão da carga somente ocorre caso a distância entre os eixos ou entre rodas montadas sobre o mesmo eixo for o suficiente para que não haja interação entre as tensões aplicadas. Keller & Arvidsson (2004) encontraram que, a uma distância de 0,1 m entre as rodas localizadas na mesma extremidade do eixo, a interação entre as tensões aplicadas pelas mesmas foi pequena. Assim, as tensões transmitidas em profundidade por um trator com carga sobre o eixo de 88 kN e rodados duplos equivaleram às de um trator com 50 kN e rodados simples, considerando os pneus com uma mesma pressão de inflação (60 kPa). No caso da diminuição da carga por rodado através de um maior número de eixos dispostos em tandem, é cabe destacar que eixos adicionais representam um maior número de passadas, o que também pode ocasionar compactação em subsuperfície (Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003).

O aumento da patinagem pode incrementar o grau de compactação induzido pelos rodados tratórios (Raper, 2005), porque à pressão de contato pneu/solo é adicionada a deformação produzida pelas tensões cisalhantes aplicadas pelos rodados (Sánchez-Girón, 1996). Raghavan et al. (1977) encontraram que a densidade do solo aumentou com o incremento da patinagem de um pneu 16.9-28 inflado a 40 kPa até este parâmetro atingir valores de 25 a 30%. Quando a patinagem superou este nível, a densidade diminuiu, porque o pneu mobilizou o terreno. Da mesma forma, o aumento da velocidade de deslocamento durante o tráfego, ao reduzir o tempo de permanência da carga sobre o solo, diminui o grau de compactação produzido pelo tráfego (Chamen et al., 2003), bem como a magnitude das tensões transmitidas às camadas subsuperficiais (Alakukku et al., 2003).

Tanto a magnitude quanto a distribuição em profundidade da compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas dependem de atributos físicos e mecânicos do solo. Dentre os fatores que determinam o grau de compactação produzido pelo tráfego, o teor de água do solo é o mais importante (Hamza & Anderson, 2005). Segundo Pinto (2002), o ensaio de Proctor Normal, criado pelo engenheiro americano R. R. Proctor em 1933,

evidencia a existência de um teor de água onde a compactação é máxima, o qual depende principalmente do teor de argila e de MOS (Ball et al., 2000) e da energia de compactação (Pinto, 2002). Segundo Braida (2004), este comportamento ocorre porque, quando o solo está seco, o aumento da umidade resulta na formação de filmes de água ao redor das partículas, o que reduz o atrito e facilita a compactação. No entanto, acima de um determinado valor (umidade crítica), o acúmulo de água no espaço poroso gera pressões neutras que dissipam parte da energia aplicada, reduzindo a compactação. De acordo com Figueiredo et al. (2000), para solos argilosos, o teor de água em que ocorre a máxima compactação equivale a aproximadamente 90% da umidade correspondente ao limite de plasticidade (LP) ou a 100% da referente à CC (tensão de -33 kPa). Valores semelhantes foram obtidos por Braida (2004) e Beutler et al. (2005). No entanto, a relação entre a umidade ótima de compactação e o LP pode ser modificada, principalmente em função da textura do solo e da energia de compactação. Nesse sentido, Ball et al. (2000) encontrou que, para solos mais arenosos, a máxima compactação ocorreu em um teor de água correspondente a aproximadamente 70% do LP. Da mesma forma, Pinto (2002) explica que o aumento da energia compactante, num mesmo solo, diminuiu o teor de água ótimo para compactação do solo.

O efeito do teor de água sobre a compactação induzida pelo tráfego de rodados foi avaliado por Tarawally et al. (2004). Estes autores observaram um maior grau de compactação quando o tráfego (sete passadas de um trator com massa total de 10 Mg e pressão de contato pneu/solo de 83 kPa) foi realizado com o solo na umidade correspondente à capacidade de campo, seguido da condição saturada e seca. Já Mosaddeghi et al. (2000) concluíram que o grau de compactação induzido na camada de 0,0-0,30 m pelo tráfego de um trator com massa total de 3,69 Mg e pressão de inflação dos pneus traseiros igual a 105 kPa aumentou quando o teor de água passou de 60 para 100% do LP. Os mesmos autores verificaram ainda que o tráfego na umidade equivalente a 60% do LP não resultou no aumento da compactação do solo em relação ao controle sem tráfego.

A forma com a qual as tensões se distribuem em profundidade também é afetada pelas propriedades físicas e mecânicas do solo. Em solos arenosos e/ou pouco agregados (Hamza & Anderson, 2005) e com maior teor

de água (Novak et al., 1992; Smith et al., 2000; Tarawally et al., 2004), as tensões aplicadas pelos rodados atingem maiores profundidades, apresentando, no entanto, menor alcance horizontal. Quando o solo é mobilizado através de operações como a escarificação e a subsolagem, e após há carga, a transmissão das tensões ocorre até camadas mais profundas (Chamen et al., 2003; Veiga et al., 2007), o que pode acelerar a recompactação do solo (Spoor et al., 2003). A MOS, devido à sua elasticidade (Soane, 1990), também pode diminuir a profundidade de transmissão das tensões exercidas pelos rodados das máquinas agrícolas. Isto foi comprovado por Mosaddegui et al. (2000) que, estudando o efeito da adubação orgânica sobre a compactação de um solo argilo-siltoso produzida por um e dois tráfegos de um trator (massa de 3,69 Mg, pressão de inflação dos pneus traseiros de 105 kPa), concluíram que a aplicação de 50 Mg ha⁻¹ (base seca) de esterco bovino diminuiu a profundidade na qual houve aumento do grau de compactação do solo em relação ao controle sem tráfego. Segundos os autores, estes efeitos foram mais pronunciados quando o tráfego foi realizado na umidade equivalente ao LP.

A propagação das tensões é determinada ainda pela heterogeneidade do perfil do solo. Camadas compactadas em subsuperfície podem confinar as tensões a profundidades menores, evitando a compactação em camadas mais profundas (Tormena et al., 1998; Alakukku et al., 2003; Spoor et al., 2003; Veiga et al., 2007). Neste caso, as tensões espalham-se no sentido horizontal (Alakukku et al., 2003). Porém, estudos conduzidos por Kulli et al. (2003) demonstraram que uma camada compactada localizada a 0,25 m da superfície do solo foi capaz de transmitir as tensões aplicadas por quatro tráfegos de uma colhedora de beterraba com 28,52 Mg de massa total a regiões mais profundas, produzindo compactação significativa até 0,55 m de profundidade.

2.4 Efeitos da compactação do solo sobre as culturas e o desempenho das máquinas agrícolas

Os impactos da compactação do solo sobre as suas propriedades físicas e mecânicas, discutidos no item 2.3., podem afetar negativamente o

desenvolvimento das plantas. Reduções na produtividade de grãos de diversas culturas, em razão da compactação, têm sido relatadas em diversos trabalhos de pesquisa (Lipiec et al., 1991; Unger & Kaspar 1994; Flowers & Lal, 1998; Secco, 2003; Beutler & Centurion, 2004; Beutler et al., 2005; Chan et al., 2006; Botta et al., 2007). Os prejuízos da compactação estendem-se à produtividade e valor nutritivo da silagem (Nevens e Reheu, 2003) e das pastagens (Jorajuria & Draghi, 1997; Martínez & Zinck, 2004; Barzegar et al., 2006), bem como à qualidade dos produtos hortifrutigranjeiros (Terminiello & Palancar, 2005).

Os prejuízos ocasionados pela compactação do solo parecem estar relacionados às condições de aeração e à resistência mecânica junto ao ambiente radicular. Estudos envolvendo o intervalo hídrico ótimo (IHO) evidenciam que, à medida que o grau de compactação aumenta, o teor de água em que porosidade de aeração considerada como sendo crítica (10%) é atingida diminui; por outro lado, a compactação aumenta a umidade abaixo da qual a resistência do solo à penetração torna-se limitante ao crescimento das raízes (Imhoff, 2002; Silva, 2003b; Cavalieri et al., 2006). Assim, em solos compactados, observa-se um incremento na probabilidade de ocorrência de teores de água restritivos às plantas, de forma que os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas tendem a ser mais pronunciados sob condições de excesso ou déficit hídrico (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). Tanto a deficiência de oxigênio (Hillel, 1982; Flowers & Lal, 1998), quanto a elevada resistência à penetração (Rosolem et al., 2002; Foloni et al., 2003; Tubeileh et al., 2003; Beutler & Centurion, 2004), diminuem o crescimento e a efetividade das raízes, afetando negativamente a absorção de nutrientes e água. Além disso, Tubeileh et al. (2003) relatam que as raízes, ao encontrarem uma camada de solo compactado, produzem sinais de natureza bioquímica, possivelmente constituídos pelo ácido abscísico (ABA). Ao ABA é atribuída uma diminuição da condutância estomática, fato que reduz a taxa de assimilação de C e, por conseguinte, o crescimento das plantas.

A dinâmica de alguns nutrientes também é influenciada pela compactação do solo, o que pode provocar deficiências nutricionais nas plantas. Este fato é especialmente importante para o caso do N, uma vez que a dinâmica deste macronutriente está intimamente ligada à atividade microbiana

e, conseqüentemente, à disponibilidade de oxigênio (Moreira & Siqueira, 2006). Assim, Nevens & Reheul (2003) observaram uma redução de 46 kg ha⁻¹ no acúmulo de N por plantas de milho destinadas à produção de silagem. Essa redução foi suficiente para diminuir o teor de N nas plantas, tornando-o menor que o nível crítico, o que se constituiu no principal fator responsável pela menor produção de silagem registrada nas áreas compactadas. Os autores obtiveram também que a compactação diminuiu substancialmente a mineralização do N a partir da MOS, o que pode explicar a menor absorção deste nutriente pelo milho nos tratamentos compactados. Pengthamkeerati et al. (2006) também concluíram que a compactação diminuiu a mineralização do N e, ainda, inibiu o processo de nitrificação, resultando no acúmulo de N amoniacal (NH₄), que não é a forma preferencialmente absorvida pela maioria das culturas (Malavolta, 1985). Aumentos de quase sete vezes nas perdas de N por denitrificação em virtude da compactação de áreas de pastagens no Canadá foram observados por Bhandral et al. (2007).

A compactação afeta também a disponibilidade de água às plantas. Devido à baixa capacidade de infiltração, o volume de água proveniente da chuva que é efetivamente armazenado no solo tende a ser menor quando o mesmo se encontra compactado (Brandão et al., 2006). Ao mesmo tempo, a compactação diminui o diâmetro dos poros (item 2.3) o que aumenta a energia com a qual a água é retida (Reichardt & Timm, 2004). Isto, aliado à menor condutividade hidráulica geralmente observada em solos excessivamente compactados (Silva, 2003b; Silva et al., 2003; Servadio et al., 2005), pode dificultar o movimento de água do solo até a planta.

Ainda no que se refere à água disponível às plantas, a influência da compactação sobre a umidade no PMP parece relacionar-se à textura do solo. Em solos argilosos, o teor de água no PMP aumenta com o incremento na densidade do solo (Tormena et al., 1999; Silva, 2003b; Tarawally et al., 2004). Este efeito tende a ser menos pronunciado com o decréscimo no teor de argila, de forma que em solos arenosos, a umidade no PMP praticamente não varia em função do grau de compactação (Da Silva et al., 1994; Silva, 2003b). Por outro lado, é esperado que o aumento do grau de compactação incremente o teor de água referente à capacidade de campo, devido ao fato desse processo, conforme mencionado anteriormente, resultar num aumento do volume de

meso e microporos. Tal fato foi comprovado nos trabalhos realizados por Da Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999), Klein & Libardi (2000) e Cavalieri et al. (2006). Silva (2003b) verificou que o teor de água equivalente à CC foi maior nos tratamentos conduzidos sob semeadura direta comparativamente aos escarificados, os quais apresentavam um menor grau de compactação em relação aos primeiros. No entanto, a umidade na CC pode diminuir quando o grau de compactação for grande o suficiente para ocasionar diminuições acentuadas no volume de meso e microporos, conforme detectado no trabalho de Cavalieri et al. (2006).

Unger & Kaspar (1994) afirmam que os prejuízos às plantas tornam-se mais severos à medida que as camadas compactadas se desenvolvem mais superficialmente. De acordo com os autores, camadas compactadas em superfície limitam de maneira mais pronunciada o volume de solo a ser explorado pelas raízes comparativamente à compactação em subsuperfície, restringindo o acesso das mesmas a nutrientes e água. Além disso, se a compactação é restrita a camadas subsuperficiais, as raízes podem se desenvolver mais no sentido horizontal, sem decréscimos significativos na produtividade das culturas (Hamza & Anderson, 2005). Tal afirmação foi comprovada por Beutler et al. (2004), que verificaram um aumento na densidade e superfície radicular da soja em profundidades inferiores à da camada compactada, compensando o menor desenvolvimento das raízes nesta região.

Vários trabalhos de pesquisa indicam que a produtividade das culturas diminui quando as mesmas se desenvolvem sobre solos mobilizados e com alta porosidade, indicando a existência de um nível ótimo para esta variável (Hakansson & Lipiec, 2000; Beutler et al., 2004; Beutler et al., 2005). Este comportamento se justifica pelo fato de solos soltos e muito porosos se caracterizarem por uma menor condutividade hidráulica não saturada (Taylor & Brar, 1991; Veen et al., 1992) e, ao mesmo tempo, não proporcionarem um bom contato solo-raiz, o que prejudica a absorção de água e nutrientes (Veen et al., 1992). Em solos pouco densos e com elevada macroporosidade, a capacidade de retenção de água, expressa pela umidade na CC, é baixa, de modo que o volume de água disponível é menor comparativamente a solos com moderado grau de compactação (Klein & Libardi, 2000; Cavalieri et al.,

2006). Da mesma forma, a emergência pode ser afetada negativamente em solos com densidades muito baixas, devido a um mau contato solo-semente (Raghavan et al., 1979). Assim, os prejuízos ocasionados um baixo grau de compactação também são mais pronunciados sob condições de déficit hídrico (Raghavan et al., 1979).

O aumento da resistência do solo ao cisalhamento, resultante da compactação do mesmo, exerce efeitos contraditórios sobre o desempenho das máquinas e equipamentos agrícolas. Por um lado, a compactação aumenta a demanda de força de tração das ferramentas de mobilização do solo (Bailey et al., 1995), assim como prejudica a qualidade do trabalho (Tullberg, 2000). Em contrapartida, superfícies firmes, ou seja, que apresentem determinado grau de compactação, ao reduzir as perdas de potência na interface solo/rodado devidas à patinação e à resistência ao rolamento (devido ao menor recalque do rodado no solo), aumentam a eficiência de tração (Lee & Kim, 1997; Jenane & Bashford, 2000).

Maiores exigências de força de tração pelos sulcadores de semeadoras e hastes de escarificadores, em áreas compactadas, também têm sido relatadas. Sánchez-Girón et al. (2005) concluíram que a força de tração demandada por hastes sulcadoras adaptadas ao preparo convencional e reduzido triplicou quando a densidade passou de 1,1 para 1,4 Mg m⁻³. Os mesmos autores obtiveram ainda que a força vertical (de sucção) na haste foi mais negativa à medida que a densidade do solo aumentou. Conte et al. (2007), trabalhando em um Latossolo muito argiloso, obtiveram que a demanda de força de tração de hastes sulcadoras para deposição do adubo, sob condição de semeadura direta, correlacionou-se de forma positiva e significativa com índice de cone. Da mesma forma, Xavier (2005), em estudo realizado sobre um Argissolo Vermelho, textura areno-franco-argilosa, concluiu que a força de tração demandada por hastes sulcadoras de adubo, em semeadura direta, foi praticamente 100% maior nas áreas submetidas a tráfego do que nas não trafegadas.

2.5 Indicadores do estado de compactação do solo

Existem diversos indicadores do estado de compactação do solo

(Imhoff, 2002), sendo a densidade e a resistência mecânica à penetração os mais utilizados (Raper, 2005). Uma das grandes vantagens do uso da densidade do solo como indicador do estado de compactação é a sua independência em relação ao teor de água durante a avaliação. No entanto, são necessárias diversas amostragens para que diferenças significativas nesta variável sejam detectadas (Chancellor, 1994). Além disso, o método padrão para quantificação da densidade do solo, que envolve a coleta de amostras indeformadas através de anéis volumétricos (EMBRAPA, 1997), é trabalhoso, demorado e destrutivo.

O estabelecimento dos valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas não é tarefa fácil, especialmente quando se considera que, conforme Hakansson & Lipiec (2000), a resposta das culturas a este atributo varia de solo para solo, principalmente em função da textura, o que dificulta a extrapolação dos resultados experimentais. Embasados em estudos relacionados ao IHO, Reichert et al. (2003) sugerem valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas, os quais variam em função da classe textural do solo. De acordo com estes autores, os valores de densidade limitantes as plantas correspondem, em média, a 1,75; 1,45 e 1,30 Mg m^{-3} para solos de textura arenosa, média e muito argilosa, respectivamente.

Para reduzir as diferenças de resposta das plantas à densidade em função do tipo de solo, Hakansson (1990) propôs o conceito de densidade relativa, determinada através da divisão da densidade do solo por um valor de densidade de referência obtido pela compressão uniaxial de amostras grandes e indeformadas de solo a uma tensão de 200 kPa. Este autor, tendo como base os resultados de mais de 100 experimentos em diferentes tipos de solos, concluiu que a densidade relativa ótima à produtividade de diversas culturas corresponde a aproximadamente 0,87. No Brasil, tem-se utilizado como referência a densidade máxima determinada pelo teste de Proctor Normal (Klein, 2006) que, na maioria dos casos, resulta em valores de densidade relativa ótima semelhantes (Torres & Saraiva, 1999; Beutler et al., 2005) aos indicados por Hakansson (1990).

A quantificação da resistência do solo à penetração (RP) é feita mediante o emprego de equipamentos denominados de penetrômetros, sendo que os mais utilizados são os constituídos por uma haste metálica que

apresenta um cone em uma de suas extremidades (Chancellor, 1994). Este equipamento mede a força por unidade de área (pressão) necessária para que o cone penetre no solo até uma determinada profundidade. Conforme o mesmo autor, as características do cone e a forma de utilização do penetrômetro influenciam nos resultados. Assim, foram desenvolvidas normas técnicas que padronizam as características construtivas e os procedimentos para a obtenção dos dados de RP. A norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004) estabelece que, entre outros aspectos, o cone deve apresentar um ângulo de 30° em relação à vertical; a área da base do cone deve ser de 323 e de 130 mm², respectivamente, para solos macios e duros; e o desgaste máximo permitido é de 3% em relação ao diâmetro recomendado. O procedimento a ser adotado durante os ensaios é descrito na norma ASAE EP542 (ASAE, 1999). Os aspectos de maior relevância a serem observados referem-se à velocidade de penetração (constante e igual a 30 mm s⁻¹), ao teor de água do solo (execução do ensaio próximo à umidade da CC) e à limpeza do cone.

A RP aumenta e diminui, respectivamente, com a redução do teor de água e da densidade do solo (Klein et al., 1998; Tormena et al., 1998; Torres & Saraiva, 1999; Silva, 2003b; Genro Junior et al., 2004; Cavalieri et al., 2006). A diminuição da RP com o incremento da umidade é mais pronunciada para solos argilosos comparativamente aos arenosos (Mapfumo & Chanasyk, 1998). Por outro lado, o aumento da RP em função do incremento na densidade do solo torna-se menos evidente à medida que o teor de água aumenta (Klein et al., 1998; Torres & Saraiva, 1999; Camara & Klein, 2005a; Cavalieri et al., 2006), indicando que em solos úmidos, a RP é menos sensível na detecção de camadas compactadas. Diante disso, a análise correta dos dados de RP exige o conhecimento do teor de água sob o qual a avaliação foi executada. A RP é afetada ainda pelas propriedades mecânicas do solo, tais como a resistência ao cisalhamento (Bradford, 1986; Chancellor, 1994).

Embora o crescimento radicular seja altamente correlacionado com a RP, os mecanismos de atuação das raízes e dos penetrômetros são notadamente distintos (Leão, 2002). Assim, a resistência do solo ao cone pode ser de duas a oito vezes maior que aquela encontrada pelas raízes, o que é atribuído à incapacidade do penetrômetro em acompanhar as irregularidades dos poros pré-existentes no solo (Bengough & Mullins, 1990). O valor de 2 MPa

tem sido indicado como o limite de RP acima do qual o crescimento radicular é prejudicado (Imhoff, 2002). No entanto, este valor é grandemente variável entre as diferentes espécies vegetais e estádios de desenvolvimento das mesmas, bem como em função do tipo de solo e das características do penetrômetro utilizado. Valores críticos de RP determinados inferiores a 2 MPa são relatados em diversos trabalhos de pesquisa (Rosolem et al., 1994; Foloni et al., 2003; Rosolem et al., 2002; Beutler & Centurion, 2004). Em solos caracterizados por um elevado grau de compactação, o valor crítico de RP pode ser inferior a 2 MPa, devido à quebra da continuidade dos poros (Lipiec & Hakansson, 2000). Em contrapartida, Klein & Camara (2007), trabalhando em um Latossolo Vermelho, argiloso, concluíram que uma RP de 2 MPa na camada de 0,0-0,25 m, em condições de semeadura direta, não foi limitante à produtividade da soja.

A principal vantagem da utilização da RP refere-se à facilidade e rapidez de execução do ensaio (Chancellor, 1994). Silva (2003b) acrescenta que o uso de penetrômetros permite a avaliação do estado de compactação em pequenos intervalos de profundidade, o que nem sempre é possível quando se utiliza outras propriedades físicas. Além disso, a RP parece ser um indicador da qualidade estrutural do solo mais sensível a mudanças do manejo comparativamente à densidade do solo (Abreu et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006b). A principal desvantagem da resistência à penetração é a sua dependência em relação ao teor de água, o que dificulta a comparação dos resultados obtidos em diferentes locais/épocas (Raper, 2005).

2.6 Compressibilidade do solo

A expressão quantitativa da resistência do solo a um novo decréscimo de volume, quando lhe é imposto um determinado regime de tensão, é denominada de compressibilidade (Soane, 1990); ou seja, é a facilidade com que um solo se compacta (Imhoff, 2002). Existem diversos métodos para avaliar a compressibilidade do solo (Soane, 1990). Um deles, que vem sendo utilizado com freqüência no Brasil, é o ensaio de compressão uniaxial confinada, executado em um equipamento denominado de prensa oedométrica, cuja metodologia de execução encontra-se descrita na norma

NBR 12007/90 (ABNT, 1990). A partir deste ensaio, obtém-se a curva de compressão do solo, que é a representação gráfica da variação do índice de vazios ou da densidade do solo em função do logaritmo da tensão aplicada (Dias Junior & Pierce, 1996). Os parâmetros de maior interesse, que podem ser extraídos da curva de compressão do solo, são a tensão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressibilidade (IC).

Para solos que não possuem histórico de deformações, a curva de compressão é, na verdade, uma reta (Larson et al., 1980). Em solos já submetidos a tensões externas, a curva de compressão apresenta um formato curvilíneo, podendo a mesma ser dividida em dois segmentos, um curvo e outro reto (Lebert & Horn, 1991). O segmento curvo é denominado de linha ou curva de compressão secundária, enquanto que o reto é chamado de linha ou reta de compressão virgem. A tensão a partir da qual a curva de compressão torna-se uma linha reta corresponde a σ_p . A σ_p é um indicador da capacidade de suporte e da história de tensões às quais o solo foi submetido, sendo definida como a máxima pressão que o solo sofreu no passado (Dias Junior & Pierce, 1996) ou da tensão de água mais negativa experimentada pelo mesmo (Veiga et al., 2007). Quando se aplica tensões inferiores à σ_p , o solo sofre deformações pequenas, elásticas e reversíveis, de forma que o mesmo não apresentará compactação adicional. Tensões superiores à σ_p resultam em deformações plásticas, irreversíveis; neste caso, o solo sofrerá compactação adicional. Assim, para que o solo não apresente compactação adicional, a pressão exercida pelas máquinas e implementos agrícolas, assim como pelo pisoteio animal, não deve ultrapassar a σ_p .

Durante o ensaio de compressão uniaxial, o arranjo poroso do solo é modificado e, assim, as características referentes à retenção de água também são afetadas, o que pode ser monitorado através da pressão da água nos poros, expressa em termos de potencial matricial (Peng et al., 2004). Estes autores encontraram que, à medida que a carga aplicada às amostras aumenta, o potencial matricial torna-se mais negativo, o que se deve principalmente à formação de poros menores. Essa redução é pequena nas cargas correspondentes à curva de compressão secundária, tornando-se grande quando a tensão aplicada ultrapassa a σ_p , evidenciando que a partir daí o arranjo poroso é grandemente afetado pela aplicação de cargas externas. A

variação do potencial matricial permite inferir a respeito da estabilidade do sistema poroso, conforme relatado por Veiga et al. (2007). Conforme estes autores, a diminuição do potencial matricial sob a aplicação de cargas pequenas foi muito maior na escarificação e preparo convencional do que na semeadura direta, sugerindo que a rigidez do sistema poroso é maior na semeadura direta do que no preparo convencional e na escarificação.

A determinação da σ_p é empírica, utilizando métodos que permitem estimar o valor mais provável e a sua ordem de grandeza. No Brasil, os processos mais utilizados para determinação da σ_p são o de Casagrande e o de Pacheco Silva, descritos na NBR 12007/90 (ABNT, 1990). A comparação entre os valores da σ_p encontrados na bibliografia deve ser cuidadosa, atentando para o processo de determinação empregado, pois Arvidsson & Keller (2004) encontraram diferenças na magnitude deste parâmetro em função do método de cálculo. Em geral, os valores obtidos foram maiores quando determinados pelo método de Casagrande, embora a relação entre os diferentes processos tenha sido positiva e significativa. Os mesmos autores advertem que o limite entre as deformações elásticas e plásticas dentro da curva de compressão do solo não é abrupto, mas sim gradual. Portanto, é possível que deformações plásticas ocorram com a aplicação de tensões próximas, mas inferiores à σ_p .

A magnitude da σ_p diminui em função do aumento no teor de água do solo (Kondo & Dias Junior, 1999a; Oliveira et al., 2003; Peng et al., 2004; Assis & Lanças, 2005; Pereira et al., 2005; Miranda, 2006), devido ao aumento da espessura do filme de água que envolve as partículas do solo, resultando na redução das forças de coesão (Imhoff, 2002) e de atrito entre as mesmas (Braidá, 2004). No entanto, Secco (2003) obteve que, sob graus de saturação inferiores a 30%, a σ_p aumentou com o incremento do teor de água do solo. Isto se deve ao aumento no número de interfaces água/ar, resultando numa maior tensão superficial e, conseqüentemente, maior coesão. A relação σ_p x teor de água têm sido quantificada através dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo - MCSCS (Kondo & Dias Junior, 1999a; Miranda, 2006). Os MCSCS são importantes ferramentas visando à prevenção da compactação, permitindo o estabelecimento de pressões máximas que podem ser aplicadas ao solo num dado teor de água ou então, o teor máximo de água

no solo em que uma dada pressão pode ser aplicada sem compactar adicionalmente o solo (Cardoso, 2007). Além disso, os MCSCS têm sido usados como indicadores dos efeitos que o tráfego exerce sobre a estrutura do solo (Silva et al., 2006; Silva et al., 2007).

Solos com maior densidade inicial caracterizam-se por valores mais altos de σ_p , o que pode ser atribuído a maior força de fricção e de coesão entre as partículas (Silva, 1999; Imhoff, 2002; Rücknagel et al., 2007; Schäffer et al., 2007; Veiga et al., 2007). Este comportamento mantém-se mesmo com o uso de amostras de solo inicialmente deformadas e recompactadas a diferentes densidades (Peng et al., 2004). Braida (2004) observou que a resposta da σ_p à densidade inicial é condicionada pelo grau de saturação e pelo tipo de solo. Assim, em um Nitossolo (787 g kg⁻¹ de argila), a σ_p foi menor nas amostras menos densas em todos os graus de saturação. Já no Argissolo (155 g kg⁻¹), em saturações baixas, σ_p foi maior para as densidades mais elevadas. No entanto, sob graus de saturação superiores a 70%, σ_p não variou em função da densidade. O autor atribuiu estes resultados ao fato de, em solos arenosos, a resistência à deformação ser determinada principalmente pelo número de pontos de contato e pelo atrito entre as partículas. Assim, quando há água suficiente para recobrir todas as partículas, o contato e o atrito entre as mesmas tornam-se pequenos mesmo sob altas densidades.

A relação σ_p x densidade e os MCSCS são afetados pela estrutura do solo. Rücknagel et al. (2007) demonstraram que, para uma mesma densidade do solo, o aumento do espaço poroso interagregados, constituído principalmente por macroporos, diminui a σ_p . Da mesma forma, Pereira et al. (2005) estudaram o efeito de duas classes de tamanho de agregados (menores que 2,5 mm e entre 9,3 e 19,4 mm), obtidos de amostras coletadas de um Nitossolo de textura argilosa, sobre a σ_p . Concluíram que a σ_p foi menor para as amostras constituídas de agregados maiores, embora as mesmas tenham se caracterizado por um menor índice de vazios inicial. Segundo os autores, a maior σ_p em amostras constituídas de agregados menores pode ser explicada pela maior área de contato superficial entre os mesmos. Canarache et al. (2000) também concluíram que a σ_p diminuiu com o aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados, sendo esta relação linear. Estas inferências são confirmadas por Macedo (1993), que obteve que um Argissolo Vermelho

fisicamente recuperado por práticas de manejo mostrou-se altamente compressível, principalmente em umidades mais elevadas, devido ao incremento no volume de macroporos.

Em contrapartida, Veiga et al. (2007) concluíram que o uso de amostras deformadas ao invés de indeformadas diminuiu a σ_p em quatro vezes para a semeadura direta, de forma que as diferenças entre os sistemas de preparo, neste caso, não foram significativas. Para os autores, estes resultados sugerem que a agregação e processos como o *age hardening* (fortalecimento das ligações entre partículas minerais e orgânicas do solo que ocorre no decorrer do tempo) são os grandes responsáveis pela maior σ_p obtida na semeadura direta. Estudos conduzidos por Assis & Lanças (2005) também indicaram um efeito positivo da agregação sobre a capacidade de suporte de carga do solo. Neste trabalho, o manejo do solo afetou os MCSCS, de forma que, para um mesmo teor de água, a σ_p diminuiu na ordem: mata nativa > semeadura direta 12 anos > semeadura direta 5 anos.

Alguns trabalhos (Kondo & Dias Junior, 1999a; Silva, 1999; Peng et al., 2004) mostram que solos com maior teor de argila, como os Latossolos, apresentam maior σ_p comparativamente a solos mais arenosos, como os Argissolos, principalmente nos menores teores de água. Este fato se deve ao efeito cimentante dos óxidos de ferro e alumínio, os quais fortalecem as ligações intra-agregados, tornando-os mais resistentes à deformação e ao rompimento (Imhoff, 2002), bem como ao maior número de pontos de contato entre as partículas minerais nos solos argilosos (Peng et al., 2004).

Soane (1990) afirma que a MOS aumenta a resistência do solo à compactação, o que é mais evidente quando o mesmo se encontra úmido e a ele são aplicadas tensões inferiores a 100 kPa. Os mecanismos através dos quais a MOS reduz a compressibilidade são: efeito cimentante, através do qual as moléculas orgânicas unem as partículas minerais no interior dos agregados; elasticidade, que confere ao solo a propriedade de, após a remoção da tensão, recuperar, em parte, o seu volume original; efeito de diluição, devido ao fato de materiais orgânicos apresentarem uma densidade inferior à fração mineral, tanto pela baixa densidade da partícula quanto pelo baixo grau de empacotamento (menor número de pontos de contato); efeito de filamento, dado pelas raízes (especialmente as vivas), e pelas hifas de fungos; efeito na

carga elétrica; e aumento na fricção entre as partículas, devido ao recobrimento das mesmas por substâncias orgânicas e à existência de material orgânico entre elas. Zhang et al. (1997) acrescentam que a MOS pode aumentar a resistência do solo à compactação pela diminuição no potencial matricial da água, o que incrementa as tensões efetivas nos pontos de contato entre as partículas, bem como através da retenção de um maior volume de água, o que minimiza o efeito da umidade na redução da fricção entre as mesmas.

As pesquisas que tentam relacionar os valores de σ_p ao teor de MOS têm chegado a resultados contraditórios. Braida (2004) salienta que o efeito da MOS sobre a σ_p depende da textura e do teor de água do solo. Este autor verificou que, em um Nitossolo de textura muito argilosa, os valores de σ_p aumentaram com o incremento no teor de MOS, o que ocorreu de forma mais pronunciada nas umidades mais elevadas. Porém, este comportamento não foi tão claro para um Argissolo de textura arenosa, principalmente em valores de densidade menor que $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$. O autor associou a diferença no comportamento dos dois solos ao fato de, no Argissolo, o aumento do teor de MOS ter diminuído a densidade do solo e, assim, o número de pontos de contato entre as partículas e a resistência à deformação, o que não foi observado para o Nitossolo.

Imhoff (2002), através de modelos estimados a partir de amostras coletadas em Latossolos com teores contrastantes de argila, concluiu que a MOS não afetou de forma significativa a σ_p . Lebert & Horn (1991), embasados em regressões realizadas em separado para solos com diferentes texturas, encontraram que a σ_p diminuiu com o aumento no teor de MOS, o que foi mais evidente em solos argilosos. Pereira et al. (2007), estudando o comportamento compressivo de amostras deformadas de um solo argilo-siltoso, obtiveram que, sob valores similares de porosidade estrutural e baixa umidade, o aumento no teor de MOS resultou em menores valores de σ_p . Os autores atribuíram estes resultados a diferenças na curva de retenção de água do solo provocadas pela MOS sem, no entanto, explicar como as mudanças na retenção de água ocasionadas pela MOS afetaram a σ_p . Em trabalho realizado por Veiga et al. (2007), a substituição da adubação mineral por cama de aviário, aplicada durante 10 anos a taxas de $3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (base seca), diminuiu a σ_p a -6 kPa de tensão de água. Como a fonte de nutrientes não afetou densidade do solo,

os autores afirmam que há um efeito direto dos resíduos orgânicos na diminuição da capacidade do mesmo em suportar cargas. Essas diferenças foram minimizadas pelo uso de amostras deformadas, sugerindo que a redução da σ_p devido ao aporte de resíduos orgânicos, esteja associada à formação de agregados maiores. Cabe salientar que, no referido trabalho, não são fornecidas informações mais detalhadas sobre as características físicas da cama de aviário empregada, que podem variar bastante de acordo com os materiais utilizados e tratamento dispensado à mesma. Essas variações, por sua vez, podem modificar os efeitos exercidos pela cama de aviária nas propriedades mecânicas do solo.

O IC, que corresponde à tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem, reflete a taxa de variação do índice de vazios ou da densidade do solo em resposta ao logaritmo da tensão aplicada, sendo assim considerado um indicador da suscetibilidade do solo à compactação (Dias Junior & Pierce, 1996). O IC diminui com o aumento da densidade do solo inicial (Imhoff, 2002; Braida, 2004; Schäffer et al., 2007; Veiga et al., 2007), o que é explicado pelo maior número de pontos de contato entre as partículas (Braida 2004) e pelo menor espaço disponível para a movimentação e conseqüente rearranjo das mesmas (Imhoff, 2002). Da mesma forma, a suscetibilidade do solo à compactação aumenta com o teor de argila até valores próximos a 300 g kg^{-1} , mantendo-se, a partir daí, constante (Larson et al., 1980; Lebert & Horn, 1991; Imhoff, 2002). Segundo Larson et al. (1980), isto ocorre porque, a partir de 300 g kg^{-1} de argila, os solos se constituem em uma matriz argilosa com as partículas maiores distribuídas no interior da mesma. Dados obtidos por Smith et al. (1997) comprovam que a suscetibilidade do solo à compactação também aumenta em função do incremento dos teores de silte, o que condiz com as características das partículas que compõem essa fração (grandes demais para estabelecer ligações fortes em agregados, mas pequenas o suficiente para se acomodarem facilmente entre as partículas de areia e, assim, aumentar o grau de compactação).

A maior parte dos trabalhos indica que o IC é afetado de forma quadrática pelo teor de água do solo (Kondo & Dias Junior, 1999b; Silva, 1999; Braida, 2004). Isto ocorre porque, sob condição de baixa umidade inicial, o

aumento do teor de água diminui a coesão e o atrito entre as partículas, facilitando o cisalhamento nos pontos de contatos entre as mesmas (Braidá, 2004). Conforme o mesmo autor, depois de atingir um valor máximo, o IC decresce porque o excesso de água resulta no surgimento de pressões neutras que dissipam parte da carga aplicada. No entanto, em alguns trabalhos não foi verificado efeito significativo do teor de água sobre o IC (Larson et al., 1980; Imhoff 2002), o que pode estar relacionado à pequena amplitude de variação na umidade apresentada pelas amostras.

Os resultados experimentais divergem também no que se refere ao efeito da MOS sobre o IC. Alguns trabalhos relacionam a redução do IC ao aumento no teor de MOS (Etana et al., 1997; Kondo & Dias Junior, 1999b; Silva, 1999), enquanto outros indicam uma tendência contrária (Carpenedo, 1994; Pereira et al., 2007). Da mesma forma, há casos em que não há relação entre essas duas variáveis (Arvidsson, 1998; Imhoff, 2002; Veiga et al., 2007). Braidá (2004) encontrou que o IC aumentou linearmente com o incremento no teor de MOS de um Argissolo, arenoso, o que foi atribuído à redução na densidade do solo em razão deste fator. Para um Nitossolo de textura argilosa, o efeito da MOS sobre o IC dependeu da densidade inicial. O IC não foi influenciado ou aumentou em função do incremento no teor de MOS, respectivamente, para as amostras inicialmente menos ou mais densas. Este comportamento ocorreu porque sob menores densidades, o aumento da resistência nos pontos de contato entre as partículas em função do maior teor de MOS foi mascarado pelo seu pequeno número.

Para Braidá (2004), os efeitos contraditórios da MOS sobre a capacidade de suporte e a compressibilidade do solo podem ser associados ao fato de as partículas orgânicas exercerem dois efeitos contrários sobre a resistência do solo, um relacionado ao aumento da coesão entre as partículas minerais e outro à mudança no arranjo das mesmas, com redução da densidade. Quando o primeiro efeito predomina, a resistência à compactação aumenta; quando é o segundo que prepondera, a resistência diminui, devido à redução no número de pontos de contato e na fricção entre as partículas. O balanço entre estes dois efeitos depende da origem e do grau de decomposição da MOS. Por outro lado, a MOS parece ser mais efetiva em reduzir a compressibilidade em teores de água próximos à umidade ótima de

compactação e em solos argilosos (Zhang et al., 1997).

Alguns questionamentos quanto ao valor prático das curvas de compressão e da σ_p podem ser feitos, tendo em vista as diferenças entre o ensaio e as interações rodado-solo. A carga aplicada pelos rodados das máquinas não é estática, além de apresentar componentes em outras direções que não somente a vertical (Wiermann et al., 1999). Essas forças dinâmicas podem desagregar o solo, diminuindo a capacidade de o mesmo suportar cargas (Horn, 1990). O confinamento das amostras limita a transmissão das tensões, o que não ocorre no campo (Novak et al., 1992; Keller et al., 2004). O tempo de permanência da carga aplicada pelos rodados das máquinas é bem menor que nos ensaios (Keller et al., 2004; Schäffer et al., 2007). Sob estes dois últimos aspectos, a σ_p deveria ser maior em condições de campo. Neste sentido, os resultados de campo obtidos por Berli et al. (2004) sugerem que a σ_p é um critério adequado para definir a máxima pressão que pode ser aplicada por rodados de máquinas agrícolas sem que o solo se compacte adicionalmente. Porém, os dados obtidos por Keller et al. (2004) mostraram que as pressões aplicadas pelos rodados, mesmo sendo inferiores à σ_p , ocasionaram deformações plásticas no solo. Dessa forma, os autores concluem que há necessidade de se correlacionar os resultados de laboratório com os obtidos a campo, sob condições de tráfego.

2.7 Alternativas para o controle da compactação do solo

Para o manejo da compactação, diversas práticas vêm sendo recomendadas, algumas das quais são essencialmente preventivas ou corretivas, enquanto outras agem de ambas as formas. Unger & Kaspar (1994) relatam que a compactação pode ser controlada através de melhorias no sistema de manejo e/ou da mobilização via preparo do solo. As melhorias no sistema de manejo envolvem práticas preventivas, como o tráfego controlado, e preventivas/corretivas, como o aumento do teor de MOS e a abertura de bioporos pelas raízes e pela macro e mesofauna do solo. Tendo em vista o problema desta pesquisa, a revisão será restringida ao controle da compactação através de plantas de cobertura e da mobilização por hastes de escarificadores e de semeadoras-adubadoras.

2.7.1 Plantas de cobertura de solo

As plantas de cobertura modificam a estrutura do solo por afetarem tanto os processos de formação quanto os de estabilização dos agregados (Dexter, 1991). Os efeitos positivos das plantas de cobertura sobre a agregação relacionam-se, em primeiro lugar, ao aumento do teor de MOS pela adição de resíduos orgânicos provenientes da parte aérea e raízes (Silva & Mielniczuk, 1997a,b; Conceição, 2006). O sistema radicular, além de unir mecanicamente agregados menores formando macroagregados e produzir exudatos que agem como agentes cimentantes, é capaz de, através do seu crescimento e da absorção localizada de água, gerar forças que aproximam agregados e partículas, o que também melhora a estrutura do solo (Silva & Mielniczuk, 1997a). Os resíduos das plantas de cobertura, uma vez mantidos em superfície (semeadura direta), evitam a desagregação pelo impacto da gota da chuva (Derpsch et al., 1986) e pelo aumento da pressão interna aos agregados devido ao aprisionamento de ar ocasionado pelo umedecimento rápido dos agregados (Dexter, 1988). Para isso atingir esses objetivos e, ao mesmo tempo, facilitar o seu emprego nas propriedades agrícolas, as plantas de cobertura devem apresentar, entre outras características, rusticidade, fácil produção de sementes, crescimento rápido, elevada produção de biomassa e um sistema radicular profundo e agressivo (Florentín et al., 2001).

Várias pesquisas têm comprovado que o emprego de plantas de cobertura aumenta da estabilidade dos agregados (Silva & Mielniczuk, 1997a,b; Campos et al., 1999; Wohlenberg et al., 2004; Conceição, 2006). Adicionalmente, o uso de plantas de cobertura tem sido recomendado como alternativa à recuperação física de solos compactados (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2003). Tal recomendação baseia-se, em primeiro lugar, na abertura de novos poros e/ou aumento do diâmetro dos pré-existentes através do sistema radicular das plantas de cobertura, originando bioporos estáveis (Dexter, 1991) que, conforme Oades (1993), caracterizam-se por serem longos, contínuos e cilíndricos e, assim, de alta efetividade para a transmissão de água e ar. Dexter (1991) assinala que os bioporos não modificam a densidade média do solo, pois a acomodação das

raízes é feita às custas da redução do espaço poroso do solo localizado ao redor das mesmas. Porém, os bioporos, por se constituírem em macroporos, podem diminuir a RP (Tarawally et al., 2004) e aumentar a friabilidade do solo devido à produção de planos de fraqueza (Chan & Heenan, 1996).

Mesmo sem reduzir a densidade do solo e a RP ou aumentar a porosidade do solo, os bioporos podem, ao menos, atenuar os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento das plantas. Após a decomposição das raízes, os bioporos podem ser utilizados pelo sistema radicular de outras culturas para atravessar camadas compactadas (Dexter, 1991). Isto foi comprovado em por Silva & Rosolem (2002) que, em trabalho conduzido sob casa de vegetação em vasos preenchidos com Latossolo de textura franco-arenosa, verificaram que o crescimento radicular das raízes de soja em camadas inferiores à compactada foi estimulado por bioporos abertos por raízes de plantas de aveia preta, guandu e milho previamente semeadas nos mesmos vasos.

Outro aspecto que justifica o uso de culturas de cobertura na recuperação de solos compactados engloba o aumento do teor de MOS. Reduções na densidade do solo, em virtude do aumento do teor de MOS, têm sido relatadas na bibliografia (Zhang et al., 1997; Arvidsson, 1998; Mosaddegui et al., 2000; Braida, 2004; Jarecki et al., 2005) e se devem, além do efeito sobre a agregação, a menor densidade da partícula e ao baixo grau de empacotamento dos materiais orgânicos (Soane, 1990). Por outro lado, Zhang et al. (1997) concluíram que a adição de MOS pode aumentar ou diminuir a RP, dependendo do balanço entre as mudanças induzidas por ela na densidade do solo, nas tensões efetivas e na resistência ao cisalhamento. Se predominarem os efeitos sobre a densidade do solo, a RP diminui; se o predomínio for sobre a resistência ao cisalhamento e as tensões efetivas, a RP aumenta. A MOS estimula ainda a atividade da meso e macrofauna do solo, o que pode resultar na formação de bioporos (Dexter, 1991).

Foram encontrados poucos trabalhos a respeito da eficiência e do tempo necessário para que as diferentes culturas de cobertura reduzam o grau de compactação do solo a níveis não limitantes ao crescimento das plantas. Além disso, em alguns deles, o efeito das plantas de cobertura sobre a diminuição do grau de compactação não foi comprovado (Teixeira et al., 2003;

Genro Junior et al., 2004). Por outro lado, Bhattacharyya et al. (2006) concluíram que a substituição do trigo por lentilha ou ervilha forrageira, em sucessão à soja, num solo franco-argilo-arenoso, aumentou o volume de água disponível e a condutividade hidráulica saturada e não saturada, além de diminuir a densidade do solo, o que foi mais evidente na camada de 0 a 0,15 m. Os autores atribuíram esses resultados ao maior teor de MOS proporcionado pela substituição do trigo pela lentilha ou ervilha em rotação à soja, bem como aos bioporos produzidos pelas raízes dessas espécies e por uma maior atividade biológica.

Outras pesquisas também evidenciam a possibilidade de recuperação de solos compactados mediante o uso de plantas de cobertura. Miglierina et al. (2000), trabalhando em um solo areno-siltoso, encontraram que a rotação dois anos trigo/dois anos aveia preta ou triticales + ervilhaca, resultou em maior teor de MOS e maior volume de água disponível, em função do incremento na quantidade de mesoporos (0,19 e 8,81 μm), comparativamente ao sistema trigo/trigo. Já Abreu et al. (2004), em trabalho realizado sobre um Argissolo há dez anos em semeadura direta, constataram que a densidade do solo foi menor na área escarificada do que na ocupada por crotalária em semeadura direta. Porém, a maior condutividade hidráulica saturada foi obtida para este tratamento, o que foi atribuído à formação de poros verticais, estáveis e contínuos ao longo do perfil pelo sistema radicular agressivo desta espécie. Stone & Silveira (2001) concluíram que, independentemente do sistema de preparo utilizado (aração/gradagem, aração, gradagem pesada e semeadura direta), o consórcio arroz/calopogônio, em rotação com feijão preto, resultou em menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade comparativamente à sucessão trigo/soja, o que se limitou à camada superficial do solo (0,0-0,1 m). Dados semelhantes foram obtidos por Torres & Saraiva (1999) que, trabalhando em um Latossolo de textura muito argilosa, manejado sob semeadura direta, encontraram que a densidade do solo na camada de 0,08-0,13 m, e a RP na de 0,0-0,2 m, foram significativamente menores na rotação de culturas (tremoço/milho – aveia/soja – trigo/soja – trigo/soja) comparativamente à sucessão de culturas (trigo/soja).

O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo pode, teoricamente, atenuar as cargas aplicadas pelas máquinas agrícolas, devido à

sua elasticidade e ao aumento da área de contato efetiva entre o solo e os rodados (Soane, 1990). Braida (2004) realizou um estudo onde diversas quantidades (0 a 12 Mg ha⁻¹) de palha de milho picada foram colocadas sobre amostras de solo antes de serem submetidas ao ensaio de Proctor normal. Os resultados mostraram que a densidade máxima diminuiu exponencialmente com o aumento na quantidade de palha sobre a amostra, de forma que, na maior dose de resíduo, cerca de 31% da energia de compactação foi dissipada. Em nível de campo, a capacidade de resíduos florestais em dissipar parte da pressão aplicada pelos rodados de um "Forwarder" foi evidenciada por Silva et al. (2007). Porém, quando se considera a palha proveniente de culturas anuais, a atenuação das cargas impostas pelos rodados não foi confirmada (Gupta et al., 1987; Ess et al., 1998; Cepik, 2006), o que pode estar relacionado à remoção dos resíduos pela patinagem dos mesmos (Xavier, 2005; Cepik, 2006).

As plantas de cobertura exercem uma série de outros efeitos positivos dentro do sistema de produção em que se encontram inseridas, os quais são reportados e analisados por Florentín et al. (2001). De acordo com estes autores, os benefícios advindos do emprego destas plantas, em condições de semeadura direta, estão relacionados à cobertura da superfície do solo, à melhoria da fertilidade química e ao controle de invasoras, pragas e doenças. A cobertura do solo minimiza a formação de selamento superficial e crostas, as quais reduzem a capacidade de infiltração de água, aumentando assim as perdas de água e solo. A palha torna o caminho percorrido pelo escoamento superficial mais tortuoso, reduzindo a sua velocidade e, em consequência, a erosão hídrica. A presença de resíduos resulta ainda num maior teor de água na superfície, além de diminuir a temperatura do solo. Em regiões e/ou períodos quentes, a redução da temperatura do solo pelos resíduos facilita a absorção de água e nutrientes pelas plantas e estimula a atividade dos organismos do solo. No entanto, em regiões que apresentam pelo menos um período frio, os resíduos podem resultar em temperaturas do solo abaixo das ótimas à germinação das sementes e ao desenvolvimento das plantas. Isso ocorre com a cultura do milho no Rio Grande do Sul que, em alguns locais, vem sendo semeada no final do inverno, de forma a possibilitar a produção subsequente de soja ou milho safrinha. As melhorias nas

propriedades químicas do solo em função do uso de plantas de cobertura devem-se à reciclagem de nutrientes, à fixação biológica de N e ao aumento do teor de MOS. A elevação do conteúdo de MOS resulta num incremento da CTC, na neutralização de elementos tóxicos (como o Al) e distribuição em profundidade de nutrientes, principalmente Ca e Mg, através da formação de complexos orgânicos, e na diminuição da quimiossorção de P.

O emprego de plantas de cobertura afeta também o desempenho do conjunto trator/semeadora. Por um lado, sendo verdadeiro que as plantas de cobertura diminuem o grau de compactação do solo, a tendência é que ocorra uma redução na força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras. Esta afirmação é respaldada pelos resultados obtidos por Beutler (2005), os quais indicaram que, na semeadura do milho em um Argissolo, areno-franco-argiloso, o requerimento de força de tração pelas hastes sulcadoras de adubo foi de 0,87 kN para o pousio de inverno, enquanto que, nas parcelas ocupadas por aveia preta e aveia preta+ervilhaca, este valor caiu para 0,75 kN. Bortolloto et al. (2006) também observaram maiores valores de força de tração e de consumo horário de combustível quando a semeadura direta de soja foi realizada em área com vegetação espontânea comparativamente às ocupadas com aveia dessecada ou rolada. Porém, estes resultados foram atribuídos às touceiras de capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) que predominavam na área com vegetação espontânea, e não a diferenças no grau de compactação. De acordo Cepik (2006), a presença de uma maior quantidade de resíduos da parte aérea e raízes alterou a forma de ruptura do solo por hastes sulcadoras de adubo, proporcionando uma maior área da secção de solo mobilizada para uma mesma profundidade máxima efetiva. Neste mesmo trabalho, a força de tração foi maior nos tratamentos com mais resíduos em superfície e massa de raízes no solo, porém a força de tração específica ($N\ cm^{-2}$) não foi alterada.

Sob outro ponto de vista, as raízes das culturas de cobertura podem implicar uma demanda de força de tração mais elevada, devido ao aumento da resistência dos agregados à ruptura por cisalhamento. McLaughlin et al. (2004) concluíram que a presença de raízes vivas de trevo vermelho aumentou em mais de 20% a força de tração demandada por hastes escarificadoras em relação ao tratamento em que as plantas foram previamente dessecadas.

Tendência semelhante foi observada por Levien et al. (2004), que encontraram que a exigência de força de tração por hastes sulcadoras de adubo em semeadura direta foi 43% quando as mesmas atuaram sobre campo nativo com raízes em comparação ao campo nativo dessecado 90 dias antes da semeadura (sem raízes).

A natureza e o volume de resíduos culturais na superfície do solo podem afetar também o desempenho do disco de corte da palha, o que foi comprovado em trabalho realizado por Silva (2007). Este autor testou três tipos de discos de corte (liso, corrugado e ondulado) atuando sob diferentes cargas verticais e sobre resíduos de milho, sorgo, aveia preta, triticale e nabiça. Os resultados mostraram que as maiores profundidades e áreas de solo mobilizadas, e os menores de força horizontal e vertical, independentemente da carga vertical e do tipo de disco, ocorreram para a nabiça, que foi a planta com menor produção de massa seca. As diferenças entre as demais coberturas, com relação à profundidade de penetração e área de solo mobilizado, foram pequenas. Porém, os resíduos de milho e de sorgo resultaram em um maior requerimento de força horizontal e vertical em relação às demais coberturas, evidenciando que a palha destas culturas apresenta uma maior resistência ao corte.

Além disso, a presença de uma grande quantidade de resíduos vegetais na superfície do solo na semeadura tende a aumentar a frequência embuchamentos (Derpsch et al. 1986), o que diminui a capacidade operacional e compromete a qualidade do trabalho das semeadoras. A dificuldade de secagem do solo quando este se encontra recoberto por uma grande quantidade de material vegetal pode levar o produtor a executar a semeadura sob teores de água superiores ao limite de plasticidade. Neste caso, a aderência de solo às hastes pode aumentar a força de tração (Casão Junior et al., 1998; Cepik, 2002), diminuir a profundidade de atuação das mesmas (Portella et al., 1997; Fey et al, 2001) e ocasionar o espelhamento das paredes laterais do sulcos (Torres & Saraiva, 1999).

A patinação dos rodados tratórios aumenta em função do incremento da massa de resíduos na superfície do solo (Herzog, 2003; Xavier, 2005; Cepik, 2006). Estes resultados são confirmados pelo trabalho realizado por Fey et al. (2002), que concluíram que a patinação dos rodados de um

trator 4x2 tracionando uma semeadora-adubadora de semeadura direta foi inferior na área com milho (6,7%) em relação à observada na ocupada por aveia (10,0%), devido a menor cobertura do solo por resíduos culturais de milho. Gabriel Filho et al. (2004) também avaliaram o efeito de diferentes coberturas sobre a patinagem de um trator 4x2 TDA (massa total de 6400 kg) tracionando um escarificador de cinco hastes atuando a uma profundidade média de 0,30 m. Durante os ensaios, a TDA foi mantida desligada. Os resultados mostraram que os maiores valores de patinagem ($0,21 \text{ m m}^{-1}$) foram observados para a aveia preta, e os menores para área sem cobertura ($0,14 \text{ m m}^{-1}$). As demais coberturas (nabo, ervilhaca e nabo+aveia) apresentaram valores intermediários de patinagem (aproximadamente $0,17 \text{ m m}^{-1}$). No entanto, Beutler (2005) não encontrou diferenças significativas na patinagem durante a semeadura direta de milho e soja nas safras 2002/2003 e 2003/2004, em função das coberturas de inverno testadas, mesmo com a massa de resíduos na superfície sendo bem mais elevada para a aveia preta e aveia preta+ervilhaca em comparação ao pousio.

2.7.2 Mobilização do solo

2.7.2.1 Escarificação

A escarificação esporádica dentro do sistema de semeadura direta é outra prática que vem sendo recomendada como alternativa para a recuperação de solos compactados. Tal recomendação é estimulada pelas dúvidas que freqüentemente surgem entre produtores e técnicos a respeito da eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos caracterizados por um elevado grau de compactação.

O primeiro ponto a ser analisado refere-se ao tempo requerido para que a recuperação física ocorra. Comparando a mobilização mecânica e as culturas de cobertura como alternativas isoladas ao controle da compactação, Unger & Kaspar (1994) argumentam que, enquanto a diminuição da compactação do solo por plantas de cobertura é um processo lento e com comprovação ainda não unânime, o preparo com ferramentas do tipo haste, quando bem executado, elimina este problema de forma rápida e

freqüentemente completa. Corsini & Ferraudo (1999) concluíram que, numa área fisicamente degradada, foram necessários oito anos de semeadura direta para que a densidade e a macroporosidade do solo atingissem valores semelhantes aos observados após a mobilização do solo. Hamilton-Manns et al. (2002) salientam que a produtividade de culturas implantadas sob semeadura direta em solos fisicamente degradados é insatisfatória, o que pode justificar a adoção de práticas que aliviem este problema a curto prazo, para que depois os processos naturais de recuperação, estimulados pela semeadura direta, possam agir.

A eficiência da escarificação em romper camadas compactadas de forma imediata tem sido inferida por diversos trabalhos de pesquisa. Esses trabalhos mostram que a escarificação diminui a resistência à penetração (Pikul Junior & Aase, 1999; Levien, 1999; Furlani, 2000; Hamilton-Manns et al., 2002; Secco, 2003; Abreu et al., 2004; Secco et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006a; Veiga et al., 2007) e a densidade (Corsini & Ferraudo, 1999; Pikul Junior & Aase, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002; Tavares-Filho et al., 2006; Klein & Camara, 2007), aumentando a porosidade total (Secco & Reinert, 1997) e a permeabilidade ao ar (Hamilton-Manns et al., 2002). A distribuição do tamanho de poros também é alterada; em geral, observa-se um aumento na proporção de macroporos (Secco & Reinert, 1997; Corsini & Ferraudo, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002) e uma redução na de microporos (Secco & Reinert, 1997).

Com relação aos efeitos da escarificação sobre as propriedades hídricas do solo, Pikul Junior & Aase (1999) concluíram que essa prática, comparativamente à semeadura direta, aumentou capacidade de infiltração de um solo areno-siltoso e, por conseguinte, o volume de água armazenada. Resultados similares foram obtidos por Bonel et al. (2005) que, em um solo argilo-siltoso, observaram uma capacidade de infiltração quase dez vezes maior para a escarificação do que para a semeadura direta. Tavares-Filho et al. (2006), trabalhando em Latossolo, muito argiloso, encontraram que a escarificação aumentou em 67% a condutividade hidráulica saturada em relação a uma área sob semeadura direta há 20 anos. Contrariamente, Abreu et al. (2004), através de um experimento realizado em um Argissolo franco-arenoso, manejado sob semeadura direta há dez anos, verificaram que a

condutividade hidráulica saturada e o volume de água armazenada foram maiores para a semeadura direta envolvendo rotação de culturas com crotalaria (*Crotalaria spectabilis*) comparativamente à escarificação, realizada a uma profundidade média de 0,25 m e cerca de cinco meses antes das avaliações. Tal fato foi atribuído pelos autores, em primeiro lugar, aos bioporos produzidos pela crotalaria, associado à interrupção da continuidade dos poros devido à escarificação. Além disso, o referido estudo foi realizado em um Argissolo com baixo teor de argila (aproximadamente 100 g kg^{-1}), ou seja, com baixa estabilidade dos agregados. Com isso, os cinco meses decorridos entre a escarificação e a determinação da condutividade hidráulica saturada foram suficientes para que a recompactação diminuísse a magnitude dessa variável. Bhattacharyya et al. (2006) também obtiveram maiores valores de condutividade hidráulica saturada nas áreas sob semeadura direta comparativamente às escarificadas, devido a uma maior proporção de poros longos e contínuos no primeiro sistema.

As melhorias promovidas pela escarificação sobre as propriedades físicas do solo têm se refletido, em alguns casos, no aumento da produtividade das culturas. Secco (2003) avaliou o impacto da escarificação sobre a produtividade do milho e da soja em dois Latossolos, comparando com áreas não mobilizadas e caracterizadas por três estados de compactação (EC). Enquanto que a produtividade de grãos da soja não respondeu à escarificação, a do milho foi maior nas áreas escarificadas em relação aos EC 1 e 2 (densidade média na camada de 0,07 a 0,12 m de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$), não diferindo do EC 3 ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$). Simulando diferentes EC através de 0, 1, 2, 3 e 5 passagens de um rolo compactador e comparando-os com uma área escarificada, Secco et al. (2004) concluíram que a produtividade da soja foi aumentada pela escarificação apenas quando comparada à área que recebeu cinco passagens do rolo (densidade de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada de 0,0 a 0,1 m). Da mesma forma, Bonel et al. (2005), em um trabalho desenvolvido na Argentina sobre um solo argilo-siltoso, observaram um aumento de 35% na produtividade da soja na área escarificada comparativamente à sob semeadura direta. Efeitos positivos da escarificação sobre a produtividade do milho também foram observados por Secco & Reinert (1997).

No entanto, a escarificação nem sempre resulta em benefícios ao

desenvolvimento das culturas. A resposta das plantas à escarificação parece depender da espécie vegetal, das condições climáticas durante o ciclo de desenvolvimento e do grau de compactação inicial. Este fato é comprovado por diversos trabalhos, envolvendo culturas como o trigo, feijão e soja, onde a escarificação não determinou incrementos significativos na produtividade (Pikul Junior & Aase, 1999; Levien, 1999; Furlani, 2000; Hamilton-Manns et al., 2002; Klein & Camara, 2007), o que pode ser atribuído à disponibilidade hídrica adequada e/ou ao fato de o grau de compactação inicial não ser limitante ao crescimento das plantas.

Em geral, as melhorias proporcionadas pela escarificação persistem por um período efêmero, correspondente a aproximadamente uma safra (Corsini & Ferraudo, 1999; Botta et al., 2006a) ou a um ano (Secco & Reinert, 1997; Siqueira, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002; Tavares-Filho et al., 2006). O principal fator responsável pela rápida recompactação dos solos submetidos à escarificação é o tráfego de máquinas agrícolas, embora o entupimento dos poros, através da chuva e dos ciclos de umedecimento e secamento, também colabore para este processo (Hamza & Anderson, 2005). Conforme os mesmos autores, a escarificação torna o solo mais vulnerável à deformação pelo tráfego de máquinas agrícolas, de forma que a recompactação tem sido detectada após um (Chan et al., 2006) ou dois tráfegos (Reeder et al., 1993; Veiga et al., 2007), mesmo quando o trator utilizado é leve (Veiga et al., 2007). A mobilização do solo possibilita que a compactação pelo tráfego atinja maiores profundidades (Chamen et al., 2003), devido principalmente à eliminação de camadas de maior resistência que confinem as tensões aplicadas pelos rodados à superfície do solo (Spoor et al., 2003). Isto justifica os resultados obtidos por Veiga et al. (2007) que, estudando um Nitossolo Vermelho, muito argiloso, concluíram que o aumento da RP em virtude do tráfego recente de um trator com massa de 2,9 Mg, atingiu profundidades de 0,05; 0,20 e 0,40 m nas áreas sob semeadura direta, preparo convencional e escarificação, respectivamente.

Diante disso, a escarificação deve ser complementada por práticas que estabilizem a estrutura formada (Hamza & Anderson, 2005). Segundo estes autores, a adição de matéria orgânica e/ou de agentes agregantes químicos, como o gesso, são medidas que têm se mostrado eficientes para

prolongar o efeito residual da escarificação. A realização da escarificação antes da semeadura de plantas de cobertura dotadas de um sistema radicular agressivo, abundante e profundo, também colabora para a estabilização da estrutura formada e, assim, previne ou retarda a recompactação (Chamen et al., 2003). Reeder et al. (1993) acrescentam que o tráfego controlado é outra prática essencial visando prolongar os efeitos da escarificação.

A decisão em torno da necessidade de escarificação deve ser criteriosa, pois ela implica consideráveis dispêndios energéticos e econômicos. Boller (1996), utilizando um escarificador equipado com 7 hastes, ponteiros estreitos (0,05 m de largura), rolo destorroador e disco de corte à frente de cada haste, trabalhando a uma profundidade de 0,19 m, obteve que o consumo horário e por hectare de diesel foi de 16 e 20 L, respectivamente. Resultados semelhantes a este foram obtidos por Levien (1999) e Furlani (2000). Machado (2001) obteve, para uma haste escarificadora equipada com uma ponteira estreita, atuando a uma profundidade média de 0,2 m, esforços de tração variando de 3,17 kN (Planossolo) a 7,73 kN (Argissolo) por haste. Considerando o Argissolo e uma velocidade de trabalho de 4,0 km h⁻¹, a demanda de potência corresponde a 8,59 kW por haste. Neste caso, um escarificador com 5 hastes requer um trator com potência no motor de aproximadamente 75 kW. Portanto, dentro de uma propriedade manejada sob semeadura direta, o uso da escarificação pode aumentar o pico de demanda energética, definido por McPhee et al. (1995), como sendo a energia requerida na operação energeticamente mais intensiva, o qual define a necessidade de potência do trator.

A escarificação pode reduzir ainda eficiência de tração e incrementar os gastos energéticos nas operações mecanizadas que a sucedem. Estudando diferentes sistemas de preparo (convencional, escarificação e semeadura direta) e de manejo da cobertura de inverno (tritador, rolo faca, herbicida e solo descoberto), Furlani (2000) concluiu que a força de tração, a demanda de potência e o consumo de combustível por hora e por área na semeadura das culturas de inverno e de verão, foram maiores nas áreas escarificadas. A velocidade do conjunto trator-semeadora foi menor nas parcelas escarificadas, devido a maior patinação. Estes resultados foram atribuídos pelo autor a maior rugosidade superficial do solo submetido à escarificação. Dados semelhantes

foram obtidos por Levien (1999).

2.7.2.2 Uso de hastes sulcadoras para a deposição do fertilizante

Outra medida que pode reduzir o efeito da compactação do solo, em sistema de semeadura direta, envolve uso de hastes sulcadoras para deposição do adubo em substituição aos discos duplos, operando a maiores profundidades. Tal procedimento possibilita o rompimento localizado de camadas compactadas superficialmente, as quais são comuns em semeadura direta (Klein & Boller, 1995; Tormena et al., 1998; Abreu et al., 2004; Genro Junior et al., 2004), e são as mais prejudiciais às culturas (Unger & Kaspar, 1994). Além disso, a deposição do adubo a maiores profundidades pode estimular o crescimento das raízes em profundidade, uma vez que, conforme relatam Merten & Mielniczuk (1991), os nutrientes, em solos submetidos à semeadura direta, concentram-se na superfície do solo (0,0-0,05 m).

Mello et al. (2002) constataram que, em um Latossolo Vermelho, o uso de hastes sulcadoras em lugar dos discos duplos aumentou em mais de 10% a produtividade do milho. Efeitos positivos do uso de hastes sulcadoras em substituição aos discos duplos, em semeadura direta, também foram observados por Klein & Boller (1995). Já Silva (2003a) obteve que, num Nitossolo Vermelho e sob disponibilidade hídrica adequada, a produtividade do milho não respondeu ao uso de hastes em substituição aos discos duplos. Ainda conforme Mello et al. (2002), a mobilização do solo pela haste acarretou na redução da sua densidade e RP, e num aumento da macroporosidade. Reis et al. (2006), trabalhando em um Latossolo argiloso, concluíram que a densidade do solo na linha de semeadura foi menor para as hastes sulcadoras em comparação aos discos duplos, o que resultou em uma maior porcentagem de emergência de plantas de milho para o primeiro mecanismo. Da mesma forma, Veiga et al. (2007) observou que a mobilização na linha de semeadura por sulcadores do tipo haste reduziu a RP até à profundidade de 0,12 m, eliminando as diferenças observadas para esta variável entre o preparo convencional, a escarificação e a semeadura direta. O uso de hastes sulcadoras em substituição aos discos duplos, porém, aumenta a demanda de tração e o consumo de combustível, além de diminuir a velocidade de

deslocamento do conjunto trator/semeadora e, conseqüentemente, a capacidade operacional (Silva, 2003a).

A resposta das culturas à profundidade de atuação das hastes parece estar relacionada à disponibilidade hídrica. Herzog (2003), avaliando o efeito da profundidade de atuação da haste sulcadora (0,06 e 0,12 m) sobre a soja safra 2001/02, com e sem irrigação, concluiu que a produtividade desta cultura não foi afetada pelos tratamentos, tanto na condição irrigada quanto na não irrigada. O autor atribuiu este resultado à uniformidade e volume adequados de chuva, especialmente durante os períodos críticos da cultura. Trabalhando na mesma área experimental e sob os mesmos tratamentos, porém, na safra 2003/04, onde uma considerável deficiência hídrica foi observada, Xavier (2005) constatou que, na condição não irrigada, a produtividade da soja foi 10% (180 kg ha^{-1}) maior quando a haste atuou a 0,12 m. Sob irrigação, os tratamentos não influenciaram a produtividade desta cultura. Silva (2003a) também concluiu que, na ausência de déficit hídrico, a produtividade do milho não aumentou em função do incremento da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de adubo.

Os resultados obtidos por Beutler (2005) sugerem que, quando o déficit hídrico é muito forte ou ocorre em um período crítico da cultura, bem como numa situação em que o solo se encontra muito compactado, a mobilização superficial pelas hastes sulcadoras pode não ser suficiente para aliviar os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas. Avaliando a resposta da soja e do milho a diferentes coberturas de inverno (aveia preta, aveia preta+ervilhaca e campo nativo) e à profundidade de deposição do adubo (0,06 e 0,12 m), na safra de 2002/03, o autor encontrou que, embora tenha ocorrido deficiência hídrica no pendoamento, a produtividade do milho foi maior para a profundidade de 0,12 m apenas no tratamento campo nativo. A produtividade da soja não respondeu à profundidade de atuação da haste. Já na safra 2003/04, onde nova estiagem ocorreu, em um período tal que a principal cultura afetada foi a da soja, a profundidade de deposição do adubo não modificou de maneira significativa a produtividade tanto do milho quanto da soja, independentemente da cultura antecessora de inverno.

O aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras para adubo acarreta em um maior custo energético e econômico. Os dados obtidos

por Xavier (2005) evidenciam que, quando a profundidade de atuação passou de 0,064 m para 0,100 m, a força de tração por haste e por unidade de volume de solo mobilizado aumentou, respectivamente, 95 e 260%. A patinação dos rodados tratórios dobrou quando o sulcador atuou na maior profundidade (9,6% a 0,064 m, contra 19% a 0,100 m). Resultados semelhantes foram obtidos por Cepik (2002) e Beutler (2005). Silva (2003a) encontrou que a demanda de força de tração de uma semeadora equipada com quatro linhas aumentou de 9 para 25 kN quando a profundidade de atuação da haste passou de 0,1 para 0,3 m, o que incrementou o consumo de combustível em 4 L h^{-1} . Além disso, o aumento da profundidade de trabalho da haste sulcadora reduziu a velocidade do conjunto trator/semeadora e, assim, a capacidade operacional. No entanto, Xavier (2005) afirma que o aumento na produtividade da soja observado na safra 2003/04 compensou com vantagem o maior custo operacional quando do aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo, incrementando assim a lucratividade.

3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

3.1. Localização da área experimental

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), pertencendo à unidade de mapeamento São Jerônimo (Brasil, 1973). A textura superficial deste solo é franco-argilo-arenosa, com a presença de cascalhos. A área apresenta uma declividade média de 0,03 m m⁻¹. O clima da região é subtropical úmido (Cfa, pela classificação de Köppen), com temperaturas médias mensais variando entre 13,9°C e 24,9°C e precipitações médias mensais entre 96 mm e 168 mm, totalizando 1440 mm anuais (Bergamaschi et al., 2003). Os principais atributos químicos e físicos da área experimental, antes da aplicação dos tratamentos (julho/2002), são mostrados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento (Beutler, 2005).

| Profundidade (m) | pH | P | K | MOS ¹ | Al | Ca | Mg |
|---------------------|------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--|------------|------------|
| | | -- mg dm ⁻³ -- | -- g kg ⁻¹ --- | ----- | cmol _c dm ⁻³ ----- | ----- | |
| 0,00 a 0,06 | 5,6 | 3,5 | 201 | 30 | 0,0 | 3,6 | 1,7 |
| 0,06 a 0,12 | 5,7 | 2,0 | 145 | 22 | 0,0 | 3,7 | 1,7 |
| Média | 5,6 | 2,8 | 173 | 26 | 0,0 | 3,7 | 1,7 |

¹ - MOS = matéria orgânica do solo.

3.2 Histórico da área experimental

A área onde este experimento se encontra instalado fazia parte de

Tabela 2. Caracterização física do solo, antes da instalação do experimento.

| Característica analisada | Profundidade (m) | | |
|---|------------------|-----------|----------|
| | 0,0-0,06 | 0,06-0,12 | 0,0-0,12 |
| Densidade do solo (Mg m ⁻³) ¹ | 1,70 | 1,72 | 1,71 |
| Densidade da partícula (Mg m ⁻³) ² | 2,51 | 2,56 | 2,54 |
| Macroporosidade (m ³ m ⁻³) ¹ | 0,07 | 0,05 | 0,06 |
| Microporosidade (m ³ m ⁻³) ¹ | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| Porosidade total (m ³ m ⁻³) ¹ | 0,36 | 0,35 | 0,35 |
| Limite de liquidez (kg kg ⁻¹) ¹ | - | - | 0,23 |
| Limite de plasticidade (kg kg ⁻¹) ¹ | - | - | 0,14 |
| Limite de contração (kg kg ⁻¹) ¹ | - | - | 0,08 |
| Argila (g kg ⁻¹) ³ | 255 | 283 | 269 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 216 | 220 | 218 |
| Areia muito grossa (1,0 < d ≤ 2,0 mm, g kg ⁻¹) ⁴ | 34 | 35 | 34 |
| Areia grossa (0,5 < d ≤ 1,0 mm, g kg ⁻¹) | 112 | 97 | 104 |
| Areia média (0,25 < d ≤ 0,5 mm, g kg ⁻¹) | 161 | 153 | 157 |
| Areia fina (0,105 < d ≤ 0,25 mm, g kg ⁻¹) | 157 | 152 | 155 |
| Areia muito fina (d ≤ 0,105, g kg ⁻¹) | 65 | 61 | 63 |
| Areia "total" (g kg ⁻¹) | 529 | 497 | 513 |

¹ Atributos determinados por Beutler (2005). ² Determinação através do método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). ³ Distribuição das partículas por tamanho avaliada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) ⁴ d = diâmetro equivalente das partículas.

uma gleba de aproximadamente 4,5 hectares, que foi utilizada, durante vários anos, para programas de melhoramento de cultivares pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO). Neste período, a área foi intensivamente preparada, com o uso de aração, gradagem e enxada rotativa, o que resultou em excessiva desagregação do solo. Com o término das pesquisas, no final da década 70, houve o restabelecimento das espécies típicas dos campos naturais da região que, de acordo com Pott (1974), englobam as gramíneas *Paspalum spp.*, *Aristida spp.*, *Trachypogon montufari* e *Setaria geniculata* e a leguminosa *Desmodium canum*. A área, então, passou a ser utilizada para o pastejo de bovinos.

Em 1982, a gleba foi dividida em três partes, de forma que a fração correspondente a este experimento começou a ser utilizada como área onde bovinos permaneciam temporariamente antes do deslocamento do mesmos ao local de pastejo, o que perdurou até 2002. Durante este período, a área foi submetida a altas lotações animais, mesmo sob elevados teores de água no

solo, o que resultou na sua degradação física, expressa por uma alta densidade do solo e por baixos valores de macroporosidade e porosidade total (Tabela 2). A composição botânica também foi alterada, de forma que a vegetação predominante da área experimental à época do início do experimento constava de gramíneas cespitosas de baixo porte e de caraguatás, podendo, assim, ser considerada uma área de campo natural degradado (Beutler, 2005).

No outono/inverno de 2002, foi implantado o experimento referente a presente pesquisa. Antes da semeadura das culturas de inverno em 2002, foi realizada a correção do solo através da aplicação, em superfície, de 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 60%). Esta dose equivaleu à metade da recomendada pela Comissão... (2004) para a correção da camada de 0,0-0,2 m. Mais detalhes sobre a instalação e os primeiros anos de condução do experimento podem ser encontrados em Beutler (2005). As avaliações que compõem este trabalho representam a continuidade do trabalho de Beutler (2005) nas safras de 2005/06 e 2006/07.

3.3 Tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Até o inverno de 2006, toda a área experimental foi manejada sob o sistema de semeadura direta. As parcelas principais e as subparcelas do experimento são esquematizadas nos croquis expostos nos Apêndices 1 e 2, nas safras 2005/06 e 2006/07, respectivamente.

Os tratamentos principais, sorteados em parcelas de 4,5 m largura por 20 m de comprimento, constaram de três coberturas de inverno: pousio, aveia preta (*Avena strigosa*) e o consórcio aveia preta + ervilhaca comum (*Vicia sativa*), seguidas da semeadura de milho e soja no verão. Nas áreas sob pousio, as espécies vegetais predominantes durante o inverno foram a serralha (*Sonchus oleraceus*), o azevém (*Lolium multiflorum*), o mentruz (*Coronopus didymus*) e a grama-seda (*Cynodon dactylon*). Os tratamentos secundários, distribuídos nas subparcelas, englobaram duas profundidades nominais de atuação da haste sulcadora, para deposição do adubo, durante a semeadura das culturas de verão: 0,06 m (raso) e 0,12 m (profundo). As profundidades

máximas efetivas do sulco, assim como a área da secção transversal mobilizada pelo sulcador, em todas os anos de condução do experimento e na média dos tratamentos, são mostradas no Apêndice 3. Cada subparcela correspondeu a uma passada do conjunto trator/semeadora-adubadora, ou seja, a 3 linhas de milho, a 5 de soja ou a 11 das culturas de cobertura de inverno, espaçadas 0,9; 0,45; e 0,18 m entre si, respectivamente. O espaçamento entre a última linha de semeadura de uma subparcela e a primeira da outra (no sentido de fora para dentro da parcela principal) foi 0,6 m. Dentro de um dado bloco, cada cobertura de inverno ocupou duas parcelas, de forma que, na primavera/verão, numa delas foi semeado milho e, na outra, soja, propiciando, assim, a rotação anual entre essas culturas (Apêndices 1 e 2). Durante o inverno, a rotação de culturas não foi realizada, de modo que cada cobertura sempre foi semeada sobre a mesma parcela principal. No inverno de 2004 e verão de 2004/2005, toda a área permaneceu em pousio, devido a um forte déficit hídrico, que impediu o estabelecimento das culturas.

Desde o início do experimento, as operações mecanizadas de semeadura das culturas de inverno e verão vêm sendo realizadas sob tráfego controlado, ou seja, a passagem dos rodados do trator ocorre sempre nas mesmas zonas no interior das parcelas, o que originou os tratamentos “com tráfego” e “sem tráfego”, que correspondem às subsubparcelas. O tráfego de máquinas relacionado à pulverização e aplicação de produtos sólidos, como fertilizantes e corretivos, foi realizado na área entre as parcelas. Em 2002 e 2003, a passagem do conjunto trator/semeadora-adubadora, no inverno, foi realizada também nas parcelas mantidas sob pousio sem, no entanto, ocorrer a distribuição das sementes. Tal procedimento visou igualar as condições de mobilização do solo ocasionada pelos mecanismos sulcadores (discos duplos) da semeadora/adubadora, entre as coberturas de inverno. Como a mobilização do solo foi pequena e rasa, e no intuito de adequar o pousio às condições que de fato ocorre em nível de propriedade agrícola, a partir de 2005 e 2006, a passagem do trator+semeadora/adubadora nesse tratamento não foi mais efetuada. Portanto, o número de tráfegos de rodados de trator foi diferente entre as coberturas de inverno e épocas consideradas (Apêndice 4). Já o teor de água no momento da realização dos tráfegos de rodados de trator é apresentado no Apêndice 5. A colheita do milho e da soja também foi

mecanizada e executada sob tráfego controlado. Porém, as regiões trafegadas pela colhedora não foram incluídas nessa pesquisa.

A estrutura inicial do experimento comportava ainda mais um bloco (bloco 5, apêndice 1), composto também por seis parcelas que, durante os invernos de 2002 a 2005, foram mantidas sob pousio e utilizadas para um experimento em paralelo, onde foram aplicados, nas parcelas principais, dois tratamentos: com e sem calagem. As parcelas principais eram divididas em duas subparcelas; numa delas, a haste sulcadora de adubo, na semeadura de verão, era regulada para trabalhar a uma profundidade de 0,06 m (“raso”) e na outra, a 0,12 m (“profundo”). Da mesma forma que para os demais blocos, na primavera/verão dos anos de 2002 a 2005, semeava-se milho e soja, em rotação anual e sob sistema de semeadura direta.

Durante o inverno de 2006 e a primavera/verão de 2006/07, foram executadas duas modificações na estrutura do experimento. A primeira modificação envolveu a substituição do consórcio aveia preta + ervilhaca por nabo forrageiro (*Raphanus sativus*). A opção pelo nabo forrageiro fundamentou-se na agressividade do seu sistema radicular, que é pivotante e profundo (Florentín et al., 2001), tornando-o, dessa maneira, uma alternativa interessante para a formação de bioporos em camadas compactadas. A segunda modificação englobou a escarificação das parcelas do quinto bloco, utilizando-se o escarificador descrito no item 3.5, regulado para atuar a uma profundidade média de 0,27 m. O preparo secundário (gradagem) não foi realizado. Posteriormente, cada uma das parcelas principais deste bloco foi dividida em duas subparcelas. No inverno, uma delas foi cultivada com aveia preta e a outra, com nabo forrageiro. A implantação das culturas de verão foi realizada sob semeadura direta, com a haste sulcadora sendo regulada para atuar na posição “raso”, em todas as parcelas. Como cada cultura de verão ocupou três parcelas principais no bloco 5, as coberturas de inverno foram repetidas três vezes como antecessoras da soja e do milho (Apêndice 2). Após a escarificação, o tráfego referente à semeadura das culturas de inverno e de verão foi realizado nas mesmas zonas dentro das parcelas, dando origem, da mesma forma que para a área não escarificada, a mais dois tratamentos: com e sem tráfego de rodados de trator.

Conforme descrito anteriormente, a área correspondente ao bloco 5

foi submetida, inicialmente, a condições diferenciais em termos de calagem. Assim, logo após a colheita das culturas de verão na safra 2005/06, foram coletadas amostras para análise química, na camada de 0,00-0,10 m, seguindo a metodologia recomendada pela Comissão... (2004), para áreas conduzidas sob semeadura direta. Os resultados desta análise (Apêndice 6) mostraram que as parcelas não se diferenciaram de forma acentuada com relação ao pH, índice de SMP, teor de Al trocável e dos principais nutrientes. Assim, não foi necessária a realização de calagem e adubação diferencial visando à uniformização da área.

3.4 Implantação e condução das culturas

3.4.1 Culturas de inverno

À exceção da área escarificada no inverno de 2006, toda a área experimental, nas safras 2005/06 e 2006/07, foi dessecada, mediante o emprego do herbicida glifosato ($1,44 \text{ kg ha}^{-1} \text{ i.a.}$). A aveia preta e a aveia preta+ervilhaca (2005) ou nabo forrageiro (2006) foram implantados através da semeadora-adubadora descrita no item 3.5. Para a semeadura na área escarificada, a pressão exercida sobre as molas dos sulcadores foi aliviada. A aveia preta foi semeada, em ambos os anos, a uma densidade de 60 kg ha^{-1} de sementes puras e viáveis, e a uma profundidade média de 0,03 m. A densidade empregada para o consórcio aveia preta+ervilhaca foi de, respectivamente, 45 e 25 kg ha^{-1} de sementes puras e viáveis, sendo a profundidade média de semeadura igual a 0,03 m. Para o nabo forrageiro, utilizou-se 8 kg ha^{-1} de sementes puras e viáveis, a uma profundidade média de 0,02 m. A semeadura das coberturas de inverno foi realizada nos dias 3 e 7 de junho, respectivamente, nas safras de 2005 e 2006.

A adubação de base não foi executada para as culturas de cobertura de inverno. No entanto, procedeu-se, em ambas as safras, a uma adubação nitrogenada de cobertura para todas as espécies semeadas, excetuando-se o pousio. Esta adubação foi executada aos 30 dias após a semeadura, com a aplicação de 22 kg ha^{-1} de N na forma de uréia. Para o manejo químico das plantas de cobertura e da área em pousio, visando à semeadura da soja e do

milho, foram executadas duas dessecações. A primeira delas foi efetuada na segunda quinzena do mês outubro de 2005 e de 2006, quando a aveia preta e o nabo forrageiro já estavam com as sementes formadas e a ervilhaca no final da floração. A segunda dessecação, também em toda a área, foi feita no início de dezembro, em ambas as safras. Nas duas dessecações, empregou-se o herbicida glifosato na dose de 1,44 kg ha⁻¹ de i.a.

3.4.2 Culturas de verão

A semeadura do milho e da soja foi realizada nos dias 08 e 01 de dezembro, respectivamente, nas safras 2005/06 e 2006/07, utilizando-se a mesma semeadora-adubadora empregada na implantação das culturas de inverno (item 3.5), porém, configurada para culturas de verão. O conjunto trator/semeadora-adubadora foi operado a uma velocidade média de 4,7 km h⁻¹. Para o milho, a semeadora foi regulada de forma a distribuir as sementes necessárias à obtenção de uma população de 65 mil plantas por hectare, com espaçamento de 0,90 m entrelinhas, em ambas as safras. O híbrido utilizado foi o D-766 (híbrido simples modificado de ciclo precoce), em 2005/06; e o P-3069 (híbrido simples modificado de ciclo superprecoce), em 2006/07. Já a soja foi semeada buscando-se o estabelecimento de uma população de 400 mil plantas por hectare, com um espaçamento de 0,45 m entrelinhas, nas duas safras avaliadas. O cultivar utilizado, tanto na safra de 2005/06, quanto na de 2006/07, foi o BRS 154, que apresenta ciclo médio. Para ambas as culturas e safras, as sementes foram depositadas a uma profundidade média de 0,05 m.

As sementes de milho foram tratadas com inseticida imidaclopride (100 g do produto comercial em 15 kg de sementes). As sementes de soja foram tratadas, primeiramente, com o fungicida carbendazin (100 mL do produto comercial por 100 kg de sementes) e, após secagem à sombra, inoculadas com o rizóbio *Brayrhizobium japonicum*. A adubação de base (milho e soja) e de cobertura (milho) foi executada de acordo com os resultados da análise de solo, para as respectivas safras (Apêndice 7), e recomendações da Comissão... (2004), aplicando-se os mesmos fertilizantes e doses independentemente do tratamento. No caso da adubação nitrogenada de cobertura no milho, esta foi realizada quando as plantas se encontravam no

estádio V6 (seis folhas desenvolvidas), através da aplicação de N na forma de uréia, numa dose visando à produtividade de 7 Mg ha⁻¹ e considerando como cultura antecedente uma gramínea.

O controle de plantas daninhas, tanto na cultura da soja, quanto na do milho, foi realizado aos 25 e aos 21 dias após a semeadura, respectivamente, nas safras 2005/06 e 2006/07. Para a soja, aplicou-se 100 g ha⁻¹ de i.a de imazethapyr; na safra 2006/07; e, na de 2005/06, uma mistura de imazethapyr e tepraloxymid, ambos nas doses de 100 g ia ha⁻¹. No milho, o controle de plantas daninhas, nas duas safras avaliadas, foi feito mediante a aplicação de uma mistura de atrazina + nicossulfuron, nas doses de 2,5 kg e 40 g ha⁻¹ i.a, respectivamente. Em todas as situações, o volume de calda empregado correspondeu a 140 L ha⁻¹. O controle de pragas, tanto no milho quanto na soja, foi executado sempre quando da detecção dos primeiros exemplares e/ou danos. O controle de doenças foi necessário somente na soja na safra de 2006/07, devido à elevada umidade durante o estágio reprodutivo desta cultura, e foi realizado em duas aplicações (estádios R2 e R5, 66,5 + 25 g ha⁻¹ de i.a. de pyraclostrobin + epoxiconazole), visando ao controle preventivo da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). Os demais tratamentos culturais para o milho e para a soja seguiram as recomendações da pesquisa para as culturas na região.

3.5 Máquinas e implementos agrícolas utilizados

Para a instalação e condução da pesquisa a campo, foram utilizados as seguintes máquinas e implementos agrícolas:

- um trator marca John Deere modelo 5600, 4x2 TDA; potência máxima do motor de 53 kW (75 cv); massa total de 3835 kg (1530 kg sobre o eixo dianteiro e 2305 kg sobre o traseiro); pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1, com pressão de inflação de 95 e 110 kPa, respectivamente; pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), de 115 e 120 kPa, respectivamente; e bitola de 1,65 m nos eixos dianteiro e traseiro;

- pulverizador de barras tratorizado e montado; tanque com capacidade para 400 litros de calda e barras providas de 19 bicos tipo jato em leque

110015, espaçados em 0,5 m; pressão de trabalho de 40 psi (275 kPa); e largura útil de 9,5 m;

- Pulverizador costal, marca Jacto, modelo PJH, com acionamento manual; tanque com capacidade para 20 litros de calda; equipado com bico tipo jato em leque 110015;

- semeadora-adubadora múltipla (precisão e fluxo contínuo), marca Vence Tudo, modelo AS 11500, montada ao sistema hidráulico de três pontos do trator. Para a semeadura das culturas de cobertura de inverno, a semeadora-adubadora foi equipada com 11 linhas espaçadas de 0,17 m; sulcadores para adubo e semente tipo discos duplos com 0,330 m (13") de diâmetro; correntes para cobrir o sulco em cada linha de semeadura; rodas para acionamento dos dosadores de adubo e sementes com 1,20 m de diâmetro, dotadas de pneus 5.00/16-12 R1, com pressão de inflação de 124 kPa; dosadores de adubo e de sementes tipo rotor dentado horizontal e rotor acanalado, respectivamente; condutores de adubo e sementes de borracha corrugada e flexíveis; depósitos de adubo e de sementes com capacidade para 162 e 136 kg, respectivamente; e massa de 810 kg. Para a semeadura da soja e do milho, configurou-se a semeadora-adubadora de forma a apresentar 5 linhas espaçadas de 0,45 m, e 3 linhas espaçadas em 0,90 m, respectivamente; cada linha é composta por um disco de corte de palha, liso, de 0,356 m (14") de diâmetro, colocado à frente do sulcador de adubo tipo haste, com ponteiros de 0,025 m de largura e ângulo de ataque de 20°; sulcador para sementes do tipo disco duplo, com 0,330 m (13") de diâmetro; e rodas compactadoras dispostas em "V", com 0,305 m (12") de diâmetro. Os dosadores de adubo e de sementes são do tipo rotor dentado horizontal, acionados por rosca sem fim e discos horizontais perfurados, respectivamente. Os condutores de adubo são construídos em borracha corrugada e flexível, enquanto que os de sementes são de plástico e rígidos. Sob a configuração necessária à implantação das culturas de verão, a massa desta semeadora-adubadora equivale 1110 kg;

- trilhadora estacionária, marca Lindner, com cilindro e côncavo de dentes, acionada por motor à gasolina com 8,83 kW de potência;

- colhedora autopropelida de grãos, marca SLC-JOHN DEERE, modelo 1165, dotada de plataforma de corte, com 14 pés (4,62 m) de largura, ou

despigadora, para 4 linhas de milho; com picador de palhas; massa em ordem de marcha de 7.200 kg, sendo 2.250 kg no eixo traseiro e 4.950 kg no eixo dianteiro; pneus dianteiros 18.4-30 R1 e traseiros 10.5/80-18, com pressão de inflação de 138 e 200 kPa, respectivamente; pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), de 173 e 260 kPa, respectivamente; e bitola de 2,34 m no eixo dianteiro, e de 2,18 m no eixo traseiro;

- escarificador, marca JAN, modelo Jumbo-Matic, de arrasto, composto por cinco hastes, ponteiros estreitos (0,075 m de largura), ângulo de ataque da ponteira em relação ao solo de 18°, equipado com rolo destorroador e discos lisos para corte da palha.

3.6. Avaliações realizadas

O material e as metodologias envolvidas nas avaliações, assim como o procedimento estatístico adotado para a análise dos dados, serão descritos detalhadamente em cada um dos estudos que compõe este trabalho.

4. ESTUDO I: PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO AFETADAS POR PRÁTICAS DE MANEJO DA COMPACTAÇÃO

4.1 Introdução

Prejuízos significativos ao desenvolvimento das plantas, ao desempenho das máquinas agrícolas e ao meio ambiente têm sido atribuídos às modificações nas características e propriedades físicas do solo ocasionadas pela compactação do mesmo. Diante disso, em solos com elevado grau de compactação, torna-se necessária a adoção de medidas capazes de reverter este processo e, assim, minimizar os efeitos negativos por ele ocasionados. Uma das práticas que vem sendo preconizadas para diminuir o grau de compactação, em semeadura direta, engloba o uso de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas de cobertura do solo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005). Tal possibilidade se fundamenta na abertura de bioporos pelo sistema radicular destas espécies (Dexter, 1991) e no aumento do teor de MOS (Oades, 1993), o que ocorre de forma mais efetiva na superfície do solo e para as frações menos humificadas (Conceição et al., 2005).

Enquanto que o aumento na estabilidade dos agregados, em virtude do uso de plantas de cobertura, é bem documentado (Silva & Mielniczuk, 1997a,b; Campos et al., 1999; Wohlenberg et al., 2004; Conceição, 2006), as informações a respeito da eficácia das mesmas em recuperar solos caracterizados por um elevado grau de compactação inicial são escassas. Este fato é ainda mais evidente quando se trata de espécies de inverno, como a aveia preta, a ervilhaca e o nabo forrageiro, as quais são as mais utilizadas pelos produtores, uma vez que as coberturas de verão competem por área com as culturas comerciais de maior rentabilidade (soja e milho). Ao mesmo tempo,

a redução do grau de compactação do solo pelas plantas de cobertura, evidenciada em alguns trabalhos (Torres & Saraiva, 1999; Miglierina et al., 2000; Stone & Silveira, 2001; Abreu et al., 2004; Bhattacharyya et al., 2006), não se confirma em outros (Teixeira et al., 2003; Genro Junior et al., 2004). Além disso, a diminuição do grau de compactação por plantas de cobertura parece ser um processo lento (Corsini & Ferraud, 1999).

Diante das dúvidas a respeito da eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos compactados, a escarificação esporádica em semeadura direta vem sendo recomendada para o rompimento de camadas compactadas que surgem neste sistema (Tavares-Filho et al., 2006; Klein & Camara, 2007). Porém, a decisão em torno da necessidade de escarificação deve ser criteriosa, já que ela se constitui em uma prática econômica e energeticamente onerosa (Boller, 1996), nem sempre resulta em aumentos na produtividade das culturas (Hamilton-Manns et al., 2002; Klein & Camara, 2007) e os seus efeitos podem ser de curta duração (Tavares-Filho et al., 2006).

Por outro lado, a eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos com elevado grau de compactação pode ser melhorada se esta prática for complementada pela limitação do tráfego a determinadas regiões dentro da lavoura e pelo uso de hastes sulcadoras para deposição do adubo, atuando a maiores profundidades. Embora haja evidências de que estas práticas diminuem o grau de compactação (Botta et al., 2007; Veiga et al., 2007), pouco se sabe a respeito da efetividade das mesmas em potencializar a recuperação física de solos compactados promovida pelas plantas de cobertura.

Assim, este estudo baseia-se nas seguintes hipóteses principais:

- a inclusão de plantas de cobertura de inverno em sistemas de rotação de culturas diminui o grau de compactação do solo o que, ao contrário da escarificação, restringe-se a superfície do solo e ocorre a médio prazo;
- a ausência de tráfego e a atuação das hastes sulcadoras de adubo a uma maior profundidade constituem-se em importantes medidas que auxiliam na recuperação física do Argissolo estudado.

Para testar estas hipóteses, o objetivo principal foi estudar o efeito, no decorrer do tempo, das plantas de cobertura de inverno, do tráfego de rodados de trator e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo sobre algumas propriedades físicas de um Argissolo com elevado grau

de compactação inicial.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Experimento de campo

As informações referentes ao experimento de campo foram apresentadas no capítulo 3.

4.2.2 Avaliações realizadas

4.2.2.1 Massa seca das plantas de coberturas de inverno

Nos anos de 2005 e 2006, a determinação da quantidade de massa seca produzida pelas coberturas de inverno por unidade de área foi realizada imediatamente antes da dessecação das mesmas. As amostras englobaram todas as plantas contidas no interior de um retângulo medindo 0,6 x 0,4 m (0,24 m²), as quais foram cortadas rente ao solo, com o auxílio de uma tesoura de tosquia. Na área sob semeadura direta, foi coletada uma amostra por parcela, ou seja, não foi feita distinção no que se refere à profundidade de deposição do adubo para as culturas de verão. Na testemunha escarificada, retirou-se uma amostra das subparcelas componentes das parcelas 30, 28 e 25 (apêndice 2). Tanto na área escarificada, quanto na conduzida sob semeadura direta, a amostragem foi realizada nas regiões sem tráfego, respeitando uma bordadura de 0,5 m em todos os lados das parcelas. Em seguida, as amostras foram secadas em estufa, a 65° C, até peso constante, sendo os valores convertidos para Mg ha⁻¹. Já nos anos de 2002 e 2003, os dados apresentados foram obtidos por Beutler (2005).

4.2.2.2 Propriedades físicas

A densidade e a porosidade total do solo foram avaliadas em outubro de 2005, junho e novembro de 2006 e maio de 2007. Em outubro de 2005, foi selecionado, na entrelinha das culturas de verão e dentro da área não

trafegada das subparcelas referentes aos blocos 2 e 3, um ponto amostral, onde foi aberta uma trincheira para a coleta de duas amostras indeformadas em anéis volumétricos com dimensões de 0,06 m de diâmetro e 0,025 m de altura, sendo uma na camada de 0,03-0,06 m e outra na de 0,12-0,15 m. As 48 amostras, assim coletadas, foram cuidadosamente envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em latas do mesmo material. No laboratório, os anéis foram saturados em água destilada por 48 horas, pesados e colocados em estufa a 105° C, onde foram mantidos até atingirem peso constante (72 horas). A partir do peso saturado e seco a 105° C, calculou-se a densidade do solo e a porosidade total, conforme descrito em EMBRAPA (1997).

Em junho de 2006, as amostras foram coletadas através do uso de anéis volumétricos adequados ao ensaio de compressão uniaxial (compressibilidade), com as mesmas dimensões dos usados na primeira coleta. O esquema de amostragem assemelhou-se ao empregado em outubro de 2005, porém, foram extraídos dois anéis por camada, totalizando 96 amostras. Foram coletadas também amostras em todas as subparcelas do bloco 5, antes da realização da escarificação, seguindo o mesmo procedimento de amostragem empregado nos demais blocos, totalizando mais 48 anéis. Em novembro de 2006, das 12 parcelas que compõem os blocos 2 e 3, foram selecionadas seis, de forma a englobar igualmente todas as coberturas de inverno e culturas de verão antecessoras. Nestas parcelas, foram coletadas quatro amostras indeformadas (mesmos anéis utilizados na amostragem de junho de 2006) por subparcela na área não trafegada e na entrelinha da cultura de verão, sendo duas na camada de 0,03-0,06 m e duas na de 0,12-0,15 m. Nas demais seis parcelas, amostraram-se dois anéis por subparcela, um por camada. Na área escarificada, a amostragem foi feita nas quatro parcelas centrais (Apêndice 2). Em duas delas (uma cultivada com milho e outra com soja, na safra 2005/06), coletou-se seis amostras por subparcela na área não trafegada, sendo três em cada camada. Nas demais parcelas, foram amostrados quatro anéis por subparcela, dois em cada profundidade. Em todas as parcelas amostradas dos blocos 2 e 3 e da testemunha escarificada, foram retirados mais dois anéis (um em cada camada) na área trafegada, o que foi executado nas duas subparcelas (área escarificada) ou somente na subparcela onde o adubo foi depositado à profundidade teórica de 0,12 m (blocos 2 e 3).

Assim, ao todo, foram coletadas 152 amostras, sendo 96 na área sob semeadura direta e 56 na área escarificada. Em maio de 2007, foram coletadas seis amostras indeformadas (três por camada) em três locais diferentes de uma área de referência (campo natural sob baixa lotação animal), totalizando 18 anéis (nove em cada profundidade). Os anéis empregados nesta amostragem foram os mesmos utilizados nas amostragens realizadas em junho e novembro de 2006.

No laboratório, as amostras coletadas em junho e novembro de 2006, bem como em maio de 2007, foram saturadas com água destilada, por 48 horas, e colocadas sob uma tensão de -6 kPa em mesa de tensão. Após estabilização do peso na mesa, as amostras foram secadas em estufa, a 105° C, até peso constante. De posse dos pesos saturado, seco e após equilíbrio a -6 kPa, foi possível a determinação da densidade do solo, da macroporosidade, da microporosidade e porosidade total, de acordo com a EMBRAPA (1997).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada para todos os blocos da área sob semeadura direta em outubro de 2005, junho de 2006 e maio de 2007. Na testemunha escarificada, as medições foram realizadas em junho e novembro de 2006 e maio de 2007. À exceção da avaliação realizada em maio de 2007, a determinação da RP foi executada através de um penetrômetro (Figura 1) desenvolvido por Lilles et al. (1998). Na avaliação realizada em maio de 2007, empregou-se o penetrômetro mostrado na Figura 2, o qual é produzido comercialmente pela empresa Falker. A utilização de outro equipamento em maio/2007 é justificada pela ocorrência de um problema no funcionamento do penetrômetro desenvolvido por Liller et al. (1998). Ambos os equipamentos são dotados de sistema eletrônico de medição e aquisição dos dados de força aplicada e a respectiva profundidade no solo. As características construtivas dos equipamentos estão em acordo com a norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004), possibilitando assim a comparação dos resultados.

Foram realizadas 16 determinações da RP por parcela principal, posicionadas uma ao lado da outra e regularmente espaçadas (0,30 m entre cada determinação), formando uma transecta. Assim, a cada uma das subparcelas corresponderam 8 leituras, até a profundidade de 0,33 m, em intervalos regulares de 0,03 m. Para a detecção das zonas com tráfego de

rodados de trator e de colhedora, foi elaborado um gráfico de superfície mostrando a distribuição dos valores de RP em função da profundidade e da posição horizontal dos pontos amostrais. Levando-se em consideração a bitola e a largura dos rodados do trator e da colhedora, em conjunto com os valores de RP observados no gráfico, a identificação das zonas de tráfego foi possível. As leituras que coincidiram com o tráfego de rodados da colhedora não foram consideradas.



Figura 1. Penetrômetro utilizado para determinação da resistência do solo à penetração em outubro de 2005 e junho e novembro de 2006.



Figura 2. Penetrômetro utilizado para determinação da resistência do solo à penetração em outubro de 2005 e junho e novembro de 2006.

Juntamente com a RP, foi quantificada a umidade gravimétrica do solo, em três profundidades: 0,00-0,06; 0,06-0,12; e 0,12-0,18 m. Coletou-se uma amostra por parcela principal dos blocos 1 e 4, o que foi repetido para as quatro parcelas centrais do bloco 5. A amostragem foi realizada através do emprego de um trado calador com diâmetro igual a 0,042 m. O procedimento de laboratório e de cálculo desta variável foi realizado conforme EMBRAPA (1997).

4.2.2.3 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas

A determinação do teor de matéria orgânica do solo (MOS) e respectivas frações granulométricas foi executada somente na área sob semeadura direta e de referência. Para isso, amostras de solo foram coletadas em junho de 2006, junto às trincheiras abertas para a extração dos anéis destinados à avaliação da densidade e porosidade do solo. Dessa forma, foram coletadas duas amostras por subparcela dos blocos 2 e 3, sendo uma na camada de 0,03-0,06 e outra na de 0,12-0,15 m, totalizando 48 amostras. Em maio de 2007, foram coletadas ainda mais duas amostras de solo (uma por camada) em cada local amostrado na área de referência descrita no item 4.2.2.1, totalizando seis amostras (três por profundidade).

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA), conforme procedimento descrito em EMBRAPA (1997). Uma parte da TFSA foi reservada para a análise do teor de MOS; a outra foi utilizada para o fracionamento granulométrico, executado conforme a metodologia de Cambardella & Elliot (1992). De maneira resumida, essa metodologia prevê a dispersão de 20 gramas de solo, através do uso de 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio 1 mol L^{-1} , juntamente com agitação mecânica (agitador horizontal), durante 16 horas. Posteriormente, as amostras foram lavadas através de uma peneira de 0,053 mm, de forma a ficarem retidas na mesma apenas a fração areia e a MOS particulada (MOP). A fração areia + MOP foi então seca em estufa a 60° C por 72 h e pesada. A análise do teor de MOS (na amostra não fracionada) e de MOP (na fração areia + MOP) foi

realizada segundo o método de Walkley-Black modificado, descrito em Tedesco et al. (1995). O teor de MOP e de MOS associada aos minerais (MOM) foi calculado através das fórmulas (1) e (2), respectivamente:

$$MOP = MOS_a \times \frac{Pa}{20} \quad (4)$$

$$MOM = MOS - MOP \quad (5)$$

Onde:

- MOP = teor de matéria orgânica particulada do solo (g kg^{-1});
- MOS_a = teor de matéria orgânica na fração areia + MOP (g kg^{-1});
- P_a = peso da fração areia + MOP (g) obtida a partir das 20 gramas de solo;
- MOM = teor de matéria orgânica associada aos minerais (g kg^{-1}).

4.2.3 Análise estatística dos dados

Os modelos utilizados para a análise da variância (ANOVA) diferiram em função dos parâmetros avaliados e do sistema de preparo considerado (semeadura direta e escarificação). Porém, todos os modelos foram estabelecidos tendo por base o delineamento experimental blocos ao acaso. Os modelos da ANOVA utilizados para a área sob semeadura direta são abaixo especificados:

a) matéria orgânica do solo, particulada e associada aos minerais: trifatorial com parcelas subdivididas no espaço e duas repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno e culturas de verão antecessoras às avaliações. Subparcelas: camadas avaliadas;

b) densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade:

- modelo 1: idem ao item 4.3.2a, considerando-se, no entanto, o fator épocas de avaliação nas subparcelas. Assim, a ANOVA foi executada em separado para as camadas estudadas;

- modelo 2: trifatorial com parcelas subdivididas no espaço e

quatro repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno. Subparcelas: condição de tráfego. Subsubparcelas: camada avaliada. Neste modelo, combinou-se os dados obtidos nas parcelas cultivadas no verão com milho e soja, sendo o mesmo empregado na avaliação realizada em novembro/2006;

c) resistência do solo à penetração: em ambos os modelos, a ANOVA foi realizada em separado para as profundidades estudadas e combinando-se as culturas do milho e soja:

- modelo 1: trifatorial com parcelas subdivididas no espaço e quatro repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno. Subparcelas: profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo. Subsubparcelas: condição de tráfego;

- modelo 2: trifatorial com parcelas subdivididas, subparcelas no espaço e subsubparcelas no tempo, e quatro repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno. Subparcelas: condição de tráfego. Subsubparcelas: época de avaliação;

d) teor de água do solo no dia da avaliação da RP: idem ao modelo 2 do item 4.3.2c considerando-se, no entanto, o fator camadas avaliadas nas subparcelas;

e) massa seca das coberturas de inverno: fator único, correspondente às coberturas de inverno, com quatro repetições.

Na área escarificada, os modelos empregados foram:

a) densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade: trifatorial com parcelas subdivididas no espaço e quatro repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno. Subparcelas: condição de tráfego. Subsubparcelas: camada avaliada;

b) resistência do solo à penetração: idem ao modelo 2 do item 4.3.2c, porém com seis repetições. Combinou-se os dados obtidos nas áreas ocupadas por soja e milho na execução da ANOVA, que foi realizada em separado para cada uma das profundidades estudadas;

c) teor de água do solo no dia da avaliação da RP: idem ao item 4.3.2d;

d) massa seca das coberturas de inverno: fator único, correspondente às coberturas de inverno, com três repetições.

Quando a análise da variância indicou a ocorrência de interações

significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro de outro, através do teste de Duncan ($p < 0,05$). Quando não houve interação, e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. A análise da variância e os testes de comparação entre médias foram realizados através do programa computacional SOC-EMBRAPA. Para a comparação entre as variáveis medidas na área sob semeadura direta e na testemunha escarificada, foi empregado o teste t (Student) bilateral para dados não pareados ($p < 0,05$), executado com o auxílio do programa Microsoft Excel[®]. O mesmo teste foi utilizado para comparar os valores das propriedades físicas medidos antes e após a escarificação. As análises de regressão foram efetuadas mediante o uso do programa Sigmaplot[®] 9.0 (Systat software, Inc.).

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Massa seca da parte aérea das coberturas de inverno

A produção de massa seca da parte aérea das coberturas de inverno na área sob semeadura direta, para todos os anos de condução do experimento, é mostrada na Tabela 3. Verifica-se que, independentemente do ano considerado, as plantas de cobertura de inverno resultaram num maior aporte de resíduos culturais comparativamente ao pousio. Em 2002 e 2003, não houve diferenças significativas entre a massa seca produzida pela parte aérea da aveia preta da aveia preta + ervilhaca. Por outro lado, nos invernos de 2005 e 2006, o consórcio aveia preta+ervilhaca e o nabo forrageiro, respectivamente, produziram cerca de 3 Mg ha⁻¹ de resíduos a mais, em relação à aveia preta. Já a biomassa produzida na área mantida sob pousio durante o inverno foi semelhante nos anos de 2002, 2003 e 2005; porém, em 2006, a sua magnitude diminuiu em quase 50%. Ao que parece, o cultivo do solo, com freqüentes aplicações de herbicidas, tanto de ação total quanto seletivos às culturas de verão subseqüentes, prejudicou o estabelecimento espontâneo de plantas durante o inverno.

Independentemente do ano considerado, os dados da Tabela 3

evidenciam que a aveia preta e, principalmente, o consórcio aveia preta+ervilhaca e o nabo forrageiro, demonstraram um grande potencial em termos de produção de biomassa da parte aérea. Neste sentido, os valores de massa seca produzida pelas plantas de cobertura foram maiores do que os valores obtidos por Barni et al. (2003), para a mesma região do RS, e por Heinrichs (1996). Por outro lado, a produção de massa seca da aveia preta + ervilhaca, na média das safras avaliadas, assemelhou-se à obtida por Medeiros et al. (1987), em experimento também realizado na EEA/UFRGS. Mesmo com a diminuição observada no inverno de 2006, a produção de massa seca do pousio pode ser considerada alta, uma vez que, na média, os valores foram cerca de 2 vezes superiores aos obtidos por Da Ros & Aita (1996).

Tabela 3. Produção de massa seca da parte aérea das coberturas de inverno, na área sob semeadura direta.

| Cobertura de inverno | Ano ¹ | | | |
|--|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2002 | 2003 | 2005 | 2006 |
| | ----- <i>Mg ha⁻¹</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca ou nabo forrageiro ² | 6,6 a | 8,5 a | 11,0 a | 10,3 a |
| Aveia preta | 6,6 a | 8,5 a | 8,6 b | 7,1 b |
| Pousio | 4,6 b | 4,7 b | 4,5 c | 2,4 c |
| CV (%) | 27,0 | 14,6 | 15,1 | 20,8 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente entre si, pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). ¹ Os dados referentes aos anos de 2002 e 2003 foram obtidos por Beutler (2005). ² Em 2006, o consórcio aveia preta + ervilhaca foi substituído pelo nabo forrageiro.

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que, nos tratamentos submetidos à escarificação, também houve uma tendência de a produção de resíduos da parte aérea ser maior para o nabo forrageiro do que para a aveia preta. Porém, essas diferenças foram menores comparativamente às observadas para a semeadura direta, e não significativas. A grande variabilidade na produção de biomassa do nabo forrageiro na área escarificada, o que resultou em um coeficiente de variação muito alto, explica o fato de as diferenças não terem sido estatisticamente significativas, mesmo com esta espécie tendo produzido, em média, 1,6 Mg ha⁻¹ a mais de resíduos em relação à aveia preta. O alto CV observado para a massa seca produzida pelas

plantas de cobertura de inverno na área escarificada pode ser atribuída principalmente ao estabelecimento desuniforme das mesmas, o que foi mais evidente no caso da aveia preta.

Tabela 4. Produção de massa seca da parte aérea das coberturas de inverno, na área escarificada (2006).

| Cobertura de inverno | Produção de massa seca |
|----------------------|---------------------------|
| | ----- $Mg\ ha^{-1}$ ----- |
| Nabo forrageiro | 6,9 a |
| Aveia preta | 5,3 a |
| CV (%) | 41,4 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente entre si, pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Verifica-se ainda que a quantidade de biomassa produzida nos tratamentos escarificados (Tabela 4) foi aproximadamente 25 e 33% inferior aos conduzidos em semeadura direta (Tabela 3), respectivamente, para a aveia preta e o nabo forrageiro. Como às diferenças em termos de fertilidade entre os sistemas de preparo não foram grandes (Apêndices 6 e 7), a causa mais provável para este comportamento relaciona-se ao baixo grau de compactação observado na área escarificada (item 4.3.2.2). Em condições de solos soltos e muito porosos, Veen et al. (1992) obteve que, no caso do milho, o contato solo-raiz é prejudicado, dificultando assim a absorção de água e nutrientes. A escarificação também afetou negativamente o estabelecimento, principalmente, das plântulas de aveia preta em relação à semeadura direta (Figuras 3a, 3b, 3c a 3d). A baixa densidade do solo e a alta macroporosidade verificadas na área escarificada podem ter resultado num mau contato solo-semente e, assim, diminuído a população de plantas. Esta afirmação é reforçada quando se considera que a semeadura das coberturas foi realizada no mesmo dia da escarificação. Hamza & Anderson (2005) recomendam que esta operação seja realizada com antecedência à semeadura, de forma a permitir o “assentamento do solo” e, assim, facilitar o controle da profundidade de deposição das sementes e o contato das mesmas com o solo.

**(a)****(b)****(c)****(d)**

Figura 3. Aspecto visual da aveia preta nas parcelas sob semeadura direta (a,c) e escarificadas (b,d), aos 21 (a,b) e aos 60 dias após a semeadura (c,d).

4.3.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas em semeadura direta.

A análise da variância demonstrou que não houve interação entre os fatores coberturas de inverno e culturas de verão antecedentes à amostragem para as variáveis MOS, MOP e MOM, em ambas as profundidades consideradas. Dessa forma, a comparação das médias foi realizada em separado para estes fatores. Cabe ressaltar que os dados referentes à MOS e suas frações granulométricas foram obtidos através de uma amostragem realizada em junho/2006 e, portanto, antes da inclusão do nabo forrageiro no experimento. Assim, a discussão neste tópico não relaciona os resultados a

esta planta de cobertura.

As plantas de cobertura de inverno resultaram num maior teor de MOS na superfície do solo (0,03-0,06 m) comparativamente ao pousio (Tabela 5), o que pode ser atribuído principalmente a maior adição de resíduos provenientes da parte aérea das primeiras (Tabela 3). Estes resultados também podem ser justificados pelo maior aporte de material orgânico através do sistema radicular das plantas de cobertura. Embora esta variável não tenha sido quantificada durante os anos de 2005 e 2006, Beutler (2005) encontrou que, na safra 2003/04 e para a mesma área experimental, a massa seca de raízes na superfície do solo (0,0-0,10 m) foi 31% menor para o pousio em relação à aveia preta e à aveia preta+ervilhaca, as quais não diferiram significativamente entre si. Embora possa variar em função de fatores edafoclimáticos (Conte et al., 2007), há uma proporcionalidade entre a massa da parte aérea e raízes das plantas de cobertura (Beutler, 2005). Desse modo, a maior adição de resíduos via sistema radicular das culturas de cobertura em relação ao pousio deve ter se mantido durante as safras subseqüentes.

Tabela 5. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e de suas respectivas frações (particulada – MOP e associada aos minerais – MOM) na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de avaliação (junho/2006).

| Camada | Cobertura de inverno | Matéria orgânica | | |
|-----------|-------------------------|------------------|--------------------------|-------------|
| | | MOS | MOP | MOM |
| ---- | <i>m</i> ---- | ----- | <i>g kg⁻¹</i> | ----- |
| 0,03-0,06 | Aveia preta + ervilhaca | 35,7 a | 6,3 b | 29,4 a |
| | Aveia preta | 38,2 a | 7,9 a | 30,3 a |
| | Pousio | 31,8 b | 3,7 b | 28,1 a |
| | Média | 35,3 | 6,0 | 29,3 |
| | CN¹ | 46,9 | 12,6 | 34,3 |
| 0,12-0,15 | Aveia preta + ervilhaca | 18,8 a | 1,4 a | 17,4 a |
| | Aveia preta | 18,9 a | 0,9 a | 18,0 a |
| | Pousio | 18,2 a | 1,0 a | 17,2 a |
| | Média | 18,6 | 1,1 | 17,5 |
| | CN | 25,2 | 3,3 | 21,9 |

¹ CN = campo nativo adjacente ao experimento. CV coberturas: MOS = 10,9%; MOP = 30,3%; MOM = 10,7%. CV camadas: MOS = 10,2%; MOP = 44,6%; MOM = 7,8%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, comparando as coberturas de inverno dentro de cada camada, e maiúscula, comparando as camadas dentro de cada variável, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Na camada de 0,12-0,15 m, o teor de MOS foi significativamente inferior à de 0,03-0,06 m e não foi afetado pelas coberturas de inverno (Tabela 5). Diekow (2003) e Conceição (2006) também encontraram que a magnitude do incremento no teor de MOS, ocasionado pelo emprego de plantas de cobertura com elevada produção de fitomassa, em semeadura direta, é reduzida com o aumento da profundidade da camada avaliada. A deposição dos resíduos em superfície, aliada à concentração da mobilização do solo em faixas e na sua camada superficial, sem incorporação significativa do material orgânico, são os principais fatores que justificam o maior teor de MOS a 0,03-0,06 m de profundidade e a ausência de efeitos das coberturas sobre esta variável a 0,12-0,15 m. A massa seca proveniente das raízes também tende a se concentrar na superfície do solo, conforme comprovado por Beutler (2005). Este autor concluiu que aproximadamente 75% da massa de raízes das plantas de cobertura, medida na camada de 0,0-0,2 m, concentrou-se nos primeiros 0,1 m de profundidade. Ao mesmo tempo, o referido trabalho evidenciou que as diferenças entre as plantas de cobertura e o pousio, no que se refere à produção de massa seca radicular, não foram significativas para a camada de 0,1-0,2 m.

Com relação aos efeitos das coberturas sobre as frações físicas que compõem a MOS, os dados apresentados na Tabela 5 indicam que o teor de MOP, na camada de 0,03-0,06 m, foi mais elevado nos sistemas de rotação de culturas incluindo plantas de cobertura de inverno. Como o teor de MOM não foi significativamente afetado pelas coberturas de inverno, pode-se atribuir o aumento na concentração de MOS exclusivamente ao incremento no teor da sua fração particulada. Isto significa que a MOP foi muito mais sensível em detectar as diferenças proporcionadas pelo manejo do solo, confirmando as conclusões de Conceição et al. (2005). No entanto, existe uma possibilidade grande de que, com o tempo, as maiores adições de resíduos proporcionadas pelas plantas de cobertura impliquem aumentos significativos também no teor de MOM, conforme detectado por Conceição (2006), em um experimento de longa duração. Da mesma forma que para a MOS, os teores de MOP e MOM não foram afetados pelas coberturas de inverno na camada de 0,12-0,15 m (Tabela 5). É importante destacar que a MOP é constituída por resíduos orgânicos em estágios iniciais de decomposição (Roscoe & Machado, 2002) e,

assim, pode exercer um efeito diferente em relação às frações mais humificadas da MOS sobre as propriedades mecânicas do solo (Soane, 1990). Além disso, a MOP é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados, principalmente daqueles de maior tamanho (Goldchin et al., 1997).

A maior produção de fitomassa pela aveia preta+ervilhaca em 2005 não resultou em aumentos no teor de MOS para estes tratamentos comparativamente à aveia preta (Tabela 5). Pelo contrário, o teor de MOS tendeu a ser mais alto para as parcelas ocupadas por aveia preta, embora as diferenças não tenham sido significativas. Da mesma forma, o teor de MOP foi 25% maior para a aveia preta em relação ao consórcio aveia preta+ervilhaca. Conforme explica Diekow (2003), o estoque de MOS e suas frações é definido pela massa de resíduos adicionada ao solo (C) e pela taxa de mineralização do compartimento orgânico do mesmo (k_2). Como a adição foi igual (2002 e 2003) ou maior (2005) para o consórcio aveia preta+ervilhaca, os menores teores MOP relacionam-se a um k_2 maior. Em semeadura direta, o k_2 é afetado principalmente pelas características do resíduo (relação C/N, presença de moléculas orgânicas de alta recalcitrância, como a lignina) e pela magnitude da proteção física exercida pelos agregados do solo (Diekow, 2003; Conceição, 2006). O mais provável é que o k_2 tenha sido maior para a aveia preta+ervilhaca em função da menor relação C/N (Giacomini et al., 2003) e recalcitrância das moléculas orgânicas que compõe a ervilhaca (Amaral et al., 2004), uma vez que propriedades físicas indicadoras do estado de agregação não diferiram entre esses tratamentos (item 4.3.3). Assim, pressupõe-se que a maior mineralização dos compostos orgânicos para a aveia preta+ervilhaca tenha ocorrido na fração leve livre, que é a parte da MOP de maior labilidade e semelhança aos resíduos originais e menor associação, localizando-se predominantemente entre os agregados do solo (Roscoe & Machado, 2002).

Os resultados apresentados na Tabela 5 evidenciam ainda que, na camada de 0,03-0,06 m e nos tratamentos referentes às plantas de cobertura, o teor de MOS aumentou em mais de 20%, comparativamente ao valor obtido antes da implantação do experimento (julho/2002), que era de 30 g kg^{-1} (Tabela 1). No caso de pousio, o teor de MOS praticamente não se alterou, mesmo já decorridos quatro anos de condução do experimento. Isto evidencia que os resíduos aportados pelas plantas que espontaneamente se estabelecem na

área durante o inverno, juntamente com os restos culturais deixados pelas culturas de verão na superfície do solo, somam uma quantidade insuficiente para proporcionar um aumento significativo no teor de MOS. Na camada inferior, o teor de MOS medido em junho/2006 foi 22% inferior ao observado antes da implantação do experimento (Tabela 1). No entanto, em julho/2002, as amostras para determinação da MOS na camada inferior foram coletadas mais superficialmente (0,06-0,12 m), comparativamente a junho/2006 (0,12-0,15 m), o que justifica o comportamento anteriormente descrito. De qualquer forma, pode-se inferir que as alterações ocasionadas no teor de MOS na camada inferior, pela conversão do campo natural degradado em um sistema de produção de grãos sob semeadura direta, foram muito pequenas, independentemente da cobertura de inverno.

Os aumentos proporcionados pelas plantas de cobertura nos teores de MOS e suas frações físicas não foram suficientes para igualar aqueles observados no campo nativo (Tabela 5). Os teores de MOS foram 27 e 33% maiores no campo nativo, em relação aos tratamentos envolvendo plantas de cobertura de inverno, nas camadas correspondentes a 0,03-0,06 e 0,12-0,15 m, respectivamente. A fração com maiores diferenças foi a MOP, cujos teores foram 77 e 286% mais altos no campo nativo comparativamente à aveia preta e aveia preta+ervilhaca, considerando as profundidades de 0,03-0,06 e 0,12-0,15 m, respectivamente. Entretanto, é importante ressaltar que o período decorrido entre a instalação do experimento e a avaliação foi de apenas quatro anos, tempo insuficiente para que os teores de MOS e suas frações atinjam o equilíbrio diante das práticas de manejo empregadas. Bayer et al. (2000), através de simulações matemáticas baseadas em dados obtidos em um experimento de longa duração, concluíram que, sob adições de C semelhantes às encontradas nos sistemas de rotação incluindo plantas de cobertura de inverno no presente trabalho, a concentração de equilíbrio da MOS, na camada de 0,0-0,175 m, poderá chegar a aproximadamente 42 g kg^{-1} . Portanto, é provável que as diferenças entre o campo nativo e as plantas de cobertura de inverno, no que se refere ao teor e MOS, diminuam com o tempo.

O teor de MOS e de MOM, independentemente da profundidade, não foi afetado de maneira significativa pela cultura de verão antecessora à avaliação (Tabela 6). Na superfície do solo (0,03-0,06 m), o teor de MOP foi

43% superior para o milho em relação à soja. Na camada de 0,12-0,15 m, as diferenças entre a soja e o milho no que se refere à concentração de MOP não foram significativas. O maior teor de MOP observado na superfície das parcelas cultivadas com milho na safra 2005/06 pode ser atribuído a maior produção de massa seca da parte aérea e raízes desta espécie em comparação à soja, aliada a maior recalcitrância dos resíduos, devido à sua composição, à relação C/N mais alta e a menor área superficial específica dos mesmos (maior diâmetro do colmo).

Tabela 6. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e suas respectivas frações (particulada - MOP e associada aos minerais - MOM) na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão antecedente à amostragem e da profundidade de avaliação.

| Camada | Cultura de verão | Matéria orgânica | | |
|-------------|------------------|------------------|--------------------|-------------|
| | | MOS | MOP | MOM |
| ---- m ---- | | ----- | g kg ⁻¹ | ----- |
| 0,03-0,06 | Milho | 36,3 a | 7,0 a | 29,3 a |
| | Soja | 34,2 a | 4,9 b | 29,3 a |
| | Média | 35,3 | 6,0 | 29,3 |
| 0,12-0,15 | Milho | 18,2 a | 1,1 a | 17,1 a |
| | Soja | 19,1 a | 1,0 a | 18,1 a |
| | Média | 18,6 | 1,1 | 17,5 |

CV MOS = 10,9%; CV MOP = 30,3%; CV MOM = 10,7%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, comparando as culturas de verão dentro de cada camada e variável, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

O teor mais alto de MOP proporcionado pelo milho provavelmente seja transitório, uma vez que é realizado rotação de culturas anual durante o verão. Dessa forma, as parcelas ocupadas por soja na safra 2005/06 já foram cultivadas com milho em outros anos. Cabe destacar que a amostragem para determinação do teor de MOS e respectivas frações foi realizada aproximadamente 45 dias após a colheita das culturas de verão e, ao mesmo tempo, não houve diferenças nas propriedades físicas que refletem o estado de agregação do solo em função do cultivo do milho ou da soja em 2005/06 (item 4.3.3.1). Em consequência, o maior teor de MOP observado nos tratamentos cultivados com milho em 2005/2006, possivelmente, relaciona-se a uma maior concentração da fração leve livre que, conforme discutido anteriormente, é o compartimento da MOP mais suscetível à decomposição, sendo desprovido de

proteção por oclusão no interior dos agregados. É evidente que o milho, em virtude da maior adição de resíduos orgânicos, afeta positivamente o teor de MOS quando comparado à soja, mas esses efeitos não podem ser isolados neste trabalho, devido à rotação de culturas.

4.3.3 Propriedades físicas

4.3.3.1 Semeadura direta

A análise da variância não evidenciou interação significativa entre os fatores estudados na área sob semeadura direta (coberturas de inverno, culturas de verão antecessoras à avaliação e época de amostragem) para a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Desse modo, a comparação de médias foi executada em separado para cada fator estudado. No que se refere às culturas de verão antecessoras às avaliações, estas não afetaram de maneira significativa as propriedades físicas anteriormente citadas. Isto ocorreu mesmo na amostragem realizada em junho/2006, onde foi observado um maior teor de MOP para o milho (item 4.3.2), evidenciando que este aumento não resultou em benefícios à estrutura do solo, pelo menos considerando os indicadores empregados.

Os valores obtidos para a densidade do solo e porosidade total nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão, em função das coberturas de inverno e da época e camada de avaliação, são mostrados na Tabela 7. Em relação ao pousio, as plantas de cobertura resultaram em menores valores de densidade do solo e, conseqüentemente, maiores de porosidade total, o que foi observado em todas as épocas avaliadas. No entanto, tal fato se restringiu à camada superficial do solo (0,03-0,06 m), uma vez que as coberturas de inverno, independentemente da época de amostragem, não diferiram significativamente entre si em termos de densidade do solo e porosidade total na camada de 0,12-0,15 m. Este resultado comprova que a compactação persiste por períodos de tempo mais longos, à medida que a mesma se desenvolve em camadas mais profundas, devido à ação progressivamente menos intensa de agentes naturais que tendem a recuperá-lo (Jorajuria Collazo, 2005). As diferenças entre os tratamentos aveia preta e aveia preta +

Tabela 7. Densidade do solo e porosidade total em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação, considerando as entrelinhas não tráfegadas das culturas de verão.

| Camada (m) | Cobertura | Época de avaliação | | | |
|--|-----------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------|
| | | 10/2005 | 06/2006 | 11/2006 | Média |
| ----- Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) ----- | | | | | |
| 0,03-0,06 | A+E/N ¹ | 1,34 | 1,28 | 1,29 | 1,30 b |
| | Aveia preta | 1,41 | 1,26 | 1,32 | 1,33 b |
| | Pousio | 1,51 | 1,42 | 1,45 | 1,46 a |
| | Média | 1,42 A | 1,32 B | 1,35 B | 1,36 |
| | CN² | | 1,34 | | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 1,61 | 1,58 | 1,60 | 1,60 a |
| | Aveia preta | 1,60 | 1,56 | 1,59 | 1,58 a |
| | Pousio | 1,63 | 1,56 | 1,60 | 1,60 a |
| | Média | 1,61 A | 1,57 A | 1,60 A | 1,59 |
| | CN | | 1,57 | | |
| ----- Porosidade total ($m^3\ m^{-3}$) ----- | | | | | |
| 0,03-0,06 | A+E/N | 0,46 | 0,47 | 0,48 | 0,47 a |
| | Aveia preta | 0,42 | 0,49 | 0,47 | 0,46 a |
| | Pousio | 0,39 | 0,42 | 0,41 | 0,41 b |
| | Média | 0,42 B | 0,46 A | 0,45 A | 0,45 |
| | CN² | | 0,49 | | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 0,36 | 0,37 | 0,37 | 0,37 a |
| | Aveia preta | 0,37 | 0,37 | 0,38 | 0,37 a |
| | Pousio | 0,35 | 0,37 | 0,37 | 0,36 a |
| | Média | 0,36 A | 0,37 A | 0,37 A | 0,37 |
| | CN | | 0,40 | | |

¹ A+E/N = Aveia + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006). ² CN = campo nativo ³ CV densidade do solo: coberturas = 7,5% (0,03-0,06 m) e 5,9% (0,12-0,15 m); épocas de avaliação = 5,0% (0,03-0,06 m) e 3,2% (0,12-0,15 m). CV porosidade total: coberturas = 9,6% (0,03-0,06 m) e 6,1% (0,12-0,15 m); épocas de avaliação = 8,2% (0,03-0,06 m) e 4,8% (0,12-0,15 m). Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, dentro de cada variável e camada, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

ervilhaca (2002 a 2005)/nabo (2006) também não foram significativas considerando as mesmas variáveis. É importante destacar que, em avaliação realizada quatro meses após o início desse experimento, Beutler (2005) não encontrou efeitos significativos das coberturas de inverno testadas sobre a

densidade e porosidade total do solo, em ambas as profundidades avaliadas (médias de 1,62 e 1,68 Mg m⁻³ para a densidade, e de 0,39 e 0,36 m³ m⁻³ para a porosidade, nas camadas de 0,03-0,06 e 0,06-0,12 m, respectivamente). Verifica-se também que a redução do grau de compactação da superfície do solo pelas plantas de cobertura de inverno na ausência de tráfego foi tal que, a partir da avaliação realizada em junho/2006, a densidade e a porosidade total atingiram valores semelhantes aos observados na área sob vegetação natural (campo nativo). Na camada superficial do pousio, a densidade do solo foi superior e a porosidade total inferior à área de referência. Nota-se ainda que, em todas as épocas e coberturas de inverno estudadas, a densidade do solo e a porosidade total foram similares à área sob vegetação natural, quando se considera a camada correspondente a 0,12-0,15 m de profundidade.

Os dados apresentados na Tabela 7 mostram que, nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão, a densidade do solo diminuiu e a porosidade total aumentou de outubro/2005 a junho/2006, evidenciando a ocorrência de melhorias na qualidade física do solo mesmo para o pousio. Novamente, estes efeitos se limitaram à camada correspondente a 0,03-0,06 m de época profundidade. Embora a interação coberturas x épocas não tenha sido significativa, os resultados expostos na Tabela 7 indicam uma tendência da modificação nesses atributos ser mais acentuada nos sistemas de rotação de culturas que incluem plantas de coberturas de inverno. Neste sentido, as reduções na densidade do solo em sua camada superficial corresponderam a 8,6; 11,9; e 5,6%, respectivamente, para a aveia preta+ervilhaca/nabo, aveia preta e pousio. Esta constatação sugere que, pelo menos até junho/2006, as culturas de cobertura de inverno continuaram melhorando a estrutura da superfície do solo quando comparadas ao pousio.

Ainda conforme a Tabela 7, verifica-se que tanto a densidade do solo, quanto a porosidade total não variaram significativamente de junho a novembro/2006. Isto pode ser um indicativo de que a estrutura do solo esteja próxima ou tenha alcançado um novo estado estável (Vezzani, 2001), em resposta às práticas de manejo adotadas na área a partir da implantação do experimento. Entretanto, são necessárias avaliações subseqüentes para confirmar esta tendência. Baseando-se no princípio da mínima produção de entropia, descrito em Vezzani (2001), é possível afirmar que, no estado estável,

há um balanço constante entre a magnitude dos processos que resultam na degradação e aqueles que proporcionam a construção da estrutura. Portanto, alterações em fatores externos, como nas práticas de manejo, tendem a levar a um novo estado de estabilidade. Neste trabalho, foi realizada uma modificação no manejo, que envolveu a substituição do consórcio aveia preta+ervilhaca pelo nabo forrageiro, a partir do inverno de 2006. Entretanto, mesmo para este tratamento, a densidade do solo e a porosidade total não foram alteradas de junho a novembro/2006. A falta de sensibilidade das propriedades analisadas (Logsdon & Karlen, 2004) e/ou o pequeno espaço de tempo decorrido desde a inclusão do nabo forrageiro, constituem-se em possíveis justificativas para este resultado.

Em junho e novembro/2006, determinou-se também a distribuição da porosidade total em macro e microporos (Tabela 8). De acordo com esta Tabela, verifica-se que, na camada de 0,03-0,06 m e para ambas as épocas de amostragem, o volume de macroporos nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão foi significativamente maior nos tratamentos aveia preta e aveia preta+ervilhaca/nabo, em relação ao pousio. Essas diferenças não se repetiram na profundidade de 0,06-0,12 m, indicando, mais uma vez, que as melhorias nas propriedades físicas do Argissolo estudado, em virtude do emprego de plantas de cobertura de inverno, se concentraram na camada superficial. Entretanto, os dados obtidos por Beutler (2005), no mesmo experimento utilizado nesta pesquisa, indicaram que, decorridos quatro meses da implantação das plantas de cobertura de inverno (novembro/2002), essas não haviam influenciado de forma significativa o volume de macroporos, em ambas as camadas estudadas. A microporosidade não foi afetada pelas coberturas de inverno, em ambas as camadas. Assim, estes resultados comprovam que o aumento na porosidade total e, conseqüentemente, a redução na densidade do solo, em função das plantas de cobertura de inverno, considerando a camada superficial, está relacionada exclusivamente ao incremento no volume de macroporos. Tendência semelhante é relatada por Oliveira et al. (2003) que, estudando o efeito de sistemas de manejo sobre propriedades físicas do solo, obtiveram que o aumento na porosidade total, em função de práticas agrícolas adequadas à qualidade física do solo, restringiu-se ao volume de macroporos. Argenton et al. (2005) também concluíram que o

uso da mucuna cinza em consórcio com o milho diminuiu a densidade do solo em relação ao milho isolado, sendo estes efeitos limitados ao aumento no volume de macroporos.

Tabela 8. Macro e microporosidade do solo em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação, considerando as entrelinhas não trafegadas das culturas de verão.

| Camada (m) | Cobertura | Época de avaliação | | |
|---|-----------------------|--------------------|---------------|-------------|
| | | 06/2006 | 11/2006 | Média |
| ----- <i>Macroporosidade (m³ m⁻³)</i> ----- | | | | |
| 0,03-0,06 | A+E/N ¹ | 0,19 | 0,22 | 0,20 a |
| | Aveia preta | 0,21 | 0,21 | 0,21 a |
| | Pousio | 0,13 | 0,15 | 0,14 b |
| | Média | 0,18 A | 0,19 A | 0,18 |
| | CN² | | 0,15 | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 0,09 | 0,09 | 0,09 a |
| | Aveia preta | 0,10 | 0,11 | 0,10 a |
| | Pousio | 0,10 | 0,10 | 0,10 a |
| | Média | 0,10 A | 0,10 A | 0,10 |
| | CN | | 0,12 | |
| ----- <i>Microporosidade (m³ m⁻³)</i> ----- | | | | |
| 0,03-0,06 | A+E/N | 0,28 | 0,26 | 0,27 a |
| | Aveia preta | 0,28 | 0,25 | 0,26 a |
| | Pousio | 0,29 | 0,27 | 0,28 a |
| | Média | 0,28 A | 0,26 B | 0,27 |
| | CN | | 0,34 | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 0,28 | 0,26 | 0,27 a |
| | Aveia preta | 0,28 | 0,27 | 0,28 a |
| | Pousio | 0,28 | 0,26 | 0,27 a |
| | Média | 0,28 A | 0,26 A | 0,27 |
| | CN | | 0,28 | |

¹ A+E/N = Aveia + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006); ² CN = campo nativo. ³ Valores entre parêntesis correspondem ao intervalo de confiança para a média (95%). CV macroporosidade: coberturas= 17,0% (0,03-0,06 m) e 18,4% (0,12-0,15 m); épocas de avaliação= 22,0% (0,03-0,06 m) e 18,2% (0,12-0,15 m). CV microporosidade: coberturas = 10,3% (0,03-0,06 m) e 5,8% (0,12-0,15 m); épocas de avaliação = 3,2% (0,03-0,06 m) e 8,8% (0,12-0,15 m). Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, dentro de cada variável e camada, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

Da mesma forma que para a densidade do solo e a porosidade total, a macro e microporosidade, determinadas nas zonas sem tráfego e nas entrelinhas da soja e do milho, não variaram significativamente de junho a novembro de 2006, o que foi observado tanto na camada de 0,03-0,06 quanto na de 0,12-0,15 m (Tabela 8). Isto evidencia, mais uma vez, que a estrutura do solo pode ter atingido um novo estado estável, conforme já discutido. O uso do nabo forrageiro em lugar do consórcio aveia preta+ervilhaca não modificou significativamente o volume de macro e microporos, o que também já havia sido detectado para a densidade do solo e porosidade total. Em comparação à vegetação natural, verifica-se que, na camada de 0,03-0,06 m, o uso de plantas de cobertura, embora tenha resultado em valores similares de porosidade total (Tabela 7), alterou a distribuição dos poros por tamanho, aumentando a proporção de macroporos e diminuindo a de microporos (Tabela 8). Já o pousio apresentou valores similares de macroporosidade, porém menores de microporosidade em relação ao campo nativo.

Os valores obtidos para a densidade do solo e para a porosidade total, nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão, em todas as épocas avaliadas e para ambas as camadas (Tabela 7), foram inferiores e superiores aos observados antes da instalação do experimento (Tabela 2, item 3.2), respectivamente. Da mesma forma, o volume de macroporos na camada superficial, medido em junho e novembro/2006 (Tabela 8), foi 2 e 3 vezes superior ao valor observado em junho/2002 (Tabela 2), para o pousio e as plantas de cobertura de inverno, respectivamente. Na camada de 0,12-0,15 m, independentemente da cobertura de inverno, a macroporosidade duplicou. Isto comprova que, mesmo para o pousio e a camada inferior, o grau de compactação do solo na entrelinha das culturas de verão e nas zonas sem tráfego foi reduzido pela conversão de um campo natural degradado em um sistema de produção de grãos sob semeadura direta e ausência de tráfego, o que foi observado desde a primeira avaliação, realizada 39 meses após a implantação do experimento.

A microporosidade, independentemente do tratamento, apresentou valores similares aos observados antes da implantação do experimento (Tabela 2). Da mesma forma que o observado para as plantas de cobertura de inverno em comparação ao pousio, tal fato evidencia que o aumento na porosidade

total e a conseqüente redução na densidade do solo em relação ao início do experimento ocorreram mediante o incremento no volume de macroporos.

A RP determinada na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação, é mostrada nas Figuras 4a, 4b e 4c. Cabe salientar que os resultados apresentados nas referidas Figuras englobam tanto as entrelinhas trafegadas por rodados de trator quanto as não trafegadas, assim como as zonas mobilizadas pelos elementos sulcadores utilizados na semeadura das culturas de verão. Já os coeficientes de variação obtidos na determinação desta variável são listados nos Apêndices 8 e 9. A RP, de modo geral, seguiu a mesma tendência observada para as demais propriedades físicas determinadas neste trabalho. Contudo, a análise da variância indicou que a interação entre coberturas de inverno e épocas de avaliação foi significativa.

Os gráficos referentes às Figuras 4a e 4b mostram que a RP, determinada em outubro/2005 e junho/2006, respectivamente, foi inferior para as plantas de cobertura de inverno comparativamente ao pousio, o que foi significativo até a profundidade de 0,09 m em ambas as épocas de avaliação. As diferenças entre a aveia preta e a aveia preta+ervilhaca não foram significativas, em todas as épocas e profundidades estudadas. É importante considerar que, na camada de 0,0-0,06 m e em outubro/2005 e junho/2006, o teor de água no momento da realização dos ensaios de RP foi maior para a aveia preta+ervilhaca em relação à aveia preta e o pousio (Tabela 9). Como a RP depende, principalmente, da densidade do solo e do teor de água (Klein et al., 1998; Tormena et al., 1998; Torres & Saraiva, 1999; Silva, 2003b; Genro Junior et al., 2004; Cavalieri et al., 2006), é possível que os menores valores obtidos para esta variável considerando o tratamento aveia preta+ervilhaca reflitam, ao menos em parte, os valores mais elevados de umidade. No entanto, isto é verdadeiro para a profundidade de 0,03 m, uma vez que, a partir da camada de 0,06-0,12 m, as diferenças no teor de água entre as coberturas foram pequenas e não significativas (Tabela 9). Da mesma forma, as diferenças na RP entre o pousio e a aveia preta (Figuras 1a e 1b) podem ser atribuídas às variações na densidade do solo, já que o teor de água foi similar para esses dois tratamentos, mesmo na camada de 0,0-0,06 m (Tabela 9).

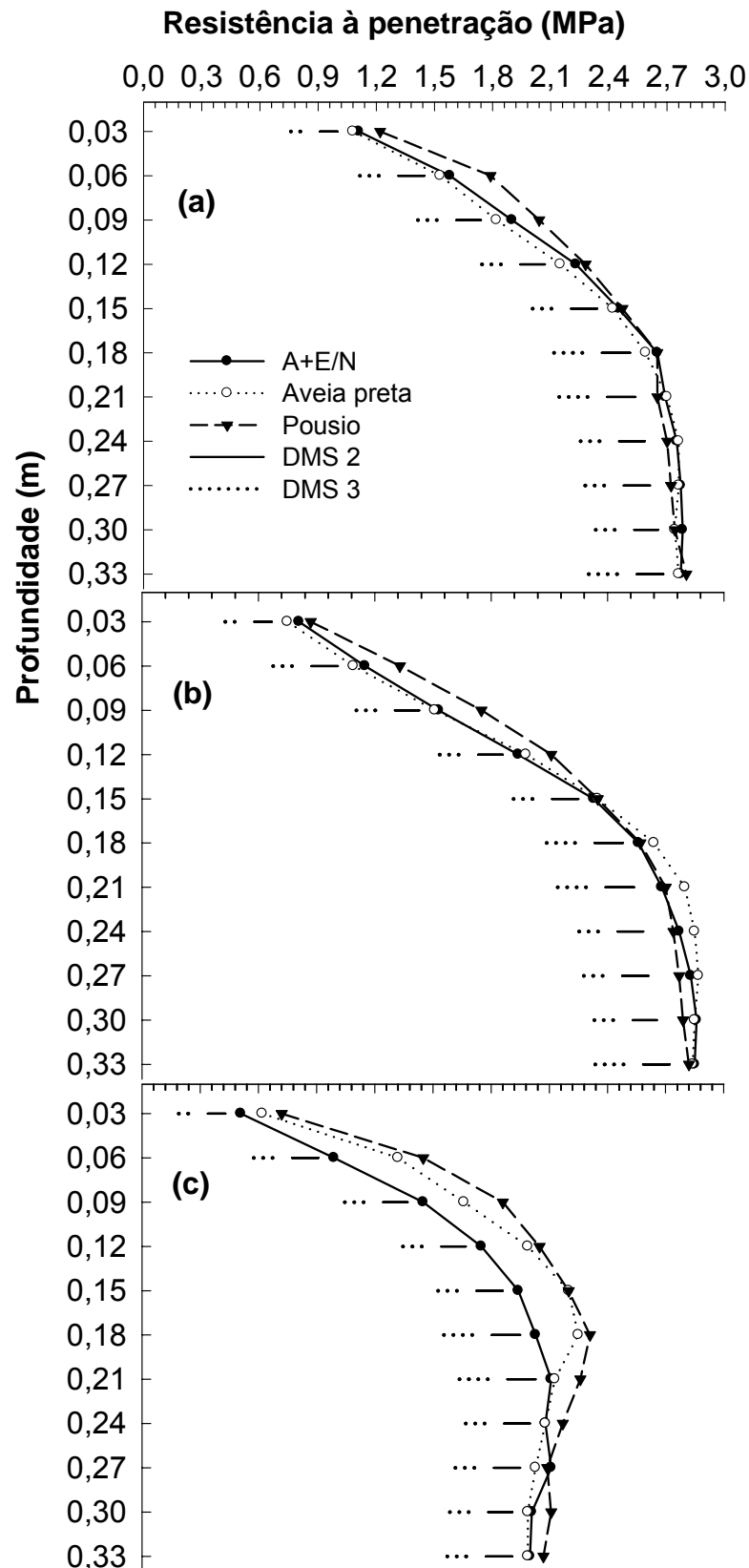


Figura 4. Resistência do solo à penetração, em função das coberturas de inverno, avaliada em outubro de 2005 (a), junho de 2006 (b) e maio de 2007 (c). A+E/N = aveia preta + ervilhaca (até 2005) ou nabo forrageiro (2006). DMS 2 e DMS 3 = diferença mínima significativa (Duncan, $p < 0,05$), quando a comparação engloba duas e três coberturas de inverno, respectivamente.

Tabela 9. Teor gravimétrico de água do solo no momento da determinação da resistência do à penetração, em função das coberturas de inverno e da camada e época de avaliação.

| Tratamento | Camada (m) | | | Média |
|--|---------------|---------------|---------------|-------------|
| | 0,00-0,06 | 0,06-0,12 | 0,12-0,18 | |
| ----- <i>kg kg⁻¹</i> ----- | | | | |
| ----- <i>Coberturas de inverno</i> ----- | | | | |
| A+E/N | 0,21 a | 0,16 a | 0,16 a | 0,18 |
| Aveia preta | 0,18 b | 0,16 a | 0,15 a | 0,16 |
| Pousio | 0,18 b | 0,16 a | 0,15 a | 0,16 |
| ----- <i>Época de avaliação</i> ----- | | | | |
| Outubro/2005 | 0,21 a | 0,17 a | 0,16 a | 0,18 |
| Junho/2006 | 0,20 a | 0,16 a | 0,15 a | 0,17 |
| Maió/2007 | 0,15 b | 0,15 b | 0,15 a | 0,15 |
| Média | 0,19 A | 0,16 B | 0,16 B | 0,17 |

¹ A+E/N = Aveia + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006). CV coberturas = 6,3%; CV camadas = 5,0%; CV épocas = 7,2%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, ambas considerando um mesmo fator (cobertura ou época), não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

Os resultados referentes à medição da RP efetuada em maio/2007 são apresentados pela Figura 4c. Observa-se que, até a profundidade de 0,09 m, os valores de RP diminuiram de forma significativa na seguinte ordem: pousio > aveia preta > nabo forrageiro. Nas profundidades compreendidas entre 0,12 e 0,18 m, não houve diferenças significativas entre a aveia preta e o pousio, porém estes dois tratamentos resultaram em maiores valores de RP comparativamente ao nabo forrageiro. Diante disso, pode-se inferir que a substituição do consórcio aveia preta+ervilhaca pelo nabo forrageiro não só acarretou menores valores de RP, como propiciou que os efeitos benéficos provenientes da inclusão de plantas de cobertura de inverno em sistemas de rotação de culturas visando à produção de grãos de milho e soja se estendessem até a profundidade de 0,18 m. Ao contrário do que foi demonstrado pela densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, a RP medida seis meses após o manejo do nabo forrageiro sugere que esta planta pode estar levando a um novo estado estável,

caracterizado por um menor grau de compactação em relação ao pousio e aveia preta inclusive a maiores profundidades. Novamente, há de se considerar que o teor de água no momento da determinação da RP foi maior para o nabo forrageiro do que para o pousio e a aveia preta, considerando a camada de 0,03-0,06 m (Tabela 9). Entretanto, a umidade pode ter colaborado para a menor RP medida nas parcelas ocupadas por nabo forrageiro apenas na profundidade de 0,03 m, pois nas demais camadas as diferenças no teor de água entre as coberturas de inverno não foram significativas.

É importante salientar ainda que, independentemente da época de avaliação, da cobertura de inverno e da profundidade, o teor de água no momento da determinação da RP pode ser considerado alto, pois o mesmo foi superior ao limite de plasticidade (Tabela 9), que na área estudada equivale a $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ (Tabela 2, item 3.2). Em condições de solo muito úmido, a variação nos valores de RP em função da densidade do solo é menos pronunciada do que quando este parâmetro é avaliado sob menores teores de água (Klein et al., 1998; Mapfumo & Chanasyk, 1998; Torres & Saraiva, 1999; Camara & Klein, 2005a; Cavalieri et al., 2006). Dessa forma, caso a medição fosse realizada sob menores umidades do solo, possivelmente, as diferenças entre as coberturas de inverno seriam mais pronunciadas e/ou detectadas até uma profundidade maior, principalmente, quando se considera as avaliações realizadas em outubro/2005 e junho/2006, bem como a camada de 0,0-0,12 m.

A RP foi influenciada significativamente pela época de avaliação (Figura 5). Em primeiro lugar, cabe destacar que a determinação da RP em maio/2007 foi realizada através de um penetrômetro diferente do utilizado em outubro/2005 e junho/2006 (item 4.2.2.2, Figuras 1 e 2), embora as características construtivas de ambos estivessem rigorosamente de acordo com o previsto pela norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004). No entanto, é muito provável que estes equipamentos tenham resultado em valores de RP diferentes, o que fica bastante evidente quando se analisa os dados obtidos na área submetida à escarificação, cuja discussão será apresentada no item (4.3.3.2). Além disso, de forma praticamente inexplicável, a RP determinada em maio/2007, a partir da profundidade de 0,15 m, caracterizou-se por valores muito inferiores em relação às demais épocas (Figura 5). Por outro lado, em camadas superiores a esta profundidade, a RP em maio/2007 assemelhou-se à

obtida em junho/2006, porém os valores correspondentes ao teor de água no momento das avaliações, considerando a camada de 0,0-0,12 m, foram significativamente inferiores em maio/2007 (Tabela 9). Dessa maneira, é provável que mesmo na camada de 0,0-0,12 m, a RP seja menor em maio/2007 do que em junho/2006, considerando umidades do solo similares. Possivelmente, os penetrômetros tenham se diferenciado em termos da calibração entre a magnitude do impulso elétrico gerado pela célula de carga e da força exercida. No entanto, as diferenças entre os penetrômetros não afetam a resposta da RP aos tratamentos dentro de cada época, o que é comprovado pelo fato de as diferenças entre o pousio e a aveia preta, assim como entre as condições de tráfego, terem se mantido constantes quando se compara as épocas de avaliação.

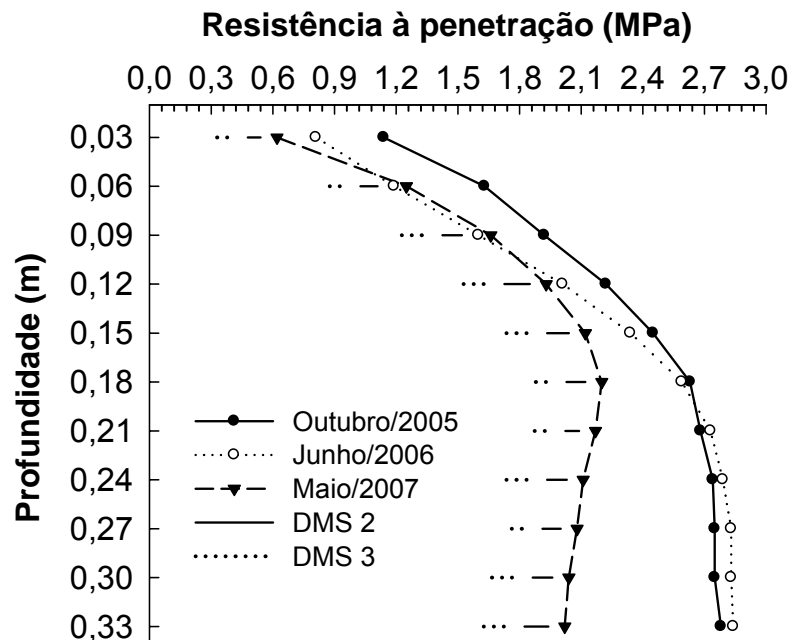


Figura 5. Resistência do solo à penetração, em função das épocas de avaliação. DMS 2 e DMS 3 = diferença mínima significativa (Duncan, $p < 0,05$), quando a comparação engloba duas e três épocas, respectivamente.

Diante do que foi anteriormente exposto, a comparação entre as épocas se restringirá aos dados obtidos nas duas primeiras épocas avaliadas (Figura 5). Nota-se que os valores de RP obtidos em outubro/2005 foram menores em relação aos medidos em junho/2006, o que foi significativo até a profundidade de 0,15 m. Como o teor de água, independentemente da camada considerada, não variou significativamente entre estas duas épocas (Tabela 9),

pode-se afirmar que o grau de compactação de fato diminuiu de outubro/2005 a junho/2006. Estes resultados são coerentes com os menores valores de densidade e maiores de porosidade total e macroporosidade determinados para a segunda época comparativamente à primeira (Tabelas 7 e 8).

Os efeitos exercidos pelas plantas de cobertura de inverno não se limitaram aos valores absolutos da RP, mas também à resposta desta variável à variação da magnitude da densidade do solo. Conforme a Figura 6, verifica-se que, na avaliação realizada em junho/2006, o índice de cone (média dos valores de RP medidos nas profundidades de 0,03 e 0,06 m), aumentou linearmente com o incremento dos valores de densidade do solo (na camada de 0,03-0,06 m), corroborando com os resultados obtidos por Klein et al. (1998). No entanto, a linha que representa a variação do índice de cone com a densidade do solo para a aveia preta+ervilhaca foi deslocada para cima em relação as demais coberturas e, ao mesmo tempo, caracterizou-se por uma menor inclinação. Isso significa, em primeiro lugar, que a taxa de aumento da RP com o incremento na densidade do solo foi menor para o consórcio aveia preta+ervilhaca. O maior teor de água do solo no momento da determinação da RP, observado para este tratamento na camada de 0,0-0,06 m (Tabela 9), explica este comportamento, haja vista que o aumento no teor de umidade diminui a sensibilidade do índice de cone ao incremento no grau de compactação (Klein et al., 1998; Mapfumo & Chanasyk, 1998; Torres & Saraiva, 1999; Cavaliere et al., 2006).

O deslocamento da reta para regiões de maior índice de cone sugere que, para uma mesma densidade do solo (considerando valores inferiores a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$), a aveia preta+ervilhaca se caracteriza por maiores valores de RP comparativamente à aveia preta e ao pousio. Tal fato ocorreu mesmo considerando que o teor de água foi maior (Tabela 9) e o grau de compactação, expresso por outras propriedades físicas (Tabelas 7 e 8), igual (em relação à aveia preta) ou superior (em relação ao pousio) para a aveia preta+ervilhaca. A média da RP para a aveia preta+ervilhaca, nas profundidades de 0,03 e 0,06 m, só foi menor em relação ao pousio (Figura 4b) devido ao maior número de amostras com menor densidade no primeiro tratamento (Figura 6). A justificativa mais provável para este resultado passa pelo entendimento de que a RP depende de outros fatores além da densidade

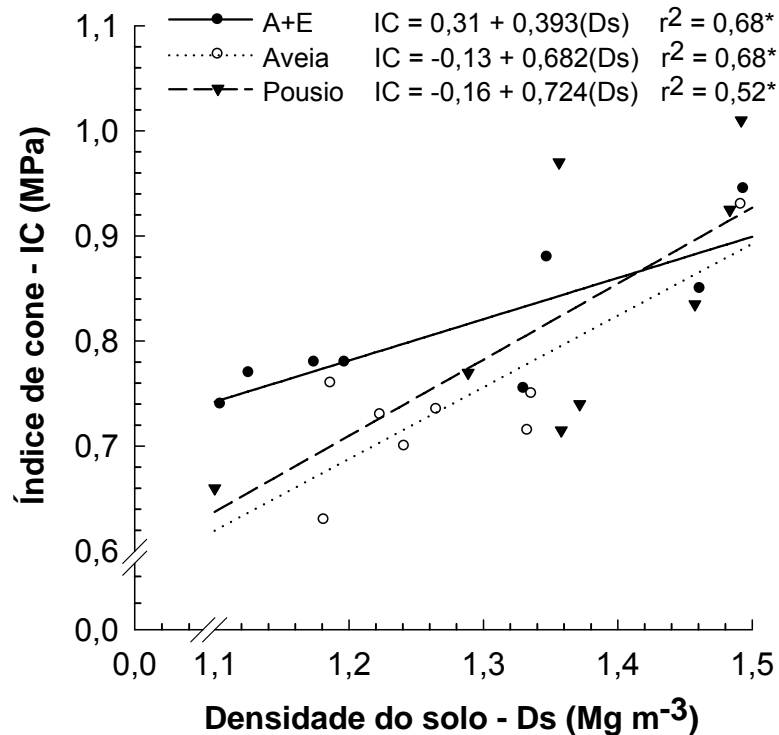


Figura 6. Relação entre o índice de cone (0,0-0,06 m) e a densidade do solo (0,03-0,06 m), em função das coberturas de inverno, considerando a área sob semeadura direta e a avaliação realizada em junho de 2006.

e teor de água do solo (Tormena et al., 1999). Estes autores encontraram que, para uma mesma densidade e teor de água do solo, a RP foi maior na semeadura direta do que no preparo convencional, o que foi atribuído a maior densidade dos agregados e maior força de ligação entre as partículas do solo. Assim, o maior índice de cone encontrado para as parcelas ocupadas pelo consórcio aveia preta+ervilhaca, sob valores similares de densidade do solo, pode estar evidenciando uma maior resistência em cada um dos pontos de contato entre as partículas e/ou agregados do solo. Moreira & Siqueira (2006) comentam que a espécie vegetal é um dos fatores que determinam a quantidade e natureza dos exsudatos radiculares, assim como a população e diversidade da microbiota associada à rizosfera. Assim, a inclusão de mais uma espécie no sistema de rotação de culturas, no caso a ervilhaca, pode ter beneficiado a produção de agentes agregantes, resultando em uma maior resistência à ruptura nos pontos de contato entre as partículas do solo. Os mesmos autores salientam ainda que as leguminosas podem aumentar a população microbiana junto à rizosfera, devido ao estabelecimento de simbiose

com bactérias diazotróficas (rizóbios), as quais, além de proporcionar a fixação de N, produzem polissacarídeos extracelulares, que se constituem em importantes agentes agregantes. Além disso, as exsudações das leguminosas são ricas em compostos nitrogenados, que estimulam a atividade microbiológica e, ao mesmo tempo, favorecem o crescimento da aveia preta, proporcionando que também as raízes desta espécie produzam uma maior quantidade de exsudatos.

Outro fator que poderia explicar os valores de índice de cone (0,00-0,06 m) mais elevados na aveia preta+ervilhaca em relação à aveia preta e ao pousio engloba o maior grau de preenchimento dos poros, especialmente daqueles com maior diâmetro, pelo sistema radicular do primeiro tratamento. Tal argumento sustenta-se no provável maior crescimento radicular na aveia preta+ervilhaca comparativamente às demais coberturas de inverno, tendo em vista a maior produção de massa seca da parte aérea observada nesse tratamento (Tabela 3, item 4.3.1). Nesse sentido, Genro Junior et al. (2004) atribuíram os altos valores de RP medidos nas parcelas ocupadas com guandu durante o verão à grande densidade e comprimento do sistema radicular dessa espécie, de forma que uma elevada proporção dos poros do solo, principalmente os macroporos, foi preenchido pelas raízes, resultando num aumento da rigidez do sistema. Entretanto, esse fator provavelmente não tenha sido determinante para a tendência expressa na Figura 6, levando-se em consideração que as regressões foram realizadas tendo por base os dados obtidos em junho/2006, oito meses após a dessecação das coberturas de inverno semeadas em 2005 e antes da implantação das mesmas no ano de 2006.

Os resultados anteriormente descritos comprovam a dificuldade relacionada ao estabelecimento de valores críticos de RP ao crescimento das plantas, fato já assinalado por diversos autores (Ehlers et al., 1983; Tormena et al., 1999; Torres & Saraiva, 1999; Leão, 2002). No caso deste trabalho, em situações onde o solo apresenta densidades inferiores a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, a avaliação do estado de compactação somente através da RP levaria à interpretação errônea de que as condições físicas proporcionadas pela aveia preta+ervilhaca poderiam ser menos adequadas ao crescimento da plantas em relação ao pousio.

De maneira geral, os dados obtidos indicaram que o grau de compactação do Argissolo estudado diminuiu em relação ao início do experimento, independentemente do tratamento considerado, o que foi detectado por Beutler (2005) já aos quatro meses após a implantação do experimento. No entanto, reduções mais acentuadas foram observadas na avaliação realizada em outubro/2005, ou seja, aproximadamente 36 meses após o início do trabalho (Tabela 7). Essas melhorias foram mais pronunciadas na camada superficial (0,03-0,06 m) e para as plantas de cobertura de inverno. Analisando-se os dados de RP (Figuras 4a e 4b) em conjunto com os de densidade e porosidade do solo (Tabela 7 e 8), nota-se que o efeito positivo da aveia preta e do consórcio aveia preta+ervilhaca também se restringiu à superfície do solo, sendo detectado até aproximadamente 0,10 m. O único meio de que as plantas de cobertura dispõem para alterar o grau de compactação em camadas mais profundas, pelo menos em um espaço de tempo equivalente ao da realização deste trabalho, é a ação do seu sistema radicular. Nos invernos de 2002 e 2003, a produção de massa seca de raízes na camada de 0,1-0,2 m não foi afetada de forma significativa pelas coberturas de inverno (Beutler, 2006) o que, dessa forma, justifica a ausência de modificações pronunciadas no grau de compactação a 0,12-0,15 m de profundidade, em decorrência do emprego de plantas de cobertura.

Entretanto, a substituição da aveia preta+ervilhaca pelo nabo forrageiro parece ter estendido a redução no grau de compactação do solo até 0,18 m, tendo em vista que a RP foi menor para esse tratamento, em comparação à aveia preta e ao pousio até essa profundidade, o que foi detectado seis meses após o manejo das coberturas de inverno (Figura 4c). Tal fato pode ser atribuído à abertura de bioporos pelo sistema radicular do nabo forrageiro, os quais se constituem em planos de fraqueza que aumentam a friabilidade do solo (Chan & Heenan, 1996), reduzindo assim a RP. Contudo, a inclusão do nabo forrageiro não alterou os demais indicadores do estado de compactação (Tabelas 7 e 8), o que pode ser atribuído a menor sensibilidade destas variáveis às modificações estruturais do solo (Logsdon & Karlen, 2004) e/ou ao fato de a coleta das amostras para a determinação das mesmas ter sido realizada em novembro/2006, antes do manejo das plantas de cobertura visando à implantação das culturas de verão. De qualquer forma, os resultados

obtidos neste trabalho comprovam o potencial do nabo forrageiro em romper camadas compactadas, em virtude de seu sistema radicular pivotante e agressivo (Florentín et al., 2001).

Para solos com textura semelhante ao utilizado neste trabalho, o valor crítico de densidade situa-se entre 1,40 e 1,50 Mg m⁻³ (Reichert et al., 2003). Na camada superficial e para todas as épocas estudadas, a densidade do solo no pousio superou o limite inferior da faixa de valores críticos, evidenciando que a compactação pode ainda ser prejudicial às plantas, principalmente sob condições de deficiência hídrica (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). Para as culturas de cobertura de inverno, os valores de densidade do solo ficaram próximos (outubro de 2005) ou abaixo (junho e novembro de 2006) do limite crítico inferior. Assim, foram necessários quatro anos sob plantas de cobertura de inverno para que o grau da compactação na superfície do solo fosse reduzido a níveis não restritivos ao crescimento das plantas. Na camada de 0,12-0,15 m, a densidade do solo superou o limite crítico para todos os tratamentos. Cabe destacar ainda que o volume de macroporos na superfície do solo foi 1,5 e 2 vezes superior ao mínimo necessário (10%) à obtenção de condições adequadas de aeração, respectivamente, para o pousio e as plantas de cobertura. Além da aeração, os macroporos são de importância fundamental para a infiltração de água no solo (Dexter, 1988). Entretanto, valores de macroporosidade muito elevados podem prejudicar a retenção de água pelo solo, conforme detectado por Klein & Libardi (2000) em condições de mata nativa. Sob esse ponto de vista, a maior compactação e, em decorrência, o menor volume de macroporos observado na camada de 0,12-0,15 m (Tabela 8) pode ser vantajoso, limitando as perdas de água por percolação.

Por outro lado, quando se utiliza como critério de avaliação a RP, cujo valor crítico mais aceito corresponde a 2 MPa (Imhoff, 2002), o grau de compactação na camada de 0,03-0,06 m, mesmo no pousio, pode ser considerado não restritivo ao crescimento das plantas, contradizendo em parte a interpretação em função da densidade do solo. Neste sentido, em outubro/2005, os valores de RP encontram-se abaixo do limite crítico até 0,06 e 0,09 m para o pousio e para as plantas de cobertura, respectivamente, profundidades estas que são ampliadas para 0,09 e 0,12 m, respectivamente,

em junho/2006. Esse comparativo não pode ser realizado para avaliação efetuada em maio/2007, devido às diferenças no penetrômetro utilizado, as quais já foram discutidas. Conforme destacado anteriormente, a umidade no momento da avaliação da RP, em todos os tratamentos e épocas, era alta (Tabela 9), o que pode ter mascarado os resultados. Assim, o uso dos valores críticos de densidade do solo como critério para verificar se o grau de compactação é ou não restritivo às plantas parece ser mais adequado para este trabalho.

A maior eficiência das plantas de cobertura de inverno na redução do grau de compactação da superfície do Argissolo estudado, em comparação ao pousio, parece estar relacionada ao efeito benéfico das mesmas sobre formação e estabilização dos agregados. Em primeiro lugar, as plantas de cobertura resultaram no aumento do teor de MOS na camada superficial do solo, o qual se restringiu à fração particulada da mesma (Tabela 5). De acordo com o modelo de agregação proposto por Goldchin et al. (1997), a MOP constitui-se na fração da MOS de maior efetividade na formação e estabilização de microagregados com tamanho entre 53 e 250 μm e macroagregados entre 250 e 2000 μm . Além disso, conforme relatado no item 4.3.2, a massa seca de raízes das plantas de cobertura de inverno, na camada de 0,0-0,10 m, foi superior ao pousio nos anos de 2002 e 2003, quando esta variável foi determinada (Beutler, 2005). O sistema radicular, através da união mecânica (entrelaçamento) de agregados menores, da exsudação de moléculas orgânicas capazes de atuarem como ligantes e do estímulo à atividade microbiana (Haynes & Beare, 1996), é um dos fatores responsáveis pela formação e estabilização de macroagregados maiores que 2000 μm (Oades, 1984; Goldchin et al., 1997). O crescimento das raízes traz como consequência a abertura de bioporos (Dexter, 1991; Oades, 1993), os quais se constituem em planos de fraqueza que auxiliam na formação de agregados e no aumento da friabilidade do solo (Chan & Heenan, 1996). No entanto, Dexter (1991) adverte que a abertura de bioporos não altera a densidade média do solo, haja vista que a acomodação das raízes é feita às custas da redução do espaço poroso do solo localizado ao redor das mesmas. A formação e estabilização de agregados de maior tamanho, juntamente com a abertura de bioporos pelas raízes, constituem-se na justificativa mais provável para que o

aumento da porosidade total tenha se relacionado ao incremento no volume de macroporos, conforme evidenciado pelos dados da Tabela 8.

O grau de compactação do solo, independentemente da época de avaliação, foi menor em relação ao início do experimento também para o pousio e para a camada inferior, onde não houve aumentos substanciais no teor de MOS e de suas respectivas frações. Isto evidencia que a recuperação física deveu-se também a outros fatores, como a resiliência do solo, definida como a capacidade que o mesmo apresenta em recuperar naturalmente a sua integridade funcional e estrutural após um distúrbio (Kuan et al., 2007). Entre os fatores responsáveis pela resiliência física do solo, merecem destaque os ciclos de secamento e umedecimento, os quais proporcionam a contração/expansão da matriz do solo, especialmente naqueles com algum teor de argila, mesmo não expansiva (Dexter, 1991), como é o caso do Argissolo estudado. Este processo resulta na formação de fendas e fissuras, além de aproximar as partículas do solo o que, na presença de agentes ligantes orgânicos ou inorgânicos, propicia a formação e estabilização de agregados (Dexter, 1988). Além disso, a redução no grau de compactação pode ser atribuída ao provável efeito dos resíduos culturais e do sistema radicular do milho e da soja na superfície do solo, bem como da abertura de bioporos pelas raízes das coberturas de inverno e culturas de verão na camada de 0,12-0,15 m.

Uma das hipóteses que norteiam a presente pesquisa engloba o aumento da eficiência das plantas de cobertura de inverno na redução do grau de compactação do solo, quando do uso de maiores profundidades de atuação da haste sulcadora, durante a semeadura das culturas de verão. Os efeitos da profundidade de atuação das hastes sobre a RP, para as três épocas avaliadas, são apresentadas nas Figuras 7a a 7d. Cabe salientar que os dados utilizados para a construção destes gráficos representam médias entre todas as leituras realizadas em cada época, independentemente da condição de tráfego ou na posição em relação à zona mobilizada pela linha de semeadura das culturas de verão. Verifica-se que, em outubro/2005, a RP não foi afetada significativamente pela profundidade de atuação das hastes, o que pode ser justificado pelo fato de a semeadura das culturas de verão não ter sido realizada na safra 2004/05. Porém, em junho/2006, a RP foi menor quando as

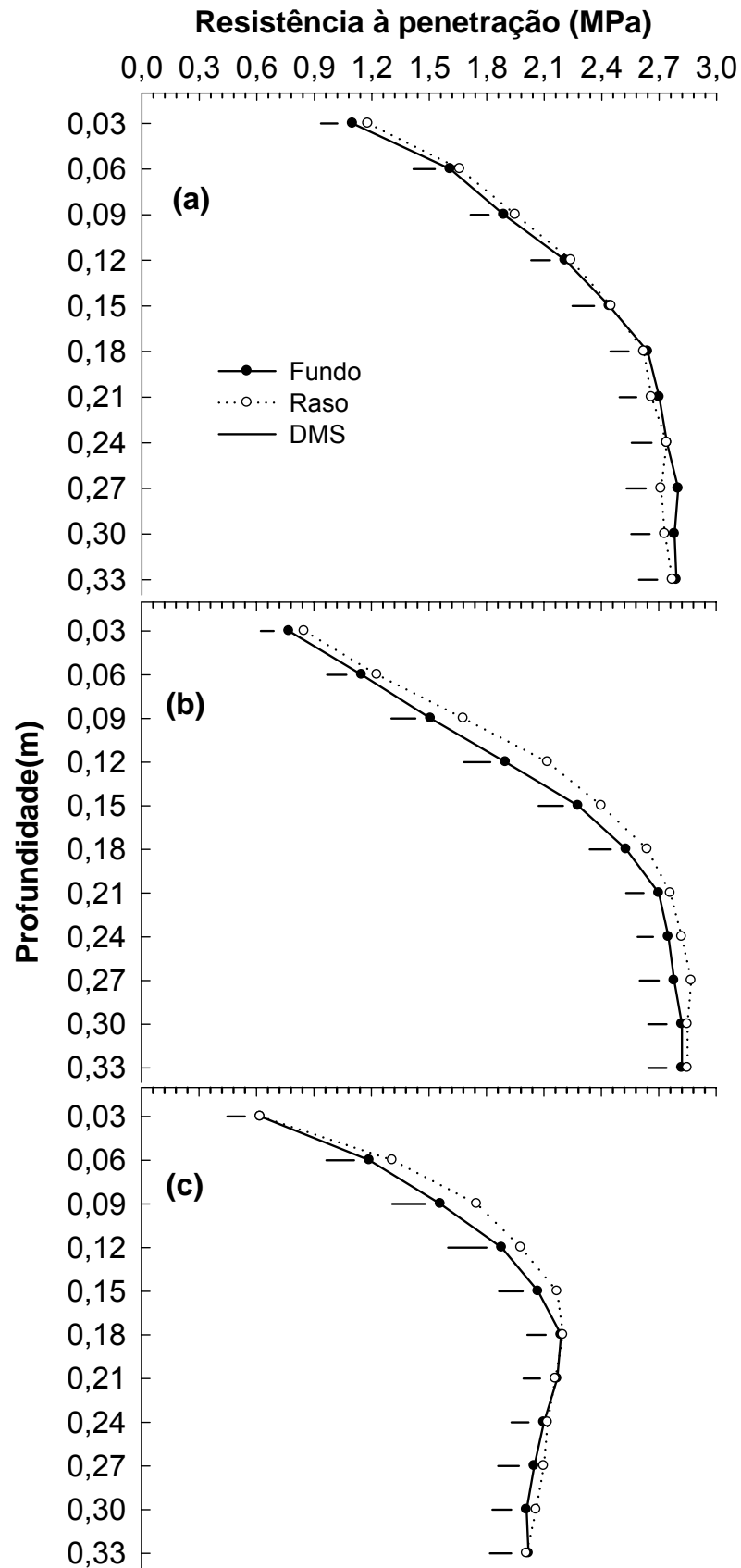


Figura 7. Resistência do solo à penetração em função da profundidade de deposição do adubo, nas avaliações realizadas em outubro/2005 (a), junho/2006 (b) e maio/2007 (c). DMS = diferença mínima significativa (teste de Duncan, $p < 0,05$).

hastes atuaram na posição “profundo”, o que foi significativo até a profundidade de 0,12 m. Na avaliação executada em maio/2007, os maiores valores de RP continuaram sendo observados nas parcelas onde a haste atuou na profundidade teórica de 0,06 m. No entanto, as diferenças foram significativas apenas para a RP medida na profundidade de 0,09 m, o que se deveu à elevada variabilidade dos dados nesta avaliação (Apêndice 9). No geral, houve uma tendência de os valores de RP serem inferiores quando a haste sulcadora foi regulada para atuar na posição “fundo”, confirmando assim que as hastes sulcadoras para a deposição do adubo, trabalhando a maiores profundidades, aceleram o processo de recuperação física de um solo através de plantas de cobertura de inverno. Reduções no grau de compactação do solo, quando do emprego de hastes sulcadoras de adubo para a semeadura das culturas de verão, também foram observadas por Mello et al. (2002) e Reis et al. (2006).

A ausência de tráfego de rodados é outra medida que pode acelerar a recuperação física de um solo com elevado grau de compactação inicial através do emprego de culturas de cobertura de inverno. Esta afirmação é comprovada pelos resultados apresentados na Tabela 10. Observa-se que, na camada de 0,03-0,06 m, a densidade do solo foi maior e a porosidade total foi menor nas áreas trafegadas por rodados de trator comparativamente às não trafegadas. A redução da porosidade total e, em consequência, o aumento da densidade do solo, em função do tráfego, podem ser atribuídos à diminuição no volume de macroporos, haja vista que a microporosidade não foi afetada. Reduções no volume de macroporos em virtude do tráfego, enquanto o de microporos permaneceu inalterado ou até mesmo aumentou, foram também detectadas nos trabalhos realizados por Tormena et al. (1998), Schäffer et al. (2007) e Tarawally et al. (2004). Na camada de 0,12-0,15 m, o tráfego de rodados de trator não afetou significativamente a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade.

Até novembro/2006, foram realizados cinco tráfegos de rodados de trator no pousio e sete nas parcelas ocupadas por plantas de cobertura de inverno, sob um teor de água que variou de 0,16 a 0,20 kg kg⁻¹ (0,18 kg kg⁻¹, em média) na camada de 0,0-0,15 m. Isto significa que o tráfego sempre foi realizado com o solo na consistência plástica (limite de plasticidade igual a 0,14 kg kg⁻¹), situação em que apresenta uma elevada suscetibilidade à

compactação (Hamza & Anderson, 2005). Diante disso, o impacto do tráfego sobre a densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade, tanto em termos de magnitude, quanto da profundidade atingida, parece ser pequeno. Contudo, deve-se atentar para o fato de as propriedades físicas exibidas na Tabela 10, principalmente a densidade do solo e porosidade total, constituírem-se em variáveis pouco sensíveis aos efeitos do tráfego, de modo que, em alguns casos, as pressões exercidas pelos rodados não as modificam (Schäffer et al., 2007). Xavier (2005) também obteve pequeno aumento na densidade do solo, após a realização de sete tráfegos com o mesmo trator empregado no presente trabalho.

Tabela 10. Densidade, porosidade total, macro e microporosidade do solo, avaliadas em novembro de 2006 e na área sob semeadura direta, afetadas pelo tráfego de rodados de trator.

| Camada | Tráfego | Densidade do solo | Porosidade | | |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| | | | Total | Macro | Micro |
| --- m --- | | -- Mg m ⁻³ -- | ----- | m ³ m ⁻³ | ----- |
| 0,03-0,06 | Sem | 1,34 b | 0,48 a | 0,21 a | 0,27 a |
| | Com | 1,43 a | 0,44 b | 0,17 b | 0,27 a |
| | Média | 1,38 | 0,46 | 0,19 | 0,27 |
| 0,12-0,15 | Sem | 1,59 a | 0,37 a | 0,11 a | 0,26 a |
| | Com | 1,60 a | 0,37 a | 0,10 a | 0,27 a |
| | Média | 1,60 | 0,37 | 0,10 | 0,27 |

CV densidade: coberturas de inverno = 4,8%; tráfego = 2,6%; camada = 3,3%. CV porosidade total: coberturas de inverno = 5,6%; tráfego = 8,2%; camada = 5,3%. CV macroporosidade: coberturas de inverno = 20,9%; tráfego = 22,3%; camada = 17,4%. CV microporosidade: coberturas de inverno = 6,4%; tráfego = 3,6%; camada = 5,6%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula no sentido das colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Os efeitos do tráfego sobre o grau de compactação do solo tornam-se mais evidentes quando se utiliza como indicador a RP (Figura 8), comprovando que este parâmetro é mais sensível a modificações na estrutura do solo comparativamente à densidade e porosidade (Abreu et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006b). De acordo com esta Figura, nota-se que, independentemente da cobertura de inverno, da época de avaliação e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo, os valores de RP foram maiores nas áreas submetidas ao tráfego comparativamente às não trafegadas, o que foi significativo até a profundidade de 0,24 m. Verifica-se

ainda que a RP atinge o valor “crítico” de 2 MPa a 0,09 m nas zonas submetidas ao tráfego de rodados de trator, enquanto que, nas áreas não trafegadas, isto somente ocorre a uma profundidade de 0,15 m. Em geral, os efeitos negativos do tráfego têm alcançado maiores profundidades (Jorajuria & Dragui, 1997; Botta et al., 2004; Tarawally et al. 2004; Botta et al., 2006b). A maior carga sobre o eixo e/ou o maior número de passadas utilizadas nas referidas pesquisas são os principais fatores que justificam o aumento do grau de compactação em camadas mais profundas comparativamente ao presente trabalho.

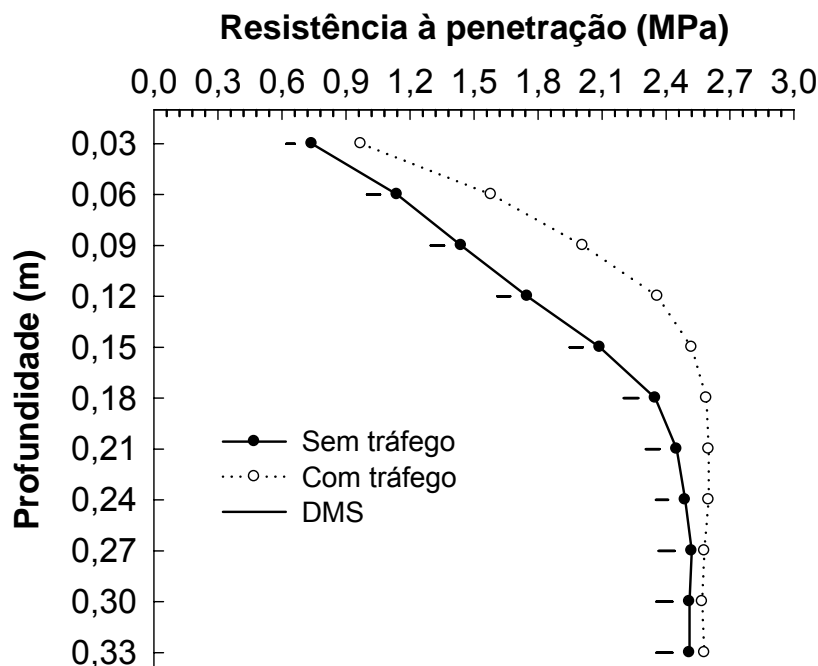


Figura 8. Resistência do solo à penetração, em função do tráfego de rodados de trator. DMS = diferença mínima significativa (Duncan, $p < 0,05$).

As maiores diferenças em função do tráfego de rodados de trator foram detectadas na camada de 0,09-0,15 m, onde a RP nas áreas trafegadas foi, em média, 540 kPa (32%) maior do que nas regiões não trafegadas (Figura 8). Estes resultados corroboram com os obtidos por Silva (2003b) e Genro Junior et al. (2004), que atribuíram o maior grau de compactação observado a 0,10-0,15 m de profundidade em áreas sob semeadura direta à concentração das tensões aplicadas pelos rodados das máquinas nessa camada. Da mesma forma, Hillel (1982) assinala que as tensões aplicadas pelos rodados tendem a se concentrar a uma profundidade equivalente a 1/3 a 1/5 da largura dos pneus. Como os pneus do trator utilizado neste trabalho apresentavam 0,47 m

de largura, a maior compactação deveria ser observada na camada de 0,09-0,15 m, o que acabou se confirmando.

A interação coberturas de inverno x condição de tráfego não foi significativa para nenhuma das propriedades físicas estudadas, inclusive para a RP. Dessa maneira, o menor grau de compactação proporcionado pelas plantas de cobertura de inverno em relação ao pousio, considerando as zonas trafegadas, foi mantido nas áreas onde o tráfego não foi realizado. Isto ocorreu mesmo com o número de tráfegos sendo maior para as plantas de cobertura de inverno e com a capacidade de suporte do solo, estimada pela tensão de pré-consolidação (σ_p), sendo mais elevada para o pousio (vide Estudo II, capítulo 5). Uma das justificativas para este comportamento engloba a maior elasticidade da MOS em comparação às partículas minerais do solo (Soane, 1990). A elasticidade da MOS é tanto maior quanto menor for o seu grau de decomposição. Estudos envolvendo a compressão uniaxial de amostras de solo têm comprovado que a recuperação do volume do solo (relaxação) após o descarregamento é mais acentuada em solos caracterizados por um maior teor de MOS (Braidá, 2004; Kuan et al., 2007). Assim, o maior teor de MOP proporcionado pelas plantas de cobertura de inverno (Tabela 5, item 4.3.2) pode ter aumentado a elasticidade da matriz do solo e, deste modo, permitido que o mesmo recuperasse parte da porosidade após a passagem do rodado. Outro fator que pode ajudar a explicar estes resultados é a maior quantidade de resíduos presentes na superfície do solo das parcelas ocupadas por culturas de cobertura, aos quais tem sido atribuída a propriedade de dissipar a energia responsável pela compactação, conforme detectado em condições de laboratório por Braidá (2004). Em nível de campo, a capacidade de resíduos florestais em dissipar parte da pressão aplicada pelos rodados de um "Forwarder" foi evidenciada por Silva et al. (2007). No entanto, a maioria dos trabalhos não tem confirmado esta tendência (Gupta et al., 1987; Ess et al., 1998; Cepik, 2006).

4.3.3.2 Escarificação

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram, em primeiro lugar, que a escarificação diminuiu a densidade do solo e aumentou a

Tabela 11. Densidade, porosidade total, macro e microporosidade do solo, avaliadas antes e depois da escarificação, em função do tráfego de rodados de trator, das coberturas de inverno e da camada estudada.

| Tratamento | Densidade (Mg m ⁻³) | | | Porosidade (m ³ m ⁻³) | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| | AEsc ¹ | DEsc ² | | Aesc | Total | | Macroporosidade | | | Microporosidade | | |
| | | ST ³ | CT ⁴ | | ST | CT | Aesc | DEsc | | AEsc | DEsc | |
| | | | | | | | | ST | CT | | ST | CT |
| ----- 0,03-0,06 m ----- | | | | | | | | | | | | |
| Nabo | - | 1,12 a | 1,32 a | - | 0,53 a | 0,47 a | - | 0,30 a | 0,22 a | - | 0,23 a | 0,25 a |
| Aveia preta | - | 1,24 a | 1,37 a | - | 0,50 a | 0,47 a | - | 0,25 a | 0,21 a | - | 0,25 a | 0,26 a |
| Média | 1,45 A | 1,18 C | 1,34 B | 0,43 C | 0,52 A | 0,47B | 0,16 C | 0,28 A | 0,22 B | 0,27 A | 0,24 B | 0,25 B |
| ----- 0,12-0,15 m ----- | | | | | | | | | | | | |
| Nabo | - | 1,43 a | 1,51 a | - | 0,43 a | 0,41 a | - | 0,19 a | 0,14 a | - | 0,24 a | 0,26 a |
| Aveia preta | - | 1,35 a | 1,53 a | - | 0,46 a | 0,40 a | - | 0,22 a | 0,13 a | - | 0,24 a | 0,26 a |
| Média | 1,60 A | 1,39 C | 1,52 B | 0,37 C | 0,44 A | 0,40 B | 0,10 C | 0,20 A | 0,14 B | 0,26 A | 0,24 B | 0,26 A |

¹ AEsc = antes da escarificação; ² DEsc = depois da escarificação; ³ ST = área sem tráfego; ⁴ CT = área com tráfego; ⁵ Médias englobando todas as coberturas de inverno e culturas de verão antecessoras à avaliação. CV densidade: coberturas = 8,8%; tráfego = 3,0%. CV porosidade total: coberturas = 11,8%; tráfego = 6,1%. CV macroporosidade: coberturas = 17,4%; tráfego = 22,9%. CV microporosidade: coberturas = 10,2%; tráfego = 9,0%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Duncan (p>0,05). Nas linhas, médias seguidas pela mesma letra maiúscula dentro de uma mesma variável não diferem significativamente pelo teste de Duncan (p>0,05) quando se compara os tratamentos ST e CT, e pelo teste t (p>0,05) para a comparação antes (AEsc) e após a escarificação (DEsc).

porosidade total, o que foi observado tanto na camada de 0,03-0,06 m quanto na de 0,12-0,15 m. Tal fato ocorreu mesmo considerando que a avaliação foi realizada cinco meses após a escarificação. Reduções na densidade do solo, com o conseqüente aumento na porosidade total, em virtude da escarificação, têm sido encontradas em diversos trabalhos de pesquisa (Secco & Reinert, 1997; Corsini & Ferraudo, 1999; Pikul Junior & Aase, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002; Tavares-Filho et al., 2006; Klein & Camara, 2007). O incremento da porosidade total deveu-se ao aumento no volume de macroporos, uma vez que o de microporos foi diminuído pela escarificação, o que corrobora com os resultados obtidos por Secco & Reinert (1997), Corsini & Ferraudo (1999) e Hamilton-Manns et al. (2002). Verifica-se ainda que, para ambas as camadas e condições de tráfego estudadas, a densidade do solo e a porosidade total, bem como o volume de macro e de microporos, não foram influenciados de forma significativa pelas plantas de cobertura de inverno. Assim, o nabo forrageiro e a aveia preta não se diferenciaram com relação à capacidade de estabilizar a estrutura formada pela escarificação. O sistema radicular fasciculado das gramíneas tem sido reconhecido pela maior eficiência na estabilização dos agregados, comparativamente a plantas com raízes pivotantes, como leguminosas e brassicáceas (Chan & Heenan, 1996), devido a sua maior massa e densidade e, conseqüentemente, maior rizodeposição e estímulo à atividade microbiana (Haynes & Beare, 1996). Isto não se confirmou neste trabalho o que, provavelmente, esteja relacionado ao curto espaço de tempo (cinco meses) decorrido entre a escarificação e a avaliação das propriedades físicas.

Os dados de RP medidos antes (junho/2006) e após (novembro/2006) a escarificação são apresentados na Figura 9. Os valores do coeficiente de variação, por sua vez, encontram-se no Apêndice 10. Nota-se que a escarificação, mesmo quando se considera a zona submetida ao tráfego de rodados de trator, diminuiu a RP, o que foi significativo até 0,33 m de profundidade. A exceção ocorreu para a profundidade de 0,03 m, onde as diferenças entre antes e após a escarificação na área trafegada não se mostraram significativas. Além do efeito do tráfego, outra justificativa para as pequenas diferenças a 0,03 m de profundidade relaciona-se ao teor de água no momento da determinação da RP, que foi maior em junho comparativamente a

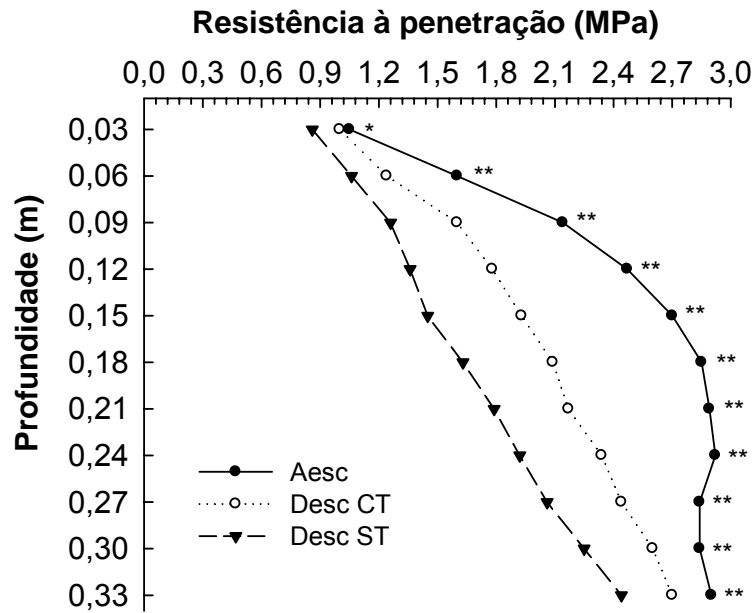


Figura 9. Comparação dos valores de resistência do solo à penetração obtidos antes (Aesc) com os determinados após a escarificação (novembro/2006) nas regiões trafegadas (Desc CT) e não trafegadas (Desc ST). ** = contrastes Aesc x Desc CT e Aesc x Desc ST significativos (teste t, $p < 0,05$); * = diferenças significativas apenas para o contraste Aesc x Desc ST, conforme o mesmo teste.

novembro/2006, para a camada de 0,0-0,06 m (Tabela 12). É importante destacar também que, em qualquer condição, a interpretação dos valores de RP a 0,03 m é prejudicada, em virtude de a falha proporcionada pelo deslocamento do cone, nessa profundidade, não ser totalmente confinada. Nas camadas de 0,06-0,12 e 0,12-0,18 m, o teor de água não diferiu entre essas duas épocas de avaliação, comprovando que a menor RP após a escarificação deve-se, realmente, ao menor grau de compactação proporcionado por esta operação. Menores valores de RP, decorrentes da mobilização do solo através da escarificação, foram também obtidos por diversos autores (Pikul Junior & Aase, 1999; Levien, 1999; Furlani, 2000; Hamilton-Manns et al., 2002; Secco, 2003; Abreu et al., 2004; Secco et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006a; Veiga et al., 2007). Da mesma forma que para as demais propriedades físicas quantificadas (Tabela 11), as plantas de cobertura de inverno não modificaram de maneira significativa os valores de RP, independentemente da condição de tráfego e da profundidade considerada. A constatação de que a escarificação diminuiu o grau de compactação até 0,33 m não condiz com a profundidade de atuação do escarificador (0,27 m). Tal fato possivelmente

esteja relacionado a variações no teor de água por ocasião determinação da RP antes e após a escarificação, nessa profundidade.

Tabela 12. Teor gravimétrico de água do solo no momento da determinação da resistência do à penetração na área escarificada, em função das coberturas de inverno e da camada e época de avaliação.

| Tratamento | Camada (m) | | | Média |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0,00-0,06 | 0,06-0,12 | 0,12-0,18 | |
| ----- <i>kg kg⁻¹</i> ----- | | | | |
| ----- <i>Coberturas de inverno</i> ----- | | | | |
| Nabo forrageiro | 0,18 a | 0,16 a | 0,16 a | 0,17 |
| Aveia preta | 0,15 b | 0,15 a | 0,15 a | 0,15 |
| ----- <i>Época de avaliação</i> ----- | | | | |
| Junho/2006 | 0,18 a | 0,15 a | 0,14 b | 0,16 a |
| Novembro/2006 | 0,14 b | 0,16 a | 0,17 a | 0,16 a |
| Maió/2007 | 0,18 a | 0,16 a | 0,15 ab | 0,16 a |
| Média | 0,17 A | 0,16 A | 0,15 A | 0,16 |

CV coberturas = 19,9%; CV camadas = 5,9%; CV épocas = 7,9%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, ambas considerando um mesmo fator (cobertura ou época), não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

A RP foi determinada também em maio/2007 e os resultados desta avaliação em comparação à efetuada em novembro/2006 são mostrados na Figura 10a. Observa-se que, em todas as profundidades avaliadas, a RP foi significativamente menor em maio/2007 do que em novembro/2006. Ao contrário destes resultados, esperava-se um aumento na RP de novembro/2006 a maio/2007, principalmente levando-se em consideração que a comparação exibida na Figura 10a engloba tanto as áreas trafegadas, quanto as não trafegadas. Enquanto que em novembro/2006 havia sido realizado um tráfego, em maio/2007, as zonas trafegadas já haviam sido submetidas a duas passagens dos rodados do trator. Além disso, o teor de água no momento da determinação da RP foi superior em maio/2007 apenas na camada de 0,0-0,06 m (Tabela 12), indicando que esse fator não pode explicar o comportamento anteriormente evidenciado para profundidades superiores a 0,06 m. A provável justificativa para estes resultados engloba o fato de que, conforme já discutido

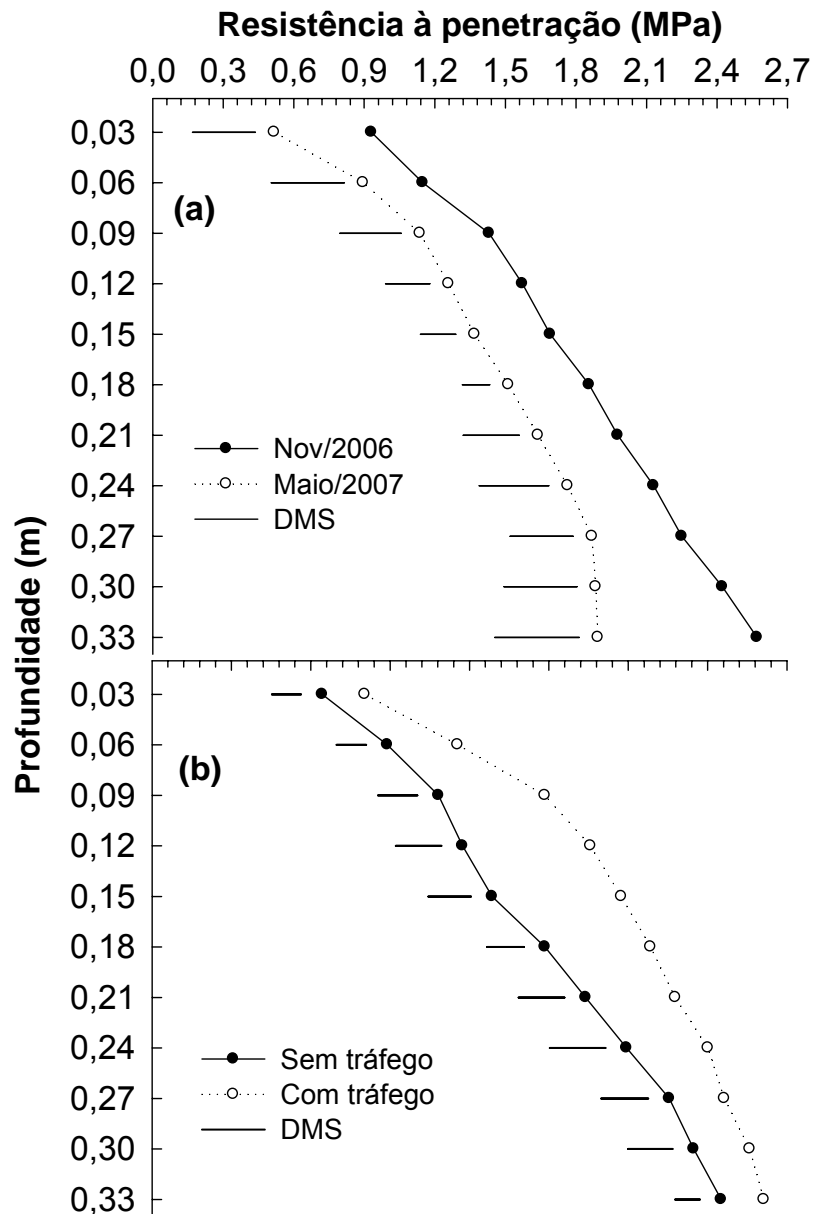


Figura 10. Resistência do solo à penetração na área escarificada, em função das épocas de avaliação (a) e do tráfego de rodados de trator (b). DMS = diferença mínima significativa (Duncan, $p < 0,05$).

no item 4.3.3.1, o penetrômetro utilizado em maio/2007 não foi o mesmo empregado nas demais avaliações. Embora as características construtivas de ambos os equipamentos tenham obedecido às indicações preconizadas pela norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004), possivelmente tenham ocorrido diferenças na calibração entre os dois equipamentos. Tal suposição é reforçada pelo paralelismo entre as curvas que representam a variação da RP com a profundidade para a avaliação realizada em novembro/2006 e maio/2007 (Figura 10a). O paralelismo das curvas exibidas na Figura 10a evidencia ainda

que, embora os penetrômetros tenham diferido em termos dos valores absolutos de RP, a resposta desta variável às diferenças nas características do solo não foi afetada pelos equipamentos, possibilitando, assim, a comparação entre os tratamentos.

Os resultados expostos na Tabela 11 indicam ainda que a realização de um único tráfego de rodados de trator, sob um teor de água equivalente a $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$ (0,0-0,15 m), não foi suficiente para reverter totalmente a diminuição do grau de compactação ocasionada pela escarificação, o que havia sido detectado por Chan et al. (2006). Entretanto, um único tráfego foi suficiente para aumentar significativamente o grau de compactação do solo em relação à área não trafegada, em ambas as camadas avaliadas. Neste sentido, a diferença na densidade do solo (0,03-0,06 m) entre antes e após a escarificação, que era de $0,27 \text{ Mg m}^{-3}$, passou a ser de $0,11 \text{ Mg m}^{-3}$ após o tráfego. Isto significa que uma única passagem dos rodados de um trator leve foi suficiente para reverter 40% da diminuição na densidade do solo ocasionada pela escarificação. Tendência semelhante foi observada na camada de 0,12-0,15 m. Para a macroporosidade, o efeito do tráfego foi ainda mais pronunciado. Seguindo o mesmo raciocínio executado para a densidade do solo, uma única passada do trator reverteu 50% do aumento ocasionado na macroporosidade pelo tráfego. Diante dessas inferências, é muito provável que a realização de mais um tráfego iguale o grau de compactação após a escarificação àquele observado antes desta operação. Veiga et al. (2007), trabalhando em um Nitossolo muito argiloso, concluíram que a realização de dois tráfegos, mediante o uso de um trator com massa sobre o eixo semelhante ao utilizado na presente pesquisa, foi suficiente para igualar a RP medida na área escarificada à obtida na sob semeadura direta.

Os efeitos do tráfego de rodados de trator evidenciados pelos resultados da Tabela 11 são confirmados quando se analisa a RP (Figura 9). À exceção da profundidade de 0,03 m, a passagem do trator por uma única vez não reverteu totalmente a diminuição da RP proporcionada pela escarificação, o que foi verdadeiro para todas as demais profundidades avaliadas (até 0,33 m). Por outro lado, observa-se que a RP após a escarificação foi maior nas áreas submetidas a um tráfego em relação às não trafegadas, o que foi estatisticamente significativo até a profundidade de 0,33 m. Este

comportamento mantém-se quando se considera a avaliação executada em maio de 2007, em conjunto com a de novembro/2006 (Figura 10b). Em condições de semeadura direta, a maior RP em virtude de vários tráfegos foi significativa até 0,24 m (Figura 8, item 4.3.3.1). A eliminação de camadas compactadas em subsuperfície, as quais tendem a confinar as tensões aplicadas pelos rodados das máquinas agrícolas a profundidades menores (Spoor et al., 2003), aliada ao aumento no fator de concentração das cargas na área abaixo do pneu em solos soltos (Chancellor, 1994), resultam na propagação das tensões a maiores profundidades. Essas afirmações foram comprovadas por Veiga et al. (2007), que encontraram que as tensões aplicadas pelos rodados de um trator leve propagaram-se a maiores profundidades na área escarificada em comparação com a sob semeadura direta.

É importante considerar ainda que a interação tráfego x plantas de cobertura de inverno, para todas as propriedades físicas avaliadas, não foi significativa também para a área escarificada. Isto significa que as modificações estruturais impostas pelo tráfego de rodados de trator não foram alteradas em função da cobertura de inverno utilizada.

4.3.3.3 Comparação entre a área sob semeadura direta e escarificada

Independentemente da condição de tráfego, os dados apresentados na Tabela 13 demonstram que, mesmo decorridos cinco meses da sua execução, a escarificação, quando comparada à semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, resultou em menores valores de densidade do solo e microporosidade e maiores de porosidade total e macroporosidade. Essas diferenças foram observadas em ambas as camadas avaliadas, porém foram mais pronunciadas na de 0,12-0,15 m. Por exemplo, a macroporosidade a 0,03-0,06 m de profundidade foi 25% maior na área submetida à escarificação comparativamente à sob semeadura direta, valor este que sobe para 70% quando se considera a camada de 0,12-0,15 m.

Por outro lado, os dados da Tabela 14 indicam que, na camada correspondente a 0,03-0,06 m de profundidade, não houve diferenças

Tabela 13. Comparação dos valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade obtidos na área escarificada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, independentemente da condição de tráfego (novembro/2006).

| Variável | Camada (m) | Sistema de preparo | |
|---|------------|--------------------|------------------|
| | | Escarificação | Semeadura direta |
| Densidade do solo (Mg m^{-3}) | 0,0-0,03 | 1,26 B | 1,35 A |
| | 0,12-0,15 | 1,45 B | 1,59 A |
| Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,49 A | 0,46 B |
| | 0,12-0,15 | 0,42 A | 0,37 B |
| Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,25 A | 0,20 B |
| | 0,12-0,15 | 0,17 A | 0,10 B |
| Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,24 B | 0,26 A |
| | 0,12-0,15 | 0,25 B | 0,27 A |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste t ($p > 0,05$).

significativas para a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade entre as zonas submetidas ao tráfego de rodados de trator das parcelas escarificadas e as não trafegadas da área sob semeadura direta. Na camada de 0,12-0,15 m, a densidade do solo continuou sendo menor e a porosidade total e macroporosidade maiores na área escarificada e trafegada do que na área conduzida em semeadura direta e sem tráfego. A microporosidade não diferiu entre estes tratamentos mesmo a 0,12-0,15 m de profundidade. Portanto, estes resultados permitem inferir que a realização de apenas um tráfego de rodados de trator, mesmo apresentando uma carga por eixo relativamente baixa, foi o suficiente para que o grau de compactação do bloco escarificado se igualasse ao das regiões não trafegadas das parcelas manejadas sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno. Isto evidencia novamente a importância do controle do tráfego para que os efeitos da escarificação persistam por um período de tempo mais longo. É importante considerar ainda que, possivelmente, a geometria dos poros entre essas duas condições seja diferente, predominando, na semeadura direta, poros mais longos e contínuos comparativamente à área escarificada e com tráfego, devido à mobilização do solo nesse último tratamento. Prejuízos à continuidade

dos poros em áreas submetidas à escarificação, comparativamente à semeadura direta, foram inferidos nos trabalhos realizados por Abreu et al. (2004) e Bhattacharyya et al. (2006).

Tabela 14. Comparação dos valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade obtidos na área escarificada e trafegada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno e sem tráfego (novembro/2006).

| Variável | Camada (m) | Tratamento | |
|---|------------|---------------------------|------------------------------|
| | | Escarificação com tráfego | Semeadura direta sem tráfego |
| Densidade do solo (Mg m^{-3}) | 0,0-0,03 | 1,34 A | 1,30 A |
| | 0,12-0,15 | 1,52 B | 1,59 A |
| Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,47 A | 0,48 A |
| | 0,12-0,15 | 0,40 A | 0,37 B |
| Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,22 A | 0,22 A |
| | 0,12-0,15 | 0,14 A | 0,10 B |
| Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) | 0,0-0,03 | 0,25 A | 0,26 A |
| | 0,12-0,15 | 0,26 A | 0,27 A |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste t ($p>0,05$).

A comparação entre os valores de RP, medidos em maio/2007, nas áreas escarificada e sob semeadura direta, é apresentada nas Figuras 11a e 11b. O teor de água durante a determinação da RP não diferiu entre as parcelas que foram escarificadas (Tabela 12) e aquelas sob semeadura direta (Tabela 9), considerando a camada de 0,0-0,18 m. Desse modo, as diferenças encontradas na RP entre esses tratamentos podem ser atribuídas a modificações ocasionadas pelos mesmos na estrutura do solo. Na Figura 11a, a comparação entre os sistemas de preparo é realizada considerando tanto as áreas trafegadas quanto as não trafegadas. Verifica-se que a RP foi significativamente maior nas áreas sob semeadura direta do que nas escarificadas, o que foi significativo para a camada localizada entre 0,06 e 0,27 m. As diferenças na RP entre os sistemas de preparo, na profundidade de 0,03 m, não se mostraram significativas. Este fato, no entanto, não pode ser atribuído ao tráfego, tendo em vista que a RP a 0,03 m de profundidade,

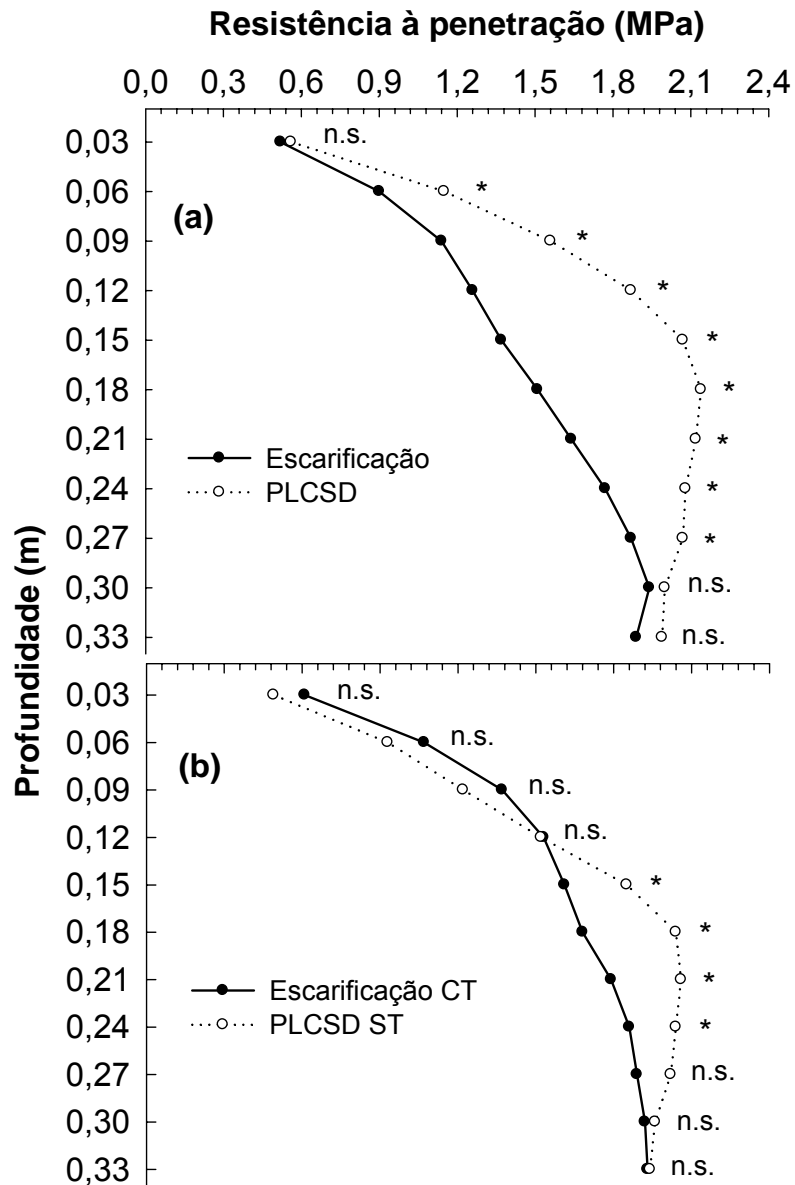


Figura 11. Comparação entre os valores de resistência do solo à penetração (maio/2007) obtidos na área escarificada e sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), em ambas as condições de tráfego (a), bem como entre a área escarificada trafegada - CT e sob PLCSD não trafegada - ST (b). * = diferenças significativas pelo teste t ($p < 0,05$); n.s. = diferenças não significativas, pelo mesmo teste.

mesmo quando se considera exclusivamente as áreas não trafegadas, continuou sendo igual entre a semeadura direta e a escarificação (dados não mostrados). Portanto, o uso de plantas de cobertura de inverno e a mobilização efetuada pelos mecanismos sulcadores durante a semeadura das culturas de verão, resultaram em diferenças no grau de compactação entre os sistemas de

preparo que foram muito pequenas na profundidade de 0,03 m. Além disso, é importante salientar, novamente, que a interpretação dos valores de RP a 0,03 m é prejudicada, em virtude de a falha proporcionada pelo deslocamento do cone, nessa profundidade, não ser totalmente confinada. Camara & Klein (2005b) também obtiveram que o grau de compactação a 0,025 m de profundidade assemelhou-se entre a semeadura direta e a escarificação.

De acordo com a Figura 11b, observa-se que a RP determinada nas áreas trafegadas das parcelas submetidas à escarificação não foi diferente da obtida nas zonas não trafegadas das parcelas sob semeadura direta com plantas de cobertura, até 0,12 m de profundidade, mesmo considerando o fato de a umidade do solo nesse tratamento ter sido inferior (camada de 0,0-0,06 m) ou igual (camadas de 0,06-0,12 e 0,12-0,18 m) à área escarificada (Tabelas 9 e 12). Cabe destacar que, em maio/2007, a área escarificada já havia sido submetida a um segundo tráfego de rodados de trator, realizado durante a semeadura das culturas de verão safra 2006/2007. Assim, a RP das áreas escarificadas e trafegadas assemelhou-se a das não trafegadas em semeadura direta até uma profundidade maior comparativamente às demais propriedades físicas, que foram determinadas quando havia sido realizado apenas um tráfego nas parcelas submetidas à escarificação (Tabela 13). O aumento da RP na área escarificada até a profundidade de 0,33 m, devido ao tráfego de rodados de trator (Figura 10b, item 4.3.3.2), aliado à manutenção, no caso da semeadura direta não trafegada, de valores constantes para essa variável em camadas inferiores a 0,18 m (Figura 4c, item 4.3.3.2), fez com que as diferenças entre os sistemas de preparo diminuíssem a partir dessa profundidade (Figura 11b). Desse modo, após dois tráfegos, a RP a 0,27 m também não diferiu entre a área escarificada e trafegada e a sob semeadura direta sem tráfego. Na camada de 0,15-0,24 m, a RP foi maior na semeadura direta sem tráfego comparativamente à escarificação com tráfego (Figura 11b). Tal fato ocorreu devido ao elevado grau de compactação para a semeadura direta nessa profundidade, o que foi observado mesmo nas regiões não submetidas ao tráfego de rodados de trator.

4.4 Conclusões

As plantas de cobertura de inverno (aveia preta e aveia preta+ervilhaca) reduziram o grau de compactação na superfície (0,0-0,1 m) do Argissolo estudado, o que se deveu principalmente ao aumento no teor de matéria orgânica particulada e à ação do sistema radicular das mesmas. Após quatro anos de condução do experimento, os indicadores do estado de compactação, na superfície do solo dos tratamentos envolvendo culturas de cobertura de inverno, atingiram valores que, de acordo com o conhecimento atual, não são restritivos ao crescimento das plantas.

O nabo forrageiro, em substituição ao consórcio aveia preta+ervilhaca, apresentou um grande potencial em reduzir o grau de compactação do Argissolo estudado, inclusive a profundidades maiores do que as demais plantas de cobertura estudadas.

A ausência de tráfego, aliada ao aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura das culturas de verão, potencializou a recuperação física do Argissolo, independentemente da cobertura de inverno utilizada.

A escarificação diminuiu o grau de compactação de forma imediata em relação às plantas de cobertura de inverno, o que foi mais pronunciado em profundidades maiores que 0,12 m. Porém, a realização de um tráfego de rodados de trator (pressão de contato de aproximadamente 120 kPa) foi o suficiente para igualar os valores de densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, medidos na área escarificada, aos obtidos sob semeadura direta sem tráfego e com plantas de cobertura de inverno, considerando a camada de 0,0-0,03 m. Dois tráfegos na área escarificada tornaram a RP desse tratamento igual à medida nas parcelas conduzidas sob semeadura direta não trafegada, até 0,12 m de profundidade, evidenciando que a manutenção dos efeitos da escarificação por maiores períodos de tempo requer a adoção do tráfego controlado.

5. ESTUDO II: CAPACIDADE DE SUPORTE E COMPRESSIBILIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO

5.1 Introdução

A compactação tem sido reconhecida como uma das principais causas da perda da qualidade física do solo, ocasionando prejuízos de ordem econômica e ambiental (Lipiec et al., 2003). Ao mesmo tempo, a recuperação física de solos com elevado grau de compactação é difícil, envolvendo a adoção de práticas nem sempre eficientes e que, via de regra, são econômica e energeticamente dispendiosas (Spoor et al., 2003). Não resta dúvida de que a melhor alternativa envolve a adoção de medidas que previnam a ocorrência deste processo. A compactação do solo somente ocorre quando a tensão efetiva, produzida pela aplicação de uma carga na sua superfície, ultrapassar a resistência ao cisalhamento existente nos pontos de contato entre as partículas, provocando a movimentação e acomodação das mesmas (Braidá, 2004). Desse modo, a estratégia mais eficaz para evitar o desenvolvimento de camadas compactadas envolve a aplicação de tensões externas que não excedam a capacidade de suporte do solo (Alakuku et al., 2003), a qual pode ser estimada pela tensão de pré-consolidação - σ_p (Dias Junior & Pierce, 1996).

A σ_p é obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona o índice de vazios ao logaritmo da carga aplicada. Em solos já submetidos a tensões externas, a curva de compressão apresenta um formato curvilíneo, podendo a mesma ser dividida em dois segmentos, um curvo e outro reto (Lebert & Horn, 1991). As deformações que ocorrem no segmento curvo, denominado de curva de compressão secundária, são elásticas (reversíveis), enquanto que as que ocorrem na porção linear, chamado de reta de

compressão virgem, são plásticas (irreversíveis). A σ_p é a tensão que separa esses dois segmentos sendo, portanto, um indicador da máxima carga e/ou tensão de água mais negativa ao qual o solo foi submetido (Veiga et al., 2007). A tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem corresponde ao índice de compressibilidade (IC), que reflete a suscetibilidade do solo à compactação.

Os fatores que controlam a magnitude da σ_p e do IC são relativamente bem conhecidos, englobando a densidade inicial e os teores de água e de argila (Imhoff, 2002), bem como a estrutura do solo (Rücknagel et al., 2007; Veiga et al., 2007). De grande interesse prático, no entanto, é o efeito exercido pelo teor de água do solo sobre a σ_p . A relação σ_p x teor de água do solo têm sido estabelecida para diferentes solos e sistemas de manejo, mediante o ajuste empírico dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo – MCSCS (Kondo & Dias Junior, 1999a; Miranda, 2006); o modelo mais utilizado atualmente é o desenvolvido por Dias Junior (1994). Considerando um determinado teor de água no solo, os MCSCS permitem conhecer a máxima tensão que pode ser aplicada ao mesmo sem ocasionar compactação adicional. Por outro lado, para uma dada tensão a ser imposta ao solo, os MCSCS possibilitam o estabelecimento de teores máximos de água sob os quais o tráfego pode ser realizado sem resultar em deformação significativa do solo. Cabe destacar que os MCSCS podem ser alterados pelo manejo do solo, conforme comprovado em estudo realizado por Assis & Lanças (2005).

Existe pouca informação no que se refere aos efeitos produzidos pela inclusão de plantas de cobertura em sistemas de rotação de culturas sobre a capacidade de suporte de carga do solo e a suscetibilidade do solo à compactação. No entanto, é possível que esta prática afete a σ_p e o IC, uma vez que as plantas de cobertura modificam a estrutura do solo, formando e estabilizando agregados de maior tamanho (Wohlenberg et al., 2004; Conceição et al., 2005), o que ocorre principalmente em função do aporte de resíduos orgânicos e exsudatos radiculares e da ação mecânica das raízes destas espécies (Oades, 1993; Haynes & Beare, 1996). Por um lado, a resistência à deformação tende a ser maior em solos agregados (Veiga et al., 2007), assim como a resistência dos agregados à ruptura aumenta com o incremento do teor de MOS (Imhoff, 2002). Em contrapartida, a formação de

agregados maiores, ao aumentar a proporção de macroporos e, eventualmente, diminuir a densidade do solo, pode diminuir a capacidade de suporte de carga do mesmo (Macedo, 1993; Pereira et al., 2005; Rücknagel et al., 2007). Além disso, as diferenças no IC e na σ_p ocasionadas pelas plantas de cobertura podem ser minimizadas pelo tráfego, em virtude da provável destruição da estrutura do solo por elas produzida.

Da mesma forma, são poucos os trabalhos que comparam os efeitos de práticas biológicas (plantas de cobertura) e mecânicas (escarificação) de controle da compactação sobre a σ_p e o IC. Nesse sentido, a redução do grau de compactação do solo por intermédio da mobilização mecânica acarreta na ruptura das ligações que se estabelecem entre as partículas e agregados do solo (Dexter, 1988). Diante disso, é provável que a escarificação aumente a suscetibilidade à compactação e diminua a capacidade de suporte de carga do solo de uma maneira mais pronunciada comparativamente às plantas de cobertura de inverno.

Assim, o presente estudo teve como hipóteses:

- tanto a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, quanto a escarificação, diminuem a capacidade de suporte de carga e aumentam a suscetibilidade do solo à compactação. No entanto, esses efeitos são mais pronunciados e atingem maiores profundidades quando o grau de compactação do solo é reduzido mediante escarificação;

- os modelos de capacidade de suporte de carga são modificados pela semeadura direta com plantas de coberturas de inverno e pela escarificação;

- o tráfego de rodados de trator minimiza as diferenças na capacidade de suporte de carga e suscetibilidade do solo à compactação adicional produzidas pelas plantas de cobertura de inverno.

Para testar essas hipóteses, os objetivos principais deste estudo foram:

- Investigar o efeito das plantas de cobertura de inverno em semeadura direta, da escarificação e do tráfego de rodados de trator sobre a σ_p e o IC de um Argissolo;

- avaliar as modificações ocasionadas pelas coberturas de inverno e sistemas de preparo (semeadura direta e escarificação) sobre a relação $\sigma_p \times$

teor de água do solo (modelos de capacidade de suporte de carga do solo).

5.2 Material e métodos

5.2.1 Experimento de campo

As informações referentes ao experimento de campo foram apresentadas no capítulo 3.

5.2.2 Avaliações realizadas

A tensão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressibilidade (IC) foram determinados em junho e novembro/2006 e maio/2007, utilizando-se as mesmas amostras coletadas visando à quantificação da densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, cujo procedimento de amostragem é descrito detalhadamente no Capítulo 4, item 4.2.2.2. Empregou-se anéis específicos para o ensaio de compressão uniaxial, com 0,025 m de altura e 0,063 m de diâmetro, apresentando uma ranhura nas paredes laterais, ao longo de todo o seu perímetro (Figura 12). Em laboratório, todas as amostras coletadas na área sob semeadura direta em junho/2006 (96 anéis) foram saturadas em água por 48 h e colocadas sob uma tensão de -6 kPa em mesa de tensão, para determinação da macroporosidade (Capítulo 4, item 4.2.2.2). Para garantir a comparação entre os tratamentos, uma das duas amostras coletadas em cada local e profundidade (48 amostras), após estabilização a -6 kPa, foi equilibrada a uma tensão de água equivalente a -33 kPa em panela de pressão de Richards. Visando simular diferentes teores de água, os demais anéis foram divididos em quatro grupos de doze amostras, uniformemente distribuídas entre profundidades e tratamentos. Um dos grupos foi mantido na umidade equivalente a tensão de -6 kPa. Os outros três grupos foram submetidos às tensões de -100, -300 e -500 kPa, também em painéis de pressão de Richards. Das duas amostras coletadas em cada subparcela e camada do bloco 5 (que à época ainda não havia sido escarificado), apenas uma foi usada para fins de determinação da σ_p e do IC, totalizando 24 anéis. O procedimento empregado nestas amostras foi idêntico ao utilizado para as

provenientes da área sob semeadura direta; entretanto, todas elas foram equilibradas a -33 kPa.



Figura 12. Anéis utilizados para a coleta de amostras de solo indeformadas destinadas à realização do ensaio de compressão uniaxial.

Conforme especificado no Capítulo 4 (item 4.2.2.2), em novembro/2006, foram coletados anéis também na área submetida ao tráfego de rodados de trator. A exemplo da avaliação realizada em junho/2006, todas as amostras foram saturadas por 48 h e submetidas a uma tensão de -6 kPa. Posteriormente, todos os anéis oriundos das zonas trafegadas e um anel por profundidade e por tratamento proveniente das regiões sem tráfego, tanto da área sob semeadura direta quanto da escarificada (104 amostras ao total), foram equilibrados a -33 kPa. As 48 amostras restantes (24 para cada sistema de preparo) foram divididas em quatro grupos de doze e, então, distribuídas de forma a contemplar todas as profundidades e tratamentos avaliados. Um dos grupos foi mantido na umidade equivalente a -6 kPa. Os demais foram submetidos às tensões de -100, -500 e -1000 kPa, em painéis de pressão de Richards. Em maio/2007, das três amostras coletadas em cada camada e cada ponto amostral da área de referência (campo nativo sob baixa lotação animal, adjacente ao experimento), duas foram equilibradas a -33 kPa e destinadas à avaliação da σ_p e do IC, totalizando 12 anéis.

Uma vez equilibradas nas respectivas tensões de águas, as

amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, visando à obtenção da curva de compressão do solo e, a partir desta, da σ_p e do IC. O ensaio de compressão uniaxial foi executado em uma prensa oedométrica, marca TESTOP (Figura 13). A metodologia de execução é descrita pela norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990). No entanto, devido às particularidades das cargas aplicadas aos solos agrícolas, foram introduzidas algumas modificações, as quais foram sugeridas por Carpenedo (1994). De maneira resumida, aplicou-se às amostras indeformadas tensões equivalentes a 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; e 800 kPa. Depois de aplicada cada uma destas tensões, fez-se leituras da deformação experimentada pelas amostras, nos tempos 0; 1/2; 1; 2; 3; 4; e 5 min. O tempo máximo do carregamento (5 minutos) correspondeu ao necessário para que 95% da deformação máxima ocorresse, o que foi definido através da realização de pré-testes. Terminado o teste, as amostras foram secas em estufa a 105° C por aproximadamente 72 horas.



Figura 13. Prensa oedométrica utilizada no ensaio de compressão uniaxial.

A partir da deformação observada aos 5 minutos (def, em cm), do volume inicial da amostra (V_i , em cm^3), do peso da amostra saturada (P_{sat} , em g) e seca em estufa a 105°C (P_s , em g), calculou-se o índice de vazios ao fim de cada carregamento (e_f), através das fórmulas (4) a (7).

$$P_{ti} = \frac{P_{sat} - P_s}{\pi r^2 h} \quad (4)$$

Onde:

- P_{ti} = porosidade total inicial, em $m^3 m^{-3}$;
- r = raio do anel volumétrico, em cm;
- h = altura do anel volumétrico, em cm.

$$D_{sf} = \frac{P_s}{\pi r^2 (h - def)} \quad (5)$$

Onde:

- D_{sf} = densidade do solo decorridos 5 minutos da aplicação de uma determinada carga, em $Mg m^{-3}$.

$$P_{tf} = P_{ti} - \left(\frac{V_i - \frac{P_s}{D_{sf}}}{V_i} \right) \quad (6)$$

Onde:

- P_{tf} = porosidade total decorridos 5 minutos da aplicação de uma determinada carga, em $m^3 m^{-3}$.

$$E_f = \frac{P_{tf}}{1 - P_{tf}} \quad (7)$$

Onde:

- E_f = índice de vazios decorridos 5 minutos da aplicação de uma determinada carga, adimensional.

Posteriormente, relacionou-se o E_f com o logaritmo da tensão aplicada obtendo-se, assim, a curva de compressão (Figura 14). Para a determinação da σ_p , foi utilizado o método de Pacheco Silva, descrito na norma

NBR 12007/90 (ABNT, 1990) e ilustrado também na Figura 14. Em primeiro lugar, traça-se uma reta paralela (reta 1) ao eixo das abscissas, tendo como origem o índice de vazios inicial da amostra (e_i). Em seguida, prolonga-se a reta virgem até a mesma cruzar com a reta 1. Do ponto onde ocorre a intersecção do prolongamento da reta virgem com a reta 1, desenha-se uma reta vertical paralela ao eixo das ordenadas (reta 2) até a mesma encontrar a curva de compressão. Finalmente, traça-se outra reta (reta 3), paralela ao eixo das abscissas, a partir do ponto de encontro entre a reta 2 e a curva de compressão, até o prolongamento da reta virgem. A abscissa deste ponto corresponde à σ_p . Todo esse procedimento de cálculo foi realizado mediante o emprego de uma planilha eletrônica do Microsoft Excel[®], desenvolvida por Cepik (2006).

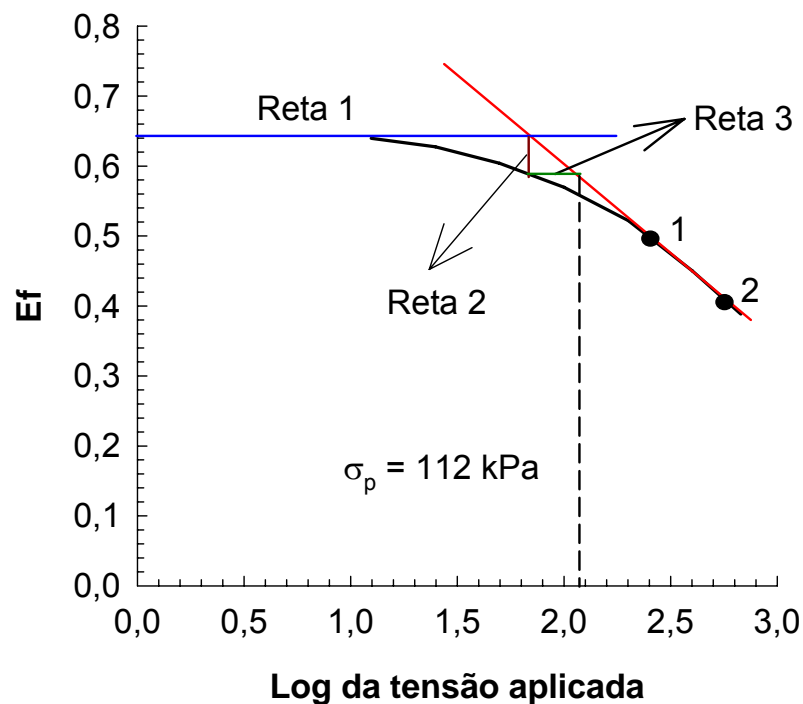


Figura 14. Curva de compressão do solo, ilustrando a metodologia de Pacheco Silva para determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p).

O IC correspondeu à tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem, sendo calculada através da fórmula (8).

$$IC = \frac{e1 - e2}{\log P2 - \log P1} \quad (8)$$

Onde:

- IC = índice de compressibilidade, adimensional;
- e1 = índice de vazios no ponto 1 (Figura 14);
- e2 = índice de vazios no ponto 2 (Figura 14);
- P1 = tensão aplicada correspondente ao e1;
- P2 = tensão aplicada correspondente ao e2.

Quantificou-se ainda o teor de água em base gravimétrica (kg kg^{-1}) que as amostras apresentavam no momento da realização do ensaio de compressão uniaxial. Essa determinação foi realizada através da metodologia descrita em EMBRAPA (1997), utilizando-se os dados referentes ao peso da amostra equilibrada nas diferentes tensões de água antes da execução do ensaio e após a secagem em estufa a 105°C .

5.2.3 Obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (MCSCS)

Os MCSCS foram ajustados de acordo com a equação (9), desenvolvida por Dias Junior (1994), utilizando-se o programa SigmaPlot[®] 9.0 (Systat software, Inc.).

$$\sigma_p = 10^{(a + bw)} \quad (9)$$

Onde:

- w = umidade gravimétrica do solo no momento da realização do ensaio de compressão uniaxial (kg kg^{-1});
- a, b = parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

O ajuste dos MCSCS foi executado em separado para cada camada avaliada e sistema de preparo (semeadura direta e escarificação), utilizando somente os valores obtidos nas zonas sem tráfego de rodados de trator. Considerando os dados provenientes da área sob semeadura direta, ajustou-se um MCSCS para cada cobertura de inverno.

5.2.4 Análise estatística dos dados

Para a análise da variância (ANOVA) dos dados de σ_p , IC, Gsi e w, considerando a área escarificada e as amostras equilibradas a -33 kPa, utilizou-se o modelo trifatorial com parcelas subsubdivididas no espaço (coberturas de inverno nas parcelas principais, condição de tráfego nas subparcelas e camada avaliada nas subsubparcelas) e quatro repetições. Para essa análise, combinou-se os dados obtidos nas parcelas ocupadas com milho e soja durante o verão. Já para a área conduzida sob semeadura direta e também para as amostras submetidas a uma tensão de água de -33 kPa, foram utilizados dois modelos de ANOVA:

- modelo 1: idem ao modelo 1 do item 4.3.2b;
- modelo 2: idem ao modelo 2 do item 4.3.2b. Neste modelo, combinou-se os dados obtidos nas parcelas cultivadas no verão com milho e soja, sendo o mesmo empregado na avaliação realizada em novembro/2006.

Quando a ANOVA indicou a ocorrência de interações significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro de outro, através do teste de Duncan ($p < 0,05$). Quando não houve interação, e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. A ANOVA e os testes de comparação entre médias foram realizados através do programa computacional SOC-EMBRAPA. Para a comparação entre a área sob semeadura direta e a escarificada, empregou-se o teste t (Student) bilateral para dados não pareados ($p < 0,05$), executado com o auxílio do programa Microsoft Excel[®]. O mesmo teste foi utilizado para comparar os valores das variáveis medidos antes e após a escarificação. As análises de regressão foram efetuadas somente mediante o uso do programa SigmaPlot[®] 9.0 (Systat software, Inc.).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Semeadura direta

A ANOVA indicou que a interação entre cobertura de inverno, cultura

de verão antecessora às avaliações e época de amostragem, considerando os valores da σ_p , não foi significativa, em ambas as camadas estudadas. Assim, a análise estatística foi executada em separado para cada fator. A σ_p não variou de forma significativa em razão da cultura de verão antecedente à amostragem (dados não mostrados). Independentemente da época de avaliação, os resultados apresentados na Tabela 15 evidenciam que, nas entrelinhas das culturas de verão não trafegadas por rodados de trator e na camada de 0,03-0,06 m, os valores de σ_p determinados em amostras estabilizadas a -33 kPa foram significativamente superiores para o pousio, em comparação às plantas de cobertura de inverno (aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta), as quais não diferiram significativamente entre si. Na camada de 0,12-0,15 m, as médias da σ_p foram cerca de duas vezes maiores em relação à superfície do solo, mas as diferenças entre as coberturas de inverno não foram significativas.

Considerando que o teor de água a -33 kPa não foi afetado significativamente pelas coberturas de inverno e épocas de amostragem (média igual a 0,16 kg kg⁻¹), a diminuição na capacidade de suporte de carga ocasionada pela aveia preta+ervilhaca/nabo e pela aveia preta na superfície do solo pode ser atribuída à redução da densidade e ao aumento da porosidade total observados neste tratamentos (Tabela 7, item 4.3.3.1), o que também se restringiu à camada superficial. Esta inferência é respaldada pelo fato de os valores de σ_p terem se relacionado de forma significativa e positiva com a densidade do solo (Figura 15). O modelo do tipo potência apresentado nessa Figura evidencia que a densidade do solo explicou mais de 50% da variação da σ_p , mesmo considerando que, para a análise de regressão, tenha se empregados todas as amostras provenientes da área sob semeadura direta, inclusive as equilibradas em tensões diferentes de -33 kPa. A maior σ_p detectada na profundidade de 0,12-0,15 m pode ser atribuída, além da maior densidade do solo (Tabela 7, item 4.3.3.1), aos teores mais altos de argila nesta camada (Tabela 2, item 3.1). Nesse sentido, valores mais elevados de σ_p para solos argilosos têm sido observados em alguns trabalhos (Silva, 1999; Imhoff, 2002; Peng et al., 2004).

Ainda conforme a Tabela 15, verifica-se que, na superfície do solo, a σ_p determinada na área sob semeadura direta, independentemente da cobertura de inverno, foi superior ao tratamento de referência (campo nativo).

Tabela 15. Tensão de pré-consolidação do solo nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão conduzidas sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação.

| Camada (m) | Cobertura | Época de avaliação | | |
|------------|-----------------------|------------------------|--------------|------------|
| | | 06/2006 | 11/2006 | Média |
| | | ----- <i>kPa</i> ----- | | |
| 0,03-0,06 | A+E/N ¹ | 51 | 60 | 56 b |
| | Aveia preta | 42 | 63 | 52 b |
| | Pousio | 76 | 86 | 81 a |
| | Média | 56 B | 70 A | 63 |
| | CN² | | 44 | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 156 | 137 | 146 a |
| | Aveia preta | 152 | 141 | 146 a |
| | Pousio | 142 | 131 | 136 a |
| | Média | 150 A | 136 A | 143 |
| | CN | | 129 | |

¹ A+E/N = Aveia + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006); ² CN = campo nativo (área de referência). CV coberturas = 33,2% (0,03-0,06 m) e 19,8% (0,12-0,15 m). CV épocas de avaliação = 14,3% (0,03-0,06 m) e 18,9% (0,12-0,15 m). Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Essas diferenças foram mais pronunciadas quando se considera o pousio, onde a σ_p atingiu valores que, na média das avaliações, correspondem a praticamente o dobro dos encontrados para a vegetação natural. A maior densidade do solo observada para o pousio (Tabela 7, item 4.3.3.1) é o principal fator que explica os maiores valores de σ_p obtidos nesse tratamento em relação ao campo natural. Além disso, o teor de água a -33 kPa na camada de 0,03-0,06 m foi mais elevado para o campo nativo (0,21 kg kg⁻¹) em relação a todas as coberturas de inverno conduzidas em semeadura direta (0,16 kg kg⁻¹). Esse último fato constitui-se na provável razão de a σ_p ter sido levemente maior para os tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta em comparação à vegetação natural, mesmo com os valores de densidade do solo e porosidade total sendo semelhantes em ambas as condições (Tabela 7, item 4.3.3.1). Na camada inferior (0,12-0,15 m), nota-se que, para ambas as épocas de amostragem, a σ_p medida para o pousio e para as plantas de cobertura de inverno assemelhou-se à obtida para o campo nativo.

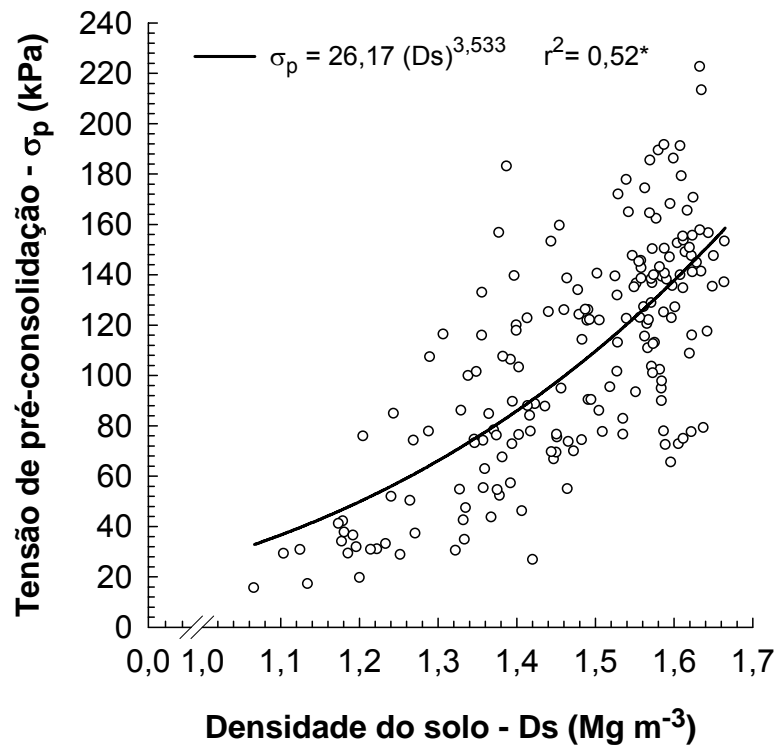


Figura 15. Relação da tensão de pré-consolidação com a densidade do solo na área sob semeadura direta, considerando todos os tratamentos, profundidades e tensões de água sob as quais as amostras foram equilibradas.

Reduções na capacidade de suporte do solo estimada pela σ_p , em função da diminuição na densidade do solo, têm sido constatadas por diversos autores (Silva, 1999; Imhoff, 2002; Rücknagel et al., 2007; Schäffer et al., 2007; Veiga et al., 2007), sendo atribuídas as menores forças de coesão e atrito entre as partículas e agregados nestas condições (Imhoff, 2002). Para uma mesma densidade do solo, a σ_p diminui à medida que aumenta o espaço poroso interagregados (Rücknagel et al., 2007), que é constituído principalmente por macroporos. Conforme discutido no capítulo 4 (item 4.3.3.1), a redução da densidade do solo e o conseqüente aumento na porosidade total, em função do uso de plantas de cobertura de inverno (Tabela 7), ocorreu devido ao incremento na macroporosidade, uma vez que o de microporos não foi significativamente afetado (Tabela 8). Assim, tal fato também pode ter colaborado para a capacidade de suporte de carga do solo fosse reduzida pela aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta.

Os tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta resultaram

em maiores teores de MOS comparativamente ao pousio, o que foi mais evidente para a fração particulada (Tabela 5, item 4.3.2). Este fato, aliado à ação mecânica e exsudatos liberados pelo sistema radicular das plantas de cobertura de inverno, possivelmente, tenha resultado na formação de agregados mais estáveis, o que já foi detectado em trabalhos desenvolvidos neste mesmo tipo de solo (Silva & Mielniczuk, 1997; Conceição, 2006). Da mesma forma, Imhoff (2002) encontrou que a resistência dos agregados à ruptura, quando submetidos a uma carga vertical, tornou-se maior à medida que o teor de MOS aumentou, considerando solos com teores de areia + silte semelhantes ao utilizado neste estudo. Isto sugere que a σ_p poderia ter sido maior nos tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta, o que, conforme explicado anteriormente, não se confirmou. De acordo com Braidá (2004), a MOS exerce dois efeitos contrários sobre a resistência do solo à compactação, um relacionado ao aumento da coesão entre as partículas minerais e outro à mudança no arranjo das mesmas, com redução da densidade. Quando o primeiro efeito predomina, a resistência aumenta; quando é o segundo que prepondera, a resistência diminui, devido à redução no número de pontos de contato e na fricção entre as partículas. Neste trabalho, o efeito da redução na densidade do solo ocasionada pela MOS adicionada pelas plantas de cobertura predominou sobre o aumento na resistência dos agregados, resultando na redução de σ_p . Além disso, a decomposição da matéria orgânica particulada (MOP), em conjunto com as raízes, são os principais agentes responsáveis pela formação de macroagregados (Haynes & Beare, 1996; Goldchin et al., 1997). Alguns trabalhos têm demonstrado que a σ_p é menor, quando o ensaio é realizado em amostras constituídas por agregados de maior tamanho (Canarache et al., 2000; Pereira et al., 2005), o que é atribuído a menor área de contato superficial entre os mesmos (Pereira et al., 2005).

A época de avaliação também modificou de forma significativa a σ_p na superfície do solo e nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão, de modo que esta variável apresentou valores mais elevados em novembro/2006 do que em junho do mesmo ano (Tabela 15). Ao contrário do que foi relatado para as coberturas de inverno, essas diferenças não podem ser atribuídas à densidade, à porosidade total ou à macroporosidade do solo, já

que essas propriedades não foram significativamente afetadas pela época de amostragem (Tabelas 7 e 8, item 4.3.3.1). Da mesma forma, o teor de água das amostras equilibradas a -33 kPa não foi modificado em função da época da amostragem (média igual a 0,16 kg kg⁻¹). Diante disso, uma possível explicação para esse resultado envolve o processo de *age hardening*, definido por Dexter (1988) como o aumento na resistência do solo à deformação no decorrer do tempo, mantendo-se constante a densidade do solo. Segundo o que foi abordado no Capítulo 4 (item 4.3.3.1), é possível que a densidade do solo, neste trabalho, já tenha atingido um estado estável em função do manejo adotado, haja vista que esse parâmetro não foi significativamente alterado de junho a novembro de 2006. Este fato, aliado à ausência de perturbação mecânica no período considerado, pode ter propiciado o fortalecimento nas ligações intra e interagregados e o deslocamento das partículas para posições de menor energia livre, o que caracteriza o *age hardening* e confere ao solo maior resistência à deformação. O sistema radicular das coberturas de inverno, ao unir mecanicamente as partículas e agregados menores, favorecer a atividade microbiana e liberar exsudatos com ação ligante (Haynes & Beare, 1996), aumenta a resistência nos pontos de contato entre as mesmas e, portanto, constitui-se em outro fator que pode ter colaborado para que a σ_p fosse maior em novembro comparativamente a junho. Na camada de 0,12-0,15 m, a σ_p não foi influenciada de forma significativa pela época de amostragem.

A magnitude da σ_p , considerando a camada superficial do solo e de forma independente para as coberturas de inverno e épocas de amostragem, pode ser considerada pequena, evidenciando uma baixa capacidade de sustentação de cargas externas na área que não tem sido trafegada neste experimento. Macedo (1993) também obteve que um solo fisicamente recuperado através de práticas de manejo apresentou baixa capacidade de suporte de carga. Considerando que as tensões aplicadas na área de contato pneu/solo pelo rodado traseiro do trator utilizado neste experimento equivalem a aproximadamente 120 kPa, pode-se facilmente concluir que a realização de um tráfego nesta área, num teor de água correspondente à tensão de -33 kPa (teor de água de aproximadamente 0,16 kg kg⁻¹) levaria à compactação adicional do solo mesmo no pousio. Essas evidências reforçam a importância do tráfego controlado na melhoria da qualidade física do solo propiciada pela

inclusão de plantas de cobertura do solo em sistemas de rotação de culturas, visando à produção de grãos de milho e de soja. Ao mesmo tempo, os resultados anteriormente expostos sugerem que, para evitar compactação adicional na camada superficial desse solo, o tráfego deve ser realizado em teores de água inferiores a $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$. A umidade máxima sob a qual o tráfego pode ser realizado sem ocasionar danos à estrutura do solo é determinada através dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo – MCSCS (Cardoso, 2007).

Os MCSCS para as camadas de 0,03-0,06 m e 0,12-0,15 m são apresentados nas Figuras 16a e 16b, respectivamente. Verifica-se que a variação de σ_p , em função do teor de água no solo, ajustou-se ao modelo proposto por Dias Junior (1994), o que foi estatisticamente significativo para todas as profundidades e coberturas de inverno, à exceção do tratamento aveia preta+ervilhaca/nabo na camada de 0,12-0,15 m. A falta de ajuste deste tratamento ao modelo de Dias Junior (1994) pode ser justificada pela grande variabilidade observada nos valores de σ_p , mesmo considerando teores semelhantes de água. É importante destacar que mesmo para os ajustes que se mostraram estatisticamente significativos, os coeficientes de determinação foram inferiores aos obtidos em outros estudos (Assis & Lanças, 2005; Miranda 2006; Cardoso, 2007), o que pode ser atribuído a menor amplitude de variação dos teores de água das amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial na presente pesquisa. Para os MCSCS que foram significativos, nota-se que o coeficiente de determinação foi maior na camada inferior, o que pode estar relacionado a menor variação nos valores de densidade do solo, que afetam de forma acentuada a magnitude da σ_p (Figura 15).

Na superfície do solo (Figura 16a), observa-se que a curva representativa do MCSCS ajustado para o pousio foi deslocada para cima em relação às demais coberturas. Isto significa que a σ_p foi maior para o pousio comparativamente às plantas de cobertura em toda a faixa de umidade estudada neste trabalho, e não somente na correspondente à tensão de -33 kPa (Tabela 15). Tal fato relaciona-se aos maiores valores de densidade do solo e menores de porosidade total (Tabela 7) e macroporosidade (Tabela 8) obtidos para este tratamento, conforme explicado no Capítulo 4 (item 4.3.3.1). No entanto, o coeficiente de regressão (parâmetro b do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bw)}$)

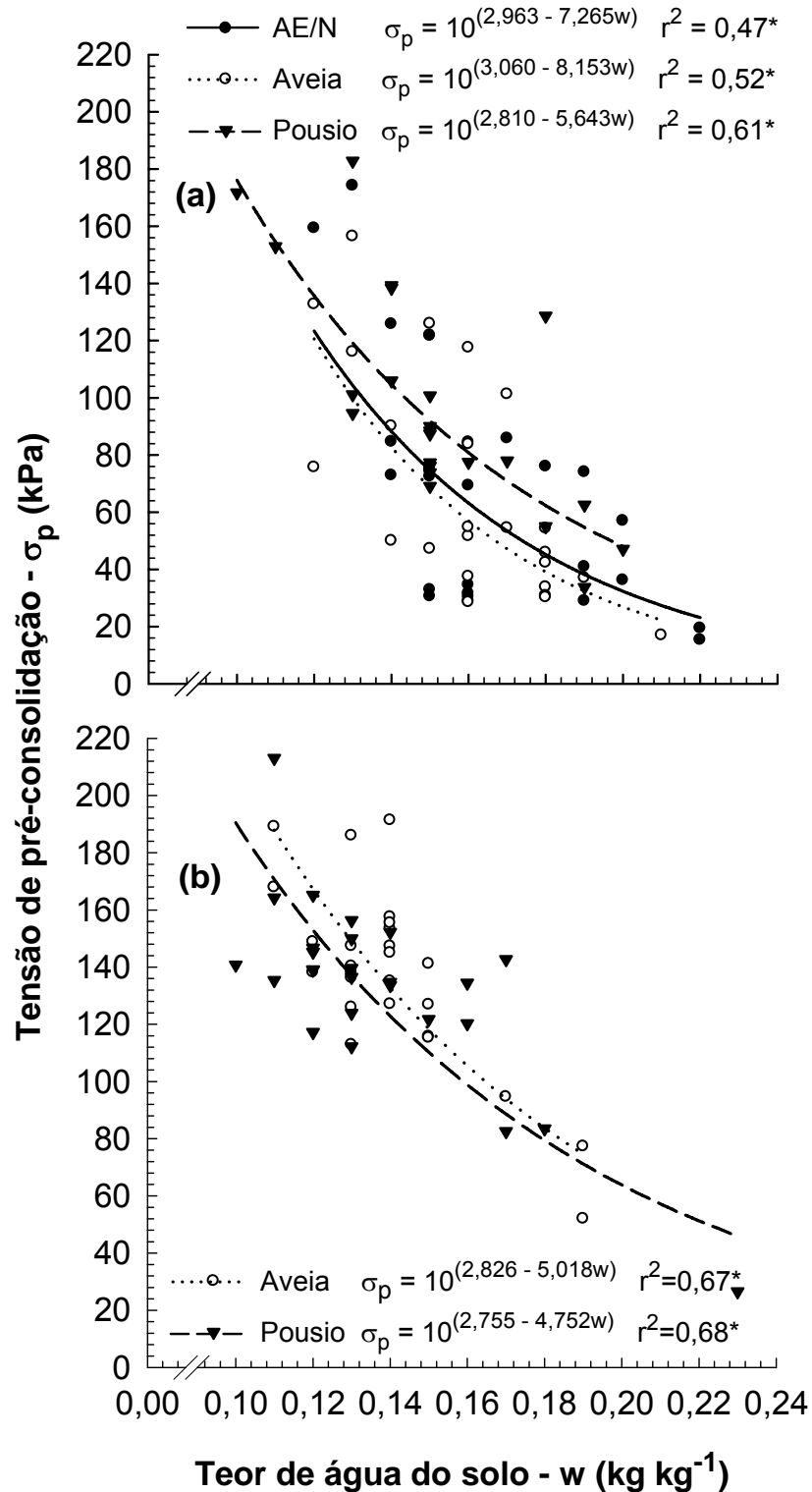


Figura 16. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo ajustados em separado para as coberturas de inverno em semeadura direta, considerando a camada de 0,03-0,06 m (a) e a de 0,12-0,15 m (b). A+E/N = Aveia preta + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006). Aveia = aveia preta.

foi menor para o pousio do que para as plantas de cobertura, indicando que as

diferenças na σ_p entre os tratamentos diminuem à medida que o solo seca e vice-versa. Utilizando-se as equações expostas na Figura 16a, tem-se que, na umidade de $0,10 \text{ kg kg}^{-1}$, que se localiza ainda dentro da faixa de friabilidade do solo (Tabela 2, item 3.1), os valores de σ_p praticamente se igualam entre as coberturas utilizadas, equivalendo a 172 kPa para a aveia preta+ervilhaca/nabo e a 176 kPa para a aveia preta e o pousio. Da mesma forma, a diminuição das diferenças na σ_p à medida que o teor de água do solo é reduzido faz com que os valores da umidade máxima em que o tráfego do trator utilizado neste trabalho poderia ser realizado sem compactação adicional sejam pouco alterados pelas coberturas de inverno. Assim, os teores máximos de água que permitem a passagem de um trator com características semelhantes ao utilizado neste estudo, sem acarretar danos à estrutura do solo, equivaleram a $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$ para o pousio e a $0,12 \text{ kg kg}^{-1}$ para a aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta. Porém, a realização de operações mecanizadas em umidades inferior a esses limites apresenta algumas implicações de natureza prática, como por exemplo, um provável aumento da demanda de força de tração por parte da semeadora-adubadora, que pode, contudo, ser compensado por menores perdas de potência na interface rodado/solo por patinagem e resistência ao rolamento.

Em contrapartida, Braida (2004), estudando um Argissolo mais arenoso (155 g kg^{-1} de argila) que o utilizado neste trabalho (Tabela 2, item 3.1), concluiu que, sob maiores teores de água, as diferenças na σ_p entre amostras mais e menos densas diminuem. Segundo o autor, o recobrimento das partículas pela água elimina o efeito do maior número de pontos de contato observado no solo mais denso, igualando assim os valores da σ_p . Neste trabalho, acredita-se que, sob baixos teores de água no solo, o menor número de pontos de contato nos tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta tenha sido compensado pelo aumento na resistência em cada um deles, devido ao incremento na tensão sob a qual a água é retida, considerando um mesmo valor de umidade gravimétrica. Tal afirmação apóia-se no fato de o pousio ter atingindo menores teores de água (Figura 16b), evidenciando que as amostras referentes às plantas de cobertura deveriam ter sido equilibradas a tensões mais negativas para chegarem aos mesmos valores de umidade gravimétrica. Os maiores teores de MOS na superfície do solo observados para as plantas

de cobertura de inverno em relação ao pousio (Tabela 5, item 4.3.2) justificam o aumento na força de retenção da água em condições de baixa umidade para estes tratamentos.

A Figura 16a mostra ainda que as diferenças nos MCSCS ajustados para a aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta foram pequenas, refletindo assim a semelhança entre esses tratamentos no que se refere à densidade do solo e porosidade total (Tabela 7), bem como na macroporosidade (Tabela 8) e teor de MOS e suas frações granulométricas (Tabela 5). No entanto, é possível que, com o tempo, a substituição do consórcio aveia preta+ervilhaca pelo nabo forrageiro, realizada no inverno de 2006, altere esse comportamento, levando-se em consideração que um ciclo dessa cultura foi suficiente para diminuir a resistência do solo à penetração até uma profundidade de 0,18 m, em relação aos demais tratamentos (Figura 4c, item 4.3.3.1). Na camada de 0,12-0,15 m, os MCSCS para o pousio e para a aveia preta não diferiram de forma pronunciada (Figura 16b). Novamente, esses resultados são explicados pela ausência de diferenças na densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e teor de MOS entre as coberturas de inverno estudadas na camada correspondente a 0,12-0,15 m de profundidade, conforme discuto nos itens 4.3.2 e 4.3.3.1 (Capítulo 4).

O IC não foi afetado de forma significativa pela cultura de verão antecedente às avaliações (dados não apresentados). Porém, os resultados mostrados na Tabela 16 indicam que esta variável, nas duas épocas de avaliação e para a camada superficial (0,03-0,06 m) das entrelinhas não trafegadas da cultura de verão, foi significativamente inferior no pousio em relação aos tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta, os quais não diferiram significativamente entre si. Isto significa que a inclusão de plantas de cobertura de inverno, em sistemas de rotação visando à produção de grãos (milho e soja), aumenta a suscetibilidade da superfície do solo à compactação. A exemplo da σ_p , tal fato é justificado pelos maiores valores de densidade e menores de porosidade total e macroporosidade apresentados pelo pousio (Tabelas 7 e 8, item 4.3.3.1), os quais predominaram sobre o possível aumento na estabilidade e resistência à ruptura dos agregados proporcionado pelos maiores teores de MOS e MOP (Tabela 5, item 4.3.2) e pelo sistema radicular das plantas de cobertura de inverno. Neste trabalho, o IC diminuiu linearmente

à medida que a densidade do solo aumentou (Figura 17), sendo este fator responsável por 79% da variação apresentada pelos dados de IC. Isto ocorreu mesmo com a inclusão na análise de regressão dos valores de IC medidos em amostras equilibradas a diferentes tensões. A diminuição da suscetibilidade do solo à compactação, em função do aumento da densidade, é relatada em diversos trabalhos (Imhoff, 2002; Braida, 2004; Schäffer et al., 2007; Veiga et al., 2007) e se deve ao aumento do número de pontos de contato entre as partículas e agregados do solo, o que dificulta a movimentação relativa entre as mesmas.

Tabela 16. Índice de compressibilidade do solo nas entrelinhas não trafegadas das culturas de verão conduzidas sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade e época de avaliação.

| Camada (m) | Cobertura | Época de avaliação | | |
|------------|-----------------------|--------------------|---------------|-------------|
| | | 06/2006 | 11/2006 | Média |
| 0,03-0,06 | A+E/N ¹ | 0,43 | 0,38 | 0,41 a |
| | Aveia preta | 0,43 | 0,36 | 0,40 a |
| | Pousio | 0,36 | 0,30 | 0,33 b |
| | Média | 0,41 A | 0,35 A | 0,38 |
| | CN² | | 0,37 | |
| 0,12-0,15 | A+E/N | 0,24 | 0,22 | 0,23 a |
| | Aveia preta | 0,24 | 0,23 | 0,24 a |
| | Pousio | 0,23 | 0,21 | 0,22 a |
| | Média | 0,24 A | 0,22 A | 0,23 |
| | CN | | 0,28 | |

¹ A+E/N = Aveia + ervilhaca (2002 a 2005) e nabo forrageiro (2006); ² CN = campo nativo (área de referência). CV coberturas = 17,5% (0,03-0,06 m) e 15,3% (0,12-0,15 m). CV épocas de avaliação = 29,7% (0,03-0,06 m) e 8,7% (0,12-0,15 m). Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$).

Ainda de acordo com a Tabela 16, nota-se que, independentemente do tratamento, o IC foi menor a 0,12-0,15 m comparativamente a 0,03-0,06 m de profundidade, mesmo sendo a camada inferior mais argilosa (Tabela 2, item 3.1), o que tende a aumentar o IC (Larson et al., 1980; Lebert & Horn, 1991; Imhoff, 2002). Este resultado também pode ser explicado pela maior densidade do solo e menor porosidade total e macroporosidade a 0,12-0,15 m de profundidade (Tabelas 7 e 8), cujos efeitos predominaram sobre o maior teor de argila. Verifica-se também que os valores do IC determinados para os tratamentos referentes à área conduzida sob semeadura direta, considerando a

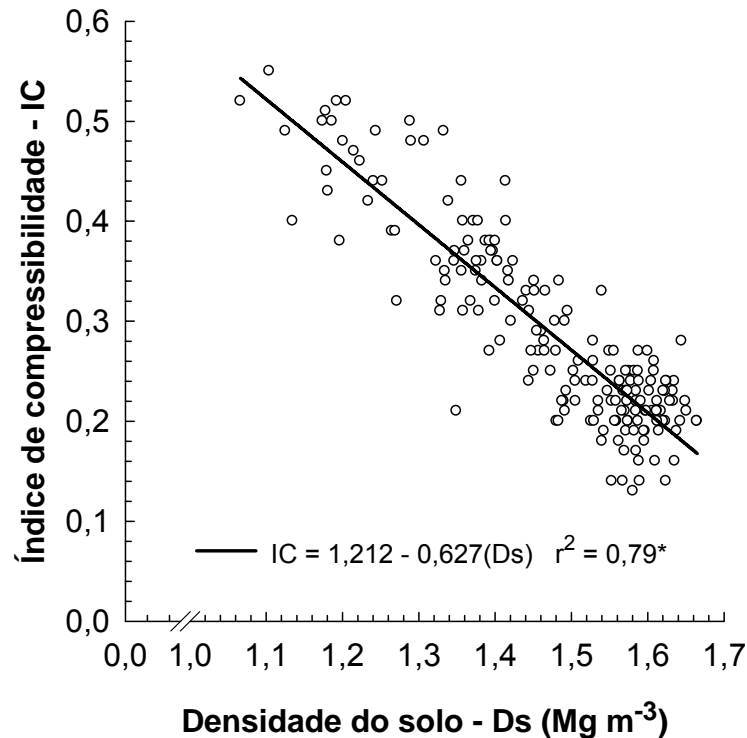


Figura 17. Relação do índice de compressibilidade com a densidade do solo na área sob semeadura direta, considerando todos os tratamentos, profundidades e tensões de água sob as quais as amostras foram equilibradas.

camada de 0,03-0,06 m e na média das épocas de amostragem, assemelharam-se aos obtidos na área sob vegetação natural. Porém, a 0,12-0,15 m de profundidade, o solo sob campo nativo mostrou-se mais suscetível à compactação adicional do que os tratamentos manejados em semeadura direta, mesmo considerando que as diferenças em termos de densidade do solo, porosidade total e macroporosidade (Tabelas 7 e 8, item 4.3.3.1), bem com no teor de água a -33 kPa (equivalente a 0,14 kg kg⁻¹ para as duas condições), tenham sido pequenas. No entanto, os teores de MOS e de MOP foram, respectivamente, 35 e 300% maiores para a área de referência em comparação à sob semeadura direta, considerando a camada inferior (Tabela 5, item 4.3.2). Desse modo, os maiores teores de MOS na área sob campo nativo, principalmente no que se refere à fração composta por materiais caracterizados por um menor grau de humificação (MOP), possivelmente tenham aumentado o IC para esse tratamento. Incrementos na suscetibilidade do solo à compactação têm sido associados ao aumento nos teores de MOS (Carpenedo, 1994; Pereira et al., 2007), o que se deve, provavelmente, a uma

redução na fricção entre as partículas e, conseqüentemente, no ângulo de atrito interno do solo, em virtude da menor dureza dos materiais de natureza orgânica (Braidá, 2004).

Embora os dados da Tabela 16 indiquem uma tendência de a magnitude do IC ser menor em novembro comparativamente a junho/2006, essas diferenças não foram significativas. Assim, não é possível afirmar com segurança que o processo de “*age hardening*”, evidenciado pelos resultados referentes à σ_p , esteja afetando a suscetibilidade do solo à compactação. Na camada de 0,12-0,15 m, o IC também não foi afetado de forma significativa pela época de avaliação. Análises de regressão demonstraram também que o IC não foi influenciado de forma significativa pelo teor de água do solo ($p > 0,05$, dados não mostrados). Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Larson et al. (1980) e Imhoff (2002), porém, contradizem os encontrados por Kondo & Dias Junior (1999b) e Braidá (2004). Provavelmente, a ausência de significância da relação IC x teor de água esteja relacionada à pequena amplitude de variação da umidade do solo, o que também foi utilizado como justificativa por Imhoff (2002).

Os efeitos do tráfego de rodados de trator sobre a σ_p e o IC determinados em amostras coletadas nas entrelinhas das culturas de verão, em semeadura direta, são apresentados na Tabela 17. Observa-se que a realização de cinco e de sete tráfegos no pousio e nas parcelas ocupadas pelas plantas de cobertura de inverno, respectivamente, distribuídos no decorrer dos cinco anos de condução do experimento, resultou num aumento significativo da σ_p na camada de 0,03-0,06 m. Tal fato corrobora com os maiores valores de densidade do solo e menores de porosidade total e macroporosidade observados neste tratamento (Tabela 10, item 4.3.3.1). Além disso, sendo a σ_p um parâmetro que reflete a história de tensões aplicadas ao solo (Dias Junior & Pierce, 1996), já era esperado que a sua magnitude fosse aumentada pelo tráfego.

Na camada de 0,12-0,15 m, a σ_p não variou de forma significativa em virtude do tráfego. Este resultado é coerente com o comportamento demonstrado pela densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, que também não foram afetadas pelo tráfego na camada inferior, porém, é importante lembrar que a resistência à penetração (RP) foi maior nas áreas

Tabela 17. Parâmetros relacionados à capacidade de suporte e compressibilidade do solo, avaliados nas entrelinhas das culturas de verão em novembro de 2006 e na área sob semeadura direta, afetados pelo tráfego de rodados de trator.

| Camada | Tráfego | Tensão de pré-consolidação (kPa) | Índice de compressibilidade |
|-------------|--------------|----------------------------------|-----------------------------|
| ---- m ---- | | ----- kPa ----- | |
| | Sem | 69 b | 0,36 a |
| 0,03-0,06 | Com | 101 a | 0,35 a |
| | Média | 85 | 0,36 |
| | Sem | 128 a | 0,22 a |
| 0,12-0,15 | Com | 123 a | 0,23 a |
| | Média | 126 | 0,22 |

CV tensão de pré-consolidação: coberturas de inverno = 27,1%; tráfego = 22,6%; camada = 25,4%. CV índice de compressibilidade: coberturas de inverno = 13,3%; tráfego = 14,3%; camada = 12,3%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

trafegadas, comparativamente às não trafegadas, o que foi significativo até 0,24m de profundidade (Figura 8, item 4.3.3.1). Inclusive, a Figura 8 evidencia que as maiores diferenças na RP ocorreram para a camada correspondente a 0,09-0,15 m. Isto sugere que as tensões aplicadas pelos rodados do trator foram suficientes para aumentar o grau de compactação entre 0,12-0,15 m de profundidade, o que, no entanto, não se refletiu em incrementos na σ_p para esta camada. Entre os fatores que podem justificar esses resultados, cabe destacar que a coleta das amostras nas duas camadas estudadas foi realizada na mesma trincheira, a qual não foi aberta no centro da zona trafegada, visando evitar a retirada de anéis no local de passagem da linha de semeadura regulada para atuar atrás do rodado. De acordo com Schäffer et al. (2007), a magnitude das tensões aplicadas pelos rodados diminui à medida que a distância em relação ao centro do rastro aumenta o que, possivelmente, reduza o nível de deformação produzido no solo. Para a RP, essa distinção não ocorreu, de forma que medidas foram realizadas no centro do rastro. Por outro lado, a σ_p , similarmente à densidade do solo, pode se constituir em um indicador do grau de compactação menos sensível do que a RP. Além disso, o tráfego pode ocasionar danos à estrutura do solo sem, necessariamente, aumentar a densidade e diminuir a porosidade total e macroporosidade. Servadio et al. (2005) observaram que o tráfego alterou a forma e a orientação

dos poros, tornando-os menos alongados e paralelos à superfície do solo. Tal fato, mesmo sem alterar substancialmente a densidade do solo, pode aumentar a resistência do solo ao penetrômetro.

A Tabela 17 mostra ainda que o IC não foi afetado de forma significativa pelo tráfego, em ambas as camadas amostradas. Levando-se em consideração que os valores de densidade do solo foram maiores e os de porosidade total e macroporosidade menores na superfície da área submetida a sete tráfegos de rodados de trator, esperava-se que o IC fosse maior na zona não trafegada. Possivelmente, o aumento da densidade do solo promovido pelo tráfego tenha sido de magnitude insuficiente para gerar diferenças no IC. Efeitos significativos do tráfego de rodados de trator sobre o IC também não foram detectados nas pesquisas realizadas por Lima (2004) e Cepik (2006). Além disso, alterações no índice de compressibilidade, em virtude da aplicação de tensões não deveriam ocorrer, mesmo com a magnitude das mesmas excedendo a σ_p (Schäffer et al., 2007). Segundo estes autores, uma vez encerrado o ensaio de compressão uniaxial, a máxima carga aplicada passa a ser o novo valor de σ_p . Caso um novo carregamento seja realizado, após a tensão aplicada ultrapassar o novo valor de σ_p , o solo continuará se deformando sobre a mesma reta de compressão virgem, sem alterá-la.

Independentemente da camada estudada, não houve interação significativa entre a condição de tráfego e as coberturas de inverno, tanto para a σ_p quanto para o IC. Dessa forma, na superfície do solo, as diferenças proporcionadas pelas coberturas de inverno na σ_p e no IC para a área sem tráfego foram mantidas nas zonas trafegadas. Tal fato ocorreu mesmo levando-se em consideração que o pousio foi submetido a dois tráfegos de rodados de trator a menos do que os tratamentos aveia preta+ervilhaca/nabo e aveia preta. Comportamento semelhante foi obtido para os dados referentes às propriedades físicas, o que foi discutido no Capítulo 4 (item 4.3.3.1). No caso do IC, a continuidade das diferenças entre as coberturas de inverno era esperada, tendo em vista que o tráfego não afetou este parâmetro. Uma das justificativas para a manutenção de menores valores de σ_p para as plantas de cobertura do solo comparativamente ao pousio nas áreas trafegadas, mesmo com a realização de duas passadas a mais dos rodados do trator, envolve a dissipação da energia compactante imposta pelos mesmos pela quantidade

mais elevada de resíduos na superfície do solo destes tratamentos (Tabela 3, item 4.3.1). A capacidade dos resíduos culturais presentes na superfície do solo em atenuar o efeito compactante das cargas aplicadas ao solo foi constatada em estudos de laboratório por Braida (2004) e de campo por Silva et al. (2007). Além disso, os maiores teores de MOS e MOP nos tratamentos referentes às plantas de cobertura de inverno (Tabela 5, item 4.3.2), associados à ação do sistema radicular das mesmas, ao estimularem os processos de agregação do solo (Haynes & Beare, 1996; Goldchin et al., 1997), podem ter propiciado que o solo se recuperasse, ao menos em parte, da deformação sofrida em função do tráfego.

5.3.2 Escarificação

Os dados referentes aos efeitos exercidos pela escarificação sobre a capacidade de suporte e a compressibilidade do solo são apresentados na Tabela 18. Verifica-se, em primeiro lugar, que a escarificação reduziu significativamente a capacidade de suporte de carga do solo, estimada pela σ_p , o que ocorreu em ambas as camadas avaliadas e condições de tráfego. Entretanto, essas diferenças foram mais pronunciadas na superfície do solo (0,03-0,06 m), onde a escarificação reduziu em aproximadamente 200% os valores de σ_p , levando-se em consideração as áreas livres de tráfego. Na camada de 0,12-0,15 m, a diminuição ocasionada pela escarificação neste parâmetro, também para as zonas não trafegadas, foi de 50%. O IC também foi afetado de forma significativa pela escarificação, tanto na camada de 0,03-0,06 m quanto na 0,12-0,15 m. Assim, a escarificação aumentou a suscetibilidade do solo à compactação em 71 e 54% nas camadas superior e inferior, respectivamente. Diante desses resultados, pode-se inferir ainda que tanto a σ_p quanto o IC demonstraram maior sensibilidade em detectar os efeitos da compactação comparativamente à densidade do solo, porosidade total e macroporosidade (Tabela 11, item 4.3.3.2). Considerando que não houve efeitos significativos dos tratamentos e camadas avaliadas sobre o teor de água das amostras equilibradas à tensão de -33 kPa (média igual a 0,15 kg kg⁻¹), a menor capacidade de suporte de carga e maior suscetibilidade do solo à compactação adicional, decorrentes da escarificação, podem ser associadas

à diminuição na densidade do solo e aumento na porosidade total e macroporosidade promovida por esta operação, conforme exposto no Capítulo 4, item 4.3.3.2 (Tabela 11). Reduções na capacidade de suporte de carga, em conjunto com incrementos na suscetibilidade do solo à compactação, ocasionados pela mobilização mecânica via escarificação, também foram encontrados por Veiga et al. (2007), em trabalho realizado com um Nitossolo muito argiloso.

Tabela 18. Capacidade de suporte e compressibilidade do solo na área escarificada, afetados pelo tráfego de rodados de trator, pelas coberturas de inverno e pela camada avaliada.

| Tratamento | Tensão de pré-consolidação (kPa) | | | Índice de compressibilidade | | |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| | AEsc ¹ | DEsc ² | | AEsc | DEsc | |
| | | ST ³ | CT ⁴ | | ST | CT |
| ----- 0,03-0,06 m ----- | | | | | | |
| Nabo | - | 30 a | 53 a | - | 0,51 a | 0,47 a |
| Aveia preta | - | 41 a | 88 a | - | 0,46 a | 0,43 a |
| Média | 107 A | 36 C | 70 B | 0,28 B | 0,48 A | 0,45 A |
| ----- 0,12-0,15 m ----- | | | | | | |
| Nabo | - | 100 a | 109 a | - | 0,31 a | 0,31 a |
| Aveia preta | - | 52 a | 111 a | - | 0,43 a | 0,29 a |
| Média | 114 A | 76 B | 110 A | 0,24 B | 0,37 A | 0,30 A |

¹ AEsc = antes da escarificação; ² DEsc = depois da escarificação; ³ ST = área sem tráfego; ⁴ CT = área com tráfego. CV tensão de pré-consolidação: coberturas = 40,8%; tráfego = 30,3%. CV índice de compressibilidade: coberturas = 37,2%; tráfego = 15,8%. Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$). Nas linhas, médias seguidas pela mesma letra maiúscula dentro de uma mesma variável não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$) quando se compara os tratamentos ST e CT, e pelo teste t ($p>0,05$) para a comparação antes (AEsc) e após a escarificação (DEsc).

Similarmente aos tratamentos conduzidos sob semeadura direta (Tabela 17), a realização de um tráfego com um trator leve (2.305 kg sobre o eixo traseiro), sob um teor de água equivalente a 0,16 kg kg⁻¹, não alterou significativamente a suscetibilidade do solo à compactação adicional, medida pelo IC, em ambas as camadas avaliadas na área escarificada (Tabela 18). Este fato corrobora, mais uma vez, com Schäffer et al. (2007), que afirmam que a compactação adicional do solo mediante a aplicação de tensões externas

que superem o valor da σ_p se processa sobre a mesma reta de compressão virgem, sem alterar a inclinação da mesma. Já os valores da σ_p , independentemente da profundidade avaliada, foram maiores nas zonas submetidas a um tráfego de rodados de trator em relação às áreas não trafegadas. Na camada de 0,03-0,06 m, mesmo com o tráfego, a σ_p continuou sendo significativamente inferior após comparativamente a antes da escarificação. Já para a profundidade compreendida entre 0,12-0,15 m, um tráfego foi suficiente para igualar a σ_p medida antes e após a escarificação. É importante lembrar que a realização de um tráfego não foi suficiente para aumentar os valores de densidade do solo e diminuir os de porosidade total e macroporosidade aos níveis observados antes da escarificação, considerando a camada de 0,12-0,15 m (Tabela 11, item 4.3.3.2). Isso sugere que a σ_p apresentou maior sensibilidade ao tráfego do que as referidas propriedades físicas. Gaggero (1998), estudando o efeito do pisoteio de bovinos (carga de 730 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de peso vivo) sobre a compactação de um Argissolo semelhante ao utilizado no presente trabalho, concluiu que a densidade e a porosidade total apresentaram menor sensibilidade a esse processo comparativamente às propriedades mecânicas do solo, como a resistência do mesmo ao cisalhamento direto.

Por outro lado, nota-se que o valor de σ_p , após o tráfego e na superfície do solo (Tabela 18), foi praticamente 50% inferior à tensão média aplicada pelos rodados do trator na área de contato pneu/solo, estimada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), que equivaleu a 120 kPa. Cabe destacar, no entanto, que o cálculo da pressão de contato pelo referido método foi realizado para uma condição em que o pneu se apóia sobre uma superfície firme. Em solos soltos, como é o caso dos tratamentos submetidos à escarificação, a área de contato tende a ser maior e, em decorrência, a tensão aplicada menor, devido ao recalque do pneu no solo. Mesmo assim, esses resultados sugerem que a capacidade de suporte de carga do solo, a campo, tende a ser maior em relação à estimada pela σ_p . Assim, a σ_p pode ser utilizada, com boa margem de segurança, como indicador da máxima tensão que pode ser aplicada pelos rodados ao solo sem que esse se deforme plasticamente. O menor tempo de incidência dos picos das tensões aplicadas pelos rodados das máquinas agrícolas a campo (Schäffer et al., 2007), em

conjunto com o confinamento tridimensional das amostras no ensaio de compressão uniaxial (Keller et al., 2004), são os principais fatores que explicam a menor capacidade de suporte de carga do solo em condições de laboratório. Já na camada de 0,12-0,15 m, a σ_p atingiu valores similares à tensão média na área de contato pneu/solo. Esse comportamento pode ser atribuído, em primeiro lugar, à concentração das tensões aplicadas pelos rodados a uma profundidade equivalente a 1/3 a 1/5 da largura do pneu (Hillel, 1982) que, no caso do presente trabalho, coincide com a camada de 0,09-0,15 m. Além disso, nessa profundidade, as tensões no solo encontram-se submetidas a um maior nível de confinamento (Cepik, 2006), o que pode aumentar a deformação volumétrica experimentada pelo mesmo, considerando um mesmo valor de tensão aplicada.

Ainda de acordo com a Tabela 18, verifica-se que os efeitos das plantas de cobertura de inverno sobre a σ_p e o IC medidos na área escarificada não foram significativos, em ambas as profundidades e condições de tráfego avaliadas. Esses resultados seguem a mesma tendência exibida pelas propriedades físicas indicadoras do estado de compactação do solo, que também não foram afetadas pela aveia preta e pelo nabo forrageiro (Tabela 11, item 4.3.3.2). Nesse sentido, esperava-se que a implantação da aveia preta após a escarificação resultasse, já em novembro/2006, em uma maior capacidade de suporte de carga e menor suscetibilidade do solo à compactação, em relação ao nabo forrageiro, devido ao seu sistema radicular fasciculado e, dessa forma, com grande capacidade de estabilizar agregados, o que não foi confirmado neste trabalho.

5.3.3. Comparação entre a área sob semeadura direta e escarificada

Os resultados apresentados na Tabela 19 indicam que a capacidade de suporte de carga foi maior e a suscetibilidade do solo à compactação menor para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, comparativamente à escarificação. Tal fato foi observado tanto na camada de 0,03-0,06 m, quanto na de 0,12-0,15 m. Esses resultados podem ser justificados em função dos menores valores de densidade do solo e maiores de porosidade total e macroporosidade obtidos na área escarificada em

comparação à sob semeadura direta, em ambas as camadas estudadas (Tabela 11, item 4.3.3.2). Cabe destacar que os dados mostrados na Tabela 19 correspondem à média entre as áreas trafegadas e não trafegadas. No entanto, a tendência exibida pela σ_p e pelo IC foi a mesma quando a análise estatística foi executada separadamente para cada condição de tráfego.

Tabela 19. Comparação dos valores de tensão de pré-consolidação e índice de compressibilidade obtidos na área escarificada com os determinados para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, independentemente da condição de tráfego (novembro/2006).

| Variável | Camada (m) | Sistema de preparo | |
|----------------------------------|------------|--------------------|------------------|
| | | Escarificação | Semeadura direta |
| Tensão de pré-consolidação (kPa) | 0,0-0,03 | 53 B | 74 A |
| | 0,12-0,15 | 93 B | 135 A |
| Índice de compressibilidade | 0,0-0,03 | 0,47 A | 0,38 B |
| | 0,12-0,15 | 0,33 A | 0,23 B |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste t ($p > 0,05$).

O argumento anteriormente citado torna-se mais evidente quando se comparam as curvas de variação da σ_p com a densidade do solo, obtidas para a escarificação e para a semeadura direta com plantas de cobertura, as quais foram semelhantes entre si (Figura 18). Assim, para uma mesma densidade do solo, os valores de σ_p estimados para a área escarificada e sob semeadura direta são praticamente iguais. Comportamento similar ocorre para o IC (Figura 19), onde as retas que representam a diminuição desse parâmetro em função do aumento na densidade do solo são quase coincidentes. Desse modo, sob valores similares de densidade do solo, a suscetibilidade do mesmo à compactação é pouco alterada pelo sistema de preparo (escarificação ou semeadura direta). Diante disso, é possível afirmar que, para um mesmo grau de compactação, a mobilização do solo via escarificação não resulta em menores valores de σ_p . Em outras palavras, a diminuição do grau de compactação mediante o uso plantas de cobertura de inverno, em semeadura direta, não implica o aumento da capacidade de suporte de carga e/ou na diminuição da suscetibilidade do solo à compactação adicional, quando essa

prática é comparada à escarificação. Esses resultados contrapõem Dexter (1988), que afirma que a mobilização do solo, ao romper ligações que se estabelecem entre partículas e agregados do solo no decorrer do tempo (*age hardening*), diminuiu a resistência do mesmo à deformação. Possivelmente, a menor desagregação promovida pelo escarificador em relação a outros implementos de preparo primário do solo, como os arados de discos e aivecas, a grade pesada e a enxada rotativa (Boller et al., 1997), com a ruptura da massa de solo ocorrendo nos pontos de fraqueza existentes entre os agregados, justifique a ausência de efeitos dos sistemas de preparo testados sobre a σ_p e o IC, quando se considera um mesmo grau de compactação inicial.

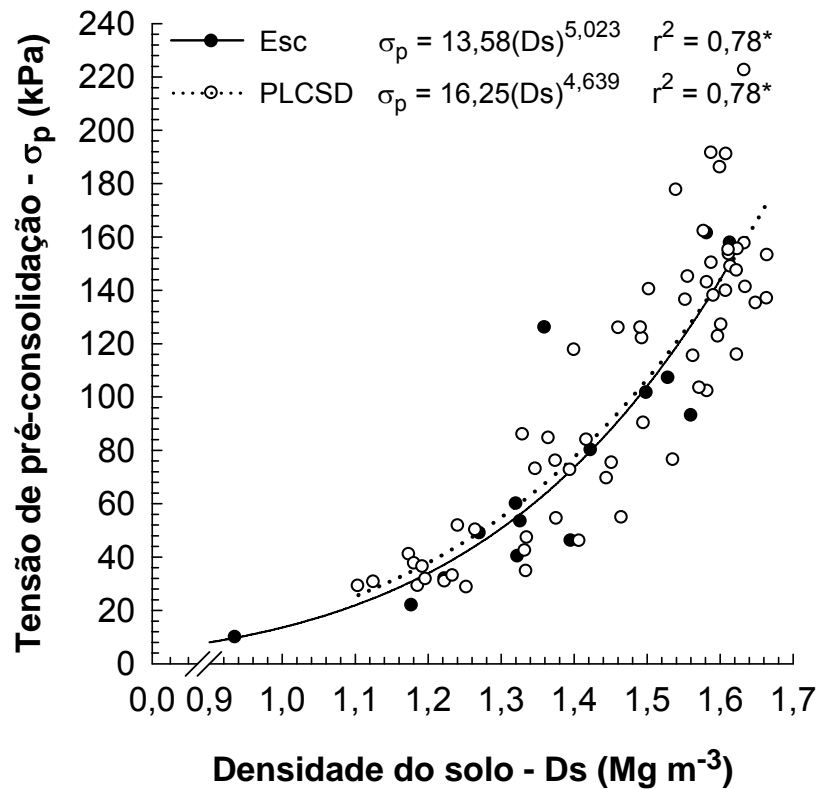


Figura 18. Relação entre a tensão de pré-consolidação e a densidade do solo, determinada em separado para a área escarificada (Esc) e para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), considerando as zonas não trafegadas por rodados de trator e ambas as camadas estudadas (0,03-0,06 m e 0,12-0,15 m).

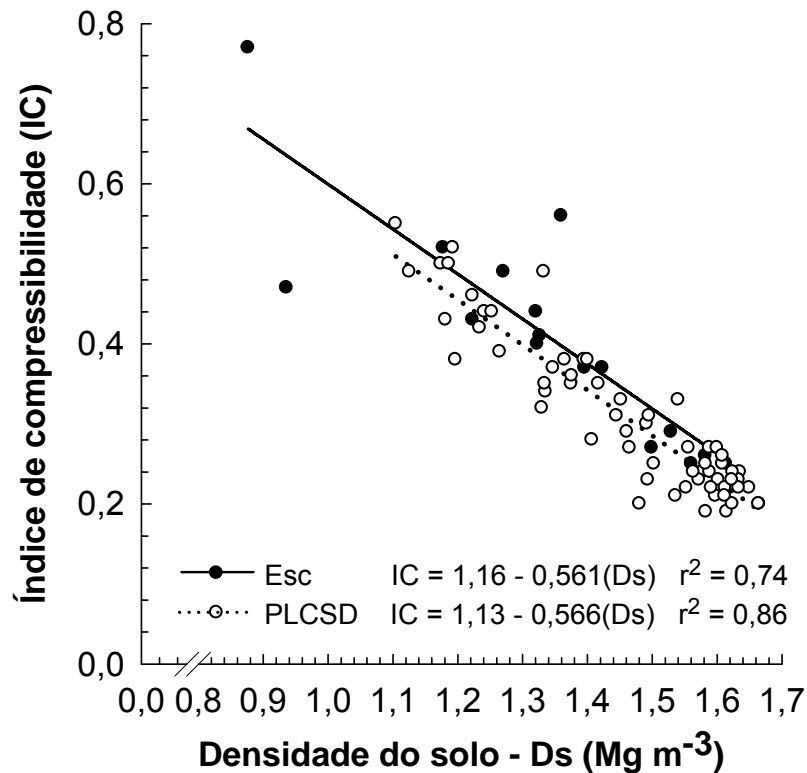


Figura 19. Relação entre índice de compressibilidade e a densidade do solo, determinada em separado para a área escarificada (Esc) e para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD), considerando as zonas não trafegadas por rodados de trator e ambas as camadas estudadas (0,03-0,06 m e 0,12-0,15 m).

A realização de um único tráfego de rodados de trator foi suficiente para que o valor da σ_p medido nas regiões trafegadas da área escarificada igualasse os obtidos nas zonas não trafegadas das parcelas manejadas sob semeadura direta (Tabela 20). Tal fato se restringiu à superfície do solo, uma vez que, na camada de 0,12-0,15 m, a σ_p continuou sendo maior para as plantas de cobertura de inverno em semeadura direta. Esses resultados são coerentes com a manutenção de valores mais elevados de densidade do solo e menores de porosidade total e macroporosidade na referida camada para semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (Tabela 14, item 4.3.3.3). Em contrapartida, um tráfego de rodados de trator elevou os valores de σ_p na camada de 0,12-0,15 m a níveis semelhantes aos obtidos antes da escarificação (Tabela 19). Isso pode ser justificado pelos valores mais altos de σ_p na camada inferior da área sob semeadura direta (135 kPa) em relação aos obtidos na mesma profundidade para o bloco 5 antes da escarificação (114

kPa). Com relação ao IC, verifica-se que esse parâmetro atingiu maiores valores na área escarificada e trafegada comparativamente à sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno e sem tráfego, o que ocorreu nas duas camadas estudadas. Dessa forma, pode-se inferir que, mais uma vez, o tráfego de rodados de trator não modificou a suscetibilidade do solo à compactação, estimada pelo IC, concordando com Lima (2004) e Cepik (2006).

Tabela 20. Comparação dos valores de tensão de pré-consolidação e índice de compressibilidade obtidos na área escarificada e trafegada com os determinados para a área sob semeadura direta plantas de cobertura de inverno e sem tráfego (novembro/2006).

| Variável | Camada (m) | Sistema de preparo | |
|----------------------------------|------------|--------------------|------------------|
| | | Escarificação | Semeadura direta |
| Tensão de pré-consolidação (kPa) | 0,0-0,03 | 70 A | 65 A |
| | 0,12-0,15 | 110,0 B | 139 A |
| Índice de compressibilidade | 0,0-0,03 | 0,45 A | 0,38 B |
| | 0,12-0,15 | 0,30 A | 0,23 B |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas não diferem significativamente pelo teste t ($p > 0,05$).

A comparação entre os MCSCS ajustados para a área escarificada e sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, nas camadas de 0,03-0,06 e 0,12-0,15 m, é mostrada pelas Figuras 20a e 20b, respectivamente. Na profundidade equivalente a 0,12-0,15 m, a comparação do MCSCS obtido na área escarificada é executada em relação ao tratamento aveia preta sob semeadura direta, tendo em vista que o ajuste do referido modelo não foi significativo para a aveia preta+ervilhaca/nabo nesta camada. Independentemente da profundidade estudada, verifica-se que a curva que representa o MCSCS para o tratamento escarificado foi deslocada para cima em comparação à referente à semeadura direta com plantas de cobertura de inverno. Dessa forma, para um mesmo teor de água, a máxima tensão que o solo suporta sem experimentar deformações plásticas e irreversíveis é menor para a escarificação do que para a semeadura direta. Considerando a tensão de contato pneu/solo do trator utilizado neste trabalho (120 kPa), o máximo teor de água permissível com vistas à prevenção da compactação na superfície do

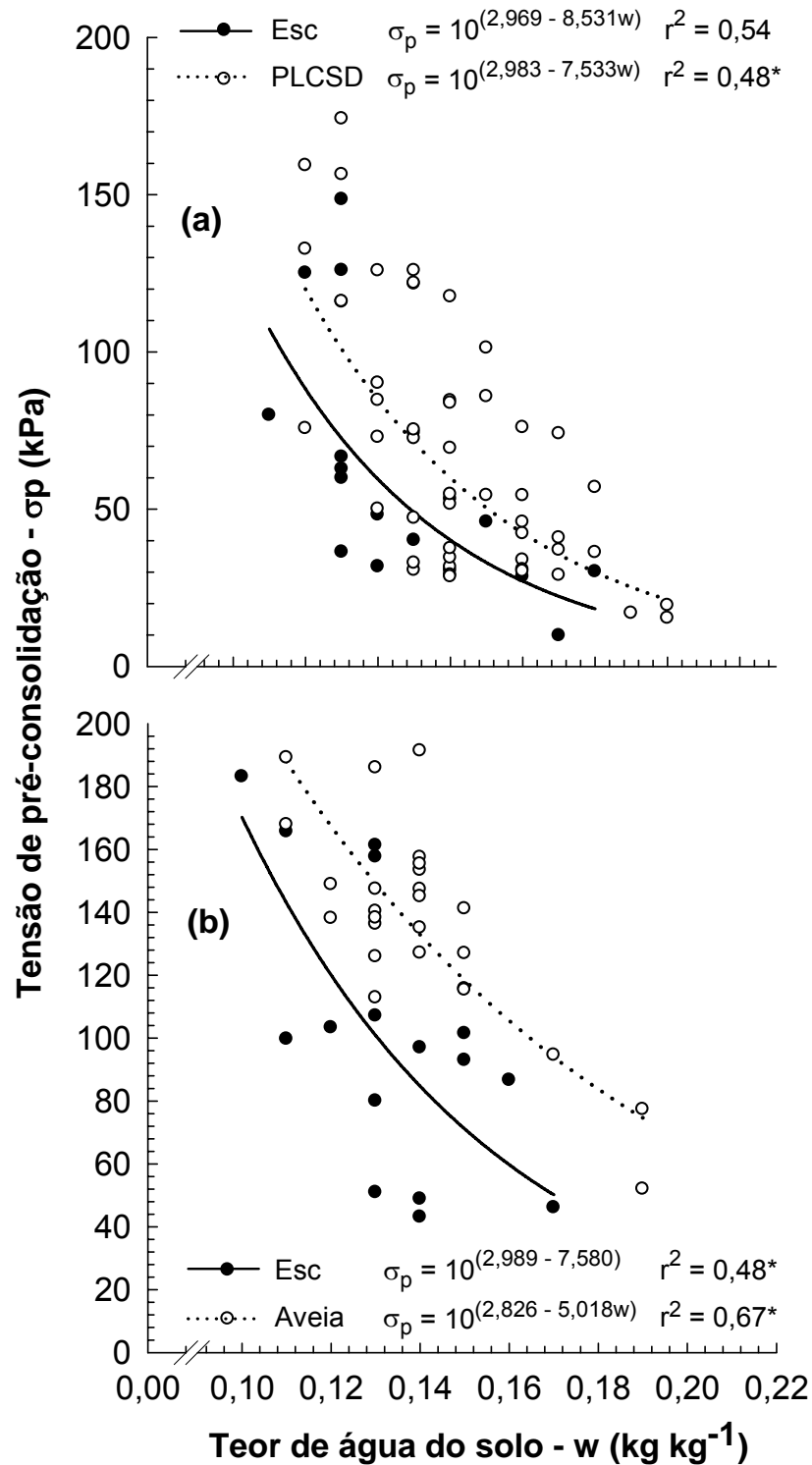


Figura 20. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo ajustados para área escarificada (Esc), em comparação aos obtidos para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (PLCSD) na camada de 0,03-0,06 m (a) e para a aveia preta em semeadura direta (aveia) na camada de 0,12-0,15 m (b).

solo corresponderia a 0,10 e 0,12 kg kg^{-1} para os tratamentos escarificado e semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, respectivamente.

Observa-se ainda que as diferenças entre essas duas condições são ainda maiores na camada inferior. Supondo-se que a tensão transmitida pelos rodados do mesmo trator até essa camada fosse igual à média na área de contato pneu/solo (120 kPa), o tráfego poderia ser realizado com segurança em teores de água equivalentes a, no máximo, 0,12 e 0,15 kg kg⁻¹ nas áreas escarificada e sob semeadura direta, respectivamente. É importante considerar que a realização das operações mecanizadas, na prática, nem sempre é possível em teores de água inferiores aos limites anteriormente mencionados. No caso da semeadura das culturas de verão, por exemplo, tal umidade não é suficiente para garantir a germinação das sementes. Do mesmo modo, a eficácia da maioria dos defensivos agrícolas, principalmente daqueles que são aplicados ao solo e/ou apresentam ação sistêmica, é prejudicada em situações onde o teor de água do solo é muito baixo. Por outro lado, a força de tração demandada pelas semeadoras tende a aumentar e a qualidade do trabalho a piorar, com a formação de agregados grandes que diminuem o contato solo/semente. Diante dessas questões, mais uma vez, comprova-se a importância do tráfego controlado como alternativa à prevenção do processo de compactação do solo.

A principal justificativa para que os MCSCS ajustados para a área escarificada fossem deslocados para regiões de maior σ_p engloba os menores valores de densidade do solo e maiores de porosidade total e macroporosidade obtidos para esse tratamento, conforme mencionado no Capítulo 4, item 4.3.3.3 (Tabela 13). Contrariamente ao observado quando se comparou os MCSCS para as diferentes coberturas de inverno em semeadura direta (Figura 16, item 5.3.1), as curvas que representam os referidos modelos para as condições relativas à escarificação e à semeadura direta, em ambas as camadas, foram aproximadamente paralelas entre si, ou seja, os coeficientes de regressão foram similares. Isso evidencia que a taxa de variação da σ_p com o teor de água do solo não foi afetada pelos sistemas de preparo do solo.

5.4 Conclusões

O emprego de plantas de cobertura de inverno em semeadura direta e a escarificação, ao diminuírem a densidade do solo e aumentarem a

porosidade total e macroporosidade, reduziram a capacidade de suporte de carga e aumentaram a suscetibilidade do solo à compactação adicional. Para a escarificação, a magnitude desses efeitos foi maior e atingiu maiores profundidades comparativamente à semeadura direta com plantas de cobertura de inverno.

O tráfego de rodados de trator não alterou a resposta do solo, em termos de σ_p e IC, às diferentes coberturas de inverno testadas.

Os MCSCS foram afetados pelas coberturas de inverno e sistemas de preparo, sendo as curvas representativas dos mesmos deslocadas para regiões de maior σ_p para o pousio hibernar, em relação às plantas de cobertura de inverno, e para a semeadura direta, comparativamente à escarificação.

Os teores de água no solo que permitem o tráfego de rodados de trator, de forma que a tensão por eles aplicada seja inferior à capacidade de suporte de carga do mesmo, são baixos, o que poderá ocasionar problemas à germinação das sementes e à eficiência dos defensivos agrícolas, bem como resultar em aumentos na demanda de força de tração da semeadora/adubadora e em prejuízos à qualidade da semeadura (contato solo/semente).

6. ESTUDO III: FORÇA DE TRAÇÃO DEMANDADA POR HASTES SULCADORAS DE ADUBO E PATINAGEM DE RODADOS TRATÓRIOS AFETADOS POR PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO E SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

6.1 Introdução

A área sob semeadura direta no Brasil vem crescendo de forma exponencial, desde a implantação, no princípio dos anos 70, das primeiras lavouras sob esse sistema. Dados compilados pela FEBRAPDP (2007) mostram que a área manejada sob semeadura direta passou de pouco menos de 1 milhão de hectares na safra 1980/81 para cerca de 25 milhões em 2005/2006, o que representa um incremento de 2500%. A expansão da semeadura direta não pode ser creditada somente às vantagens advindas de sua adoção, que, de acordo com Gassen & Gassen (1996), englobam principalmente a diminuição das perdas de água e solo por erosão hídrica, o aumento no teor de matéria orgânica do solo e a redução dos custos com mão-de-obra e máquinas agrícolas. A adesão dos produtores agrícolas à semeadura direta só foi possível devido ao desenvolvimento de tecnologias que garantiram a exequibilidade em nível de lavoura desse sistema. Entre as referidas tecnologias, merece destaque o desenvolvimento de semeadoras-adubadoras aptas a cumprir com sua função de depositar os fertilizantes e as sementes de modo a garantir um estabelecimento adequado das culturas e o mínimo revolvimento do solo, mesmo na presença de cobertura vegetal na superfície do solo e, em muitos casos, de camadas compactadas que dificultam a penetração dos mecanismos sulcadores.

No sistema de semeadura direta, a operação tratorizada de maior demanda de potência e, portanto, a que define o tamanho do trator, passou a

ser a semeadura. Dessa forma, conhecer a magnitude da força de tração requerida pelas semeadoras-adubadoras é de grande importância prática visando ao dimensionamento da frota de uma dada propriedade agrícola. A demanda de força de tração por parte das semeadoras-adubadoras depende, em primeiro lugar, dos elementos sulcadores utilizados. Existe um número considerável de evidências experimentais comprovando que o emprego de sulcadores para deposição de adubo, do tipo facão, em substituição aos discos duplos, incrementa a força de tração requerida pelas semeadoras-adubadoras (Casão Junior & Siqueira, 2003; Silva, 2003a; Bordignon, 2005; Mahl, 2006). Como o facão é o componente da semeadora-adubadora que exige maior força de tração (Bordignon, 2005) e, ao mesmo tempo, o seu uso têm aumentado devido à possibilidade de rompimento de camadas compactadas que surgem na superfície do solo manejado sob semeadura direta, a pesquisa tem se concentrado no desenvolvimento de hastes cuja geometria minimize os esforços de tração requeridos (Siqueira et al., 2001).

No entanto, a demanda de força de tração por parte das hastes sulcadoras não depende só das características construtivas das mesmas, mas também das condições do terreno onde a semeadura é realizada, principalmente no que se refere ao grau de compactação (Sánchez-Girón et al., 2005; Xavier, 2005; Conte et al., 2007), teor de água (Casão Junior et al., 1998; Cepik, 2002), presença e estado de decomposição das raízes (McLaughlin et al., 2004; Levien et al., 2004; Bortolotto et al., 2006) e quantidade de resíduos presentes na superfície do solo (Cepik, 2006). Todos esses fatores são afetados pelas coberturas de inverno e pelos sistemas de preparo do solo. Diante disso, é muito provável que as diferentes alternativas que podem ser utilizadas visando à recuperação da qualidade física de solos com elevado grau de compactação inicial exerçam efeitos divergentes sobre a demanda de força de tração por parte das hastes sulcadoras. Tais efeitos podem ser maximizados em áreas não trafegadas, como ocorre quando do emprego do tráfego controlado. É importante que esses aspectos sejam levados em consideração pelos técnicos e produtores, quando da tomada de decisão a respeito de qual forma de controle e/ou prevenção deste problema deve ser adotada.

Além da força de tração demandada pela semeadora-adubadora,

outro fator determinante do desempenho energético e econômico da operação de semeadura relaciona-se às perdas de potência por patinagem dos rodados do trator. Além das características do trator (massa, área de contato e pressão de inflação e tipo de carcaça dos pneus) e da demanda de força na barra de tração, a patinagem é afetada pelas condições da superfície do solo. Nesse sentido, práticas que reduzam o grau de compactação do solo tendem a diminuir a resistência do mesmo às tensões cisalhantes impostas pelos rodados (Sánchez-Girón, 1996) e, portanto, incrementar a patinagem. Por outro lado, a demanda de força de tração das semeadoras-adubadoras é menor sob menores graus de compactação (Sánchez-Girón et al., 2005; Conte et al., 2007). Dessa forma, a influência real das medidas de controle da compactação sobre a patinagem dos rodados tratórios, ao que parece, será determinado pelo balanço entre os dois efeitos anteriormente mencionados, os quais são contraditórios. É importante considerar ainda que a patinagem tende a aumentar em função do incremento na massa de resíduos sobre o solo (Herzog, 2003; Xavier, 2005; Cepik, 2006). O tipo de resíduo presente também pode modificar a magnitude das perdas de potência associadas à patinagem (Gabriel Filho et al., 2004).

Levando-se em consideração a problemática previamente discutida, o presente estudo teve como hipóteses:

- em semeadura direta, o uso de plantas de cobertura de inverno diminui a força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo quando comparadas ao pousio, independentemente da realização ou não de tráfego de rodados de trator. No entanto, esta medida aumenta a patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura direta das culturas do milho e da soja;

- a escarificação resulta em menores valores de força de tração comparativamente à semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, considerando as regiões não submetidas ao tráfego de rodados de trator. Essas diferenças, entretanto, são reduzidas pelo tráfego de rodados de trator posterior à escarificação do solo;

- sob condições de tráfego controlado, a menor demanda de força de tração ocasionada pela escarificação proporciona menores perdas de potência por patinagem em relação à semeadura direta.

A partir dessas hipóteses, foram traçados os seguintes objetivos:

- investigar a influência exercida pelas coberturas de inverno, pelo tráfego e pelos sistemas de preparo (escarificação e semeadura direta) sobre a força de tração absoluta e específica demandada por hastes sulcadoras de adubo atuando a duas profundidades durante a semeadura de milho e soja;
- quantificar a patinação dos rodados tratórios em função das coberturas de inverno e do sistema de preparo durante a semeadura de milho e soja sob duas profundidades de colocação do adubo.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Experimento de campo

As informações referentes ao experimento de campo foram apresentadas no capítulo 3 (material e métodos geral).

6.2.2 Avaliações realizadas

6.2.2.1 Demanda de força de tração da haste sulcadora para adubo

A força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja foi avaliada somente na safra 2006/07, através de um sistema de coleta e armazenamento de dados desenvolvido por Cepik (2006). De maneira simplificada, esse sistema é constituído por extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) colados ao suporte da haste sulcadora de adubo (Figura 21). Os extensômetros são condutores em forma de fios, cuja variação da resistência elétrica é diretamente e inversamente proporcional ao comprimento e diâmetro dos mesmos, respectivamente. A força horizontal experimentada pela ponteira da haste ao se deslocar no solo é transmitida ao suporte da mesma, causando deformações elásticas e micrométricas nesse componente. Isso faz com que os fios condutores que compõem os extensômetros também se deformem elasticamente e no sentido longitudinal, aumentando o seu comprimento e diminuindo o diâmetro. Em consequência, há uma variação na resistência elétrica e na tensão de saída dos extensômetros, as quais são proporcionais à

força horizontal incidente sobre a ponteira da haste, tornando possível, mediante calibração, a determinação da força de tração.

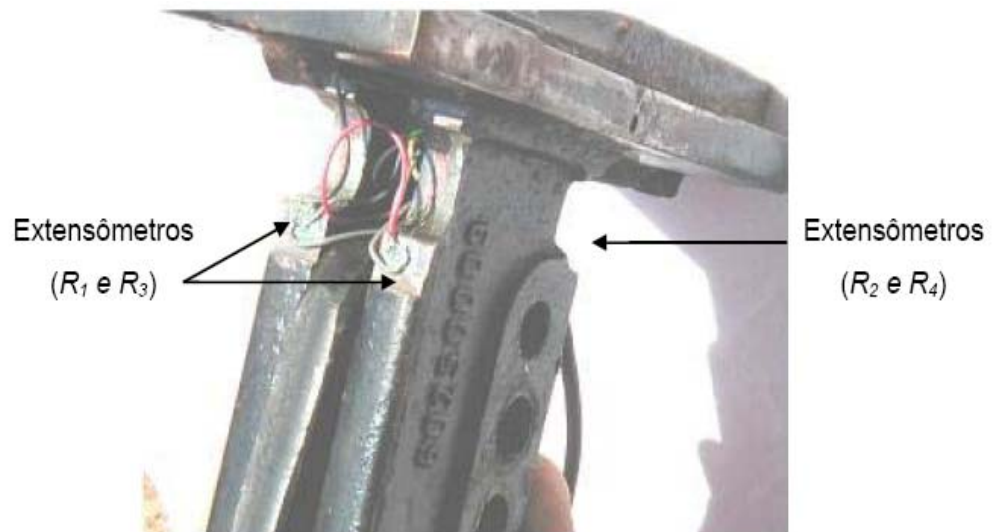


Figura 21. Extensômetros instalados no suporte da haste sulcadora (extraído de Cepik, 2006).

As variações observadas na resistência elétrica dos extensômetros são muito pequenas, de forma que a medição das mesmas é muito complexa e cara. Para contornar essa limitação, foram utilizados quatro extensômetros de resistência elétrica ligados entre si de forma a constituir um circuito do tipo ponte de Wheatstone completa. No intuito de aumentar a sensibilidade do sistema, dois extensômetros foram colados na parte frontal (submetidos a esforços de tração) e dois na parte traseira (submetidos a esforços de compressão) do suporte (Figuras 20 e 21).

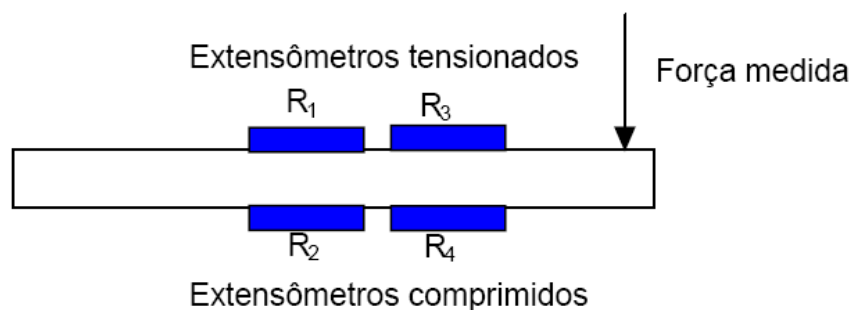


Figura 22. Extensômetros de tensão (R_1 e R_3) e de compressão (R_2 e R_4) (extraído de Cepik, 2006).

Os sinais de saída, cuja magnitude é proporcional à deformação dos

strain gauges e, conseqüentemente, à força de tração na haste sulcadora, foram armazenados em um datalogger fabricado pela Campbell Scientific Inc., modelo CR23X (Figura 22). Através do software DLOG.exe, o datalogger foi previamente carregado com um programa escrito em arquivo texto, o qual pode ser modificado pelo operador através de um editor de textos ASCII, como o notepad. Este programa fornece ao datalogger diversas informações, como, por exemplo, os sensores habilitados, o coeficiente angular da reta de calibração do extensômetro e um fator aditivo. A magnitude deste fator aditivo é tal que, quando não há incidência de força na haste, a leitura seja nula. O coeficiente angular e o fato aditivo propiciaram o armazenamento dos dados diretamente na unidade de interesse (N). O programa DLOG.exe permite, ainda, a recuperação dos dados armazenados a partir do datalogger.

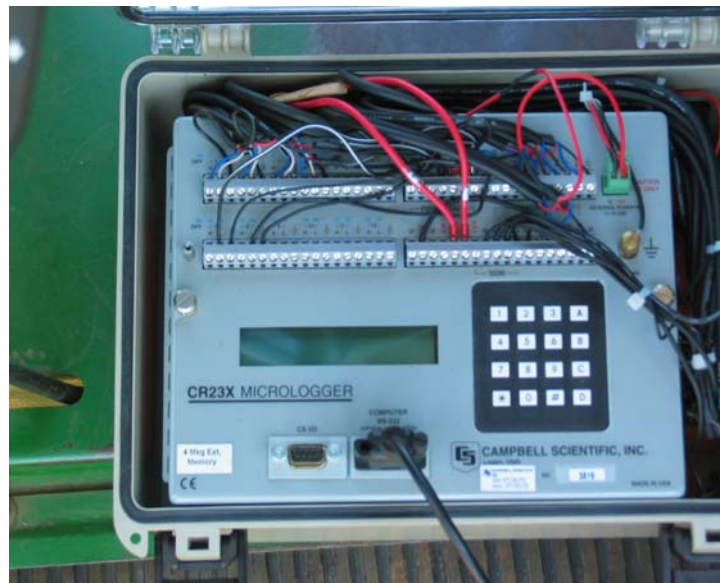


Figura 23. Datalogger utilizado para o armazenamento dos dados de força de tração medida nas hastes sulcadoras de adubo.

Para a calibração dos extensômetros, a haste e o suporte instrumentados foram presos a uma estrutura de madeira, de modo a ficarem na posição horizontal (Figura 23). Nessa condição, a haste foi submetida a forças de magnitudes diferentes, através de objetos metálicos de massa conhecida presos à ponteira do facão por uma corrente. Posteriormente, as forças aplicadas foram relacionadas aos respectivos valores indicados no display do datalogger, gerando uma reta de calibração (Figura 24), cujo coeficiente angular é informado ao datalogger pelos arquivos textos através do

programa DLOG.exe. A calibração foi efetuada em separado para cada regulagem da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo (“raso” e “profundo”), utilizando-se, no momento da coleta dos dados em cada um desses tratamentos, os respectivos coeficientes angulares.



Figura 24. Posição da haste sulcadora de adubo e seu respectivo suporte durante a calibração dos extensômetros de resistência elétrica.

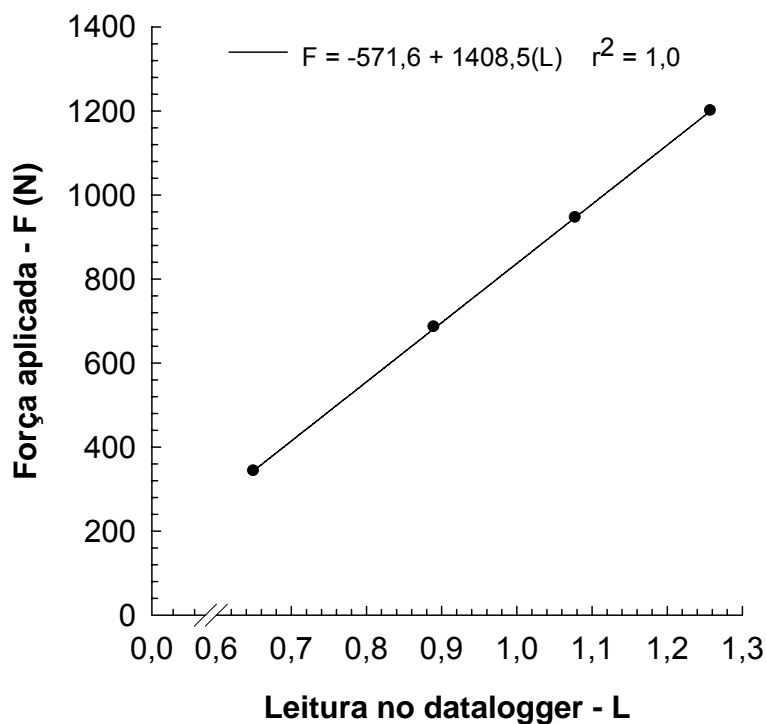


Figura 25. Exemplo de reta de calibração dos extensômetros de resistência elétrica.

A força de tração foi medida na haste central e na localizada na extremidade direita da semeadora-adubadora, as quais corresponderam, respectivamente, às áreas não trafegadas e trafegadas por rodados de trator. Em trabalhos prévios, constatou-se que a haste que atuou na região trafegada por rodados de trator atingiu menores profundidades comparativamente à que se deslocou nas áreas livres de tráfego (Debiasi et al., 2006). Desse modo, visando igualar a profundidade de atuação, empregou-se, nas zonas trafegadas, uma haste com as mesmas características das demais (formato, ângulo de ataque e espessura da ponteira), porém, 0,025 m mais comprida.

6.2.2.2 Profundidade máxima e área da seção transversal do sulco produzido pela haste sulcadora de adubo

Para a determinação dessas duas variáveis, foi empregado um perfilômetro com 0,35 m de largura, equipado com varetas espaçadas de 0,01 m e curso de 0,35 m (Figura 25). A metodologia envolveu, em primeiro lugar, a remoção cuidadosa do solo mobilizado na linha de semeadura, de forma a expor as paredes e o fundo do sulco aberto pela haste. Em seguida, as varetas do perfilômetro, instalado transversalmente ao sulco, foram liberadas. O posicionamento da extremidade superior das varetas copia a forma geométrica do sulco, permitindo transcrevê-lo a uma folha de papel colocada à frente do painel do aparelho. A maior distância vertical medida entre o fundo do sulco e a superfície do solo correspondeu à profundidade máxima do mesmo. As distâncias verticais de cada ponto copiado do fundo do sulco, em relação à linha correspondente à superfície do solo, foram medidas no laboratório e, através de uma planilha eletrônica elaborada no Microsoft Excel[®], obteve-se a área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo.

A profundidade máxima e a área da seção transversal do sulco foram quantificadas logo após a semeadura das culturas de verão safra 2006/07. Na área conduzida sob semeadura direta, essa avaliação foi executada em todas as subparcelas dos blocos 2 e 3. No bloco 2, foram realizadas duas leituras por subparcela, ambas sobre as linhas correspondentes às hastes instrumentadas, sendo uma no sulco aberto sobre a zona de tráfego do trator e outra no sulco referente à área não trafegada. As

avaliações realizadas no bloco 3 restringiram-se ao sulco produzido pela haste instrumentada que se deslocou na área não trafegada. A determinação da profundidade de atuação e da área de solo mobilizada pela haste sulcadora, no bloco submetido à escarificação, foi efetuada em quatro parcelas (duas cultivadas com milho e duas com soja). De maneira semelhante à área sob semeadura direta, em duas parcelas, uma ocupada com soja e outra com milho, foram realizadas duas leituras por subparcela, ambas nas linhas correspondentes às hastes instrumentadas, sendo uma na zona com e outra na sem tráfego de rodados de trator. Nas duas parcelas restantes, procedeu-se a uma determinação por subparcela, no sulco aberto pela haste instrumentada que atuou nas regiões não trafegadas.



Figura 26. Perfilômetro de varetas utilizado para a determinação da profundidade máxima do sulco e área da seção transversal de solo mobilizado pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura das culturas de verão.

6.2.2.3 Força de tração por área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora

Esta variável foi obtida dividindo-se os valores de força de tração medida nas hastes sulcadoras de adubo pela média da área da seção transversal do sulco formado no mesmo tratamento.

6.2.2.4 Força de tração por profundidade de sulco

Esta variável foi quantificada através da divisão os valores de força de tração medida nas hastes sulcadoras de adubo pela média da profundidade do sulco formado no mesmo tratamento.

6.2.2.5 Patinagem das rodas motrizes do trator

Durante a semeadura das culturas de verão, o trator percorreu as parcelas sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. Assim, a patinagem foi determinada apenas para os rodados traseiros. Como a área experimental apresenta uma declividade média de 0,03 m m⁻¹ no sentido do comprimento das parcelas, a semeadura foi realizada com o trator se deslocado em aclive. Mediu-se, para cada tratamento, a distância real percorrida pelo trator em quatro voltas da roda traseira, sendo a contagem iniciada somente quando a semeadora-adubadora já estava trabalhando no interior da parcela. A distância teórica, por sua vez, foi obtida medindo-se o espaço percorrido por quatro voltas da roda traseira durante o deslocamento do trator em área adjacente à experimental, com a semeadora suspensa pelo sistema hidráulico. De posse desses dados, a patinagem (δ , em m m⁻¹) foi estimada através da fórmula (10):

$$\delta = \frac{Dt - Dr}{Dt} \quad (10)$$

Onde:

- Dt = distância teórica, em m;
- Dr = distância real, em m.

6.2.2.6 Teor de água na semeadura das culturas de verão

Imediatamente antes da semeadura do milho e da soja na safra 2006/07, coletou-se, na área sob semeadura direta, duas amostras deformadas em todas as parcelas principais dos blocos 1 e 4, sendo uma na camada de 0,0-0,08 e outra na de 0,08-0,16 m. Na área escarificada, foram retiradas duas amostras em cada subparcela componente das quatro parcelas centrais, sendo uma em cada profundidade. Essas amostras foram acondicionadas em latas de

alumínio e então transportadas para o laboratório. O procedimento para a determinação do teor de água seguiu as recomendações descritas pelo Manual de Análises Físicas e Químicas da EMBRAPA (EMBRAPA, 1997).

6.2.3 Análise estatística dos dados

Os modelos utilizados para a análise da variância (ANOVA), em função do sistema de preparo e das variáveis determinadas, são abaixo especificados:

a) semeadura direta:

- força de tração absoluta e específica por área de solo mobilizada e por profundidade máxima do sulco: idem ao modelo 1 do item 4.3.2c. No entanto, a ANOVA foi realizada em separado para o milho e para a soja;

- patinagem: trifatorial em blocos ao acaso com parcelas subdivididas no espaço e quatro repetições. Parcelas principais: coberturas de inverno e culturas de verão. Subparcelas: profundidade de atuação das hastes sulcadoras;

- teor de água do solo na semeadura das culturas de verão: idem ao item 4.3.2a;

b) escarificação:

- força de tração absoluta e específica por área de solo mobilizada e por profundidade máxima do sulco: trifatorial em blocos ao acaso com parcelas subdivididas no espaço e três repetições. Parcelas principais: culturas de verão. Subparcelas: coberturas de inverno. Subsubparcelas: condição de tráfego;

- patinagem: bifatorial com parcelas subdivididas no espaço e três repetições. Parcelas principais: culturas de verão. Subparcelas: coberturas de inverno;

- teor de água do solo na semeadura das culturas de verão: trifatorial em blocos ao acaso com parcelas subdivididas no espaço e duas repetições. Parcelas principais: culturas de verão. Subparcelas: coberturas de inverno. Subsubparcelas: camadas avaliadas.

Quando a ANOVA indicou a ocorrência de interações significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro

do outro, através do teste de Duncan ($p < 0,05$). Quando não houve interação, e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. A ANOVA e os testes de comparação de médias foram executados através do programa computacional SOC-EMBRAPA.

Para a comparação entre as variáveis medidas na área escarificada e sob semeadura direta, foi empregado o teste t de Student bilateral para dados não pareados ($p < 0,05$). O mesmo teste foi utilizado para a análise estatística dos dados referentes à profundidade do sulco e área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora, em ambos os sistemas de preparo. O teste t foi efetuado através de planilha eletrônica do Microsoft Excel[®].

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Semeadura direta

Os resultados referentes à profundidade do sulco aberto pela haste sulcadora do adubo durante da semeadura das culturas da soja e do milho safra 2006/07, constam das Tabelas 21 a 22. Verifica-se, em primeiro lugar, que a profundidade máxima real de atuação das hastes sulcadoras na área sob semeadura direta foi de fato superior (teste t, $p < 0,05$) para a posição “profundo” em relação à posição “raso”, independentemente das coberturas de inverno, do tráfego e das culturas de verão semeadas (Tabela 21). Essas diferenças não foram muito grandes (2,7 e 3,4 cm, respectivamente, para as áreas sem e com tráfego de rodados de trator), mas se assemelharam às observadas por Beutler (2005), na mesma área, sob os mesmos tratamentos e utilizando a mesma semeadora-adubadora, e por Xavier (2005). As profundidades médias atingidas foram superiores às preconizadas teoricamente, o que foi mais evidente para a posição “raso”. Tal comportamento pode ser atribuído à atuação do disco de corte localizado à frente de haste, cuja mola de regulagem foi ajustada sob maior pressão visando diminuir a probabilidade de ocorrência de embuchamentos, devido à grande quantidade de resíduos na superfície, principalmente nos tratamentos envolvendo plantas de cobertura de inverno

(Tabela 3, item 4.3.1). Este fato, associado ao baixo grau de compactação na superfície do solo (Capítulo 4, item 4.3.3.1), facilitou a penetração da haste, principalmente quando esta se encontrava na posição “raso”.

Tabela 21. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada.

| Cobertura de inverno | Sem tráfego | | Com tráfego | |
|----------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | Raso | Profundo |
| | ----- <i>cm</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 10,9 a | 13,8 a | 14,4 a | 16,4 a |
| Aveia preta | 11,0 a | 12,9 a | 12,2 a | 15,8 a |
| Pousio | 10,4 a | 13,5 a | 10,7 a | 15,3 a |
| Média | 10,7 B | 13,4 A | 12,4 B | 15,8 A |

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e, dentro de cada condição de tráfego, por letras maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de t ($p>0,05$).

Tabela 22. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada.

| Cultura de verão | Raso | | Profundo | |
|------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Sem tráfego | Com tráfego | Sem tráfego | Com tráfego |
| | ----- <i>cm</i> ----- | | | |
| Milho | 11,2 a | 12,9 a | 14,0 a | 16,5 a |
| Soja | 10,3 a | 11,9 a | 12,7 a | 15,1 a |
| Média | 10,7 B | 12,4 A | 13,4 B | 15,8 A |

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e, dentro de cada profundidade de atuação da haste, por letras maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de t ($p>0,05$).

Já as coberturas de inverno não afetaram de maneira significativa a profundidade máxima do sulco (Tabela 21), independentemente do tráfego, da profundidade de regulação da haste e da cultura de verão semeada. Isto ocorreu mesmo diante de um teor de água no momento da semeadura significativamente mais alto para a aveia preta em relação às demais coberturas (Tabela 23), o qual, inclusive, superou a umidade correspondente ao limite de plasticidade (Tabela 2, item 3.1). Teores de água muito elevados tendem a diminuir a profundidade de atuação das hastes sulcadoras (Portella et al., 1997; Fey et al., 2001), o que pode ser atribuído à aderência de solo aos

elementos sulcadores (Vieira et al., 1998). A provável atuação profunda do disco de corte da palha e o espelhamento das paredes produzidas pelo deslocamento do mesmo devido ao elevado teor de água, podem ter diminuído a aderência de solo à haste sulcadora e, assim, o efeito anteriormente descrito. De qualquer forma, estes resultados concordam com Cepik (2002), que, estudando o efeito de diferentes teores de água sobre o desempenho de hastes sulcadoras de adubo, concluiu que a profundidade máxima efetiva de atuação das mesmas não variou em função da umidade do solo. O mesmo ocorre quando os dados do presente trabalho são comparados aos obtidos por Beutler (2005), que não encontrou diferenças significativas na profundidade de atuação da haste sulcadora em razão das diferentes coberturas de inverno estudadas.

Observa-se ainda que a profundidade máxima real de atuação da haste sulcadora foi significativamente maior na condição trafegada comparativamente a não trafegada (Tabela 22), o que foi mais pronunciado quando a mesma foi regulada na posição “profundo”. Isso ocorreu em virtude da utilização de uma haste 2,5 cm mais longa na área trafegada do que na não trafegada, o que é comprovado pelo fato de as diferenças absolutas entre as profundidades máximas de atuação da haste nas regiões com e sem tráfego terem sido, em média, de 2 cm. Como a geometria das hastes empregadas nas zonas com e sem tráfego de rodados de trator era idêntica, pode-se inferir que a maior compactação nas áreas com tráfego (Tabela 10 e Figura 8, item 4.3.3.1), não afetou de forma pronunciada a profundidade real de atuação das hastes sulcadoras de adubo. Este comportamento pode estar relacionado à maior força vertical de sucção imposta à haste sulcadora quando esta atua em solos mais densos (Sánchez-Girón et al., 2005), o que teria, desse modo, compensado o maior grau de compactação observado na área trafegada por rodados de trator. No entanto, Debiasi et al. (2006), avaliando o efeito de diferentes sistemas de rotação de culturas, tráfego e formas de adubação (orgânica ou mineral) sobre a força de tração demandada por hastes sulcadoras de adubo, encontraram que a profundidade do sulco aberto pela haste que atuou atrás dos rodados foi significativamente inferior à área não trafegada, o que foi atribuído pelos autores ao maior grau de compactação observado nessa área.

Tabela 23. Teor de água do solo no momento da semeadura do milho e da soja (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, em função da cobertura de inverno, da camada avaliada e da cultura de verão.

| Tratamento | Camada (m) | |
|---|---------------|---------------|
| | 0,00 a 0,08 | 0,08 a 0,16 |
| ----- $g\ kg^{-1}$ ----- | | |
| ----- <i>Cobertura de inverno</i> ----- | | |
| Nabo forrageiro | 0,15 b | 0,16 a |
| Aveia preta | 0,20 a | 0,15 ab |
| Pousio | 0,15 b | 0,14 b |
| ----- <i>Cultura de verão antecessora</i> ----- | | |
| Milho | 0,16 a | 0,15 a |
| Soja | 0,17 a | 0,15 a |
| Média | 0,16 A | 0,15 B |

CV coberturas de inverno = 16,2%; CV cultura de verão antecessora = 16,2%; camada = 5,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Não houve diferenças estatisticamente significativas entre a semeadura da soja e do milho relativamente à profundidade máxima real do sulco (Tabela 22). Entretanto, houve uma tendência de o aprofundamento das hastes ser maior quando da semeadura do milho, independentemente da profundidade teórica de atuação das mesmas, da condição de tráfego e da cobertura vegetal de inverno. Essa tendência pode ser explicada pelo maior número de linhas que equipam a semeadora-adubadora quando essa realiza a semeadura da soja, o que “dilui” a massa da mesma, resultando numa redução da pressão que em cada linha. Como a penetração do disco de corte de palha depende principalmente da massa que incide sobre o mesmo (Silva, 2007), o maior número de linhas pode ter diminuído a profundidade de atuação do disco e, em conseqüência, afetado de maneira negativa o aprofundamento da haste. Por outro lado, os efeitos diretos da maior pressão em cada linha de semeadura sobre a penetração da haste parecem ser menos importantes, uma vez que, sob ângulos de ataque semelhantes às ponteiros utilizadas neste trabalho, ocorre a geração de uma força vertical de sucção (Siqueira et al., 2001; Bordignon, 2005), que auxilia grandemente no aprofundamento do facão. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram com os encontrados por

Modolo et al. (2005), que concluíram que a profundidade do sulco diminuiu à medida que o número de linhas de semeadura foi aumentado.

Os resultados obtidos para área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo (ATSM) são mostrados nas Tabelas 24 e 25. Observa-se que a resposta desta variável aos tratamentos foi diferente do que a exibida pela profundidade do sulco. Na zona onde não houve tráfego de rodados de trator, os valores da ATSM foram mais elevados quando a haste atuou a uma maior profundidade (Tabela 24), independentemente da cultura semeada e da cobertura vegetal antecedente, o que concorda com os resultados obtidos por diversos autores (Herzog, 2003; Beutler, 2005; Xavier, 2005; Cepik, 2006). No entanto, na região submetida ao tráfego de rodados de trator, a ATSM não foi significativamente modificada pela profundidade de atuação para a qual a haste foi regulada. Da mesma forma, constata-se que a ATSM na posição “profundo” não foi alterada significativamente pela condição de tráfego (Tabela 25), mesmo com a haste atuando a uma profundidade média 2,4 cm menor na região não trafegada (Tabela 21). Diante desses dois fatos, pode-se inferir que a profundidade crítica de atuação da haste sulcadora foi ultrapassada quando a mesma atuou na posição “profundo” e na área trafegada por rodados de trator.

A profundidade crítica de atuação de ferramentas de mobilização do solo do tipo haste é definida como sendo a profundidade a partir da qual o solo flui lateralmente à ferramenta ao invés de se romper por cisalhamento. (Sánchez-Girón, 1996). De acordo com o mesmo autor, a partir da profundidade crítica, observa-se um grande incremento na demanda de tração por parte das hastes sulcadoras, sem aumento significativo na área de solo mobilizada pela mesma. Em geral, a profundidade crítica equivale a 5-7 vezes a largura da ponteira. Neste trabalho, as hastes utilizadas em ambas as condições de tráfego apresentavam uma ponteira com largura igual a 2,5 cm, de forma que a profundidade crítica de atuação das mesmas deveria estar, teoricamente, entre 12,5-17,5 cm. Considerando os resultados obtidos no presente trabalho, a profundidade crítica foi de aproximadamente 14 cm, valor este condizente com os limites anteriormente citados. Os elevados teores de água observados na superfície do solo para a aveia preta podem justificar o fato de a profundidade crítica ter sido menor do que o limite superior de 17,5

cm, pois, segundo Sánchez-Girón (1996), esse parâmetro tende a ser menor quando as hastes atuam em solos com maior umidade. No Apêndice 11, é mostrado um exemplo de perfil de sulco aberto numa condição tal que a profundidade crítica de atuação da haste sulcadora para deposição do adubo foi ultrapassada.

Tabela 24. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno, do tráfego e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada.

| Cobertura | Sem tráfego | | Com tráfego | |
|-----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Raso | Profundo | Raso | Profundo |
| | ----- cm^2 ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 77,2 a | 127,4 a | 130,1 a | 99,7 a |
| Aveia preta | 76,0 a | 100,0 a | 98,9 a | 110,7 a |
| Pousio | 71,6 a | 131,7 a | 80,7 a | 103,6 a |
| Média | 74,9 B | 119,7 A | 103,2 A | 104,6 A |

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e, dentro de cada condição de tráfego, por letras maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de t ($p>0,05$).

Tabela 25. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área sob semeadura direta, em função da cultura de verão, do tráfego de rodados de trator e da profundidade para a qual a haste sulcadora foi regulada.

| Cultura de verão | Raso | | Profundo | |
|------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Sem tráfego | Com tráfego | Sem tráfego | Com tráfego |
| | ----- cm^2 ----- | | | |
| Milho | 65,2 a | 87,7 b | 122,7 a | 93,6 b |
| Soja | 84,7 a | 118,7 a | 116,7 a | 115,7 a |
| Média | 74,9 B | 103,2 A | 119,7 A | 104,6 A |

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e, dentro de cada profundidade de atuação da haste, por letras maiúsculas nas linhas, não diferem significativamente pelo teste de t ($p>0,05$).

Independentemente da condição de tráfego, da cultura semeada e da profundidade teórica de atuação da haste sulcadora, as coberturas de inverno não influenciaram significativamente a ATSM (Tabela 24), assemelhando-se aos dados obtidos por Beutler (2005). No entanto, na posição “raso”, os valores de ATSM tenderam a ser menores no pousio do que na aveia preta e no nabo forrageiro, o que pode ser justificado em razão da

menor profundidade de atuação da haste neste tratamento (Tabela 21), embora essas diferenças também não tenham sido estatisticamente significativas. Esta tendência, porém, não se repetiu para a posição “profundo”. Por outro lado, a ATSM variou significativamente em função da cultura de verão semeada ou, em outras palavras, do número de linhas de semeadura (Tabela 25). Embora as diferenças tenham se mostrado estatisticamente significativas apenas quando a haste atuou na região submetida ao tráfego de rodados de trator, a magnitude da ATSM tendeu a ser maior para a soja, mesmo levando-se em consideração que a profundidade máxima do sulco tenha sido maior para o milho (Tabela 21). Esse comportamento sugere que o número de linhas de semeadura e, portanto, a pressão que incide sobre cada uma delas, modificou o padrão de ruptura do solo. A tendência de uma maior área de solo mobilizada quando a semeadora estava equipada com cinco linhas, mesmo com a haste sulcadora de adubo atuando a uma profundidade menor nessa condição, possivelmente esteja relacionada à atuação do disco de corte. Conforme discutido anteriormente, o disco de corte na semeadura do milho deve ter trabalhado a uma maior profundidade comparativamente à soja, devido a maior pressão atuante sobre as linhas. Com isso, o corte vertical do solo pelo disco foi mais profundo durante a semeadura do milho, e esse fato provavelmente tenha prejudicado a ruptura do solo por cisalhamento.

O requerimento de força de tração por parte das hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função do tráfego, da cobertura de inverno e da profundidade teórica de atuação da haste, encontra-se na Tabela 26. Na semeadura da soja, a ANOVA evidenciou que as interações coberturas x profundidade da haste, coberturas x tráfego e profundidade da haste x tráfego não foram estatisticamente significativas. Também não houve efeito significativo das coberturas de inverno sobre a força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo quando as médias gerais destes tratamentos foram comparadas entre si, independentemente do tráfego e da profundidade de atuação da haste sulcadoras (Tabela 26). Levando-se em consideração que as plantas de cobertura de inverno resultaram em um menor grau de compactação do solo em relação ao pousio, principalmente na camada de 0,0-0,1 m (Capítulo 4, item 4.3.31), esperava-se que a força de tração fosse menor para os tratamentos aveia

preta+ervilhaca/nabo e aveia preta, o que não se confirmou. A ausência de efeito significativo das coberturas de inverno sobre a força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo na semeadura da soja pode ser atribuída aos efeitos exercidos pelas mesmas sobre as características do sulco produzido, em termos de profundidade máxima (Tabela 21) e área da seção transversal (Tabela 24).

Tabela 26. Força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Tráfego | | Média |
|--------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | Sem | Com | |
| ----- <i>kN</i> ----- | | | | | |
| ----- <i>Soja</i> ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 0,74 | 1,22 | 0,72 | 1,25 | 0,98 a |
| Aveia preta | 0,84 | 1,21 | 0,77 | 1,27 | 1,02 a |
| Pousio | 0,78 | 1,23 | 0,75 | 1,27 | 1,01 a |
| Média | 0,79 B | 1,22 A | 0,75 B | 1,26 A | 1,00 |
| ----- <i>Milho</i> ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 1,00 b | 1,84 ab | 0,98 b | 1,86 b | 1,42 a |
| Aveia preta | 1,21 a | 1,82 b | 0,99 b | 2,04 a | 1,51 a |
| Pousio | 1,11 ab | 1,97 a | 1,07 a | 2,01 a | 1,54 a |
| Média | 1,11 B | 1,88 A | 1,01 B | 1,97 A | 1,49 |

CV milho: coberturas de inverno = 12,8%; profundidade da haste = 8,1%; tráfego = 5,2%. CV soja: coberturas de inverno = 8,0%; profundidade da haste = 7,8%; tráfego = 7,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Na semeadura do milho, o fator coberturas de inverno interagiu de forma significativa com a profundidade de atuação da haste e, de forma contrária ao observado para todas as propriedades físicas (Capítulo 4) e mecânicas (Capítulo 5) do solo, também com a condição de tráfego (Tabela 26). Por outro lado, não foi obtida significância estatística para a interação tráfego x profundidade da haste. O padrão de variação força de tração em função das coberturas de inverno na semeadura do milho não foi claro, de

modo que é difícil associar a magnitude dessa variável com a variação observada para as propriedades físicas nesses tratamentos. Esse fato relaciona-se, provavelmente, às diferenças na profundidade do sulco e ATSM entre os referidos tratamentos, conforme já mencionado para a soja. Entretanto, os dados mostrados na Tabela 26 permitem inferir que, na maioria das situações, o nabo forrageiro resultou nas menores demandas de força de tração por parte das hastes sulcadoras de adubo, mesmo que a profundidade máxima de atuação das mesmas e a ATSM tenham apresentado uma tendência de serem maiores para esta cobertura (Tabelas 21 e 24). Tal fato é coerente com os valores de resistência do solo à penetração (RP) medidos em maio de 2007, os quais foram menores para o nabo forrageiro até 0,18 m de profundidade (Figura 4c, item 4.3.3.1). Menores valores de força de tração para o nabo forrageiro foram também observados na área submetida ao tráfego de rodados de trator o que, similarmente ao demonstrado pelos dados referentes às propriedades físicas (Capítulo 4), indica que os efeitos positivos do nabo forrageiro sobre a estrutura do solo mantiveram-se mesmo após a imposição de tensões externas.

Tanto para a soja quanto para o milho, os maiores valores de força de tração foram observados quando a haste sulcadora de adubo foi regulada para trabalhar a maiores profundidades (Tabela 26). A passagem da haste da posição “raso” para a posição “profundo” resultou num incremento de 54 e 69% na força de tração requerida pela haste na semeadura da soja e do milho, respectivamente. Beutler (2005) e Xavier (2005) também obtiveram maiores valores de demanda de força de tração em função do aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora. Contudo, os incrementos obtidos por estes autores foram maiores, chegando a 150% (Xavier, 2005). Da mesma forma, os maiores incrementos na demanda de força de tração, em função da mudança de posição da haste de “raso” para “profundo”, foram obtidos quando da semeadura do milho, o que pode ser atribuído ao menor aumento da profundidade de atuação da haste observado para a soja (Tabela 21).

Os dados da Tabela 26 mostram ainda que a força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo foi aproximadamente 68 e 95% superior na área trafegada em relação à não trafegada para a soja e para o milho, respectivamente. É importante lembrar que a profundidade máxima do

sulco na área trafegada foi significativamente maior do que na região sem tráfego (Tabela 21), devido ao emprego de uma haste mais longa na zona submetida ao tráfego de rodados de trator. Assim, o aumento da força de tração demandada pela haste quando esta trabalhou na área submetida ao tráfego de rodados de trator deve-se, ao menos em parte, a maior profundidade de atuação da mesma. É possível, entretanto, inferir a respeito do efeito do maior grau de compactação induzido pelo tráfego de rodados de trator sobre a força de tração demandada pelo facão sulcador mediante a comparação dos incrementos proporcionados nessa variável pelo aumento da profundidade de atuação da haste através de regulagem (posição “raso” ou “profundo”) ou pelo uso de uma haste mais longa. Nesse sentido, a força de tração e a profundidade máxima do sulco produzido pela haste sulcadora de adubo aumentaram, na média entre a soja e o milho, 0,6 kN e 3,1 cm, quando a mesma passou da posição “raso” para a posição “profundo” (Tabelas 21 e 26). Por outro lado, o aumento na força de tração proporcionado pelo tráfego de rodados foi maior e, também na média das culturas de verão semeadas, correspondeu a 0,75 kN (Tabela 26), mesmo levando-se em consideração que a profundidade real de atuação da haste sulcadora tenha sido 2 cm maior nesse tratamento (Tabela 22), contra 3,1 cm na situação anterior. Tais resultados sugerem que o aumento no grau de compactação do solo em virtude da realização de oito e seis tráfegos de rodados de trator nas parcelas sob plantas de cobertura de inverno e pousio, respectivamente, de fato resultou em incrementos significativos na demanda de força de tração das hastes sulcadoras. Aumentos na demanda de tração por parte de ferramentas do tipo haste foram também constatadas por Tullberg (2000) e Xavier (2005).

Segundo mencionado anteriormente, a comparação entre os tratamentos, principalmente no que se refere às diferentes coberturas de inverno, é dificultada quando se considera apenas a força de tração absoluta, devido às variações nas características do sulco provocadas pelas mesmas (Tabelas 21 e 24). Para contornar essas limitações, determinou-se a força de tração específica por profundidade do sulco - FTEP (N cm^{-1}) e por área da secção transversal de solo mobilizada pela haste - FTEA (N cm^{-2}), cujos resultados são apresentados nas Tabelas 27 a 30.

Para a FTEP medida durante a semeadura da soja, a ANOVA

indicou que as interações cobertura x profundidade da haste e coberturas x tráfego, bem como tráfego x profundidade da haste, foram estatisticamente significativas. Isso indica, em primeiro lugar, que a FTEP foi eficiente em eliminar, ao menos em parte, a variação relacionada às características do sulco, uma vez que, na soja, a força de tração não havia sido significativamente afetada pelas coberturas de inverno testadas. Em despeito às referidas interações, os dados da Tabela 27 indicam que, na maioria das situações, os menores valores de FTEP foram obtidos para os tratamentos referentes às plantas de cobertura de inverno (nabo forrageiro e aveia preta). As diferenças só não se mostraram estatisticamente significativas quando a haste foi regulada na posição “profundo”. Contudo, mesmo nessa condição, a tendência de menores valores de FTEP para o nabo forrageiro e a aveia preta se manteve. Esses resultados refletem o menor grau de compactação resultante da inclusão de plantas de cobertura de inverno em sistemas de rotação de culturas para a soja e o milho, conforme discutido no estudo I (Capítulo 4, item 4.3.3.1).

Na semeadura do milho, as interações cobertura x profundidade de atuação da haste e cobertura x tráfego, considerando a FTEP, também foram significativas. No entanto, a interação entre os fatores tráfego x profundidade da haste não foi significativa. Verifica-se que, similarmente ao observado durante a semeadura da soja, os menores valores de FTEP foram medidos nas parcelas ocupadas por nabo forrageiro, sendo essas diferenças estatisticamente significativas para todas as condições estudadas, exceto quando a haste se deslocou sobre a região livre de tráfego de rodados de trator (Tabela 27). Ao contrário da tendência exibida quando da semeadura da soja, a FTEP, na maioria das situações, foi maior para a aveia preta comparativamente ao nabo forrageiro. Inclusive, a FTEP medida no tratamento aveia preta foi similar aos valores obtidos nas parcelas conduzidas sob pousio durante o inverno. Levando-se em consideração os dados de que se dispõe nesse trabalho, é difícil justificar de forma objetiva as diferenças na tendência dos dados de FTEP para a aveia preta quando da semeadura da soja e do milho. Sabe-se, no entanto, que a profundidade de atuação das hastes foi maior para o milho do que para a soja (Tabela 21) e, também, que o teor de água no dia da semeadura das culturas de verão era mais elevado para a aveia preta em

Tabela 27. Força de tração específica ($N\ cm^{-1}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Tráfego | | Média |
|--------------------------|--------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| | Raso | Profundo | Sem | Com | |
| ----- $N\ cm^{-1}$ ----- | | | | | |
| ----- Soja ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 60,9 c | 86,2 a | 59,0 b | 88,1 b | 73,5 b |
| Aveia preta | 68,4 b | 84,0 a | 64,4 ab | 88,0 b | 76,2 b |
| Pousio | 83,0 a | 90,4 a | 69,0 a | 104,4 a | 86,7 a |
| Média | 70,8 B | 86,9 A | 64,1 B | 93,5 A | 78,8 |
| ----- Milho ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 73,0 c | 112,7 b | 75,8 a | 110,0 c | 92,9 b |
| Aveia preta | 107,6 a | 122,9 ab | 80,6 a | 149,9 a | 115,2 a |
| Pousio | 95,5 b | 127,4 a | 80,0 a | 142,9 b | 111,4 a |
| Média | 92,0 B | 121,0 A | 78,8 B | 134,2 A | 106,5 |

CV milho: coberturas de inverno = 13,6%; profundidade da haste = 8,9%; tráfego = 5,5%. CV soja: coberturas de inverno = 9,3%; profundidade da haste = 8,0%; tráfego = 7,0%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

relação às demais coberturas de inverno, principalmente na camada de 0,0-0,08 m (Tabela 23). Diante disso, é possível que a maior profundidade de atuação do facão na semeadura do milho tenha aumentado a superfície sobre a qual ocorreu adesão de solo e palha na haste sulcadora, o que foi mais importante para a aveia preta devido ao elevado teor de água do solo nesse tratamento. Como o atrito solo-solo é maior que o solo-superfície metálica da ferramenta (Machado, 2001) e, além disso, a aderência de solo aumenta a espessura real da haste, a menor grau de compactação nos tratamentos sob a aveia preta foi compensada, resultando em valores de FTEP mais altos comparativamente ao nabo forrageiro e semelhantes ao pousio. Tal afirmação é respaldada pelo fato de, na semeadura da soja, as diferenças em termos de FTEP entre as coberturas de inverno não terem sido significativas quando a haste atuou na posição “profundo”. Nesse sentido, Casão Junior et al. (1998)

verificaram que a força de tração exigida pela semeadora-adubadora por eles testada aumentou quando o teor de água foi tal que a consistência do solo passou de friável à plástica, o que foi atribuído à aderência de solo aos elementos sulcadores. Da mesma forma, Cepik (2002) concluiu que os maiores valores de força de tração absoluta e específica foram observados na condição friável e úmida comparativamente ao solo seco. Como o teor de água no momento da semeadura não afetou a profundidade máxima do sulco e área da secção transversal de solo mobilizada, os autores atribuíram esses resultados à possível aderência de solo à haste, com a conseqüente substituição do atrito solo-metal pelo atrito solo-solo, o qual é de magnitude maior.

Similarmente ao detectado para a força de tração, a FTEP foi significativamente superior quando a haste sulcadora de adubo atuou na maior profundidade (Tabelas 27 e 28). Quando o adubo foi depositado na maior profundidade, a FTEP foi 31,5 e 22,7% maior comparativamente à profundidade “raso” para a semeadura do milho e da soja, respectivamente. Embora as diferenças percentuais entre as duas profundidades de atuação da haste tenham sido reduzidas relativamente à força de tração, esses resultados indicam que o aumento na magnitude desta variável em função do incremento da profundidade de atuação da haste não é linear. Ou seja, mesmo com a correção dos valores de força de tração demandada pela haste em função da profundidade do sulco, esta variável continua apresentando uma maior magnitude na maior profundidade de trabalho. Diante disso, deve-se ter cuidado quando da utilização dos valores de FTEP obtidos neste trabalho para fins de estimativa do requerimento de força de tração por hastes sulcadoras, tendo por base a profundidade de atuação das mesmas. Nesse sentido, sob profundidades e condições de solo diferentes das empregadas na presente pesquisa, os valores de FTEP provavelmente serão modificados. Assim, os dados mostrados nas Tabelas 27 e 28 são válidos apenas para profundidades de atuação da haste e características de solo (umidade, textura e estrutura) semelhantes a esse trabalho. Comportamento semelhante foi obtido por Cepik (2002), e pode estar relacionado ao aumento do grau de compactação do solo com o incremento da profundidade considerada. Assim, o aumento da profundidade de atuação da haste implica o rompimento de camadas de solo mais profundas e, conseqüentemente, mais compactadas, o que resulta no

incremento da força de tração por unidade de profundidade máxima do sulco. Além disso, nos tratamentos onde a profundidade crítica de atuação da haste foi ultrapassada, a FTEP é aumentada de forma acentuada, devido ao fato de a ruptura ascendente do solo ser substituída pelo fluxo lateral do mesmo.

Apesar de a interação profundidade da haste x condição de tráfego ter sido significativa para a soja, os dados da Tabela 28 indicam que, independentemente do nível de aprofundamento do facão no solo e da cultura de verão semeada, os maiores valores de FTEP foram observados na área submetida ao tráfego de rodados de trator comparativamente à área não trafegada. A exemplo do que foi discutido para a força de tração, a maior FTEP na zona trafegada deve-se, em primeiro lugar, ao emprego de uma haste mais longa, o que propiciou a esta uma maior profundidade de atuação para uma mesma posição de regulagem. Ainda assim, através da mesma comparação procedida para a força de tração, é possível afirmar com segurança que o maior grau de compactação proporcionado pelo tráfego de rodados de trator (Tabela 10 e Figura 8, item 4.3.3.1) proporcionou aumentos significativos na FTEP. Na média da soja e do milho, a passagem da haste da posição “raso” para a posição “profundo” resultou num aumento de 22,6 N cm⁻¹

Tabela 28. Força de tração específica (N cm⁻¹) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas e do tráfego.

| Tratamento | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>N cm⁻¹</i> ----- | | | |
| ----- <i>Soja</i> ----- | | | |
| Sem tráfego | 54,4 | 73,9 | 64,1 b |
| Com tráfego | 87,2 | 99,8 | 93,5 a |
| Média | 70,8 B | 86,9 A | 78,8 |
| ----- <i>Milho</i> ----- | | | |
| Sem tráfego | 64,1 | 93,4 | 78,8 b |
| Com tráfego | 119,9 | 148,6 | 134,2 a |
| Média | 92,0 B | 121,0 A | 106,5 |

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

para um correspondente incremento na profundidade de atuação de 3,1 cm (Tabela 21). Por outro lado, a FTEP foi 42,4 N cm⁻¹ mais elevada para a zona trafegada em relação à não trafegada, o que ocorreu mesmo para um aumento inferior na profundidade de atuação das hastes (2 cm, Tabela 22).

Os dados da força de tração específica por área da secção transversal de solo mobilizada (FTEA) são apresentados nas Tabelas 29 e 30. Da mesma forma que para os demais parâmetros, a ANOVA mostrou que as interações coberturas x profundidade da haste e coberturas x tráfego foram significativas, tanto para a soja quanto para o milho. Ainda, para ambas as culturas, a interação tráfego x profundidade da haste também foi significativa.

Tabela 29. Força de tração específica (N cm⁻²) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas, das coberturas de inverno e do tráfego.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Tráfego | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | Raso | Profundo | Sem | Com | |
| ----- <i>N cm⁻²</i> ----- | | | | | |
| ----- <i>Soja</i> ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 6,0 c | 10,2 b | 6,5 c | 9,7 b | 8,1 b |
| Aveia preta | 8,0 b | 11,7 a | 8,3 a | 11,4 a | 9,9 a |
| Pousio | 9,2 a | 9,9 b | 7,4 b | 11,7 a | 9,6 a |
| Média | 7,8 B | 10,6 A | 7,4 B | 10,9 A | 9,2 |
| ----- <i>Milho</i> ----- | | | | | |
| Nabo forrageiro | 11,6 b | 20,3 a | 10,7 a | 21,1 b | 15,9 b |
| Aveia preta | 16,3 a | 16,5 b | 11,5 a | 21,4 b | 16,4 ab |
| Pousio | 16,4 a | 19,9 a | 10,7 a | 25,5 a | 18,1 a |
| Média | 14,7 B | 18,9 A | 11,0 B | 22,7 A | 16,8 |

CV milho: coberturas de inverno = 13,3%; profundidade da haste = 8,9%; tráfego = 5,8%. CV soja: coberturas de inverno = 9,0%; profundidade da haste = 8,8%; tráfego = 6,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

De acordo com a Tabela 29, observa-se que, para a semeadura da soja, os valores de FTEA, em todos os desdobramentos efetuados tendo em

vista a profundidade teórica de atuação e a condição de tráfego, foram menores para o nabo forrageiro comparativamente às demais coberturas de inverno. Esses resultados acompanham a tendência evidenciada pela FTEP (Tabela 27), e podem ser associados ao menor grau de compactação promovido pelo nabo forrageiro (Figura 4c, item 4.3.3.1). Entretanto, a FTEP na semeadura da soja foi também inferior para a aveia preta em relação ao pousio (Tabela 27), o que não se confirmou, para a maior parte das situações, quando a variável analisada é a FTEA (Tabela 29). Considerando que a força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura da soja não diferiu significativamente entre as coberturas de inverno, o comportamento anteriormente evidenciado pode ser atribuído a menor mobilização do solo quando a haste trabalhou nas parcelas ocupadas por aveia preta, mesmo sob profundidades de atuação similares às demais coberturas, o que se deve, possivelmente, ao maior teor de água do solo nesse tratamento (Tabela 23).

De maneira semelhante ao observado para a soja, verifica-se que a FTEA determinada durante a semeadura do milho foi menor para o nabo forrageiro do que para as demais coberturas, exceto quando a haste sulcadora foi regulada na posição “profundo” (Tabela 29), o que contraria a tendência exibida pelos dados de força de tração (Tabela 26) e FTEP (Tabela 27). Isso pode ser justificado em função de, nesse tratamento e para a semeadura do milho, a haste ter atuado a uma profundidade real (16 cm) em relação às demais coberturas (14 cm), sem aumentos proporcionais na ATSM. Para a aveia preta, os dados da Tabela 29 evidenciam que, nas situações onde a haste atuou a maiores profundidades reais (posição “profundo” e sob tráfego de rodados de trator), os valores de FTEP foram significativamente inferiores ao pousio, enquanto que, na posição “raso” e na área livre de tráfego, as diferenças entre essas duas coberturas de inverno não se mostraram estatisticamente significativas. Novamente, variações na profundidade máxima do sulco e na ATSM em virtude dos tratamentos testados respondem pelo comportamento diferencial da aveia preta em relação às demais coberturas quando a condição de tráfego e/ou profundidade teórica de atuação da haste são modificados. Por outro lado, a Tabela 29 mostra ainda que a FTEA, na maioria das situações, foi maior para o pousio, o que se deve ao maior grau de compactação proporcionado por esse tratamento (Capítulo 4, item 4.3.3.1).

Conforme mencionado anteriormente, tanto para o milho quanto para a soja, a ANOVA demonstrou que houve interação significativa entre tráfego e profundidade da haste, considerando a variável FTEA. Os dados apresentados na Tabela 30 evidenciam que, na soja, apesar da interação significativa, o comportamento da profundidade de atuação da haste não diferiu entre as condições de tráfego. Assim, a maior FTEA, independentemente do tráfego, ocorreu quando a haste atuou na maior profundidade, confirmando a tendência detectada para os dados de força de tração (Tabela 26) e FTEP (Tabela 28). Em contrapartida, a FTEA medida durante a semeadura do milho aumentou com o incremento na profundidade de atuação da haste sulcadora na área com tráfego (Tabela 30). Porém, na área sem tráfego, as diferenças entre as profundidades de deposição do adubo, no que se refere à FTEA, não foram significativas. Tal fato pode ser relacionado à área mobilizada pela haste na posição “raso” e na zona sem tráfego que, na área semeada com milho, atingiu valores pouco maiores ($63,5 \text{ cm}^2$) do que a metade da ATSM observada para a posição “profundo” sob a mesma condição de tráfego ($122,7 \text{ cm}^2$).

Tabela 30. Força de tração específica (N cm^{-2}) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja, em função da profundidade de atuação das mesmas e do tráfego.

| Tratamento | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- N cm^{-2} ----- | | | |
| ----- Soja ----- | | | |
| Sem tráfego | 6,7 bB | 8,2 bA | 7,4 B |
| Com tráfego | 8,8 aB | 13,0 aA | 10,9 A |
| Média | 7,8 B | 10,6 A | 9,2 |
| ----- Milho ----- | | | |
| Sem tráfego | 11,1bA | 10,8 bA | 11,0 B |
| Com tráfego | 18,4 aB | 27,0 aA | 22,7 A |
| Média | 14,7 B | 18,9 A | 16,8 |

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Da mesma forma que para a força de tração e a FTEP, a FTEA foi maior na área trafegada comparativamente a não trafegada o que, mais uma vez, pode ser parcialmente atribuído a maior profundidade de atuação da haste naquele tratamento. Seguindo o mesmo raciocínio empregado quando da análise dos dados de força de tração de FTEP, tem-se que o aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora mediante regulagem resultou num incremento na FTEA que, na média da soja e do milho, correspondeu a $3,5 \text{ N cm}^{-2}$ (Tabela 30). Quando o aumento na profundidade da haste ocorreu em função do emprego de um facão mais comprido na área trafegada por rodados de trator, a mesma Tabela indica que o incremento na FTEA foi de $7,6 \text{ N cm}^{-2}$, ou seja, praticamente o dobro relativamente à mudança de posição da haste. Isso ocorreu mesmo com o aumento real na profundidade de atuação tendo sido menos pronunciado quando se compara as duas condições de tráfego (2 cm) do que entre as duas profundidades teóricas de trabalho das hastes (3,1 cm). Assim, esses resultados comprovam novamente que a compactação ocasionada por 8 e 6 tráfegos nas parcelas sob semeadura direta ocupadas pelo pousio e pelas plantas de cobertura de inverno, respectivamente, implicou aumentos consideráveis na força de tração específica demanda pelas hastes sulcadoras para a deposição de adubo.

A análise global de todos os dados anteriormente expostos, que incluem as características do sulco produzido pelas hastes sulcadoras de adubo, bem como a força de tração absoluta e específica (N cm^{-1} e N cm^{-2}) demanda pelas mesmas, permite a constatação de algumas tendências. Em primeiro lugar, a comparação entre os tratamentos no que se refere à força de tração foi prejudicada pelas diferenças ocasionadas pelos mesmos nas características do sulco (profundidade máxima e ATSM). Mesmo o uso da FTEP e FTEA ao invés da força de tração absoluta não eliminou o problema, o que pode ser atribuído à heterogeneidade horizontal e vertical (em profundidade) de atributos do solo como teor de água, textura e estrutura, bem como ao fato de a profundidade crítica de atuação da haste sulcadora ter sido ultrapassada em alguns casos. Em profundidades maiores que a crítica, o aumento na demanda de tração por parte das hastes é acentuado, mascarando o efeito das condições físicas diferenciais proporcionadas pelos tratamentos. Esses resultados devem ser levados em consideração diante da possibilidade

de utilização da força de tração, em conjunto com sistemas de posicionamento global, no mapeamento do estado de compactação, conforme vem sendo sugerido em alguns trabalhos (Mouazen et al., 2003; Cepik, 2006; Mouazen & Ramon, 2006).

Apesar disso, é possível afirmar que, de maneira geral, o nabo forrageiro acarretou em menores requerimentos de força de tração específica relativamente ao pousio, o que pode ser atribuído a menor RP resultante do emprego dessa planta de cobertura de inverno (Figura 4c, item 4.3.3.1). Reduções da força de tração em virtude do uso de culturas de cobertura também foram obtidas por Beutler (2005) e Bortolloto et al. (2006). Similarmente ao observado para as propriedades físicas (Capítulo 4, item 4.3.3.1), a menor força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo proporcionada pelo nabo forrageiro manteve-se nas áreas trafegadas por rodados de trator, mesmo que o número de tráfegos para este tratamento tenha sido maior (8 passadas) comparativamente ao pousio (6 passadas). Isso novamente sugere que o menor grau de compactação proporcionado pelas plantas de cobertura de inverno em relação ao pousio persiste mesmo com a aplicação de cargas externas. A dissipação de parte da energia compactante pela maior quantidade de resíduos presentes na superfície do solo (Tabela 3, item 4.3.1), associada à elasticidade da matéria orgânica do solo, cujos teores foram mais elevados para as plantas de cobertura de inverno (Tabela 5, item 4.3.2), são fatores que podem explicar o comportamento anteriormente discutido. Já a aveia preta apresentou um comportamento intermediário, proporcionando em algumas situações maiores e, em outras, menores requerimentos de força de tração comparativamente ao pousio. Possivelmente, a falta de uma tendência mais clara para os dados referentes à força de tração absoluta e específica no caso da aveia preta esteja atrelada ao maior teor de água do solo para essa cobertura no momento da semeadura das culturas de verão.

Os dados referentes aos efeitos das coberturas de inverno e das profundidades de atuação das hastes sulcadoras de adubo sobre a patinagem dos rodados tratórios são apresentados na Tabela 31. Independentemente da profundidade de atuação das hastes e da cultura de verão semeada (número de linhas), a patinagem dos rodados tratórios foi significativamente maior para

a aveia preta em relação ao nabo forrageiro e ao pousio, os quais não diferiram significativamente entre si. Nesse sentido, a aveia preta resultou em valores de patinagem dos rodados tratórios muito elevados e que, em todas as situações,

Tabela 31. Patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura do milho e da soja na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>m m⁻¹</i> ----- | | | |
| ----- Soja ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 0,15 | 0,35 | 0,25 b |
| Aveia preta | 0,30 | 0,45 | 0,37 a |
| Pousio | 0,25 | 0,31 | 0,28 b |
| Média | 0,23 B | 0,37 A | 0,30 |
| ----- Milho ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 0,07 | 0,17 | 0,12 b |
| Aveia preta | 0,15 | 0,25 | 0,20 a |
| Pousio | 0,06 | 0,12 | 0,09 b |
| Média | 0,09 B | 0,18 A | 0,14 |

CV coberturas de inverno = 20,1%; CV profundidade da haste = 20,6%; CV culturas de verão: 20,1%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

superam os limites máximos recomendados pela ASAE (1989), os quais, para solos não mobilizados, encontram-se na faixa de 0,08-0,10 $m m^{-1}$. Na pior condição (semeadora-adubadora com cinco linhas e haste na posição “profundo”), a patinagem dos rodados tratórios para o tratamento aveia preta alcançou níveis quatro vezes maiores do que os referidos limites. Altas patinagens representam perdas na velocidade de deslocamento do conjunto trator/semeadora e, em consequência, de capacidade operacional, ocasionando ainda incrementos no consumo de combustível por área trabalhada (Márquez, 1990; Silva, 2003a). Os valores de patinagem foram consideravelmente superiores aos determinados por Xavier (2005) e Cepik (2006), os quais empregaram a mesmo conjunto trator-semeadora e

profundidades teóricas de atuação da haste utilizados nesse estudo. Entretanto, cabe destacar que, nos referidos trabalhos, a profundidade máxima do sulco produzido em cada uma das posições da haste testada, assim como a massa de resíduos presentes na superfície do solo, eram menores do que na presente pesquisa. De qualquer forma, para o nível de patinagem encontrado nesse trabalho, a TDA deveria ter sido acionada em todas as situações, exceto para o nabo forrageiro e pousio na semeadura do milho e para a profundidade “raso”. Isso não foi realizado nesse estudo visando reproduzir uma condição extrema e, assim, acentuar as diferenças entre os tratamentos.

Os valores mais altos de patinagem observados para a aveia preta podem ser relacionados a maior massa de resíduos presentes na superfície do solo para esse tratamento no momento da semeadura. Conforme a Tabela 3 (Capítulo 4, item 4.3.1), o nabo forrageiro produziu uma maior quantidade de resíduos quando comparado à aveia preta. Entretanto, por ocasião da semeadura do milho e da soja, que foi realizada aproximadamente três semanas após a dessecação das coberturas de inverno, a massa seca de resíduos presente na superfície do solo das áreas ocupadas com nabo forrageiro era menor do que para a aveia preta, devido à decomposição mais rápida do primeiro. Embora a quantidade de resíduos na superfície do solo no momento da semeadura não tenha sido quantificada, as Figuras 26a e 26b comprovam a afirmação anterior. Para que o trator se desloque, o solo deve resistir ao torque imposto pelos seus rodados, cuja magnitude é proporcional ao esforço desenvolvido pelo mesmo na barra de tração. Os resíduos presentes na superfície do solo não apresentam coesão e atrito suficientes para impor resistência ao torque aplicado pelos rodados. Assim, o trator só deslocou após a remoção dos mesmos, o que ocorre mediante a patinagem dos pneus. Aumentos lineares nas perdas de potência na interface solo/pneus com o incremento na massa seca de resíduos sobre o solo (0 a 6 Mg ha⁻¹) foram encontrados por Xavier (2005) e Cepik (2006). Além disso, as características dos resíduos produzidos pela aveia preta parecem potencializar a patinagem. Gabriel Filho et al. (2004) concluíram que a magnitude da patinagem durante a escarificação foi maior quando o trator se deslocou sobre restos culturais de aveia preta em relação aos de nabo forrageiro, mesmo considerando que a massa seca presente na superfície do solo desses dois

tratamentos era similar. Tal fato pode estar relacionado a maior resistência dos resíduos de aveia preta, de forma que os provenientes das plantas de nabo forrageiro são fragmentados mais facilmente pelas garras do pneu resultando, assim, num melhor contato pneu/solo. Outro fator que pode explicar a maior patinagem dos rodados tratórios nas áreas cultivadas durante o inverno com aveia preta engloba o teor de água mais elevado no momento da semeadura das culturas de verão nesse tratamento (Tabela 23). Tanto a coesão quanto o ângulo de atrito interno diminuem em função do aumento da umidade do solo (Machado, 2001), o que reduz a resistência do solo à ruptura por cisalhamento e, em decorrência, aumenta as perdas de potência por patinagem.



Figura 27. Vista das parcelas ocupadas por aveia preta (a) e nabo forrageiro (b) durante a semeadura do milho, mostrando a massa de resíduos presentes na superfície do solo.

Ainda no que se refere aos resultados mostrados na Tabela 31, observa-se que a patinagem foi maior durante a semeadura da soja comparativamente a do milho, devido ao maior número de linhas no primeiro caso e, conseqüentemente, maior demanda de força de tração. Nota-se também que o aumento médio de 3,1 cm na profundidade máxima real do sulco (Tabela 21) ou de 0,6 kN na demanda de força de tração por haste sulcadora (Tabela 26), em função da passagem do facão da posição “raso” para a posição “profundo” resultou num incremento, na média da semeadura da soja e do milho, superior a 80% nas perdas de potência por patinagem. Maiores patinagens em função do aumento da profundidade de atuação das hastes também foram detectados em diversos outros trabalhos (Cepik, 2002;

Herzog, 2003; Silva, 2003a; Beutler, 2005; Xavier, 2005; Cepik, 2006). Em termos absolutos, a patinação foi $0,11 \text{ m m}^{-1}$ maior para a profundidade “raso” em relação à posição “profundo”, o que representa uma redução de 11% na velocidade de deslocamento do conjunto trator/semeadora. Considerando a velocidade teórica do trator na marcha e rotação de trabalho selecionadas ($6,5 \text{ km h}^{-1}$), a velocidade real seria de $5,5$ e $4,7 \text{ km h}^{-1}$ para a menor e maior profundidade de atuação da haste, respectivamente, na média da soja e do milho. Isso corresponde, novamente considerando valores médios entre a semeadura da soja e do milho, a uma diminuição da capacidade operacional teórica de $1,38$ para $1,16 \text{ ha h}^{-1}$, o que equivale a quase 20%. Esse cálculo pode ser repetido para o milho, contrapondo-se duas situações extremas: pousio na profundidade “raso” e aveia preta na posição “profundo”, sendo essa última uma associação entre duas práticas de controle da compactação. Nesse caso, a velocidade seria de $6,0$ na primeira e de $4,9 \text{ km h}^{-1}$ na segunda condição. Tal diminuição da velocidade de deslocamento representa uma redução da capacidade operacional teórica de $1,62$ para $1,32 \text{ ha}^{-1}$. Essas constatações devem ser levadas em consideração quando da opção por uma determinada prática de manejo da compactação do solo e/ou na adaptação do trator ao trabalho. Cabe lembrar que essas perdas seriam minimizadas caso a TDA tivesse sido ligada durante os testes.

6.3.2 Escarificação

Os dados referentes à profundidade máxima do sulco e ATSM na área escarificada, em função das coberturas de inverno e da condição de tráfego, são mostrados nas Tabelas 32 e 33. Nessas Tabelas, é realizada também uma comparação entre os valores obtidos para essas variáveis nas áreas escarificadas e sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno. Observa-se, em primeiro lugar, que tanto a profundidade real máxima do sulco (Tabela 32) quanto a ATSM (Tabela 33), em ambas as condições de tráfego, não foram significativamente afetadas pelas plantas de cobertura de inverno na área escarificada. Da mesma forma, essas variáveis não foram significativamente modificadas pela cultura de verão semeada, ou seja, pelo número de linhas que equipavam a semeadora-adubadora (dados não

mostrados). Por outro lado, a haste sulcadora atingiu profundidades significativamente menores quando se deslocou sobre a área trafegada (Tabela 32) sem, no entanto, produzir alterações na ATSM (Tabela 33). Embora as diferenças absolutas na profundidade máxima do sulco tenham sido pequenas (1,2 cm), elas contrariam os resultados obtidos para a área sob semeadura direta com plantas de cobertura, onde esse parâmetro foi maior nas áreas trafegadas (Tabela 32). Isso ocorreu mesmo com o emprego de uma haste mais longa nas regiões trafegadas, o que pode estar evidenciando que o maior grau de compactação propiciado pela realização de dois tráfegos na área escarificada (Figura 10b, item 4.3.3.2), prejudicou a penetração principalmente do disco de corte, uma vez que a força de sucção que incide na haste aumenta sob maiores densidades (Sánchez-Girón et al., 2005). Diante disso, o disco de corte da palha teria atuado como um “limitador” de profundidade da haste.

Tabela 32. Profundidade máxima do sulco para deposição do adubo, determinada na área escarificada, em função das coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator.

| Cobertura de inverno | Tráfego | | Média |
|-------------------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| | Sem | Com | |
| | ----- <i>cm</i> ----- | | |
| Nabo forrageiro | 12,1 | 11,3 | 11,7 a |
| Aveia preta | 11,7 | 10,2 | 10,9 a |
| Média | 11,9 A | 10,7 B | 11,3 |
| Média SD^{1,2} | 10,9* | 13,3* | 12,1 |

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de um mesmo fator, não diferem significativamente pelo teste t ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade “raso”.

As diferenças entre os sistemas de preparo avaliados, no que se refere à profundidade real de atuação das hastes sulcadoras, variaram em razão da condição de tráfego (Tabela 32). Desse modo, na zona não trafegada, a profundidade máxima do sulco foi menor para a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, o que novamente pode ser relacionado a maior profundidade de atuação do disco de corte de palha na área escarificada e sem tráfego devido ao menor grau de compactação (Tabela 13 e Figura 11a, item 4.3.3.3), de maneira a exercer, assim, uma menor limitação ao aprofundamento da haste sulcadora. Por outro lado, nas regiões submetidas a

dois tráfegos de rodados de trator, ocorreu o contrário, mesmo considerando que o grau de compactação nas áreas trafegadas das parcelas conduzidas em semeadura direta foi maior do que nas zonas trafegadas da área escarificada (Figura 11a, item 4.3.3.3). Talvez, esse menor grau de compactação tenha resultado em uma redução da força de sucção incidente sobre a haste, o que foi mais importante do que a menor resistência à penetração do disco de corte da palha proporcionada por essa condição, de forma a diminuir, assim, a profundidade máxima do sulco. Já a ATSM na zona não trafegada foi maior para a escarificação comparativamente à semeadura direta (Tabela 33). Além da maior profundidade de atuação da haste na área escarificada sem tráfego, o menor grau de compactação nesse tratamento possivelmente tenha diminuído o espelhamento das paredes laterais do corte produzido pelo disco, o que proporcionou uma maior mobilização do solo. Nas regiões trafegadas, não houve diferenças significativas entre os sistemas de preparo no que se refere à ATSM, em despeito a maior profundidade de atuação no tratamento semeadura direta com plantas de cobertura de inverno (Tabela 32), o que pode ser justificado pelo mesmo fator já mencionado para o caso das áreas não trafegadas.

Tabela 33. Área da seção transversal de solo mobilizada pela haste sulcadora de adubo, determinada na área escarificada, em função das coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator.

| Cobertura de inverno | Tráfego | | Média |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------|
| | Sem | Com | |
| | ----- <i>cm</i> ² ----- | | |
| Nabo forrageiro | 113,5 | 98,9 | 106,2 a |
| Aveia preta | 103,5 | 104,9 | 104,2 a |
| Média | 108,5 A | 106,5 A | 107,5 |
| Média SD^{1,2} | 73,4* | 105,0^{n.s.} | 89,2 |

Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de um mesmo fator, não diferem significativamente pelo teste t ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$); n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade "raso".

Na Tabela 34, encontram-se os dados referentes ao teor de água no momento da semeadura das culturas verão na área escarificada, em função das coberturas de inverno e das camadas estudadas. Para ambas as

profundidades amostradas, não houve diferenças significativas para o teor de água na semeadura do milho e da soja entre o nabo forrageiro e a aveia preta. Os valores de umidade também foram semelhantes quando se compara as camadas avaliadas (Tabela 34) e as parcelas onde foram semeadas as culturas do milho e da soja (dados não apresentados). Além disso, observa-se que o teor de água no momento da semeadura não diferiu significativamente entre a escarificação e área sob semeadura direta. Dessa maneira, é possível afirmar que o teor de água não modificou os efeitos dos tratamentos sobre as características do sulco produzido bem como sobre os parâmetros relacionados à demanda de força de tração.

Tabela 34. Teor de água do solo no momento da semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das coberturas de inverno e profundidades de avaliação.

| Tratamento | Camada (m) | |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 0,00 a 0,08 | 0,08 a 0,16 |
| | ----- $g\ kg^{-1}$ ----- | |
| Nabo forrageiro | 0,16 a | 0,16 a |
| Aveia preta | 0,16 a | 0,15 a |
| Média | 0,16 A | 0,16 A |
| Média SD^{1,2} | 0,17^{n.s.} | 0,16^{n.s.} |

CV coberturas: 14,7%; CV camadas: 12,2%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada camada, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$). ¹ n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p>0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade "raso".

Os efeitos das plantas de cobertura de inverno e do tráfego de rodados de trator sobre a força de tração absoluta e específica por profundidade máxima do sulco e por unidade de área de solo mobilizada pela haste sulcadora, considerando a área escarificada, são mostrados nas Tabelas 35, 36 e 37. A interação entre as plantas de cobertura e a condição de tráfego foi significativa para a força de tração e FTEP. Independentemente da cultura de verão semeada, a força de tração, na área sem tráfego, foi maior para o nabo forrageiro em relação à aveia preta, enquanto que, nas áreas trafegadas, ocorreu o contrário (Tabela 35). Para a FTEP, os resultados da Tabela 36 mostram que, tanto para o milho quanto para a soja, as diferenças entre as plantas de cobertura de inverno avaliadas não se mostraram estatisticamente

significativas, considerando as regiões sem tráfego de rodados de trator. Isso evidencia que as diferenças em termos de profundidade de atuação da haste proporcionadas pelas coberturas, mesmo sendo pequenas e estatisticamente não significativas (Tabela 32), foram suficientes para que a FTEP para o nabo forrageiro não fosse significativamente maior em comparação à aveia preta. Nas áreas trafegadas, a FTEP foi maior para a aveia preta, mantendo assim a mesma tendência observada para a força de tração (Tabela 35). É importante considerar, novamente, que os valores de FTEP (Tabela 36) são válidos para a profundidade de atuação da haste e para as condições de solo (umidade, textura e estrutura) específicas deste experimento, de forma que o uso destes dados para estimar a força de tração absoluta deve ser realizada com cuidado.

Tabela 35. Força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas de cobertura de inverno e do tráfego de rodados de trator.

| Cobertura de inverno | Tráfego | | Média |
|-------------------------------|---------------|----------------------------|-------------|
| | Sem | Com | |
| ----- <i>kN</i> ----- | | | |
| ----- <i>Soja</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 0,37 a | 0,93 b | 0,65 |
| Aveia preta | 0,27 b | 1,05 a | 0,66 |
| Média | 0,32 B | 0,99 A | 0,66 |
| Média SD^{1,2} | 0,55* | 1,03^{n.s.} | 0,79 |
| ----- <i>Milho</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 0,45 a | 1,02 b | 0,74 |
| Aveia preta | 0,35 b | 1,11 a | 0,73 |
| Média | 0,40 B | 1,07 A | 0,73 |
| Média SD^{1,2} | 0,69* | 1,52* | 1,10 |

CV coberturas = 14,2%; CV tráfego = 8,6%; CV culturas de verão: 2,3%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$); n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade “raso”.

Tabela 36. Força de tração específica ($N\ cm^{-1}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator.

| Cobertura de inverno | Tráfego | | Média |
|-------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------|
| | Sem | Com | |
| ----- $N\ cm^{-1}$ ----- | | | |
| ----- Soja ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 30,0 a | 73,5 b | 51,7 |
| Aveia preta | 27,2 a | 95,8 a | 61,5 |
| Média | 28,6 B | 84,6 A | 56,6 |
| Média SD^{1,2} | 50,6* | 78,7^{n.s.} | 64,6 |
| ----- Milho ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 40,1 a | 101,3 b | 70,7 |
| Aveia preta | 30,6 a | 118,4 a | 74,5 |
| Média | 35,3 B | 109,8 A | 72,6 |
| Média SD^{1,2} | 62,4* | 118,1^{n.s.} | 90,2 |

CV coberturas = 14,9%; CV tráfego = 5,5%; CV culturas de verão: 2,0%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p<0,05$); n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p>0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade "raso".

A ANOVA demonstrou que a interação entre as plantas de cobertura de inverno e a condição de tráfego não foi significativa quando o parâmetro avaliado foi a FTEA. De acordo com a Tabela 37, verifica-se também que, para ambas as culturas de verão e condições de tráfego, a FTEA não foi influenciada significativamente pelas culturas de cobertura. Tal fato indica que a menor ATSM medida para o nabo forrageiro na área trafegada (Tabela 33), embora não significativa, diluiu as diferenças entre as plantas de coberturas de inverno no que se refere à força de tração (Tabela 35). Assim, a FTEA assumiu valores que, sob o ponto de vista estatístico, são semelhantes para a aveia preta e o nabo forrageiro. Diante dessas constatações, pode-se inferir que as diferenças observadas entre as coberturas de inverno em relação à força de tração são explicadas principalmente por variações produzidas pelas mesmas sobre as características do sulco. Esses resultados são coerentes com a ausência de diferenças significativas no teor de água no momento da

semeadura das culturas de verão (Tabela 34) e nas propriedades físicas do solo (item 4.3.3.2), quando se compara as plantas de cobertura de inverno semeadas na área escarificada.

Tabela 37. Força de tração específica ($N\ cm^{-2}$) demandada pelas hastes sulcadoras de adubo durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas coberturas de inverno e do tráfego de rodados de trator.

| Cobertura de inverno | Tráfego | | Média |
|-------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| | Sem | Com | |
| ----- $N\ cm^{-2}$ ----- | | | |
| ----- Soja ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 2,9 | 8,8 | 5,8 a |
| Aveia preta | 2,8 | 9,3 | 6,0 a |
| Média | 2,8 B | 9,0 A | 5,9 |
| Média SD^{1,2} | 6,1* | 8,0* | 7,0 |
| ----- Milho ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 4,2 | 11,1 | 7,7 a |
| Aveia preta | 3,3 | 11,6 | 7,4 a |
| Média | 3,7 B | 11,3 A | 7,5 |
| Média SD^{1,2} | 11,2* | 16,7* | 14,0 |

CV coberturas = 15,0%; CV tráfego = 8,1%; CV culturas de verão: 1,3%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p>0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p<0,05$); n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p>0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade "raso".

Os resultados apresentados nas Tabelas 35 a 37 indicam também que a realização de dois tráfegos de rodados de trator aumentou de forma significativa a demanda de força de tração absoluta e específica por parte das hastes sulcadoras para deposição do adubo. Mesmo com a profundidade de atuação da haste sendo menor nas áreas trafegadas, e com a ATSM sendo similar entre as duas condições de tráfego, nota-se que, na média das culturas de verão, a força de tração demandada pela haste sulcadora foi quase 2 vezes maior para a área submetida a dois tráfegos de rodados de trator. Esse aumento foi muito maior do que o observado na área sob semeadura direta, que correspondeu, em média, a 80% (Tabela 26). Cabe lembrar que parte do

aumento na força de tração observado para as áreas trafegadas em semeadura direta deveu-se a maior profundidade de atuação da haste sulcadora nessa condição, e não ao maior grau de compactação proporcionado pelo tráfego. Para a força de tração específica, o aumento proporcionado pelo tráfego foi ainda mais pronunciado, chegando a valores 2,5 e 3 vezes maiores do que os medidos nas zonas sem tráfego, considerando a FTEP (Tabela 36) e a FTEA (Tabela 37), respectivamente. Esses resultados podem ser justificados pelo maior grau de compactação nas regiões trafegadas das parcelas submetidas à escarificação (Capítulo 4, item 4.3.3.2).

Independentemente da cultura de verão semeada, verifica-se ainda que, nas áreas não trafegadas por rodados de trator, a magnitude da força de tração absoluta (Tabela 35) e da específica por profundidade (Tabela 36) e por área de solo mobilizada (Tabela 37) foi significativamente menor nos tratamentos escarificados do que nas parcelas sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno. Na média dos valores obtidos para o milho e para a soja, as reduções proporcionadas pela escarificação na força de tração, na FTEP e na FTEA corresponderam a 72, 77 e 160%, respectivamente. A magnitude das reduções foi maior para a FTEA em virtude de a ATSM ter se mostrado significativamente maior para área escarificada em comparação à sob semeadura direta, considerando as regiões sem tráfego (Tabela 33). Os menores valores de força de tração absoluta e específica observados nas áreas sem tráfego das parcelas escarificadas podem ser associados à diminuição do grau de compactação ocasionada por essa operação (Capítulo 4, item 4.3.3.3), uma vez que o teor de água no momento da semeadura do milho e da soja não foi modificado significativamente pelos sistemas de preparo (Tabela 34). Em contrapartida, Levien (1999) e Furlani (2000) concluíram que a força de tração requerida por uma semeadora-adubadora foi maior quando a mesma realizou a semeadura direta sobre resíduos de plantas de inverno semeadas sobre área previamente escarificada em relação a quando a mesma atuou sobre resíduos de coberturas implantadas sob semeadura direta. No presente trabalho, mediu-se a força de tração na haste sulcadora de adubo, de forma que os resultados poderiam ser diferentes se a demanda de força de tração total na barra tivesse sido medida. Nesse sentido, o maior recalque dos pneus, dos discos de corte da palha e dos discos duplos para deposição das

sementes poderia incrementar a demanda de força de tração para vencer a resistência ao rolamento da semeadora.

A tendência muda quando a comparação entre as áreas escarificada e sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno é realizada a partir dos dados coletados nas regiões submetidas a tráfego de rodados de trator. Na semeadura da soja, observa-se que as diferenças entre os sistemas de preparo nas áreas trafegadas não foram estatisticamente significativas tanto para a força de tração absoluta (Tabela 35) quanto para a FTEP (Tabela 36). No caso da FTEA, os valores foram maiores na área escarificada (Tabela 37). Para o milho, os resultados mostraram que os valores de força de tração e de FTEA mantiveram-se mais elevados, nas áreas trafegadas, para as parcelas manejadas sob semeadura direta. No entanto, as diferenças entre os sistemas de preparo para estas variáveis foram sensivelmente reduzidas pelo tráfego de rodados de trator. Por exemplo, a FTEA nas áreas não trafegadas era duas vezes maior para a semeadura direta comparativamente à escarificação, valor esse que foi reduzido para 48% nas áreas com tráfego (Tabela 37). Para a FTEP medida na semeadura do milho, as diferenças entre a escarificação e a semeadura direta não foram significativas (Tabela 26).

De maneira geral, os dados anteriormente discutidos permitem inferir que a realização de dois tráfegos tornou a força de tração requerida pelas hastes sulcadoras de adubo na área escarificada similar à sob semeadura direta com plantas de cobertura de inverno, cuja região trafegada, no momento da avaliação desse parâmetro, já havia sido submetida a oito passadas. Considerando que as variações proporcionadas pelos tratamentos, em termos de força de tração, tenham sido determinadas pelas propriedades físicas do solo, esses resultados corroboram com Veiga et al. (2007), que concluíram que dois tráfegos em uma área escarificada foram suficientes para que a compactação atingisse um nível similar ao observado antes da realização dessa operação. No entanto, os dados de RP obtidos em maio/2007 (item 4.3.3.3) indicaram que, mesmo na área trafegada, o grau de compactação foi menor para a escarificação do que para semeadura direta sob plantas de cobertura. Essa aparente contradição pode ser justificada pelo fato de o centro das duas regiões trafegadas por rodados de trator em cada subparcela ser mobilizado superficialmente pelas hastes sulcadoras de adubo durante a

semeadura das culturas de verão, o que pode ter mascarado parte dos efeitos do tráfego sobre a RP.

A patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das plantas de cobertura de inverno, é mostrada na Tabela 38. Similarmente ao verificado para a área sob semeadura direta, e de forma independente em relação às culturas de verão semeadas, ou seja, do número de linhas, as patinagens mais elevadas ocorreram para a aveia preta. Novamente, a maior quantidade de resíduos presentes na superfície das parcelas cultivadas com aveia preta no momento da semeadura do milho e da soja, assim como as características dos resíduos produzidos por essa planta de cobertura, ao prejudicarem o contato solo/pneu, justificam esses resultados. Mesmo com as medições sendo realizadas com a haste na posição “raso”, os valores absolutos da patinagem dos rodados tratórios superaram o limite máximo de 0,08-0,1 m m⁻¹ preconizado pela ASAE (1989), indicando que a TDA também deveria ter sido acionada na área escarificada. O maior número de linhas (cinco) que equipavam a semeadora-adubadora quando da implantação da soja, ao aumentar o requerimento de força de tração na barra, resultaram em valores de patinagem durante a semeadura dessa cultura equivalentes ao dobro dos observados para o milho (3 linhas).

Tabela 38. Patinagem dos rodados tratórios durante a semeadura do milho e da soja na área escarificada, em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Cultura de verão | | Média |
|-----------------------------|------------------|---------------|----------------------------|
| | Milho | Soja | |
| Nabo forrageiro | 0,10 | 0,24 | 0,17 b |
| Aveia preta | 0,17 | 0,32 | 0,24 a |
| Média¹ | 0,14 B | 0,28 A | 0,21^{n.s.} |
| Média SD² | 0,11 | 0,22 | 0,16 |

CV coberturas de inverno = 12,9%; CV culturas de verão: 5,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). ¹ n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta e na profundidade “raso”.

As diferenças entre os sistemas de preparo em relação à patinagem dos rodados tratórios não foram significativas, o que foi observado tanto para a semeadura do milho quanto da soja (Tabela 38). No entanto, houve uma

tendência de os valores dessa variável serem maiores para a área escarificada comparativamente à sob semeadura direta. Esse comportamento sugere que resistência do solo às tensões cisalhantes impostas pelos rodados ainda é menor na área escarificada comparativamente à conduzida sob semeadura direta devido, possivelmente, a uma menor coesão. Maiores valores de patinagem durante a semeadura realizada sobre áreas previamente escarificadas em relação a parcelas conduzidas sob semeadura direta foram obtidos por Levien (1999) e Furlani (2000). De qualquer forma, esses resultados evidenciam que a menor força de tração demanda pelas hastes sulcadoras de adubo na área escarificada não foi suficiente para tornar as perdas de potência por patinagem, observadas nesse sistema, menores que as obtidas na área sob semeadura direta.

6.4 Conclusões

A força de tração absoluta e a força de tração específica por profundidade máxima do sulco e unidade de área de solo mobilizada, demandada pelas hastes sulcadoras de adubo, foram afetadas pelas plantas de cobertura de inverno, tanto na presença quanto na ausência de tráfego. Os maiores requerimentos de força de tração absoluta e específica, em ambas as condições de tráfego, foram observados para o pousio e os menores, para o nabo forrageiro, o que reflete os menores graus de compactação do solo nesse tratamento. Não é possível afirmar, diante dos resultados obtidos, que a aveia preta reduziu a força de tração absoluta ou específica requerida pelas hastes sulcadoras de adubo.

A aveia preta resultou em maiores perdas de potência por patinagem durante a semeadura do milho e da soja, em ambos os sistemas de preparo avaliados.

A escarificação, ao reduzir o grau de compactação do solo, diminuiu o requerimento de força de tração pelas hastes sulcadoras de adubo em relação à semeadura direta com plantas de cobertura de inverno. Isso não foi suficiente para reduzir as perdas por patinagem, que foram semelhantes à área sob semeadura direta.

A realização de dois tráfegos de rodados de trator elevou a demanda de força de tração das hastes sulcadoras de adubo na área escarificada, a

níveis similares aos observados para as regiões trafegadas sob semeadura direta.

7. ESTUDO IV: PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO E SOJA E SUA RELAÇÃO COM PRÁTICAS DE MANEJO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

7.1 Introdução

A compactação excessiva do solo tem sido reconhecida como uma importante causa responsável por perdas na produtividade das culturas de grãos (Flowers & Lal, 1998; Beutler & Centurion, 2004; Beutler et al., 2005; Chan et al., 2006; Botta et al., 2007), o que pode ser associado às modificações físicas ocasionadas por esse processo junto ao ambiente radicular (Leão, 2002). Essas alterações englobam principalmente a redução da disponibilidade de oxigênio e água e o aumento da resistência mecânica do solo ao crescimento radicular (Imhoff, 2002; Silva, 2003a; Cavalieri et al., 2006). Isso implica redução da densidade e comprimento das raízes (Montico & Bonel, 2005) o que, por sua vez, limita a profundidade e o volume de solo a ser explorado pelas mesmas e, em decorrência, restringe o acesso das plantas à água e nutrientes. Assim, os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas tendem a ser mais acentuados sob condições de excesso ou déficit hídrico (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). A compactação afeta ainda os processos biológicos envolvidos no ciclo de alguns nutrientes, notadamente o nitrogênio, de forma a potencializar as perdas do mesmo através da volatilização (Bhandral et al., 2007), bem como a reduzir as taxas de mineralização a partir da matéria orgânica do solo (Nevens & Reheul, 2003). Além de possíveis reflexos na produtividade das culturas, as perdas de N aumentam a necessidade de adubação e, assim, os custos de produção (Lipiec et al., 2003).

Diante do que foi anteriormente exposto, torna-se necessária a adoção de práticas que reduzam o grau de compactação e/ou minimizem os

efeitos desse processo sobre o crescimento das plantas. Em solos compactados e que vêm sendo manejados sob semeadura direta, a escarificação esporádica tem sido recomendada como alternativa à diminuição do nível de compactação (Tavares-Filho et al., 2006; Klein & Camara, 2007), cuja grande vantagem é eliminar de forma imediata o problema (Unger & Kaspar, 1994). Entretanto, essa prática é econômica e energeticamente dispendiosa (Boller, 1996) e os seus efeitos têm se mostrado, em geral, de curta duração (Secco & Reinert, 1997; Corsini & Ferraudo, 1999; Botta et al., 2006a; Tavares-Filho et al., 2006). Além disso, a escarificação nem sempre resulta em aumentos significativos na produtividade das culturas, conforme detectado em trabalhos como os realizados por Pikul Junior & Aase (1999), Hamilton-Manns et al. (2002) e Klein & Camara (2007). Tal fato aplica-se principalmente a solos de textura arenosa a média, onde o grau de compactação crítico ao desenvolvimento das plantas é mais elevado (Reichert et al., 2003). Nesse tipo de solo, é possível inclusive que a produtividade seja reduzida pela escarificação, devido a essa prática resultar em um grau de compactação menor que o ótimo para o crescimento das plantas.

Assim, outras medidas alternativas à escarificação vêm sendo recomendadas, como o emprego de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas de cobertura com elevado potencial de produção de biomassa vegetal e dotadas de um sistema radicular abundante e agressivo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005). Embora existam contradições na bibliografia quando se trata da capacidade que as plantas de cobertura possuem em recuperar fisicamente solos caracterizados por um elevado grau de compactação inicial, sabe-se que os bioporos produzidos pelo sistema radicular dessas espécies, mesmo que não reduzam a densidade média do solo e a resistência do solo à penetração (RP), constituem-se em caminhos através dos quais as raízes das culturas de interesse econômico podem crescer através de camadas compactadas (Silva & Rosolem, 2002). Esses bioporos representam menos de 1% do volume total do solo (Ehlers et al., 1983), porém, por serem longos e contínuos, são de alta efetividade para a transmissão de água e ar (Oades, 1993). Além disso, os resíduos produzidos pelas plantas de cobertura colaboram para a manutenção de maiores teores de água na superfície do solo, aliviando assim parte dos efeitos produzidos pela

compactação (menor disponibilidade de água e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes). Apesar disso, percebe-se que os produtores rurais e técnicos ligados a esse setor resistem à idéia de melhorar fisicamente um solo com elevado grau de compactação apenas através de plantas de cobertura, devido às dúvidas que ainda persistem quanto à eficiência dessa prática, principalmente no que se refere ao desempenho produtivo das culturas durante o período de recuperação, que, segundo Corsini & Ferraudo (1999), pode ser longo.

O aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora é uma medida que pode ser adotada em conjunto com as plantas de cobertura, visando reduzir os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas enquanto a recuperação física por processos biológicos está em andamento. Essa possibilidade baseia-se no rompimento localizado de camadas compactadas em superfície, as quais são as mais prejudiciais às culturas (Unger & Kaspar, 1994). Além disso, a deposição do adubo a maiores profundidades pode estimular o crescimento das raízes a camadas inferiores, uma vez que os nutrientes, em condições de semeadura direta, tendem a se concentrar nos primeiros 0,05 m da superfície do solo (Merten & Mielniczuk, 1991). Aumentos da produtividade das culturas em função da atuação mais profunda das hastes sulcadoras de adubo tem sido reportados na bibliografia, especialmente quando da ocorrência de deficiências hídricas moderadas (Beutler, 2005; Xavier, 2005).

Levando-se em consideração o que foi anteriormente exposto, este estudo teve como hipóteses principais:

- em semeadura direta, as plantas de cobertura de inverno, principalmente através da redução do grau de compactação do solo, da formação de bioporos e da produção de uma cobertura superficial de resíduos orgânicos, resultam em produtividades de grãos de milho e soja superiores ao pousio;

- o aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora para deposição do adubo, em áreas manejadas sob semeadura direta, diminui os efeitos da compactação sobre o crescimento do milho e da soja e, conseqüentemente, incrementa a produtividade de grãos dessas culturas;

- para solos de textura franca, a escarificação esporádica dentro do

sistema de semeadura direta não traz benefícios em termos da produtividade de grãos das culturas do milho e da soja, em relação à semeadura direta contínua e com o uso de plantas de cobertura de inverno.

Para testar essas hipóteses, o objetivo desse estudo foi determinar o efeito de diferentes coberturas de inverno, da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo e da escarificação esporádica dentro do sistema de semeadura direta sobre o estabelecimento, a produtividade de grãos e os componentes da produção das culturas do milho e da soja.

7.2 Material e métodos

7.2.1 Experimento de campo

As informações referentes ao experimento de campo, incluindo os detalhes a respeito da implantação e condução das culturas do milho e da soja, foram apresentadas no capítulo 3. Cabe destacar que, neste estudo, os tratamentos considerados foram as coberturas de inverno (aveia preta+ervilhaca em 2005, que foi substituída por nabo forrageiro em 2006; aveia preta; e pousio), as profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo (“raso” e “profundo”) e os sistemas de preparo (semeadura direta e escarificação antes da implantação das plantas de cobertura de inverno, seguida da semeadura direta das culturas de verão). Os efeitos referentes ao tráfego não foram avaliados, sendo as amostragens realizadas apenas nas áreas não trafegadas por rodados de trator. No caso da soja na área sob semeadura direta, uma das linhas coletadas coincidiu com o tráfego da colhedora; no entanto, isso ocorreu para todos os tratamentos, de forma que a comparação entre os mesmos não é prejudicada.

7.2.2 Avaliações realizadas

Em todas as determinações relacionadas às culturas do milho e da soja, as duas linhas mais externas a cada subparcela, assim como as plantas localizadas a menos de 2 m a partir das extremidades das parcelas, não foram consideradas para fins de amostragem, constituindo-se, assim, em bordaduras.

As avaliações foram realizadas nas safras de 2005/2006 e 2006/2007. A exceção ocorreu para os tratamentos escarificados que, por terem sido implantados em 2006, foram avaliados somente na safra de 2006/2007. O procedimento de amostragem adotado foi igual nas duas safras e nos dois sistemas de preparo testados.

7.2.2.1 População de plantas

Esta variável foi determinada aos 28 dias após a semeadura, mediante a realização de duas contagens por subparcela. Cada contagem englobou todas as plantas existentes em quatro metros de fileira. Na colheita, a população de plantas de soja foi estimada seguindo a mesma metodologia utilizada aos 28 dias após a semeadura. Já a população de plantas de milho na colheita foi quantificada através da contagem das plantas existentes nos 12 m colhidos para estimativa da produtividade de grãos.

7.2.2.2 Produtividade e componentes da produção

Na soja, a estimativa da produtividade de grãos foi executada através da coleta de uma amostra por subparcela, constituída pelas plantas existentes em 12 metros lineares das três fileiras centrais, o que correspondeu a uma área de amostragem de 14,4 m². Para o milho, também foi colhida uma amostra por subparcela, englobando as plantas existentes em 12 metros lineares da fileira central, o que equivaleu a uma área de amostragem de 10,8 m². Em seguida, as amostras foram trilhadas através de uma trilhadora de grãos estacionária, descrita no item 3.5, e os grãos pesados. Determinou-se o teor de água dos grãos no momento da pesagem, através da secagem em estufa a 105° C por 72 h, propiciando assim a correção do peso para a umidade de referência de 13%. É importante destacar que a produtividade de grãos de soja e milho foi também quantificada, na safra 2005/06, no bloco 5 que, à época, não havia ainda sido escarificado e era manejado sob pousio de inverno e, a exemplo dos demais blocos, sob duas profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo durante a semeadura das culturas de verão (Capítulo 2, item 3.3).

Para a determinação dos componentes da produção de grãos na soja, foram amostradas, aleatoriamente, 10 plantas por subparcela. Estas plantas foram adequadas e cuidadosamente acondicionadas e transportadas ao laboratório, onde se avaliou, por contagens e pesagens, o número de legumes por planta e de grãos por legume, a massa de grãos por planta e a massa de 1000 grãos. No caso do milho, contou-se o número de espigas e o número de plantas existentes nos 12 metros de fileira que foram coletados para a quantificação da produtividade de grãos. Com esses dados, calculou-se o número de espigas por ha e por planta (prolificidade). Após a operação de trilha, foram separados, de forma aleatória, 500 grãos por amostra, os quais foram submetidos à secagem em estufa a 105° C por aproximadamente 72 horas e, então, pesados, possibilitando assim a determinação da massa de mil grãos, assim como a massa média de cada um deles, ambas na umidade de 13%. Dividindo-se a massa de grãos por m² (obtida na estimativa da produtividade) pela massa individual dos mesmos, obteve-se o número de grãos por m². O número de grãos por espiga foi calculado através da divisão entre o número de grãos por m² e o número de espigas por m². A massa de grãos por planta foi quantificada mediante o quociente entre a massa de grãos por m² e o número de plantas por m² na colheita.

7.2.3 Análise estatística dos dados

Na área sob semeadura direta, independentemente da variável medida, a ANOVA foi realizada em separado para cada safra e cultura de verão, mediante o emprego do modelo bifatorial em blocos ao acaso com parcelas subdivididas no espaço e quatro repetições. O fator principal, distribuídos nas parcelas, correspondeu às coberturas de inverno, enquanto que o secundário, disposto nas subparcelas, englobou as profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo. Para os tratamentos escarificados, o modelo utilizado foi o unifatorial em blocos ao acaso e três repetições, sendo as plantas de cobertura de inverno (nabo forrageiro e aveia preta) o fator estudado. Quando as interações entre os fatores estudados se mostraram significativas pela ANOVA (teste F, $p < 0,05$), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro de outro, através do teste de Duncan ($p < 0,05$). Quando

não houve interação, mas os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. Tanto a ANOVA quanto os testes de comparação entre médias foram realizados através do programa computacional SOC-EMBRAPA. Para a comparação entre os parâmetros medidos na área sob semeadura direta e nas parcelas escarificadas, foi empregado o teste t (Student) bilateral para dados não pareados ($p < 0,05$), efetuado com o auxílio do programa Microsoft Excel®.

7.3 Resultados e discussão

7.3.1 Safra 2005/2006

Os dados referentes à população de plantas de soja na área sob semeadura direta, determinada aos 28 dias após a semeadura (DAS) e por ocasião da colheita, são mostrados na Tabela 39. Em primeiro lugar, verifica-se que a população estabelecida aos 28 DAS foi, na média dos tratamentos, 25% inferior à preconizada quando da regulagem da semeadora (400 mil plantas por hectare). Mesmo considerando que o solo encontrava-se úmido no momento da semeadura (teor de água de 0,16 e 0,15 kg kg^{-1} , respectivamente, para as camadas de 0,0-0,08 e 0,08-0,16 m), a ocorrência de um período de dez dias após a semeadura (08/12) sem chuvas significativas, aliado a uma alta evapotranspiração potencial (Figura 27), justificam esse resultado. No entanto, a soja possui uma grande capacidade de compensar falhas, através da emissão de um maior número de folhas e ramificações (Buriol et al., 1995), de forma que a população obtida não representa limitações à produtividade de grãos.

A população de plantas foi influenciada de maneira significativa pelas coberturas de inverno, sendo os menores valores observados para a aveia preta (Tabela 39). Apesar de significativas, essas diferenças podem ser consideradas pequenas, representando, na média das profundidades, menos de uma planta por metro. Os tratamentos aveia preta+ervilhaca e pousio, por sua vez, não diferiram significativamente entre si. Na colheita, a população de plantas de soja foi 10% inferior (30000 plantas por hectare) comparativamente

à determinada aos 28 DAS, o que se deve, possivelmente, à morte de plantas mais fracas devido ao ataque de pragas, bem como aos períodos de deficiência hídrica ocorridos durante a safra 2005/2006 (Figura 27). As diferenças na população de plantas entre as coberturas de inverno, nessa ocasião, deixaram de ser significativas. Ainda conforme a Tabela 39, verifica-se que, independentemente da cobertura de inverno e da época de avaliação, o número de plantas de soja por m² não foi afetado significativamente pela profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo.

Tabela 39. Número de plantas de soja por m² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2005/2006), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- 28 dias após a semeadura ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 29 | 32 | 30 a |
| Aveia preta | 28 | 28 | 28 b |
| Pousio | 32 | 29 | 31 a |
| Média | 29 A | 30 A | 30 |
| ----- Colheita ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 27 | 27 | 27 a |
| Aveia preta | 27 | 26 | 27 a |
| Pousio | 27 | 27 | 27 a |
| Média | 27 A | 27 A | 27 |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura: coberturas = 2,9%; profundidade da haste = 5,1%. CV plantas por m² na colheita: coberturas = 3,6%; profundidade da haste = 5,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

A produtividade de grãos da cultura da soja, na safra 2005/06, é indicada pela Tabela 40. Cabe destacar que não houve interação significativa entre as coberturas de inverno e a profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo para a produtividade da soja, de forma que a comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada separadamente para cada fator. Verificase que as maiores produtividades de grãos foram obtidas quando da semeadura da soja sobre a aveia preta e o consórcio aveia preta+ervilhaca. A produtividade de grãos no pousio foi 250 e 300 kg inferior, respectivamente, às

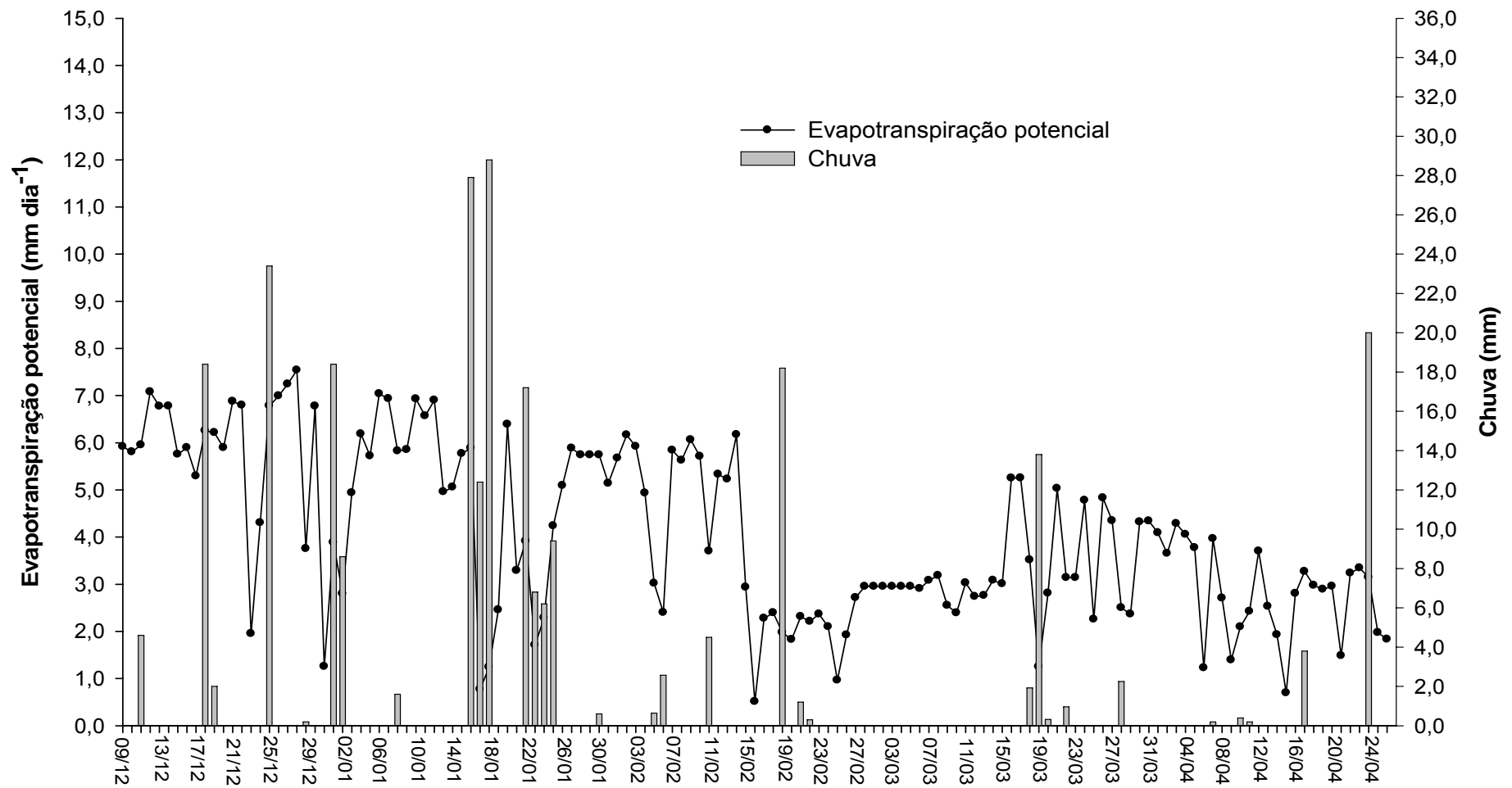


Figura 28. Evapotranspiração potencial e volume de chuvas referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão na safra 2005/2006. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia /UFRGS.

Tabela 40. Produtividade de grãos de soja (safra 2005/2006) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|----------------------------|
| | Raso | Profundo | |
| | ----- <i>Mg ha⁻¹</i> ----- | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 1,82 | 1,93 | 1,87 a |
| Aveia preta | 1,74 | 1,90 | 1,82 a |
| Pousio | 1,53 | 1,61 | 1,57 b |
| Pousio (bloco 5) ¹ | 1,61 | 1,66 | 1,64^{n.s.} |
| Média² | 1,70 A | 1,81 A | 1,75 |

¹ n.s. = diferenças entre o pousio do bloco 5 e o pousio medido nos demais blocos não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Médias entre os tratamentos instalados nos blocos 1 ao 4, excluindo-se o pousio referente ao bloco 5. CV coberturas = 12,1%; CV profundidade da haste = 8,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

encontradas para a aveia preta+ervilhaca e aveia preta, o que foi estatisticamente significativo. Como as características químicas do solo se assemelharam entre as coberturas testadas (Apêndice 7), a maior produtividade de grãos observada quando da inclusão de plantas de cobertura de inverno em sistemas de rotação de culturas para a soja, provavelmente, esteja relacionada ao menor estado de compactação nesses tratamentos (estudo II). Essa constatação é respaldada pelo fato de, na avaliação realizada pouco antes da semeadura do milho e da soja na safra 2005/2006 (outubro/2005, Tabela 7, item 4.3.3.1), a densidade da camada superficial do solo (0,03-0,06 m), medida no pousio, encontrar-se acima dos limites críticos ao crescimento das plantas sugeridos por Reichert et al. (2003). Além disso, nessa mesma época, a RP (Figura 4a, item 4.3.3.1) de 2 MPa, que é o valor crítico com vistas ao crescimento vegetal mais aceito na bibliografia (Imhoff, 2002), foi atingida a uma profundidade maior (0,12 m) nos tratamentos envolvendo plantas de cobertura de inverno do que no pousio (0,09 m). Outro fator que pode explicar a menor produtividade de grãos no pousio envolve a maior cobertura do solo por resíduos quando do uso da aveia preta e da aveia preta+ervilhaca (Tabela 3, item 4.3.1), o que provavelmente tenha colaborado para a manutenção de um maior teor de água no solo amenizando, assim, os efeitos da compactação. Nota-se ainda que não houve diferenças significativas entre a produtividade de soja medida para o pousio estabelecido no bloco 5 e o pousio mantido nos demais blocos. Isso evidencia que os atributos físicos e

químicos do solo não diferiram de forma acentuada entre essas duas condições.

Beutler (2005), trabalhando nesse mesmo experimento, obteve que o consórcio aveia preta+ervilhaca reduziu a produtividade da soja em 550 kg ha⁻¹ (mais de 9 sacas ha⁻¹) quando comparada à aveia preta e ao pousio, considerando a safra 2002/2003. O autor atribuiu esse resultado a maior disponibilidade de N no início do ciclo da soja, em função da decomposição dos resíduos da ervilhaca. De fato, a presença de N mineral pode inibir a infecção das plântulas de soja pelos rizóbios e, conseqüentemente, prejudicar a nodulação e a fixação biológica do N (EMBRAPA, 2006). No entanto, esse fator não limitou a produtividade da soja na safra 2005/2006 (Tabela 40). Uma das possíveis justificativas para as diferenças observadas no efeito da aveia preta+ervilhaca sobre a produtividade de grãos da soja nas safras 2002/2003 e 2005/2006 pode estar relacionada ao tempo decorrido entre o manejo químico da aveia preta+ervilhaca e a semeadura das culturas de verão. Na safra 2005/2006, a dessecação das coberturas de inverno foi realizada aproximadamente 45 dias antes da semeadura da soja. Como a taxa de decomposição da ervilhaca é alta (Da Ros & Aita, 1996), é provável que, após esse período, a maior parte do N presente nos resíduos da ervilhaca tenha sido mineralizada e, em seguida, reimmobilizada pelos microrganismos durante a decomposição dos resíduos de aveia preta, que apresentam relação C/N mais elevada (Heinrichs, 1996). Diante disso, o N não ficou disponível à soja no início do seu desenvolvimento, não acarretando em efeitos negativos sobre a nodulação e fixação biológica desse macronutriente.

Os efeitos das plantas de cobertura de inverno sobre a produtividade da soja foram potencializados pelas condições meteorológicas ocorridas durante o período de desenvolvimento dessa cultura em 2005/2006. Nessa safra, foram observados vários períodos relativamente longos sem chuvas significativas (Figura 27). Entretanto, o déficit hídrico mais importante ocorreu de 20/02 a 23/04 onde, em 63 dias, o volume total de chuvas foi inferior a 25 mm (Figura 27). Levando-se em consideração as épocas de ocorrência dos principais estádios fenológicos da soja (Apêndice 12), observa-se que a estiagem iniciou quando a soja estava entrando em R3 (início de formação de vagens), e se prolongou até a colheita. Assim, o déficit hídrico atingiu

praticamente toda a fase reprodutiva dessa cultura, resultando em produtividades que, embora maiores para as plantas de cobertura de inverno em relação ao pousio, podem ser consideradas baixas para todos os tratamentos (Tabela 40). A diminuição da produtividade da soja só não foi mais acentuada pelo fato de a estiagem ter ocorrido em um período tal que a demanda evaporativa da atmosfera, expressa pela evapotranspiração potencial, já não era tão elevada quanto a observada nos meses de dezembro e janeiro (Figura 27). Em situações de deficiência hídrica, os efeitos negativos sobre as plantas, produzidos por um elevado grau de compactação, tornam-se mais acentuados (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). Isto ocorre porque o aumento do teor de água diminuiu a RP (Tormena et al., 1998; Genro Junior et al., 2004; Cavaliere et al., 2006), de forma que, em solos suficientemente úmidos, as raízes podem atravessar camadas compactas sem grandes dificuldades. Além disso, o armazenamento de água disponível às plantas tende a ser baixo em solos compactados, devido à menor capacidade de infiltração (Dexter, 1991) e a maior energia de retenção da água (Reichardt & Timm, 2004). Diante disso, o menor grau de compactação do solo, em conjunto com a maior cobertura da superfície por resíduos vegetais, fez com que a soja semeada nas parcelas ocupadas por plantas de cobertura de inverno resistisse mais ao estresse hídrico por deficiência, resultando em maiores produtividades.

Independentemente da cobertura de inverno, a profundidade de atuação das hastes sulcadoras não afetou de forma significativa a produtividade da soja safra 2005/06 (Tabela 40). Entretanto, percebe-se que houve uma tendência de a produtividade de grãos dessa cultura ser mais elevada quando a haste foi regulada para atuar na posição “profundo” (profundidade máxima do sulco igual 8,4 cm) comparativamente à posição “raso” (5,4 cm). Levando-se em consideração a ocorrência de períodos de deficiência hídrica, era esperada uma resposta maior da produtividade da soja ao aumento da profundidade de atuação da haste, principalmente no pousio, que ainda apresentava um grau de compactação restritivo ao crescimento das plantas (Tabela 7 e Figura 4a, item 4.3.3.1). Porém, isso não se confirmou. Beutler (2005) também não obteve resposta da produtividade da soja ao emprego de maiores profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo,

também sob condições de déficit hídrico. Por outro lado, Xavier (2005) conclui que, na ausência de irrigação, a produtividade da soja foi aproximadamente 180 kg ha^{-1} superior quando a haste atuou a 0,100 m, comparativamente a 0,064 m, diferença essa que se mostrou estatisticamente significativa.

Os efeitos das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo sobre os componentes da produção da soja são mostrados na Tabela 41. Observa-se que, em ambas as profundidades da haste, o número de grãos por legume e a massa de mil grãos não variaram significativamente em função das coberturas de inverno testadas. Tendo em vista que a população de plantas na colheita não diferiu entre as coberturas de inverno (Tabela 39), a menor produtividade de grãos obtida pelo pousio em relação às plantas de cobertura encontra-se associada à fixação de um menor número de legumes por planta nesse tratamento, o que resultou também na diminuição da massa de grãos por planta (Tabela 41). As melhores condições físicas do solo, aliadas a maior cobertura de resíduos na superfície, ao resultarem, possivelmente, numa maior disponibilidade hídrica em função do aumento da capacidade de infiltração, da redução das perdas de água por evaporação e do incremento no volume de solo explorado pelas raízes, proporcionaram à soja semeada nos tratamentos referentes às plantas de cobertura uma maior capacidade de tolerar à falta de chuva no início da estiagem. Como as plantas de soja encontravam-se, a essa época, no estágio R3-R4 (Apêndice 12), a maior disponibilidade hídrica e, em conseqüência, de nutrientes, possibilitou a fixação de um número mais elevado de legumes nas parcelas ocupadas por plantas de cobertura durante o inverno. A continuidade da estiagem nos estágios subseqüentes não modificou a massa de mil grãos de maneira diferenciada entre as coberturas de inverno, pois a fixação de um menor número de legumes possibilitou que as plantas de soja semeadas sobre o pousio disponibilizassem aos grãos fotoassimilados em quantidades similares às semeadas sobre plantas de cobertura de inverno. No entanto, o forte déficit hídrico durante o período de enchimento dos grãos resultou em uma massa de mil grãos inferior ao potencial do cultivar utilizado (BRS 154), que segundo a EMBRAPA (2007), equivale a 194 g. Ainda conforme a Tabela 41, verifica-se que os componentes da produção da soja não foram influenciados significativamente pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo,

o que é coerente com o fato de a produtividade de grãos dessa cultura não ter sido afetada por esse fator (Tabela 40).

Tabela 41. Componentes da produção de grãos de soja (safra 2005/2006) na área sob semeadura direta, afetados pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>Número de legumes por planta</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 36 | 36 | 36 a |
| Aveia preta | 41 | 42 | 41 a |
| Pousio | 29 | 31 | 30 b |
| Média | 35 A | 36 A | 36 |
| ----- <i>Número de grãos por legume</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 1,96 | 1,89 | 1,92 a |
| Aveia preta | 1,90 | 1,92 | 1,91 a |
| Pousio | 1,97 | 1,88 | 1,93 a |
| Média | 1,94 A | 1,90 A | 1,92 |
| ----- <i>Massa de mil grãos (g)</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 154 | 149 | 152 a |
| Aveia preta | 152 | 150 | 151 a |
| Pousio | 152 | 149 | 151 a |
| Média | 153 A | 149 A | 151 |
| ----- <i>Massa de grãos por planta (g)</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 11 | 10 | 10 a |
| Aveia preta | 12 | 12 | 12 a |
| Pousio | 9 | 9 | 9 b |
| Média | 10 A | 10 A | 10 |

CV número de legumes por planta: coberturas = 7,9%; profundidade da haste = 6,7%. CV número de grãos por legume: coberturas = 2,1%; profundidade da haste = 1,8%. CV massa de mil grãos: coberturas = 2,0%; profundidade da haste = 4,1%. CV massa de grãos por planta: coberturas = 6,7%; profundidade da haste = 6,8%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

De acordo com a Tabela 42, nota-se que, independentemente da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo, a população de plantas de milho não foi alterada de forma significativa pelas coberturas de inverno,

Tabela 42. Número de plantas de milho por m² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2005/2006), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|--------------|--------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- 28 dias após a semeadura ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 6,0 | 6,6 | 6,3 a |
| Aveia preta | 5,6 | 6,2 | 5,9 a |
| Pousio | 5,2 | 6,2 | 5,7 a |
| Média | 5,6 B | 6,3 A | 6,0 |
| ----- Colheita ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 5,9 | 6,2 | 6,0 a |
| Aveia preta | 5,5 | 6,0 | 5,7 a |
| Pousio | 5,2 | 5,9 | 5,6 a |
| Média | 5,5 B | 6,0 A | 5,8 |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura: coberturas = 2,9%; profundidade da haste = 5,1%. CV plantas por m² na colheita: coberturas = 3,6%; profundidade da haste = 5,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

tanto na avaliação realizada aos 28 DAS quando na efetuada à época da colheita. Ao contrário da soja (Tabela 39), a população do milho praticamente não diminuiu dos 28 DAS até a colheita, evidenciando que essa cultura foi menos sensível, em termos de mortalidade de plantas, às pragas e aos períodos de déficit hídrico observados no início do ciclo de desenvolvimento (Figura 27). Por outro lado, os dados da Tabela 42 mostram ainda que a população de plantas de milho, independentemente da época de avaliação, aumentou significativamente em função do incremento na profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo. Na posição “profundo”, o número de plantas por unidade de área assemelhou-se ao preconizado quando da regulação da semeadora (65 mil plantas por hectare), enquanto que, na menor profundidade de atuação da haste, a população medida aos 28 DAS foi aproximadamente 15% inferior. Possivelmente, a maior mobilização na linha de semeadura em virtude do aumento da profundidade de atuação da haste tenha propiciado melhores condições para o estabelecimento das plântulas de milho, levando-se em consideração a ocorrência de um período de 10 dias sem

chuvas significativas após a semeadura dessa cultura (Figura 27). Esse aumento, embora de maior magnitude para o pousio, foi observado também para os tratamentos referentes às plantas de cobertura de inverno. Tal fato sugere que o grau de compactação, mesmo sendo menor para as coberturas de inverno (Tabela 7 e Figura 4a, item 4.3.3.1), foi suficiente para, de alguma forma, prejudicar o estabelecimento das plântulas de milho. É possível também que a atuação mais profunda da haste sulcadora tenha trazido para junto da semente solo mais úmido, melhorando assim a germinação das sementes. Nesse sentido, Reis et al. (2006) obtiveram que o facão proporcionou melhor emergência de plântulas de milho, em relação aos discos duplos, o que foi atribuído pelos autores a menor densidade do solo na área de contato solo/semente proporcionada pelo primeiro mecanismo sulcador.

A produtividade de grãos de milho na safra 2005/06, em função da profundidade de deposição do fertilizante e das coberturas de inverno, é dada pela Tabela 43. Da mesma forma que para a soja, a ANOVA demonstrou que a interação coberturas de inverno x profundidade da haste não foi significativa; desse modo, as comparações foram efetuadas em separado para cada fator testado. Verifica-se que a produtividade de grãos do milho, a exemplo do que ocorreu para a soja, foi, em média, 15% superior (700 kg ou quase 12 sacas por hectare) nos sistemas de rotação de culturas envolvendo a semeadura de plantas de cobertura de inverno (aveia preta e aveia preta+ervilhaca) do que no pousio hibernal. Novamente, como as características químicas do solo não diferiram de forma acentuada entre as coberturas de inverno (Apêndice 7), esse resultado pode ser atribuído, em primeiro lugar, a menor cobertura da superfície do solo (Tabela 3, item 4.3.1) por resíduos culturais e/ou ao maior grau de compactação das parcelas sob pousio que, em outubro/2005 (Tabela 7 e Figura 4a, item 4.3.3.1), superou os limites de densidade do solo críticos ao crescimento das plantas, sugeridos por Reichert et al. (2003). Observa-se também que as profundidades de atuação da haste sulcadora não afetaram significativamente a produtividade de grãos de milho, embora esta variável tenha atingido valores mais altos no tratamento “profundo” (230 kg ou quase quatro sacas por hectare).

Cabe destacar que um dos fatores mais limitantes à produtividade de grãos de milho é a disponibilidade de N, pois este é um dos nutrientes

requeridos em maior quantidade por essa cultura e que, em solos tropicais, apresenta-se normalmente em baixas concentrações (França & Resende, 2003). Assim, o fato de um dos tratamentos avaliados no presente trabalho englobar uma leguminosa com capacidade de fixar N atmosférico (ervilhaca), pode ter prejudicado a associação dos efeitos produzidos por este tratamento sobre a produtividade de grãos de milho unicamente às alterações ocasionadas pelas mesmas nos atributos físicos do solo. De acordo com Pöttker & Roman (1994), as diferenças na produtividade do milho observadas quando essa cultura sucede a aveia preta ou a ervilhaca são reduzidas em função do aumento na quantidade de N fornecida via adubação química. Assim, buscou-se eliminar esse problema através da aplicação de uma dose de N relativamente elevada, correspondente à quantidade recomendada pela Comissão... (2004) visando à produção de 7 Mg ha⁻¹ de grãos e considerando como cultura antecessora uma gramínea. É importante considerar, no entanto, que o sistema de semeadura direta, neste experimento, na safra 2005/2006, encontrava-se na fase inicial de implantação (menos de cinco anos). Nesse período, é sabido que a taxa de imobilização do N supera a de mineralização, diminuindo assim a disponibilidade desse nutriente às plantas (Gassen & Gassen, 1996). Portanto, pode-se atribuir parte da maior produtividade de grãos de milho proporcionada pela aveia preta+ervilhaca a maior disponibilidade de N nesse tratamento.

Tabela 43. Produtividade de grãos de milho (safra 2005/2006), afetada pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| | Raso | Profundo | |
| | ----- Mg ha ⁻¹ ----- | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 5,69 | 6,32 | 6,00 a |
| Aveia preta | 6,29 | 6,03 | 6,16 a |
| Pousio | 5,13 | 5,49 | 5,31 b |
| Pousio (bloco 5) ¹ | 5,57 | 5,82 | 5,70^{n.s.} |
| Média² | 5,71 A | 5,94 A | 5,83 |

¹ n.s. = diferenças entre o pousio do bloco 5 e o pousio medido nos demais blocos não significativas, pelo teste t (p>0,05). ² Médias entre os tratamentos instalados nos blocos 1 ao 4, excluindo-se o pousio referente ao bloco 5. CV coberturas = 10,3%; CV profundidade da haste = 11,1%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan (p>0,05).

É importante salientar que a produtividade de grãos de milho (safra 2005/2006), na média dos tratamentos, chegou a quase 100 sacas por hectare (Tabela 43). Essa produtividade pode ser considerada alta, tendo em vista que o experimento não foi irrigado e a cultura foi semeada fora da época recomendada. Tal nível de produtividade, obtido mesmo com o forte déficit hídrico observado durante o período de enchimento de grãos (Figura 27 e Apêndice 13), pode ser relacionada à ocorrência de uma chuva de aproximadamente 20 mm em 19/02 (Figura 27), quando o milho encontrava-se entre os estádios VT e R1 (Apêndice 13), ou seja, no pendoamento e emissão dos estigmas. Além disso, observou-se nesse período uma menor demanda evaporativa da atmosfera, indicada pelos valores de evapotranspiração potencial (Figura 27). O milho é muito sensível a deficiências hídricas nesses estádios (Bergamaschi et al., 2006), pois a falta de água pode resultar na ausência de sincronismo entre a emissão do pendão e da espiga, assim como na dessecação dos grãos de pólen e dos estigmas, o que diminui o número de grãos por espiga e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (Magalhães, 2003). Como o volume da referida precipitação foi baixo, as melhores condições físicas do solo, associadas a maior quantidade de resíduos na superfície do mesmo, provavelmente tenham propiciado ao milho uma maior disponibilidade de água, quando implantado sobre as plantas de cobertura de inverno comparativamente ao pousio, garantindo, assim uma produtividade mais elevada para esses tratamentos.

Os dados relacionados aos componentes de produção do milho, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação das hastes, são apresentados na Tabela 44. Nota-se que nenhum dos componentes de produção foi afetado de forma significativa pelas coberturas de inverno, o que, aparentemente, contrapõem-se ao fato de a produtividade de grãos ter sido significativamente menor para o pousio (Tabela 43). Entretanto, observa-se que, em despeito à ausência de significância estatística, houve uma tendência de o número de espigas por ha, assim como o número de grãos por espiga, serem de magnitudes inferiores para o pousio, em comparação à aveia preta+ervilhaca e à aveia preta, resultando numa maior massa de grãos por planta nesses dois tratamentos. Assim, é provável que a soma dos efeitos individuais das coberturas de inverno sobre esses componentes tenha resultado nas

Tabela 44. Componentes da produção de grãos de milho (safra 2005/2006), afetados pelas coberturas de inverno e pela profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>Número de espigas por ha</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 55.000 | 60.000 | 57.000 a |
| Aveia preta | 54.000 | 56.000 | 55.000 a |
| Pousio | 46.000 | 56.000 | 51.000 a |
| Média | 51.000 B | 57.000 A | 54.000 |
| ----- <i>Número de grãos por espiga</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 322 | 313 | 318 a |
| Aveia preta | 357 | 316 | 336 a |
| Pousio | 330 | 300 | 315 a |
| Média | 336 A | 310 A | 323 |
| ----- <i>Massa de mil grãos (g)</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 328 | 338 | 333 a |
| Aveia preta | 329 | 347 | 338 a |
| Pousio | 338 | 325 | 332 a |
| Média | 332 A | 337 A | 334 |
| ----- <i>Massa de grãos por planta (g)</i> ----- | | | |
| Aveia preta + ervilhaca | 99 | 103 | 101 a |
| Aveia preta | 114 | 102 | 108 a |
| Pousio | 99 | 91 | 95 a |
| Média | 104 A | 99 A | 101 |

CV número de espigas por ha: coberturas = 8,7%; profundidade da haste = 3,6%. CV número de grãos por espiga: coberturas = 6,2%; profundidade da haste = 5,4%. CV massa de mil grãos: coberturas = 2,3%; profundidade da haste = 6,0%. CV massa de grãos por planta: coberturas = 2,8%; profundidade da haste = 2,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

maiores produtividades de grãos obtidas para as plantas de cobertura de inverno. A influência exercida pelas coberturas sobre o número de espigas por ha e de grãos por espiga é coerente com as condições climáticas observadas durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Nas parcelas ocupadas por plantas de cobertura durante o inverno, o menor grau de compactação, em conjunto com a presença de uma quantidade mais elevada de resíduos

vegetais na superfície do solo, implicou uma maior disponibilidade hídrica entre os estádios VT e R1 para o milho, período no qual ocorreu apenas uma chuva de 20 mm (Figura 27). Isso resultou em um maior número de óvulos fecundados e, conseqüentemente, de grãos por espiga. Além disso, a menor disponibilidade de água para o pousio pode ter resultado numa redução do número de plantas com duas espigas nesse tratamento, acarretando num menor número destas por ha. Tal constatação é respaldada por Magalhães (2003), que explica que a ocorrência de deficiências hídricas nesses estádios pode prejudicar a emissão da segunda espiga em materiais com alta prolificidade, como é o caso do híbrido utilizado nesse estudo.

No que se refere às profundidades de atuação das hastes sulcadoras de adubo, a Tabela 44 mostra que este fator afetou de forma significativa o número de espigas por ha, que foi menor na posição “raso” comparativamente à posição “profundo”. Tal fato corrobora com a maior população de plantas observada quando as hastes sulcadoras atuaram a uma maior profundidade (Tabela 42). Entretanto, o maior número de espigas por ha não foi suficiente para resultar em uma produtividade de grãos significativamente mais elevada, para a maior profundidade de atuação das hastes (Tabela 43). Embora as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas, observa-se que o número de grãos por espiga tendeu a ser maior na posição “raso”, o que pode ter compensado, ao menos em parte, o maior número de espigas por ha obtido na posição “profundo” e, assim, resultado em produtividades de grãos semelhantes entre esses tratamentos. A massa de mil de grãos e a massa de grãos por planta também não foram influenciadas pelas profundidades de atuação da haste.

7.3.2 Safra 2006/2007

7.3.2.1 Semeadura direta

Os efeitos das coberturas de inverno e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras para deposição do adubo sobre a população de plantas de soja na safra 2006/07, determinada aos 28 DAS e na colheita, são mostrados na Tabela 45. Verifica-se que, aos 28 DAS, o número de plantas

Tabela 45. Número de plantas de soja por m² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- 28 dias após a semeadura ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 35,8 | 36,1 | 36,0 a |
| Aveia preta | 37,7 | 34,5 | 36,1 a |
| Pousio | 34,1 | 38,0 | 36,0 a |
| Média | 35,9 A | 36,2 A | 36,0 |
| ----- Colheita ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 26,7 | 29,2 | 27,9 a |
| Aveia preta | 27,5 | 29,0 | 28,3 a |
| Pousio | 19,6 | 26,1 | 22,8 b |
| Média | 24,6 A | 28,1 A | 26,3 |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura: coberturas = 8,8%; profundidade da haste = 10,5%. CV plantas por m² na colheita: coberturas = 8,7%; profundidade da haste = 7,7%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

de soja por unidade de área não foi afetado de forma significativa pelos tratamentos. Comparativamente à safra anterior, a germinação das sementes e o estabelecimento das plântulas foram melhores, uma vez que a população de plantas inicial se mostrou, em média, apenas 10% inferior à considerada para fins de regulação, refletindo as condições de solo úmido durante a semeadura bem como a ocorrência, a partir dos 10 DAS, de várias precipitações em um espaço curto de tempo (Figura 28). No entanto, percebe-se que a população de plantas foi consideravelmente reduzida dos 28 DAS até a colheita. Tal diminuição foi mais acentuada para o pousio na profundidade “raso”, alcançando um valor de quase 45% de redução comparativamente à população medida aos 28 DAS. Isso fez com que o número de plantas de soja para o pousio se tornasse significativamente inferior às plantas de cobertura de inverno. Esse comportamento pode ser relacionado à ocorrência de um período de cerca de três semanas (26/12/2006 a 16/01/2007) sem chuvas significativas, aliado a uma alta demanda evaporativa da atmosfera que, em alguns dias, chegou a 8 mm dia⁻¹ (Figura 28). Desse modo, as melhores

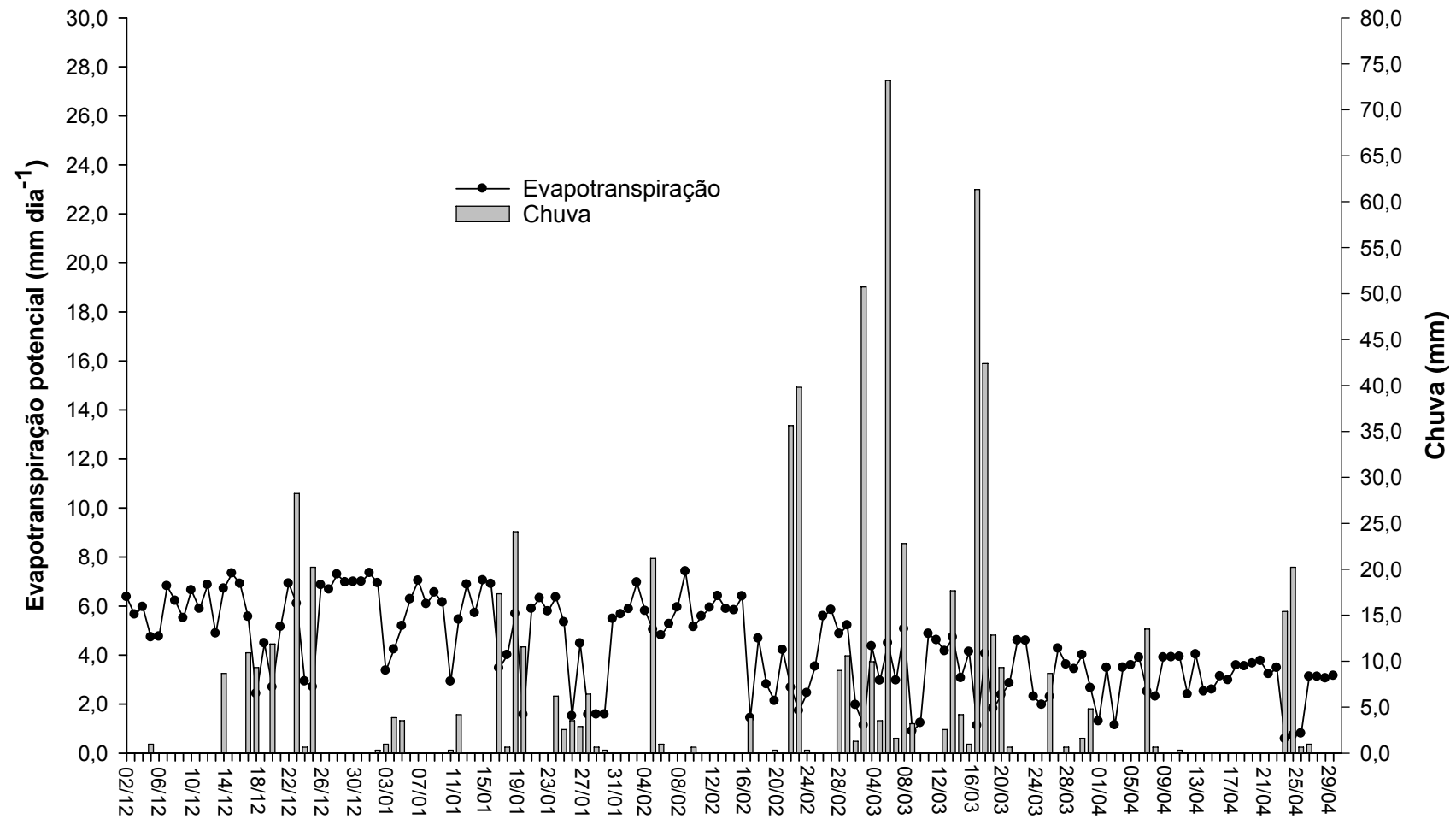


Figura 29. Evapotranspiração potencial e volume de chuvas referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão na safra 2006/2007. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.

condições físicas do solo proporcionadas pela atuação mais profunda da haste sulcadora e pelas plantas de cobertura de inverno, associadas à maior quantidade de resíduos vegetais presente na superfície do solo das parcelas cultivadas durante o inverno com essas espécies, conferiram às plântulas de soja maiores possibilidades de sobreviver ante a escassez de chuvas. Nesse sentido, Flowers & Lal (1998) observaram diminuições de aproximadamente 20% na população de plantas de soja em virtude da compactação induzida pelo tráfego de um trator de 20 Mg.

A produtividade da soja na safra 2006/2007, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo, é apresentada na Tabela 46. Primeiramente, cabe salientar que a interação coberturas x profundidade da haste não foi estatisticamente significativa, de forma que cada um dos fatores foi analisado em separado. Ao contrário da safra anterior, não houve efeito significativo das coberturas de inverno sobre a produtividade da soja, embora esta variável tenha apresentado uma tendência de, novamente, atingir maiores valores quando a cultura foi semeada sob resíduos das plantas de cobertura de inverno. A ausência de resposta da produtividade da soja às diferentes coberturas de inverno pode ser atribuída ao fato de, contrariamente a 2005/06, não terem sido observadas, na safra 2006/2007, deficiências hídricas pronunciadas (Figura 28) durante os períodos mais críticos do ciclo de desenvolvimento dessa cultura, como a floração, a formação de legumes e enchimento de grãos. Sob condições de disponibilidade hídrica adequada (sem excesso ou deficiência), os efeitos negativos exercidos pela compactação sobre o crescimento e produtividade das culturas são minimizados (Unger & Kaspar, 1994; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). Isto ocorre porque, quando a disponibilidade de água é adequada, a resistência à penetração das raízes ou a aeração se mantêm em níveis satisfatórios ao crescimento (Tormena et al., 1999; Klein & Libardi, 2000; Beutler et al., 2005; Cavalieri et al., 2006), mesmo em solos compactados.

Considerando a safra 2006/2007, a atribuição da ausência de efeitos significativos das coberturas de inverno sobre a produtividade de grãos da soja à boa disponibilidade hídrica durante os subperíodo reprodutivos dessa cultura (Apêndice 12) é respaldada quando os dados de produtividade são analisados

conjuntamente com os relacionados à população de plantas. Como o número de plantas de soja por unidade de área foi menor para o pousio comparativamente ao nabo forrageiro e à aveia preta (Tabela 45), pode-se inferir que a produtividade de grãos dessa cultura somente mostrou-se estatisticamente semelhante entre as coberturas testadas porque, a partir do estágio R3 (Apêndice 12), correspondente ao final da floração e início da formação dos legumes, o volume de chuvas foi superior à média histórica da região (Bergamaschi et al., 2003), de modo que a disponibilidade hídrica não foi limitante ao desenvolvimento da soja em nenhum dos tratamentos avaliados. Isso possibilitou que a soja implantada sobre o pousio compensasse a menor população através da fixação de um maior número de legumes (Tabela 47). Portanto, é muito provável que, em caso de ocorrência de déficit hídrico nos subperíodos reprodutivos da soja, de forma a prejudicar a capacidade de compensação da mesma, a produtividade de grãos tivesse sido maior nas áreas ocupadas por plantas de cobertura durante o inverno. Isso sugere que a densidade do solo de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, medida para o pousio em novembro/2006, ainda pode limitar o crescimento da soja, quando as condições climáticas são desfavoráveis à cultura.

Tabela 46. Produtividade de grãos de soja (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|----------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| Nabo forrageiro | 3,57 | 3,59 | 3,58 a |
| Aveia preta | 3,46 | 3,66 | 3,56 a |
| Pousio | 3,38 | 3,55 | 3,47 a |
| Média | 3,47 A | 3,60 A | 3,54 |

CV coberturas de inverno = 11,1%; CV profundidade da haste = 16,5%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Ainda no que se refere aos resultados mostrados na Tabela 46, é possível constatar que, a exemplo da safra 2005/2006, a profundidade de atuação das hastes sulcadoras para deposição do adubo não alterou significativamente a produtividade de grãos da soja na safra 2006/2007. Entretanto, na média das coberturas de inverno, a soja produziu 130 kg ha^{-1} a

Tabela 47. Componentes da produção de soja (safra 2006/2007) determinados na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade adubo | | Média |
|---|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>Número de legumes por planta</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 38 bA | 44 aA | 41 |
| Aveia preta | 40 abA | 40 aA | 40 |
| Pousio | 46 aA | 39 aB | 43 |
| Média | 41 | 41 | 41 |
| ----- <i>Número de grãos por legume</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 2,13 | 1,99 | 2,06 a |
| Aveia preta | 2,07 | 2,13 | 2,10 a |
| Pousio | 2,07 | 2,08 | 2,08 a |
| Média | 2,09 A | 2,07 A | 2,08 |
| ----- <i>Massa de mil grãos</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 219 | 229 | 224 a |
| Aveia preta | 225 | 230 | 228 a |
| Pousio | 224 | 220 | 222 a |
| Média | 222 A | 226 A | 224 |
| ----- <i>Massa de mil grãos (g)</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 19 | 19 | 19 a |
| Aveia preta | 19 | 14 | 16 a |
| Pousio | 21 | 18 | 20 a |
| Média | 19 A | 17 A | 18 |

CV número de legumes por planta: coberturas = 8,6%; profundidade da haste = 11,6%. CV número de grãos por legume: coberturas = 3,3%; profundidade da haste = 1,6%. CV massa de mil grãos: coberturas = 4,2%; profundidade da haste = 3,1%. CV massa de grãos por planta: coberturas = 23,9%; profundidade da haste = 15,1%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

mais de grãos nos tratamentos onde a haste foi regulada para trabalhar na posição “profundo”. A ausência de diferenças significativas na produtividade de grãos da soja, em virtude da profundidade de atuação das hastes sulcadoras pode ser justificada, mais uma vez, pela adequada disponibilidade hídrica durante os subperíodos mais críticos da soja na safra 2006/07, bem como pelo

fato de o estado de compactação da superfície do solo, nos tratamentos envolvendo plantas de cobertura de inverno, apresentar uma magnitude inferior aos limites críticos de densidade sugeridos por Reichert et al. (2003). Herzog (2003) e Xavier (2005) também concluíram que a soja, em termos de produtividade de grãos, não respondeu de maneira significativa ao aumento da profundidade de trabalho da haste sulcadora de adubo, quando a referida cultura foi conduzida sob irrigação, onde a água disponível as plantas não se constituiu em fator limitante às mesmas. Seguindo o mesmo raciocínio empregado na discussão referente às coberturas de inverno, é possível que, principalmente no pousio, a produtividade da soja atingisse valores superiores na maior profundidade de atuação da haste, se estiagens tivessem ocorrido nos estádios reprodutivos desta cultura. Tal afirmação baseia-se no fato de a população de plantas ter sido inferior, considerando o pousio, nos tratamentos em que a haste foi regulada na posição “raso”, embora as diferenças não tenham se mostrado estatisticamente significativas (Tabela 45). Assim, sob condições de estresse hídrico, as plantas de soja provavelmente não teriam a sua disposição CO₂ atmosférico (devido à redução da condutância estomática), água e nutrientes em quantidades suficientes para que, no tratamento “raso”, a produção individual de fotoassimilados compensasse a menor população e, assim, resultasse numa produtividade similar à posição “profundo”.

Na Tabela 47, são apresentados os valores referentes aos componentes da produção de soja na safra 2006/2007, em relação às coberturas de inverno e profundidade de atuação das hastes. Os componentes número de grãos por legume e massa de mil grãos não foram significativamente afetados pelos tratamentos, refletindo a adequada disponibilidade hídrica (Figura 28) observada durante os estádios R5 e R6 (Apêndice 12), os quais correspondem ao enchimento de grãos. Porém, as variações detectadas para a população de plantas (Tabela 45) implicaram a ocorrência de efeitos significativos dos tratamentos avaliados sobre o número de legumes por planta. A ANOVA demonstrou que, para essa variável, a interação entre os fatores coberturas de inverno e profundidade da haste foi significativa. Na posição “raso”, o número de legumes por planta foi superior para o pousio em relação ao nabo forrageiro e à aveia preta, os quais não

diferiram significativamente entre si. Porém, para a condição “profundo”, os valores obtidos por essa variável assemelharam-se entre as coberturas de inverno testadas. Sob outro ponto de vista, o número de legumes por planta não foi significativamente modificado em razão das profundidades da haste para o nabo forrageiro e a aveia preta. Porém, na área mantida sob pousio durante o inverno, o número de legumes por planta diminuiu com o incremento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo, diferença que se mostrou estatisticamente significativa. Esses resultados evidenciam que a soja implantada sobre o tratamento pousio e sob a menor profundidade de atuação da haste sulcadora, em virtude da menor competição inter-específica relacionada à população de plantas mais baixa nessas condições (Tabela 45), teve à sua disposição mais água, nutrientes e radiação solar para fixar um maior número de legumes. Peixoto et al. (2000) também encontraram que o número de legumes comportou-se de forma inversamente proporcional ao aumento na população de plantas. No entanto, conforme discutido anteriormente, é provável que essa compensação somente tenha sido possível devido às condições climáticas adequadas, principalmente no que se refere ao volume de chuvas nos subperíodos reprodutivos da soja. Além disso, o maior número de legumes obtido para o pousio e para a menor profundidade de atuação das hastes sulcadoras não se refletiu em diferenças significativas para a massa de grãos por planta, embora possa ser observada uma tendência dessa variável ser maior nos referidos tratamentos.

Ao contrário da tendência observada para a soja, os resultados expostos na Tabela 48 demonstram que o número de plantas de milho por unidade de área na safra 2006/2007 não foi afetado de maneira significativa pelas plantas de cobertura de inverno e pela profundidade de atuação da haste. Tal fato foi observado tanto na avaliação realizada aos 28 DAS, quanto na realizada imediatamente antes da colheita. O estabelecimento das plântulas de milho pode ser considerado bom, haja vista que a população aos 28 DAS correspondeu, na média dos tratamentos, a 90% da preconizada quando da regulação da semeadora-adubadora. Embora em níveis inferiores ao observado para a soja (Tabela 48), a população de plantas de milho também diminuiu dos 28 DAS até colheita, sendo essa redução equivalente a cerca de 10%. Diante desses resultados, é possível afirmar que as plantas de milho

foram menos afetadas pelo baixo volume de chuvas e alta demanda evaporativa da atmosfera ocorrida entre 26/12/2006 e 16/01/2007 (Figura 28) comparativamente à soja, de maneira que, em relação ao pousio, as melhores condições físicas do solo assim como a maior quantidade de resíduos na superfície do mesmo, observados para as plantas de cobertura de inverno, não acarretaram na sobrevivência de um maior número de plantas nesses tratamentos. Talvez, o menor número de plantas por unidade de área tenha resultado numa menor competição por recursos ambientais e, assim, proporcionado maiores possibilidades para que as plantas de milho sobrevivessem ao estresse hídrico quando comparadas às de soja.

Tabela 48. Número de plantas de milho por m² medido na área sob semeadura direta aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|--------------------------------------|--------------------|--------------|--------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- 28 dias após a semeadura ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 6,2 | 5,5 | 5,8 a |
| Aveia preta | 5,9 | 6,1 | 6,0 a |
| Pousio | 6,2 | 5,1 | 5,6 a |
| Média | 6,1 A | 5,6 A | 5,8 |
| ----- Colheita ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 5,8 | 4,8 | 5,3 a |
| Aveia preta | 5,5 | 5,3 | 5,4 a |
| Pousio | 5,7 | 4,6 | 5,2 a |
| Média | 5,7 A | 4,9 A | 5,3 |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura: coberturas = 7,5%; profundidade da haste = 9,8%. CV plantas por m² na colheita: coberturas = 8,8%; profundidade da haste = 15,6%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

A ANOVA indicou que a interação coberturas de inverno x profundidade da haste não foi significativa para a produtividade de grãos de milho, cujos resultados são mostrados na Tabela 49. Conforme essa Tabela, verifica-se que, ao contrário do ocorrido em 2005/2006, as coberturas de inverno não modificaram significativamente a produtividade de grãos do milho na safra 2006/2007. Esta variável também não respondeu de maneira

pronunciada e significativa à profundidade de atuação da haste sulcadora. Inclusive, percebe-se uma tendência de a produtividade de grãos dessa cultura atingir valores mais elevados quando a mesma foi semeada sobre as parcelas mantidas em pousio hibernar e na menor profundidade de atuação da haste sulcadora, o que se contrapõem a todas as demais situações discutidas até aqui.

Tabela 49. Produtividade de grãos de milho (safra 2006/2007) na área sob semeadura direta, afetada pelas coberturas de inverno e profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade haste | | Média |
|----------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | Raso | Profundo | |
| Nabo forrageiro | 4,42 | 3,36 | 3,89 a |
| Aveia preta | 4,20 | 3,96 | 4,08 a |
| Pousio | 4,43 | 4,51 | 4,47 a |
| Média | 4,35 A | 3,94 A | 4,15 |

CV coberturas = 25,5%; CV profundidade da haste = 14,7%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

Observa-se ainda que a produtividade de grãos de milho, na média dos tratamentos, foi quase 29% inferior em 2006/2007 comparativamente à safra anterior (1.680 kg ou exatamente 28 sacas por hectare a menos). Além do híbrido diferente, a variação das condições meteorológicas observada entre as duas safras avaliadas pode explicar este comportamento. Conforme explicado anteriormente, a safra 2005/2006 foi caracterizada pela ocorrência de diversos períodos de duração relativamente longa com baixa precipitação pluvial, sendo o mais importante deles observado durante o subperíodo referente ao enchimento de grãos do milho (Figura 27 e Apêndice 13). No entanto, uma chuva de 20 mm quando o milho encontrava-se nos estádios VT e R1 amenizou o problema e possibilitou que as melhores condições físicas e de cobertura do solo proporcionada pela aveia preta+ervilhaca e aveia preta resultassem em ganhos significativos na produtividade do milho (Tabela 43). Em contrapartida, na safra 2006/2007, a disponibilidade de água durante a fase de enchimento de grãos do milho, assim como em quase todo o ciclo de desenvolvimento desta cultura, não foi limitante (Figura 28). Entretanto, de 06/02 a 21/02, época que coincidiu com subperíodo R1-R2 (Apêndice 13), não houve registro de chuvas significativas, o que ocorreu juntamente a uma

elevada demanda evaporativa da atmosfera, expressa por uma evapotranspiração potencial média de 5 mm dia⁻¹, alcançando em alguns dias valores superiores a 7 mm dia⁻¹. De acordo com Resende et al. (2003), o coeficiente de cultura (kc) durante a fase reprodutiva do milho equivale a aproximadamente 1,1 o que, levando-se em consideração as condições meteorológicas observadas na safra 2006/2007, resulta em um requerimento de água por parte dessa cultura de 5,5 mm dia⁻¹. Diante desses fatos, a ocorrência de um déficit hídrico no período mais crítico do milho, na safra 2006/2007, implicou baixa produtividade de grãos dessa cultura, sem a observação de efeitos positivos das plantas de cobertura de inverno e/ou do aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

Os resultados anteriormente discutidos sugerem que, quando a deficiência hídrica é muito intensa e/ou se estabelece em um período crítico da cultura, os efeitos benéficos sobre a produtividade das culturas, proporcionados pelas plantas de cobertura de inverno e/ou atuação mais profunda das hastes sulcadoras durante a semeadura, são minimizados. Essas inferências são respaldadas pelos dados obtidos por Beutler (2005) que, trabalhando na mesma área experimental, encontrou uma maior produtividade de grãos de milho nas áreas semeadas sobre resíduos de plantas de cobertura durante a safra 2003/2004, quando a disponibilidade hídrica foi favorável nas fases mais crítica da cultura (pendoamento e polinização), porém, houve estiagem durante o enchimento de grãos.

Os dados referentes à influência exercida pelas coberturas de inverno e profundidades de atuação das hastes sulcadoras de adubo sobre os componentes da produção de milho são apresentados na Tabela 50. Seguindo a mesma tendência observada para a produtividade de grãos, os componentes número de espigas por ha e massa de 1000 grãos não foram significativamente afetados pelos tratamentos. Entretanto, a interação coberturas de inverno x profundidades da haste foi estatisticamente significativa considerando o componente número de grãos por espiga. O desdobramento dessa interação evidenciou que, dentro de cada profundidade de atuação da haste, não houve efeitos significativos das coberturas de inverno sobre esse parâmetro. Porém, para o nabo forrageiro, observou-se um número significativamente maior de grãos por espiga quando a haste foi regulada na posição “raso”. Esses

Tabela 50. Componentes da produção de milho (safra 2006/2007) determinados na área sob semeadura direta, em função das coberturas de inverno e da profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo.

| Cobertura de inverno | Profundidade adubo | | Média |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Raso | Profundo | |
| ----- <i>Número de espigas por ha</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 44.000 | 43.000 | 44.000 a |
| Aveia preta | 47.000 | 47.000 | 47.000 a |
| Pousio | 49.000 | 49.000 | 49.000 a |
| Média | 47.000 A | 46.000 A | 47.000 |
| ----- <i>Número de grãos por espiga</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 323 aA | 255 aB | 289 |
| Aveia preta | 292 aA | 280 aA | 286 |
| Pousio | 287 aA | 297 aA | 292 |
| Média | 301 | 277 | 289 |
| ----- <i>Massa de mil grãos (g)</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 308 | 303 | 306 a |
| Aveia preta | 307 | 302 | 304 a |
| Pousio | 306 | 309 | 308 a |
| Média | 307 A | 305 A | 306 |
| ----- <i>Massa de grãos por planta (g)</i> ----- | | | |
| Nabo forrageiro | 80 | 71 | 76 a |
| Aveia preta | 79 | 78 | 79 a |
| Pousio | 77 | 97 | 87 a |
| Média | 79 A | 82 A | 81 |

CV número de espigas por ha: coberturas = 7,6%; profundidade da haste = 9,3%. CV número de grãos por espiga: coberturas = 7,8%; profundidade da haste = 4,2%. CV massa de mil grãos: coberturas = 1,4%; profundidade da haste = 1,5%. CV massa de grãos por planta: coberturas = 13,9%; profundidade da haste = 14,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$).

resultados estão em acordo com o fato de a produtividade do milho semeado nas parcelas ocupadas por nabo forrageiro durante o inverno ter sido 1,06 Mg ha⁻¹ menor na posição “raso” comparativamente à posição “profundo”, embora essas diferenças não tenham se mostrado significativas sob o ponto de vista

estatístico (Tabela 49). Diante dos resultados de que se dispõe nesse trabalho, é difícil delinear uma justificativa plausível para esse comportamento.

7.3.2.2 Escarificação

De acordo com a Tabela 51, observa-se que a população de plantas de soja na área escarificada na safra 2006/2007, independentemente da época de avaliação, não se modificou de forma significativa em razão das plantas de cobertura de inverno testadas. Os resultados mostram ainda que, a exemplo do observado para a área sob semeadura direta, houve uma redução de aproximadamente 30% na população de plantas dos 28 DAS até a colheita. Novamente, a mortalidade de plantas durante esse período pode ser justificada pela ocorrência de uma estiagem associada a uma elevada demanda evaporativa da atmosfera entre os dias 26/12/2006 e 16/01/2007.

Tabela 51. Número de plantas de soja por m² medido na área escarificada aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Número de plantas por m ² | |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------|
| | 28 dias após a semeadura | Colheita |
| Nabo forrageiro | 30 a | 19 a |
| Aveia preta | 34 a | 25 a |
| Média | 32 | 22 |
| Média SD^{1,2} | 37* | 27* |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura = 4,9%. CV plantas por m² na colheita = 10,3%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan (p>0,05). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t (p<0,05). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

Os dados da Tabela 51 permitem ainda a comparação entre as áreas escarificadas e sob semeadura direta no que se refere à população de plantas. Cabe destacar que, para essa comparação, assim como as realizadas para as outras variáveis, considerou-se, na obtenção das médias da área sob semeadura direta, apenas os valores obtidos nas subparcelas ocupadas por plantas de cobertura de inverno e onde a semeadura das culturas de verão foi executada com a haste sulcadora de adubo regulada na posição "raso". Tanto aos 28 DAS quanto na colheita, a população de plantas foi significativamente

inferior para a área escarificada em relação à sob semeadura direta. Isso pode ser atribuído ao grau de compactação excessivamente baixo na superfície do solo submetido à escarificação, de forma que a macroporosidade respondeu por 54% do volume total de poros (Tabela 7, item 4.3.3.2). Sob essas condições, a água tende a drenar rapidamente, de forma que a capacidade de retenção de umidade pelo solo é baixa (Klein & Libardi, 2000; Cavalieri et al., 2006). Dessa forma, a rápida secagem da superfície do solo pode ter prejudicado a germinação das sementes e emergência das plântulas de soja. Além disso, quando o grau de compactação é muito baixo, a condutividade hidráulica não saturada é diminuída (Taylor & Brar, 1991; Veen et al., 1992), prejudicando assim a transmissão de água do solo às sementes. Outro fator que pode explicar a menor população de plantas no bloco escarificado é o pior contato solo-semente (Raghavan et al., 1979).

A Tabela 52 evidencia, em primeiro lugar, que a produtividade de grãos da soja, na área escarificada, não foi afetada de forma significativa pelas plantas de cobertura de inverno. Provavelmente, o tempo decorrido entre a escarificação e a safra de verão 2006/2007 não tenha sido suficiente para que as plantas de cobertura de inverno implicassem alterações nas propriedades físicas ou químicas do solo, de modo a afetar a produtividade da soja. Verificase ainda que a produtividade da soja foi quase 10% (330 kg ou 5,5 sacas por hectare) inferior na área escarificada comparativamente à conduzida sob o sistema de semeadura direta. Esse comportamento não pode ser justificado em função de diferenças nos atributos químicos entre essas duas áreas, uma vez que elas se assemelharam em relação à fertilidade química (Apêndices 6 e 7).

Tabela 52. Produtividade de grãos de soja (safra 2006/2007) na área escarificada, em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Produtividade |
|-------------------------------|---------------------------------|
| | ----- Mg ha ⁻¹ ----- |
| Nabo forrageiro | 3,00 a |
| Aveia preta | 3,28 a |
| Média | 3,14 |
| Média SD^{1,2} | 3,47* |

CV = 16,7%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

Além disso, na safra anterior, a produtividade tanto da soja quanto do milho foi similar quando se comparou o pousio no bloco 5 (que foi o escarificado em 2006) com a mesma cobertura de inverno nos demais blocos (Tabelas 40 e 43).

Assim, de maneira semelhante ao discutido em relação à população de plantas, a menor produtividade de grãos na área escarificada pode ser explicada em função das diferenças nas condições físicas detectadas entre os sistemas de preparo avaliados (Tabela 13 e Figura 11a, item 4.3.3.3). O grau de compactação induzido pela escarificação foi muito baixo, resultando numa menor capacidade de retenção de água e condutividade hidráulica não saturada. Além disso, em solos muito soltos e porosos, o contato solo-raiz é prejudicado (Veen et al., 1992). Diante disso, a absorção de água e de nutrientes pelas plantas é diminuída. Reduções na produtividade de grãos da soja em áreas escarificadas comparativamente à semeadura direta, foram constatadas também por Flowers & Lal (1998).

Uma das principais formas para a soja compensar a menor população de plantas observada para a escarificação (Tabela 51) seria a fixação de um número maior de legumes por planta. No entanto, a falta de chuvas significativas no período compreendido entre 7 e 21/02 (Figura 28), quando a soja encontrava-se nos estádios referentes à floração e início da formação dos legumes (R2 e R3, Apêndice 12), em conjunto com a provável menor disponibilidade de água e contato solo/raiz na área escarificada, possivelmente impediu que essa compensação ocorresse. Acredita-se, assim, que esse tenha sido o fato determinante para a menor produtividade de grãos na área escarificada. Nesse sentido, os resultados apresentados na Tabela 53 evidenciam que o número de legumes por planta, assim como os demais componentes da produção de soja, não diferiram de forma significativa quando se compara a escarificação com as plantas de cobertura de inverno em semeadura direta. É importante lembrar que, no caso do pousio conduzido em semeadura direta, a população de plantas por ocasião da colheita, na média das profundidades de atuação das hastes, foi similar à observada para a área escarificada (Tabela 45). Contudo, as plantas de soja, nesse tratamento, conseguiram fixar um número maior de legumes (Tabela 47), de forma a

compensar o menor número de plantas e, dessa maneira, resultar em produtividades semelhantes às plantas de cobertura de inverno (Tabela 46). Esse fato respalda a constatação de que o reduzido grau de compactação na área escarificada prejudicou a capacidade que a soja, conforme explicam Buriol et al. (1995), apresenta em compensar baixas populações de plantas.

Os dados da Tabela 53 indicam ainda que nenhum dos componentes da produção de soja foi influenciado significativamente pelas plantas de cobertura de inverno semeadas na área escarificada. Esses resultados são coerentes com a produtividade de grãos dessa cultura, que também não apresentou variação significativa em razão das coberturas de inverno.

Tabela 53. Componentes da produção de soja (safra 2006/2007) determinados na área escarificada, em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Número de legumes por planta | Número de grãos por legume | Massa de | |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | 1000 grãos | grãos por planta |
| | | | ----- g ----- | |
| Nabo forrageiro | 37 a | 2,18 a | 216 a | 16 a |
| Aveia preta | 36 a | 2,05 a | 232 a | 17 a |
| Média | 36 | 2,11 | 224 | 16 |
| Média SD^{1,2} | 40^{n.s.} | 2,08^{n.s.} | 224^{n.s.} | 17^{n.s.} |

CV número de legumes por planta = 11,3%. CV número de grãos por legume: 2,3%. CV massa de mil grãos = 5,4%. CV massa de grãos por planta = 5,9%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

Os efeitos das plantas de cobertura de inverno sobre a população de plantas de milho na área escarificada, assim como a comparação entre esse tratamento e a semeadura direta, são mostrados na Tabela 54. Da mesma forma que para a soja, o número de plantas de milho por unidade de área não foi influenciado de forma significativa pelas plantas de cobertura de inverno, tanto aos 28 DAS quanto na colheita. Observa-se também que a população de plantas de milho diminuiu em 22% no período decorrido entre os 28 DAS e a colheita. Para o milho, ao contrário da soja, não houve diferenças significativas entre a escarificação e a semeadura direta no que se refere à população de

plantas. Novamente, esses resultados sugerem que, na safra 2006/2007, o estabelecimento das plântulas de milho foi menos sensível ao baixo volume de chuvas e alta demanda evaporativa da atmosfera observada entre 26/12/2006 e 16/01/2007 (Figura 28) comparativamente à soja, mesmo na área escarificada.

Tabela 54. Número de plantas de milho por m² medido na área escarificada aos 28 dias após a semeadura e na colheita (safra 2006/2007), em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Número de plantas por m ² | |
|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| | 28 dias após a semeadura | Colheita |
| Nabo forrageiro | 5,6 a | 4,4 a |
| Aveia preta | 6,0 a | 4,7 a |
| Média | 5,8 | 4,5 |
| Média SD^{1,2} | 5,9^{n.s.} | 5,3^{n.s.} |

CV plantas por m² aos 28 dias após a semeadura = %. CV plantas por m² na colheita = 9,3%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

A produtividade de grãos de milho na área escarificada em função das plantas de cobertura e em comparação aos tratamentos manejados sob semeadura direta, é mostrada pela Tabela 55. A exemplo do que foi verificado no caso da soja, a produtividade do milho na área escarificada não foi significativamente influenciada pelas plantas de cobertura utilizadas. Observa-se ainda que a escarificação reduziu em aproximadamente 1 Mg ha⁻¹ (17 sacas) a produtividade de grãos dessa cultura, o que equivale a quase 25%. Como os atributos químicos foram similares entre a área escarificada e a manejada sob semeadura direta, esse resultado pode ser novamente atribuído ao grau de compactação do solo excessivamente baixo na primeira condição, o que provavelmente tenha acarretado em uma menor disponibilidade de água e prejudicado o contato solo-raiz, conforme discutido detalhadamente para soja. Esses efeitos foram especialmente importantes, mais uma vez, entre os dias 07/02 e 21/02, quando o milho encontrava-se no subperíodo referente à polinização e a alta demanda evaporativa da atmosfera foi acompanhada pela ausência de chuvas significativas. Diante disso, a menor disponibilidade de água e, em conseqüência, de nutrientes, na área escarificada, durante um dos

períodos mais críticos da cultura do milho (Bergamaschi et al., 2006), resultou numa diminuição acentuada da produtividade dessa cultura.

Tabela 55. Produtividade de grãos de milho (safra 2006/2007) na área escarificada, afetada pelas coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Produtividade |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| | ----- <i>Mg ha⁻¹</i> ----- |
| Nabo forrageiro | 3,03 a |
| Aveia preta | 3,50 a |
| Média | 3,26 |
| Média SD^{1,2} | 4,31* |

CV = 3,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas, e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

Conforme a Tabela 56, nota-se que os componentes número de espigas por m² e massa de mil grãos não foram afetados de maneira significativa pelas coberturas de inverno seguindo, dessa forma, a mesma tendência da produtividade de grãos de milho. Já o número de grãos por espiga foi significativamente menor para o nabo forrageiro do que para a aveia preta. No entanto, este fato não resultou em aumentos significativos na produtividade de milho quando esta cultura foi implantada sobre resíduos de aveia preta (Tabela 55). Embora sem significância estatística, houve uma tendência de os componentes número de espigas por ha e massa de mil grãos atingirem maiores valores para o nabo forrageiro. A soma desses dois efeitos pode ter sido de magnitude suficiente para compensar o maior número de grãos por espiga observado para a aveia preta, resultando, assim, em produtividades semelhantes entre esses tratamentos. Comparando-se a área escarificada com a sob semeadura direta, verifica-se que o número de espigas por ha foi significativamente menor na primeira condição. Para os demais componentes, as diferenças não se mostraram estatisticamente significativas, mas, em todos os casos, os valores tenderam a ser maiores na área sob semeadura direta. Dentre esses componentes, o número de grãos por espiga foi o que apresentou as maiores diferenças absolutas, embora as mesmas não tenham sido significativas. Tal fato pode estar refletindo problemas na polinização relacionados a menor disponibilidade hídrica no estágio R1 do ciclo

de desenvolvimento do milho, conforme já mencionado anteriormente.

A análise conjunta de todos os dados anteriormente discutidos, permite inferir que, dentro das condições sob as quais esse estudo foi realizado, a escarificação, na ausência de tráfego e de preparo secundário, se mostrou uma prática de controle da compactação inviável sob o ponto de vista do desempenho produtivo das culturas do milho e da soja. Para o milho, onde o período de déficit hídrico proporcionou efeitos mais intensos, devido a sua ocorrência no período mais crítico da cultura, a diminuição da produtividade foi ainda mais acentuada. Isso sugere que, em safras com estiagens de duração maior e/ou que se processem em fases críticas do desenvolvimento das culturas, os efeitos negativos da escarificação podem ser ainda maiores.

Tabela 56. Componentes da produção de milho (safra 2006/2007) determinados na área escarificada, em função das coberturas de inverno.

| Cobertura de inverno | Número de espigas por ha | Número de grãos por espiga | Massa de 1000 grãos | Massa de grãos por planta |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | ----- g ----- | |
| Nabo forrageiro | 40.000 a | 243 b | 307 a | 69 a |
| Aveia preta | 40.000 a | 297 a | 301 a | 75 a |
| Média | 40.000 | 270 | 304 | 72 |
| Média SD^{1,2} | 46.000* | 308^{n.s.} | 308^{n.s.} | 80^{n.s.} |

CV número de espigas por ha = 10,4%. CV número de grãos por espiga = 11,4%. CV massa de mil grãos = 2,6%. CV massa de grãos por planta = 11,4%. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas colunas, dentro de cada fator, não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p > 0,05$). ¹ * - Diferenças significativas entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta, pelo teste t ($p < 0,05$). n.s. - Diferenças entre as médias obtidas na área escarificada e na área sob semeadura direta não significativas, pelo teste t ($p > 0,05$). ² Média entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia preta conduzidos na área sob semeadura direta, na profundidade "raso".

No entanto, há de se considerar duas ressalvas, que limitam o uso generalizado desses resultados. Em primeiro lugar, o solo da área experimental possui um teor considerável de areia e, nesse caso, a densidade crítica ao desenvolvimento das plantas é maior (Reichert et al., 2003). Em um solo mais argiloso, onde os estudos relacionados ao IHO evidenciam que os valores críticos de RP e porosidade de aeração são atingidos em menores densidades (Tormena et al., 1999; Klein & Libardi, 2000; Silva, 2003a; Cavalieri et al., 2006), o comportamento provavelmente não seria o mesmo. Além disso, a

comparação entre a escarificação e a semeadura direta com plantas de cobertura de inverno como alternativas à recuperação física do solo, levando-se em consideração variáveis relacionadas às culturas econômicas, foi realizada quando o grau de compactação já havia sido reduzido. Os resultados poderiam não ser os mesmos se a comparação tivesse sido executada quando o grau de compactação era alto em toda a área experimental. De qualquer modo, a produtividade na área escarificada também foi inferior ao pousio conduzido unicamente em semeadura direta, onde a densidade na superfície do solo ainda estava próxima aos limites críticos às plantas. Diante disso, a escarificação de fato parece não ser uma boa alternativa ao menos em solos de textura média e com um nível de compactação ligeiramente maior do que o considerado limitante ao desenvolvimento vegetal.

7.4 Conclusões

Em semeadura direta, as plantas de cobertura de inverno proporcionaram maiores produtividades de grãos de milho e soja em relação ao pousio, quando da ocorrência de deficiências hídricas moderadas, o que pode ser atribuído principalmente a maior disponibilidade de água induzida pelas melhores condições físicas de solo e pela maior quantidade de resíduos vegetais na superfície dos tratamentos aveia preta e aveia preta+ervilhaca/nabo forrageiro.

O aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo na área manejada sob semeadura direta, mesmo em anos com deficiências hídricas, não promoveu aumentos significativos na produtividade do milho e da soja.

A escarificação, realizada em um solo de textura franca e num grau de compactação próximo ao limitante às plantas, não se mostrou uma alternativa viável sob o ponto de vista do desempenho produtivo do milho e da soja. Isso foi observado tanto sob déficit (milho), quanto sob adequada (soja) disponibilidade hídrica.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância do processo de compactação do solo é justificada tanto pela elevada frequência, quanto pela intensidade e amplitude dos prejuízos por ela ocasionados, que se estendem à produtividade das culturas, aos custos de produção, ao desempenho e à qualidade do trabalho executado pelos conjuntos mecanizados, bem como ao meio ambiente. Diante disso, torna-se necessária a adoção de práticas de controle desse problema, as quais podem modificar não somente as propriedades físicas do solo, mas também a resistência do mesmo à recompactação, o desempenho das máquinas agrícolas e a produtividade das culturas. Portanto, a opção por uma ou outra medida de redução do grau de compactação deve levar em consideração as suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta como um todo.

Considerando o sistema de semeadura direta, uma das alternativas à redução do grau de compactação do solo corresponde ao emprego de sistemas de rotação de culturas que contemplem a semeadura de plantas de cobertura no inverno. No entanto, percebe-se uma grande desconfiança, por parte dos produtores e técnicos, em relação à eficácia dessa medida como alternativa isolada de controle desse problema, principalmente, quando o grau de compactação é muito elevado. A principal preocupação relaciona-se ao tempo necessário para que a recuperação ocorra, durante o qual a produtividade das culturas pode ser comprometida. De fato, são poucos os estudos que investigaram os efeitos dessa medida sobre indicadores diretos do estado de compactação, como a densidade do solo, a porosidade e a resistência à penetração, principalmente quando se consideram espécies de inverno que, por não competirem por área com as culturas de verão e pela fácil produção de sementes, têm ampla aceitação pelos produtores.

No presente trabalho, verificou-se que o consórcio aveia preta+ervilhaca e a aveia preta, após quatro anos de condução do experimento, foram capazes de reduzir o grau de compactação a níveis que, na superfície do solo (0,0-0,1 m), são inferiores aos considerados críticos para o crescimento das plantas. Com base em outros trabalhos de pesquisa, a justificativa para esse comportamento pode ser atribuída, principalmente, à agregação promovida pelo aumento do teor de matéria orgânica do solo e pela ação do sistema radicular das plantas de cobertura de inverno, bem como à abertura de bioporos pelas raízes das mesmas. A diminuição do grau de compactação em relação ao inicial foi observada também no pousio e para camadas mais profundas, porém, os valores ainda se encontram próximos aos que prejudicam o desenvolvimento das culturas. Em profundidades maiores que 0,1 m, o emprego da aveia preta e do consórcio aveia preta + ervilhaca não reduziu o grau de compactação, comparativamente ao pousio. As melhorias nas propriedades físicas da superfície do solo ocasionadas pelas plantas de cobertura, em conjunto com a maior quantidade de resíduos deixados pelas mesmas sobre o solo, resultaram em maiores produtividades de grãos de milho e soja, em anos onde ocorreram deficiências hídricas moderadas. O nabo forrageiro, incluído no experimento em substituição à aveia preta + ervilhaca, demonstrou um grande potencial na descompactação do solo. Essa espécie não só diminuiu o nível de compactação como estendeu os efeitos a profundidades maiores (até 0,18 m). No entanto, as melhorias físicas proporcionadas pelo nabo forrageiro não se refletiram em aumentos na produtividade de grãos das culturas do milho e da soja na safra 2006/2007. Além disso, as plantas de cobertura de inverno diminuíram a força de tração demandada pelas hastes sulcadoras de adubo, quando comparadas ao pousio, o que foi mais evidente quando a semeadura foi realizada sobre resíduos de nabo forrageiro. Na aveia preta, a redução na força de tração demandada pelas hastes nem sempre foi observada e, além disso, não foi suficiente para compensar o pior contato solo/pneu, proporcionado pela maior quantidade de resíduos na superfície do solo nesse tratamento, o que resultou em maiores valores de patinagem mesmo em relação ao pousio.

A ausência de tráfego de rodados de trator, associada à atuação mais profunda das hastes sulcadoras de adubo, aceleraram a recuperação

física do Argissolo estudado, mesmo nas áreas sob pousio. O aumento da profundidade de trabalho da haste, no entanto, não resultou em aumentos na produtividade das culturas. Como a patinação dos rodados tratórios e a força de tração requerida pelas hastes foram maiores, quando as mesmas trabalharam a maiores profundidades, essa prática não se mostrou interessante sob o ponto de vista técnico. No entanto, houve uma tendência de um melhor desempenho produtivo do milho e da soja na maior profundidade de atuação da haste, de forma que mais pesquisas devem ser realizadas para confirmar os resultados desse trabalho. Interessante foi o fato de que, mesmo nas áreas submetidas a vários tráfegos de rodados de trator, o grau de compactação continuou sendo menor nos tratamentos envolvendo plantas de cobertura de inverno. O aumento da elasticidade do solo, em virtude dos maiores teores de matéria orgânica proporcionados pelas plantas de cobertura, especialmente das frações não humificadas (matéria orgânica particulada), bem como a dissipação da energia compactante aplicada ao solo pelos rodados em função da maior quantidade de resíduos presentes na superfície do solo, são processos que podem estar envolvidos na obtenção desses resultados.

A escarificação do solo, após quatro anos em semeadura direta, acarretou num menor grau de compactação, em relação às plantas de cobertura, o que ocorreu de forma imediata e até uma profundidade de 0,27 m. Entretanto, observou-se que a produção de massa seca das coberturas de inverno, assim como a produtividade de grãos, foram prejudicadas por essa operação. Isso evidencia que a escarificação, na ausência de tráfego e preparo secundário (gradagem), reduziu o grau de compactação a níveis que, para um solo de textura franco-argilo-arenosa, estão abaixo do considerado ótimo com vistas ao crescimento das plantas. Mesmo com a força de tração demandada pelas hastes sulcadoras sendo menor na área escarificada e com a patinação alcançando valores que se assemelharam entre os sistemas de preparo testados, pode-se inferir que a escarificação esporádica dentro do sistema de semeadura direta, embora eficiente em reduzir o grau de compactação do solo, não se mostrou uma alternativa viável levando-se em consideração o sistema de produção como um todo. Cabe ressaltar ainda que a escarificação é uma prática econômica e energeticamente dispendiosa e que, para ser eficiente no

rompimento de camadas compactadas, precisa ser executada em condições de solo friável a seco. Tal situação, além de aumentar a demanda de potência na barra de tração, torna a execução dessa operação tecnicamente difícil, considerando o gradiente de umidade que normalmente existe no perfil do solo.

Todas as medidas que reduziram o grau de compactação do solo implicaram diminuição da capacidade de suporte de carga e o aumento da suscetibilidade do mesmo à recompactação, principalmente em umidades mais elevadas. Tal fato comprova a importância de se restringir o tráfego a determinadas regiões da lavoura (tráfego controlado), pois o pequeno tempo disponível à realização das operações mecanizadas muitas vezes impossibilita que o produtor evite a entrada das máquinas, quando o teor de água do solo é elevado. No caso das plantas de cobertura de inverno, a comparação entre as épocas de avaliação demonstrou que, possivelmente, processos como o “*age hardening*” estejam atuando de forma a aumentar a capacidade de suporte de carga, mesmo sem incrementos na densidade do solo. O curto espaço de tempo decorrido entre a escarificação e as avaliações não permitiu a detecção desse processo na área escarificada. No entanto, a escarificação propiciou que as tensões aplicadas pelos rodados atingissem maiores profundidades, o que pode significar a transferência do problema da compactação a camadas mais profundas.

Diante das constatações anteriormente mencionadas, verifica-se que todas as medidas de controle da compactação apresentaram aspectos positivos e negativos. O balanço entre esses aspectos e, portanto, o nível de adequação de cada medida, varia de situação para situação. Nas condições em que esse trabalho foi realizado, as evidências obtidas sugerem que a medida de controle da compactação de maior viabilidade técnica correspondeu ao emprego de plantas de cobertura de inverno. Cabe ressaltar que, nesse trabalho, não foram analisados aspectos relacionados à eficiência econômica e energéticas das diferentes estratégias para o controle da compactação do solo avaliadas. Nesse sentido, as informações obtidas a partir do balanço energético e econômico possibilitariam a obtenção de conclusões mais consistentes a respeito dos impactos das referidas medidas sobre o sistema de produção agrícola como um todo.

9. 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**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-160, 2003.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.115-123, 2004.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural tractor test code. In: **ASAE standards 1989**: standards engineering practices data. Saint Joseph, 1989. p. 44-48.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer – ASAE EP542**. Saint Joseph, 1999.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil Cone Penetrometer – ASAE S313.3**. Saint Joseph, 2004.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 425-435, 2005.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p.159-170, 1998.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of

Swedish arable soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 85-95, 2004.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob Sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de adensamento unidimensional: NBR 12007**. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

BAILEY, A. C.; RAPER, R. L.; JOHNSON, C. E.; BURT, E. C. An integrated approach to soil compaction prediction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 61, n. 2, p. 73-80, 1995.

BALL, B. C.; CAMPBELL, D. J.; HUNTER, E. A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 1-2, p. 83-91, 2000.

BARBOSA, J. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2-3, p. 321-325, 2004.

BARNI, N.; FREITAS, J. M. O.; ZANOTELLI, V.; SECHIN, J.; BUENO, A. C.; RIBEIRO, S. S.; MATZENAUER, R.; TOMAZZI, D. J.; ARGENTA, G.; TIMM, P. J.; DIDONÉ, I. A.; HILEBRAND, G. **Plantas recicladoras de nutrientes e de proteção do solo, para uso em sistemas equilibrados de produção agrícola**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2003. 84 p. (Boletim Fepagro, 12).

BARZEGAR, A. R.; NADIAN, H.; HEIDARI, F.; HERBERT, S. J.; HASHEMI, A. M. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, n. 2, p. 155-162, 2006.

BAUMGARTL, Th.; HORN, R. Effects of aggregate stability on soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 203-213, 1991.

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**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 599-607, 2000.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 341-358, 1990.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78 p.

BERGAMASCHI, H; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERLI, M.; KULLI, B.; ATTINGER, W.; KELLER, M.; LEUENBERGER, J.; FLÜHLER, H.; SPRINGMAN, S. M.; SCHULIN, R. Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 37-52, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; DA SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, J. F. **Parâmetros de solo e máquinas na semeadura direta de milho e soja em duas coberturas de solo sobre campo natural** 2005. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2005.

BHANDRAL, R.; SAGGAR, S.; BOLAN, N. S.; HEDLEY, M.J. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.94, n. 2, p.482-492, 2007.

BHATTACHARYYA, R; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 129-140, 2006.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BOLLER, W. **Avaliação de diferentes sistemas de manejo do solo visando à implantação da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1996. 272 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1996.

BOLLER, W.; GAMERO, C. A.; PEREIRA, J. O. Avaliação de diferentes sistemas de preparo e de condições de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 3, p. 52-63, 1997.

BONEL, B. A.; MONTICO, S.; SPONDA, G.; SPURIO, N. Descompactación del suelo mediante el uso de escarificadores en Argiudoles típicos del sur de Santa Fe. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico**: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 1-11.

BORDIGNON, J. **Projeto, construção e validação de transdutores para medição de esforços em semeadoras-adubadoras**. 122 f. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BORTOLOTTI, V. C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTI, M. C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e coberturas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 122-130, 2006.

BOTTA, G. F. Compactación en suelos labrados de baja capacidad portante. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico**: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 73-84.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; ROSSATO, H. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine Max* L.) yields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 53-58, 2004.

BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; RESSIA, M.; FERRERO, C.; ROSATTO, H.; TOURN, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.) yields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p.164-172, 2006a.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 9-14, 2006b.

BOTTA, G. F.; POZZOLO, O.; BOMBEN, M.; ROSATTO, H.; RIVERO, D.; RESSIA, M.; TOURN, M.; SOZA, E.; VAZQUEZ, J. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 145-154, 2007.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**: physical, chemical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 463-478.

BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120 p.

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: IPEAS, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30).

BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A. B.; SACCOL, A. V.; SCHNEIDER, F. M.; MANFRON, P. A.. Manejo da cultura da soja. In: SANTOS, O. S. (coord.). **A cultura da soja – 1: Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná**. 2a. ed. São Paulo: Editora Globo, 1995. p. 109-128.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, 2005a.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005b.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 383-391, 1999.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.56, n. 3-4, p.185-196, 2000.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n. 3-4, p. 167-178, 2001.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234 p.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. 121 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**.

1994. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAUJO, A.G.; RALISCH, S.; SILVA, A.L.; LADEIRA, A. S.; SILVA, J.C.; MACHADO, P.; ROSSETO, R. **Avaliação do desempenho da semeadora- adubadora Magnum 2850PD no basalto paranaense**. Londrina: IAPAR, 1998. p. 1-47. (Circular IAPAR, 105).

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Resultados das avaliações do desempenho de semeadoras-adubadoras de plantio direto na costa oeste paranaense**. Londrina: IAPAR, 2003. 132 p.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CEPIK, C.T.C. **Análise do desempenho de uma haste sulcadora de semeadora-adubadora, em diferentes teores de água no Solo, velocidades e profundidades de trabalho**. 60 f. 2002. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CEPIK, C.T.C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. 104 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CHAMEN, W. T. C.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOP, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 161-174, 2003.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 37, n. 2-3, p.113-125, 1996.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 13-21, 2006.

CHANCELLOR, W. J. Soil physical properties. In: CHANCELLOR, W. J. (coord.). **Advances in soil dynamics**. Saint Joseph: ASAE, 1994. p. 21-254.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 394 p.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 138 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CEPIK, C. T. C.; DEBIASI, H.; Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 220-228, 2007.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

DA ROS, C. O.; AITA, C. Efeitos de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 135-140, 1996.

DA SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; CEPIK, C. T. C. Recuperação de solos fisicamente degradados através de coberturas de inverno. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 253-263, 1986.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D Crop and Soil Sciences) - Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, 1996.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 164 f. 2003. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Paraná 2007**. Londrina: CNPSo, 2006. 217 p.

EMBRAPA. **BRS 154 – Cultivar de soja**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/soja/cultivares/BRS154.pdf>>. Acesso em: 15 de dez.2007.

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

ESS, D. R.; VAUGHAN, D. H.; PERUMPRAL, J. V. Crop residue and root effects on soil compaction. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 45, n. 5, p.1271-1275, 1998.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 13-21, 1997.

FEBRAPDP. **Brasil – Evolução da área cultivada em plantio direto de 1972/73 a 2005/06**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucao PD72a06.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2007.

FEY, E.; SANTOS, S.R.; WEIRICH NETO, P.H.; PEREIRA J.O. Rendimento de milho (*Zea mays L.*) utilizando 3 mecanismos sulcadores na semeadura, com 3 teores de água do solo, em plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais ...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

FEY, E.; SEIDEL, G.O.; VERONA, M.M.; ERIG, P.R.; FEY, A. Desempenho de uma semeadora sob culturas vegetais e épocas de dessecação em sistema de semeadura sob a palha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador : Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. de S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 487-493, 2000.

FLORENTÍN, M. A.; PEÑALVA, M.; CALEGARI, M.; DERPSCH, R. **Abonos verdes y rotación de cultivos en siembra directa**. Pequenãs propriedades. San Lorenzo, Paraguay: MAG – GTZ, 2001. 83 p.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1-2, p.21-35, 1998.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FRANÇA, G. E.; RESENDE, M. Manejo de corretivos e fertilizantes em agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (org.). **Cultura do milho irrigado**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2003. p.89-196.

FURLANI, C. E. A.. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2000. 218 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2000.

GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S. L.; MODOLO, A. J.; SILVEIRA, J. C. M. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n. 3, p.781-789, 2004.

GAGGERO, M. R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 124f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 1998.

GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto: o caminho do futuro**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 207 p.

GENRO JUNIOR, 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**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R. O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, an aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GUPTA, S.C.; SCHNEIDER, E.C; LARSON, W.E.; HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 207-212, 1987.

HADAS, A. Long term tillage practice effects on soil aggregation modes and strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 191-197, 1987.

HAKANSSON, I. A model for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 105-120, 1990.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, 1988.

HAMILTON-MANNS, M.; ROSS, C. W.; HORNE, D. J.; BAKER, C. J. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 109-119, 2002.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p.121-145, 2005.

HAYNES, R.J.; BEARE, M.H. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humid soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.213-262.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1982. v.2. 412 p.

HEINRICHS, R. **Ervilhaca e aveia preta cultivadas simultaneamente como adubo verde e sua influência no rendimento do milho**. 1996. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

HERZOG, R. L. S. **Resposta da soja em semeadura direta após aveia preta implantada em campo nativo, influenciada por quantidade de resíduo, irrigação e profundidade de atuação do sulcador da semeadora-adubadora**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.17, n. 3-4, p. 265–289, 1990.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

JARECKI, M. K.; LAL, R.; JAMES, R. Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmers' fields in ortheastern Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 265-276, 2005.

JENANE, C.; BASHFORD, L. L. Tractive performance of a mechanical front-wheel assist tractor as related to forward speeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 77, n. 2, p. 221-226, 2000.

JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 66, n. 4, p 261–265, 1997.

JORAJURÍA COLLAZO, D. Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular. Una revisión. In: JORAJURÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 39-55.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 191-205, 2004.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; DAWIDOWSKI, J. B.; KOOLEN, A. J. Soil precompression stress - II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 97–108, 2004.

KELLER, T.; TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 39-47, 2002.

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

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa

Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. de S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999a.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. de S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 773-782, 1999b.

KUAN, H. L.; HALLETT, P. D.; GRIFFITHS, B. S.; GREGORY, A. S.; WATTS, C. W.; WHITMORE, A. P. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 3, p. 811-821, 2007.

KULLI, B.; GYSI, M.; FLÜHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 29-40, 2003.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, 1980.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 275-286, 1991.

LEE, D. R.; KIM, K. U. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 187-208, 1997.

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para implantação da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 305 f. Tese

(Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1999.

LEVIEN R.; BEUTLER J.F.; CEPIK C.T.C.; TREIN C.R. Força de tração em haste sulcadora do tipo facão, operando a duas profundidades em solo com e sem vegetação de campo nativo, na presença e ausência de disco de corte de palha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2004. 1 CD-ROM.

LI, Y. X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 282-292, 2007.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 60 f. 2004. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-170, 2003.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 307-317, 1991.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 87-94, 2000.

LOGSDON, S. D.; KARLEN, D. L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 143-149, 2004.

MACEDO, V.R.M. **Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado**. 88f. 1993. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

MACHADO, A. L. T.; TREIN, C. R.; BICCA, A. V. D. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletrônico. In: CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA RURAL, 6., 1998, La Plata. **Anais...** La Plata: CLIR-CADIR, 1998. 1 CD-ROOM.

MACHADO, A. L. T. **Esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul**. 2001. 176 f. Tese

(Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MAGALHÃES, P. C. Aspectos fisiológicos da cultura do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (org.). **Cultura do milho irrigado**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2003. p. 33-54.

MAHL, D. **Desempenho operacional de semeadora em função de mecanismos de corte, velocidade e solos, no sistema plantio direto do milho**. 2006. 143 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MALAVOLTA, E. Absorção e transporte de íons e nutrição mineral. In: FERRI, M. G. (coord.). **Fisiologia Vegetal 1**. 2a. ed. São Paulo: EPU, 1985. p.77-114.
MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S. Guidelines for safety trafficking and cultivation, and resistance – density - moisture relations of three disturbed soils from Alberta. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 46, n. 3-4, p. 193-202, 1998.

MÁRQUEZ, L. **Solo tracto'90**. Madrid : Laboreo, 1990. 231 p.

MARTÍNEZ, L. J.; ZINCK, J. A. Temporal variation of soil compaction and Deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 3-18, 2004.

McLAUGHLIN, N. B.; MACLEOD, J. B.; SANDERSON, J. B.; IVANY, J. A. Effect of red clover (*Trifolium pratense* L.) kill with glyphosate on tillage implement draft. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 63-70, 2004.

McPHEE, J. E.; BRAUNACK, M. V.; GARSIDE, A. L.; REID, D. J.; HILTON, D.J. Controlled traffic for irrigated double cropping in a semi-arid tropical environment: Part 2, Tillage operations and energy use. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n. 3, p. 183-189, 1995.

MEDEIROS, J. C.; MIELNICZUK, J.; PEDÓ, F. Sistemas de culturas adaptadas à produtividade, recuperação e conservação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n. 2, p. 199-204, 1987.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C.M.; YANO, E.H. Condicionamento físico do solo na linha de semeadura de milho em plantio direto: mecanismos sulcadores e rodas compactadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 369-374, 1991.

MIGLIERINA A. M.; IGLESIAS, J. O.; LANDRISCINI, M. R.; GALATINI, J. A.;

ROSSEL, R. A. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 129-135, 2000.

MIRANDA, E.E.V. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2006.

MODELO, A.J.; GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S.L.; GNOATO, E. Força de tração necessária em função do número de linhas de semeadura utilizadas por uma semeadora-adubadora de precisão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 465-473, 2005.

MONTICO, S.; BONEL, B. Influencia de la compactación por tránsito sobre la arquitectura de las raíces. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico**: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p.13-20.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MOSADDEGHI, M.R.; HAJABBASI, M.A.; HEMMAT, A.; AFYUNI, M. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1-2, p. 87-97, 2000.

MOUAZEN, A. M.; DUMONT, K.; MAERTENS, K.; RAMON, H. Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 91-102, 2003.

MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 218-229, 2006.

NEVENS, F.; REHEUL, D. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 2, p. 175-184, 2003.

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, 1992.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1-3, p. 319-

337, 1984.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

OADES, J.M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, 2003.

O'SULLIVAN, M.F.; HENSHALL, J.K.; DICKSON, J.W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325-335, 1999.

PEIXOTO, C. P.; CÂMARA, G.M.S.; MARTINS, M.C; MARCHIORI, L.F.S.; GUERZONI, R.A.; MATTIAZZI, P. Época de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57 n. 1, p. 89-96, 2000.

PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 125-137, 2004.

PENGTHAMKEERATI, P.; MOTAVALLI, P.P.; KREMER, R. J.; ANDERSON, S. H. Soil compaction and poultry litter effects on factors affecting nitrogen availability in a claypan soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 109-119, 2006.

PEREIRA, J. O.; BENEZ, S. H.; SILVA, S. L.; TABILE, R. A.; TOLEDO, A. Comportamento compressivo de um Nitossolo: efeito do tamanho de agregados, do teor de água e da pressão aplicada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 749-757, 2005.

PEREIRA, J. O.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 1, p. 34-44, 2007.

PIKUL JUNIOR, J. L.; AASE, J. K. Wheat response and residual soil properties following subsoiling of a sandy loam in eastern Montana. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 51, n. 1-2, p. 61-70, 1999.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 355 p.

PORTELLA, J.A.; SATLER, A.; FAGANELLO, A. Índice de emergência de plântulas de soja e de milho em semeadura direta no Sul do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 71-78, 1997.

POTT, A. **Levantamento ecológico da vegetação de um campo natural sob três condições: pastejado, excluído e melhorado.** 1974. 223f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Plantas Forrageiras, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

PÖTTKER, D.; ROMAN, E. S. Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 5, p. 763-770, 1994.

RADFORD, B. J.; BRIDGEB, B. J.; DAVISC, R. J.; MCGARRYD, D.; PILLAIE, U. P.; RICKMANF, J. F.; WALSHG, P. A.; YULEH, D. F. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3-4, p. 155-170, 2000.

RAGHAVAN, G. S.V.; MCKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 22, n. 1, p. 79-83, 1977.

RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. ; TAYLOR, F.; RICHARD, P.; DOUGLAS, E.; NEGI, S.; WATSON, A. Corn yield affected by wheel compaction in a dry year. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 21, n. 1, p. 27-29, 1979.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, 2005.

REEDER, R.; WOOD, R., FINCK, H. Five subsoiler designs and their effects on soil properties and crop yields. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 36, n. 6, p. 1525-1531, 1993.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais...Ribeirão Preto**, SBSCS, 2003. 1 CD-ROM.

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

REIS, E. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; ARAÚJO, E. F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 777-785, 2006.

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. Manejo de irrigação. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (org.). **Cultura do milho irrigado.** Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2003. p. 224-253.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica.** Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2002. 86 p.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. da S.; SACRAMENTO, L. V. S. do. Sistema

radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 109-115, 2002.

RÜCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O.; HÜLSBERGEN, K.J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 213-220, 2007.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecânica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; RAMÍREZ, J. J.; LITAGO, J. J.; HERNANZ, J. L. Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 25-37, 2005.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 28-43, 2007.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 3, p. 52-61, 1997.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade da soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SERVADIO, P.; MARSILIA, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 87-100, 2005.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 207-216, 2006.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsoidação de dois Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 89-93, 2007.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997a.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997b.

SILVA, P. R. A. **Mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora na cultura do milho (*Zea mays* L.) no sistema de plantio direto**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2003a.

SILVA, P. R. A. **Semeadora-adubadora: mecanismos de corte de palha e cargas verticais aplicadas**. 2007. 93 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 973-983, 2003.

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

SILVA, V. R. **Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água**. 1999. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003b.

SIQUEIRA, R. **Sistemas de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais do solo**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1999.

SIQUEIRA, R.; CASÃO JÚNIOR R.; RALISCH, R.; ARAÚJO, A.G. Variabilidade da demanda energética de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras diretas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South Africa forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and compressibility. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 3-4, p. 335-354, 1997.

SMITH, R.; ACHIM, E.; HORN, R. Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 37, n. 4, p. 207-222, 2000.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 179-201, 1990.

SPARKS, D. **Environmental Soil Chemistry**. London: Academic Press, 1995. 267 p.

SPOOR, G.; TIJINK, F.G.J.; WEISSKOP, P.. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p.175-182, 2003.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E.; ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 95-103, 2004.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A.; BARBOSA, G. M. 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.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n. 2-3, p.111-119, 1991.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, C. F. A.; PAULETTO, E. A.; SILVA, J. B. Resistência mecânica à penetração de um Argissolo Amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1165-1167, 2003.

TERMINIELLO, A. M.; PALANCAR, T. Compactación por tránsito en sistemas de producción hortícola. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p. 57-71.

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

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 3-4, p.223-232, 1999.

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

TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize–soil system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 151-161, 2003.

TULLBERG, J. N. Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 75, n. 4, p. 375-382, 2000.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, Set./Out., p. 759-766, 1994.

VEEN, B. W.; van NOORDWIJD, M.; DE WILLIGEN, P.; BOONE, F.R. & KOOISTRA, M.J. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 139, n. 1, p. 131-138, 1992.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 184 f. 2001. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, C.P.; MESQUITA, C. M.; HERNANI, L.C. Mecanização. In: HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FONTES, C. Z (org.). **Sistema plantio direto**. O produtor pergunta, a EMBRAPA responde. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 1998. p.151-166.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 891-900, 2004.

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A. C.; BURT, E.C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 2, p. 127-135, 1999.

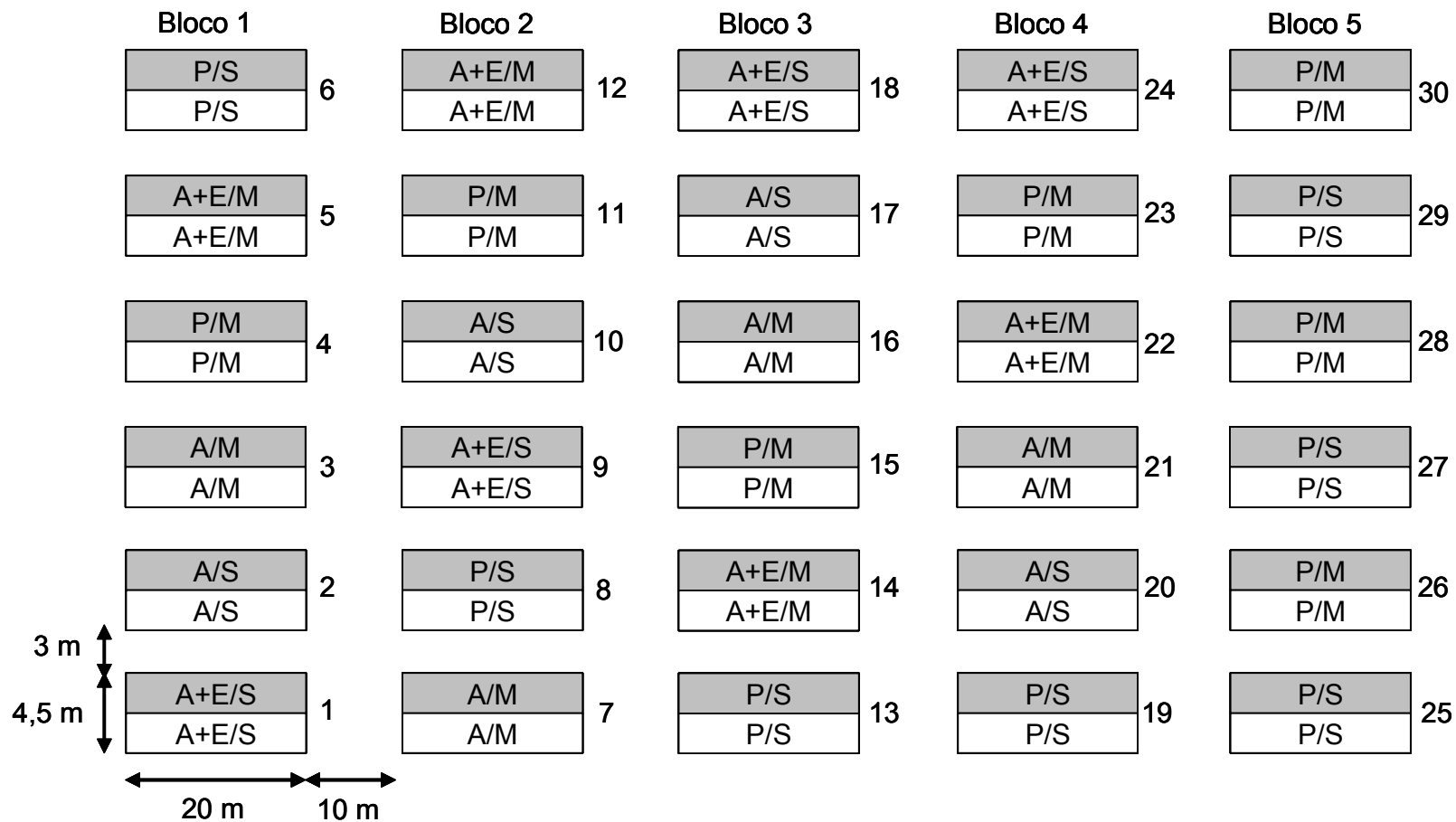
WILLIAMS, J.; SHAYKEWICH, C. F. The influence of soil water matric potential on the strength properties of unsaturated soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, n. 6, p. 835-840, 1970.

XAVIER, A. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2005.

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 239-245, 1997.

10. APÉNDICES

Apêndice 1. Croqui do experimento, safra 2005/2006.

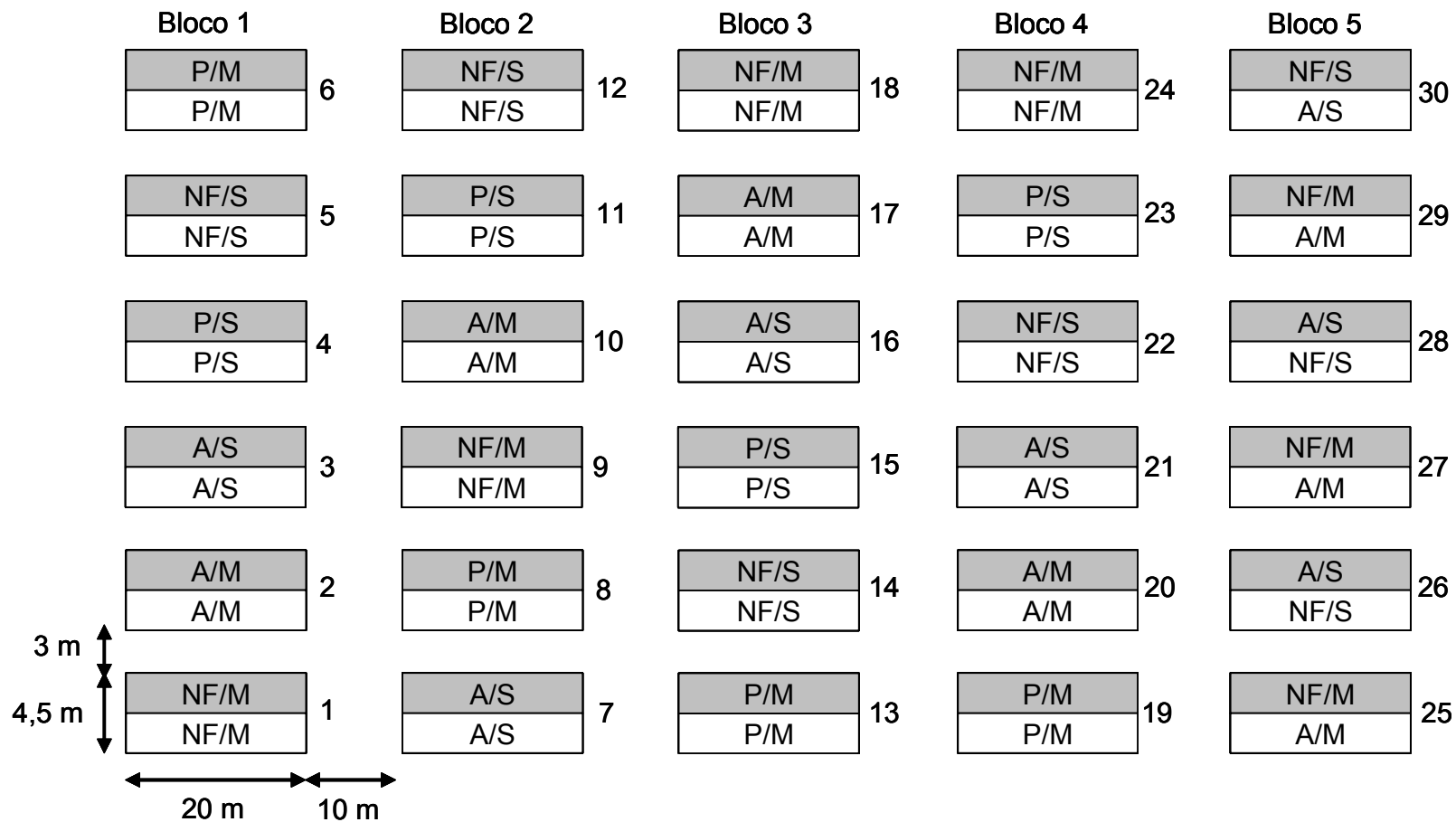


Legenda: A+E = aveia preta + ervilhaca; A = aveia preta; P= pousio; M= milho; S = soja.

□ Profundidade do adubo = 0,06 m

■ Profundidade do adubo = 0,12 m

Apêndice 2. Croqui do experimento, safra 2006/2007.



Legenda: NF = nabo forrageiro; A = aveia preta; P= pousio; M= milho; S = soja.

□ Profundidade do adubo = 0,06 m

■ Profundidade do adubo = 0,12 m

Apêndice 3. Profundidades máximas do sulco e área da secção transversal de solo mobilizada pelas hastes sulcadoras na semeadura das culturas de verão, para todos os anos de condução do experimento, considerando a área sob semeadura direta.

| Ano | Profundidade do sulco | | Área de solo mobilizada | |
|-------------------|-----------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| | Raso | Profundo | Raso | Profundo |
| | ----- <i>cm</i> ----- | | ----- <i>cm²</i> ----- | |
| 2002 ¹ | 5,4 | 8,3 | 14,0 | 20,2 |
| 2003 ¹ | 8,6 | 11,7 | 41,0 | 59,2 |
| 2005 | 5,4 | 8,4 | 42,7 | 65,0 |
| 2006 | 11,6 | 14,6 | 89,1 | 112,2 |

¹ Dados obtidos por Beutler (2005).

Apêndice 4. Número de tráfegos de rodados de trator na área sob semeadura direta, em função do tratamento e da época considerada.

| Época | Coberturas de inverno | |
|---------------|-----------------------|--------|
| | Plantas de cobertura | Pousio |
| Outubro/2005 | 5 | 4 |
| Junho/2006 | 6 | 5 |
| Novembro/2006 | 7 | 5 |
| Maio/2007 | 8 | 6 |

Apêndice 5. Teor de água do solo na camada de 0,0-0,15 m das áreas sob semeadura direta e escarificada, medido imediatamente antes do tráfego de rodados de trator realizado na semeadura das culturais de inverno e verão.

| Ano | Culturas | |
|-------------------|---------------------------------------|-------|
| | Inverno | Verão |
| | ----- <i>kg kg⁻¹</i> ----- | |
| | ----- <i>Semeadura direta</i> ----- | |
| 2002 ¹ | n.d. ² | 0,20 |
| 2003 ¹ | n.d. | 0,16 |
| 2005 | 0,20 | 0,16 |
| 2006 | 0,17 | 0,16 |
| | ----- <i>Escarificação</i> ----- | |
| 2006 | 0,16 | 0,16 |

¹ Dados obtidos por Beutler (2005). ² n.d. = não determinado.

Apêndice 6. Teores de nutrientes e pH em água do solo, medidos na camada de 0,0-0,12 m nas parcelas componentes do bloco 5, antes da escarificação (maio/2006).

| Parcelas | P | K | Al | Ca | Mg | CTC | V ¹ | pH |
|----------|---------------------|-----|-------------------------------|-----|-----|------|----------------|-----|
| | -- $mg\ dm^{-3}$ -- | | ----- $cmol_c\ dm^{-3}$ ----- | | | | -- % -- | |
| 30 | 6,2 | 217 | 0,0 | 4,4 | 2,1 | 9,8 | 72 | 5,5 |
| 29 | 7,5 | 307 | 0,0 | 3,9 | 2,1 | 9,5 | 71 | 5,6 |
| 28 | 7,2 | 232 | 0,2 | 3,3 | 1,4 | 8,8 | 60 | 5,2 |
| 27 | 7,4 | 242 | 0,2 | 3,3 | 1,4 | 9,2 | 58 | 5,2 |
| 26 | 6,0 | 181 | 0,1 | 4,0 | 1,6 | 10,4 | 58 | 5,3 |
| 25 | 6,8 | 234 | 0,0 | 4,2 | 2,2 | 10,1 | 69 | 5,6 |

¹ Saturação da CTC (capacidade de troca de cátions) por bases.

Apêndice 7. Teores de nutrientes e pH em água do solo medido na camada de 0,0-0,12 m, em função das coberturas de inverno e da época de avaliação.

| Cobertura | P | K | Al | Ca | Mg | CTC | V ² | pH |
|--------------------------|-------------------|-----|-------------------------------|-----|-----|------|----------------|-----|
| | - $mg\ dm^{-3}$ - | | ----- $cmol_c\ dm^{-3}$ ----- | | | | % | |
| ----- Maio de 2005 ----- | | | | | | | | |
| A+E ¹ | 6,2 | 272 | 0,1 | 4,5 | 2,0 | 10,4 | 71 | 5,3 |
| Aveia preta | 8,4 | 262 | 0,2 | 4,4 | 2,2 | 10,4 | 74 | 5,6 |
| Pousio | 7,3 | 238 | 0,2 | 4,6 | 2,0 | 9,8 | 70 | 5,4 |
| ----- Maio de 2006 ----- | | | | | | | | |
| A+E | 7,0 | 283 | 0,2 | 3,5 | 1,7 | 10,0 | 60 | 5,3 |
| Aveia preta | 6,5 | 236 | 0,1 | 3,8 | 1,8 | 9,6 | 66 | 5,4 |
| Pousio | 7,7 | 257 | 0,1 | 3,9 | 1,8 | 10,6 | 62 | 5,4 |

¹ A+E = aveia preta + ervilhaca. ² Saturação da CTC (capacidade de troca de cátions) por bases.

Apêndice 8. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob semeadura direta, para os fatores coberturas de inverno, tráfego de rodados de trator e épocas de avaliação.

| Profundidade | Fatores | | |
|----------------------|---------------|---------|--------------------|
| | Cobertura | Tráfego | Época de avaliação |
| ----- <i>m</i> ----- | ----- % ----- | | |
| 0,03 | 14,8 | 13,5 | 16,4 |
| 0,06 | 17,1 | 12,9 | 14,2 |
| 0,09 | 15,1 | 10,4 | 12,6 |
| 0,12 | 13,2 | 8,6 | 13,8 |
| 0,15 | 8,8 | 7,8 | 10,5 |
| 0,18 | 5,8 | 8,0 | 8,0 |
| 0,21 | 6,5 | 7,4 | 6,1 |
| 0,24 | 8,0 | 6,5 | 8,5 |
| 0,27 | 8,1 | 6,8 | 7,9 |
| 0,30 | 9,0 | 7,8 | 8,6 |
| 0,33 | 11,8 | 5,7 | 10,4 |

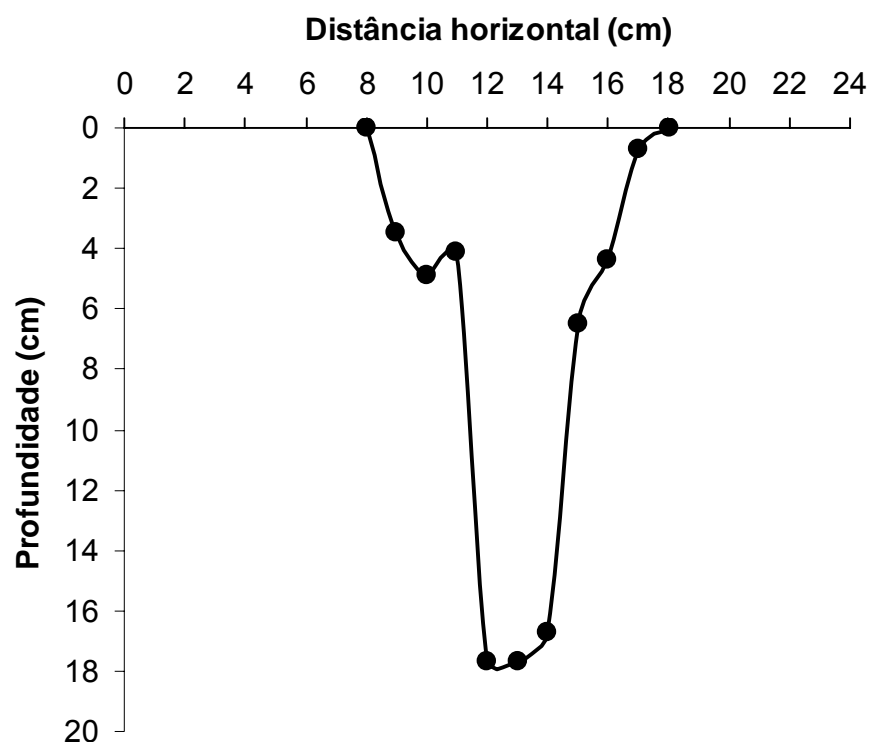
Apêndice 9. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob semeadura direta, para o fator profundidade de atuação da haste sulcadora para o adubo.

| Profundidade | Época de avaliação | | |
|----------------------|--------------------|------------|----------|
| | Outubro/2005 | Junho/2006 | Mai/2007 |
| ----- <i>m</i> ----- | ----- % ----- | | |
| 0,03 | 17,6 | 19,6 | 35,0 |
| 0,06 | 16,1 | 19,9 | 27,3 |
| 0,09 | 11,5 | 18,5 | 24,5 |
| 0,12 | 10,4 | 16,0 | 24,4 |
| 0,15 | 10,7 | 12,8 | 13,8 |
| 0,18 | 8,5 | 10,0 | 10,3 |
| 0,21 | 7,5 | 7,8 | 9,4 |
| 0,24 | 8,8 | 5,1 | 9,9 |
| 0,27 | 7,4 | 5,9 | 12,4 |
| 0,30 | 6,7 | 7,9 | 11,3 |
| 0,33 | 8,3 | 7,8 | 13,0 |

Apêndice 10. Coeficientes de variação da resistência do solo à penetração, obtidos na área sob escarificação, para os fatores coberturas de inverno, tráfego de rodados de trator e épocas de avaliação.

| Profundidade | Fatores | | |
|---------------|---------------|---------|--------------------|
| | Cobertura | Tráfego | Época de avaliação |
| ----- m ----- | ----- % ----- | | |
| 0,03 | 22,2 | 23,7 | 49,7 |
| 0,06 | 29,5 | 17,1 | 40,9 |
| 0,09 | 42,6 | 18,0 | 27,4 |
| 0,12 | 36,8 | 18,9 | 17,8 |
| 0,15 | 21,9 | 16,4 | 13,3 |
| 0,18 | 13,5 | 12,8 | 9,3 |
| 0,21 | 13,4 | 14,9 | 17,8 |
| 0,24 | 16,4 | 16,8 | 20,5 |
| 0,27 | 25,1 | 13,4 | 17,6 |
| 0,30 | 20,9 | 14,1 | 19,1 |
| 0,33 | 18,6 | 6,5 | 21,6 |

Apêndice 11. Exemplo de perfil transversal de solo mobilizado obtido em uma condição onde a profundidade crítica de atuação da haste foi ultrapassada.



Apêndice 12. Principais estádios fenológicos da cultura da soja nas safras 2005/06 e 2006/07, e sua respectiva época de ocorrência, em dias após a semeadura.

| Estádios fenológicos | Saфра | |
|----------------------|-----------|-----------|
| | 2005/2006 | 2006/2007 |
| VE | 6 | 5 |
| V1 | 11 | 10 |
| V3 | 32 | 35 |
| V7 | - | 50 |
| R1 | 56 | 60 |
| R2 | 64 | 68 |
| R3 | 74 | 77 |
| R4 | 83 | 86 |
| R5 | 93 | 97 |
| R6 | 108 | 120 |
| R7 | 116 | 131 |
| R8 | 121 | 138 |
| R9 | 130 | 150 |

Apêndice 13. Principais estádios fenológicos da cultura do milho nas safras 2005/06 e 2006/07, e sua respectiva época de ocorrência, em dias após a semeadura.

| Estádios fenológicos | Saфра | |
|----------------------|-----------|-----------|
| | 2005/2006 | 2006/2007 |
| VE | 6 | 5 |
| V3 | 16 | 14 |
| V6 | 30 | 28 |
| V9 | 40 | 38 |
| V12 | 46 | 44 |
| V15 | 52 | 50 |
| VT | 69 | 64 |
| R1 | 74 | 69 |
| R2 | 83 | 79 |
| R3 | 90 | 84 |
| R4 | 99 | 94 |
| R5 | 112 | 105 |
| R6 | 129 | 121 |