

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E
CRESCIMENTO E RENDIMENTO DE CULTURAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Santa Maria, RS, Brasil

2005

S968c Suzuki, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches, 1978-
Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas / por Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki ; orientador Dalvan José Reinert. – Santa Maria, 2005.
149 f . ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

1. Ciência do solo 2. Solo 3. Física do solo 4. Grau de compactação 5. Compressibilidade 6. Plantio direto 7. Escarificação 8. Produtividade I. Reinert, Dalvan José, orient. II. Título

CDU: 631.43

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CRESCIMENTO E
RENDIMENTO DE CULTURAS**

por

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**

Orientador: Prof. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CRESCIMENTO E
RENDIMENTO DE CULTURAS**

elaborada por

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dalvan José Reinert
(Presidente/Orientador)

José Miguel Reichert
(UFSM)

Marlene Cristina Alves
(UNESP)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005

Dedico este trabalho aos meus pais,
Maria Lucinei S.V. Suzuki e Satio Suzuki, e
ao meu irmão, Luis Gustavo A.S. Suzuki.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, que possibilitaram a realização do curso de mestrado e deste trabalho.

À CAPES, pela importante ajuda financeira por meio da bolsa de estudo.

Ao professor Dalvan José Reinert, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, orientação e amizade.

Ao professor José Miguel Reichert e demais professores do Centro de Ciências Rurais, pelos ensinamentos passados durante este período.

Ao Tarcísio Uberti e demais funcionários do Departamento de Solos.

Aos colegas de Mestrado e Doutorado, pelas trocas de informações e momentos de descontração.

À Rosane Martinazzo e Ronaldo Thiesen, responsáveis pela análise química dos solos.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de trabalho, amizade e descontração, André A. Brandt, André Pellegrini, Cláudia L.R. de Lima, Clóvis Bervald, Fabiano Braga, Federico U. Barreto, Giberto L. Collares, Giovana e Gabriel Santi, Letícia Sequinatto, Milton da Veiga, Paulo I. Gubiani, Vanderlei R. da Silva, Vinícius Hilbig, e em especial, aqueles que contribuíram para que este trabalho fosse realizado, Flávio Fontinelli, Carlos A. Streck, Douglas R. Kaiser, Marcelo e Maurício Kunz e Sid Sturmer.

À todo o Departamento Técnico da COTRIJÚ e proprietários rurais, que permitiram o uso de suas propriedades para realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas, os de perto e os de longe, que torceram por mim.

À minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e incentivando, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos.

À todos vocês, que fizeram parte de mais esta fase da minha vida, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMO.....	14
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO GERAL	20
2. HIPÓTESES.....	21
3. OBJETIVO GERAL	21
4. CAPÍTULO I.....	22
COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL SUBMETIDOS A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO.....	22
4.1. INTRODUÇÃO.....	22
4.2. OBJETIVOS GERAIS	25
4.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.4.1. Solos e manejos estudados	26
4.4.2. Coleta das amostras de solo.....	31
4.4.3. Teste de compressão uniaxial.....	31
4.4.4. Análise estatística	32
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.5.1. Compressão dos Argissolos.....	32
4.5.2. Compressão dos Latossolos	36
4.5.3. Compressão de Argissolos e Latossolos	42
4.6. CONCLUSÕES.....	45
4.7. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	46
5. CAPÍTULO II	50
ESTADO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA AFETADOS POR SISTEMAS DE MANEJO EM DISTINTOS SOLOS	50
5.1. INTRODUÇÃO.....	50
5.2. OBJETIVOS GERAIS	53
5.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	53
5.4. MATERIAL E MÉTODOS	53

5.4.1. Solos e manejos estudados	54
5.4.2. Coleta das amostras de solo	54
5.4.3 Porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo	54
5.4.4. Resistência do solo à penetração	54
5.4.5. Rendimento da cultura da soja.....	55
5.4.6. Sistema radicular da soja.....	55
5.4.7. Análise estatística	55
5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.5.1. Argissolos.....	56
5.5.2. Latossolos	66
5.5.3. Argissolos e Latossolos.....	73
5.6. CONCLUSÕES.....	75
5.7. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	75
6. CAPÍTULO III	80
GRAU DE COMPACTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA SOJA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	80
6.1. INTRODUÇÃO.....	80
6.2. OBJETIVOS GERAIS	83
6.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	84
6.4. MATERIAL E MÉTODOS	84
6.4.1. Solos e manejos estudados	84
6.4.2. Macroporosidade do solo	85
6.4.3. Resistência do solo à penetração	85
6.4.4. Grau de compactação ou compactação relativa	85
6.4.5. Teste de compressão uniaxial.....	87
6.4.6. Rendimento da cultura da soja.....	87
6.4.7. Sistema radicular da soja.....	87
6.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
6.6. CONCLUSÕES.....	94
6.7. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	95
7. CAPÍTULO IV	99

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO ADICIONAL E ESCARIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CRESCIMENTO E RENDIMENTO DE CULTURAS.....	99
7.1. INTRODUÇÃO.....	99
7.2. OBJETIVOS GERAIS	102
7.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	102
7.4. MATERIAL E MÉTODOS	102
7.4.1. Tratamentos e delineamento experimental	103
7.4.2. Especificações da carregadeira utilizada para compactar o solo	104
7.4.3. Propriedades físicas avaliadas.....	104
7.4.4. Avaliação do crescimento e rendimento das culturas	105
7.4.5. Condução do experimento	106
7.4.6. Análise estatística	106
7.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
7.5.1. Propriedades físicas do solo	107
7.5.2. Crescimento e rendimento das culturas de milho e soja	114
7.5.3. Cultura do trigo.....	117
7.6. CONCLUSÕES.....	120
7.7. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	121
8. CONCLUSÃO GERAL.....	126
ANEXOS	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para os Argissolos em estudo.	29
Tabela 2 - Análise granulométrica nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para os Latossolos em estudo.	30
Tabela 3 - Valores de D_{si} , D_{sf} , D_{ef} , θ_{vi} , G_{si} , σ_p e C_c para o Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) e Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) e seus manejos.	33
Tabela 4 - Valores de D_{si} , D_{sf} , D_{ef} , θ_{vi} , G_{si} , σ_p e C_c para o Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) e seus manejos.	38
Tabela 5 - Valores de D_{si} , D_{sf} , D_{ef} , θ_{vi} , G_{si} , σ_p e C_c para seis solos do Rio Grande do Sul.	43
Tabela 6 - Valores de densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) para o Argissolo Vermelho distrófico arênico e seus respectivos manejos em estudo.	57
Tabela 7 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho distrófico arênico e seus respectivos manejos em estudo.	59
Tabela 8 - Valores de densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) para o Argissolo Vermelho distrófico latossólico e seus respectivos manejos em estudo.	60
Tabela 9 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho distrófico latossólico e seus respectivos manejos em estudo.	62
Tabela 10 - Valores de densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico e seus respectivos manejos em estudo.	63

Tabela 11 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico e seus respectivos manejos em estudo.	65
Tabela 12 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Latossolo Vermelho distrófico típico e seus respectivos manejos em estudo.....	67
Tabela 13 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Latossolo Vermelho distrófico típico e seus respectivos manejos em estudo.	69
Tabela 14 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico e seus respectivos manejos em estudo.	70
Tabela 15 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico e seus respectivos manejos em estudo.	72
Tabela 16 - Análise granulométrica para as camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para o Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo).....	103
Tabela 17 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para os tratamentos em estudo no Latossolo Vermelho distroférico típico.	110
Tabela 18 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para os tratamentos em estudo no Latossolo Vermelho distroférico típico.	113
Tabela 19 - Altura média da cultura do milho e soja (obtida na primeira e segunda avaliação) nos tratamentos em estudo.	115
Tabela 20 - Rendimento da cultura do trigo obtido nos níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja e milho).	120

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os manejos no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a, b), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) (c, d) e Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) (e, f).35
- Figura 2 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os manejos no Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) (a, b), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) (c, d) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) (e, f).40
- Figura 3 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os solos em estudo.45
- Figura 4 - Resistência à penetração do solo Argissolo Vermelho distrófico arênico nos manejos Escarif (a), PD (b) e PDC (c), e umidade do solo (d) no momento da avaliação da resistência.58
- Figura 5 - Resistência à penetração do Argissolo Vermelho distrófico latossólico nos manejos PD (a), PDC 1 (b), Batata (c) e PDC 2 (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.61
- Figura 6 - Resistência à penetração do Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico nos manejos PD 1 (a), PDC (b), PD 2 (c) e Batata (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.64
- Figura 7 - Resistência à penetração do Latossolo Vermelho distrófico típico nos manejos PD 1 (a), PDC 1 (b), PD 2 (c) e PDC 2 (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.68
- Figura 8 - Resistência à penetração do Latossolo Vermelho aluminoférrico típico nos manejos PD 1, PD 2 e PD 3 (a), Escarif, Pasto e PDC (b), e umidade do solo no momento da avaliação da resistência (c, d).71

Figura 9 - Densidade do solo na profundidade média de 0,05-0,15 m e rendimento relativo da cultura da soja para os solos e manejos em estudo.	74
Figura 10 - Curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas e densidade do solo após aplicação de uma única carga (200, 400, 800 e 1600 kPa) em cada amostra para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) (b), Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) (c), Latossolo Vermelho distrófico típico (d), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) (e) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) (f).	89
Figura 11 - Curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas e densidade do solo após aplicação de uma única carga (200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa) em cada amostra para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) (b).	90
Figura 12 - Grau de compactação utilizando densidade referência obtida com a carga de 1600 kPa da curva de compressão em função do grau de compactação obtido com a densidade referência aplicando apenas 1600 kPa.	92
Figura 13 - Rendimento relativo em função do grau de compactação com densidade referência obtida com aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Argissolos e Latossolos em estudo.	92
Figura 14 - Índice de cone em função do grau de compactação com densidade referência obtida com a aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Argissolos em estudo.	92
Figura 15 - Índice de cone em função do grau de compactação com densidade referência obtida com a aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Latossolos em estudo.	92

Figura 16 - Macroporosidade em função do grau de compactação para os diferentes teores de argila com densidade referência obtida pela aplicação de carga única de 1600 kPa.	94
Figura 17 - Profundidade de raiz em função do grau de compactação para os diferentes teores de argila com densidade referência obtida com a aplicação de carga única de 1600 kPa.	94
Figura 18 - Resistência do solo à penetração antes e logo após quatro passadas de máquina de 10 Mg. Barras horizontais comparam os valores de resistência à penetração para cada profundidade, pelo teste DMS a 5%.	107
Figura 19 - Resistência à penetração do solo na cultura da soja (a) e milho (b) nos três tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 05/02/2004 (57 dias após a semeadura). Barras horizontais comparam os valores de resistência à penetração para cada profundidade, pelo teste DMS a 5%.	108
Figura 20 - Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) obtida no momento da avaliação da resistência à penetração nos três tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 05/02/2004 (57 dias após a semeadura).	109
Figura 21 - Resistência à penetração no tratamento PDC, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura). .	111
Figura 22 - Resistência à penetração no tratamento PD, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura). .	111
Figura 23 - Resistência à penetração no tratamento Escarif, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).	111
Figura 24 - Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) no momento da avaliação da resistência do solo à penetração nos tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).	112

Figura 25 - Rendimento da cultura do milho (a) e da soja (b) obtido nos tratamentos em estudo. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.....	116
Figura 26 - Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) no momento da avaliação da resistência. Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).....	117
Figura 27 - Resistência do solo à penetração nos diferentes níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja/milho). Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).....	118
Figura 28 - Crescimento radicular da cultura do trigo nos diferentes níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja/milho). Malha de 0,05 m x 0,05 m. Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).....	119

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CRESCIMENTO E RENDIMENTO DE CULTURAS

Autor: Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Orientador: Dalvan José Reinert

Data e local da defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

A compactação do solo é tema de vários estudos que visam avaliar seus efeitos no solo e na planta. Vários parâmetros são utilizados para avaliar a compactação do solo, como densidade do solo e resistência à penetração, mas esses parâmetros são dependentes do tipo e da umidade do solo; portanto, o estudo de parâmetros que comparam diferentes solos facilita o estudo sobre compactação do solo. Este trabalho foi dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo o objetivo foi avaliar alguns parâmetros físico-mecânicos de Argissolos e Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. Foram coletados seis solos do Rio Grande do Sul, com granulometria variando, aproximadamente, entre 100 a 650 g kg⁻¹ de argila. As amostras com estrutura preservada foram coletadas na profundidade de 0,08-0,13 m e equilibradas à tensão de 33 kPa, e submetidas ao teste de compressão uniaxial com aplicação de cargas sucessivas e estáticas. Baseado no deslocamento vertical medido no consolidômetro após a aplicação de cada carga foram avaliados a densidade do solo inicial (D_{si}) e final (D_{sf}), deformação (Def), grau de saturação inicial (G_{si}), umidade volumétrica inicial (θ_{vi}), e pressão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressão (C_c) determinados pelo método de Casagrande. Os resultados indicaram que manejos com maior estado de compactação inicial apresentaram menor deformação e menor suscetibilidade do solo à compactação; sistemas de manejo com revolvimento do solo recente apresentaram maior deslocamento de suas curvas de compressão, mostrando maior suscetibilidade à compactação; o Latossolo Vermelho distroférico típico, pela capacidade de reter

mais água a uma determinada tensão e pela maior suscetibilidade à compactação, necessita de maior cuidado com o tráfego de máquinas do que solos arenosos. O segundo capítulo objetivou estudar algumas propriedades físicas de Argissolos e Latossolos do Rio Grande do Sul submetidos a diferentes sistemas de manejo do solo e suas influências no crescimento radicular e rendimento da cultura da soja. Os resultados mostraram que independente do solo e manejo, de modo geral as maiores densidades foram encontradas na profundidade aproximada de 0,10 m; os níveis de resistência do solo à penetração não se apresentam em camadas uniformes, ocorrem espaços de maior e menor resistência; a densidade do solo e a resistência à penetração se avaliada com umidade próxima à capacidade de campo, mostraram-se bons indicadores do solo para desenvolvimento da planta e a avaliação do sistema radicular, mesmo que apenas visual, é um bom indicativo da condição física do solo; o rendimento esteve associado às condições físicas dos solos. O terceiro capítulo teve como objetivo avaliar o efeito da textura e do manejo do solo no grau de compactação e verificar a melhor pressão para se obter a densidade referência. Foram coletados seis solos do Rio Grande do Sul submetidos à condições de manejo distintas, com granulometria, aproximadamente, entre 100 e 650 g kg⁻¹ de argila. Para a determinação da densidade do solo foram coletadas amostras com estrutura preservada nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m e para avaliação da densidade referência foram coletadas amostras com estrutura preservada na camada de 0,08-0,13 m. Para a determinação da densidade referência, as amostras foram equilibradas à tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação em cada amostra de solo carga única de 200, 400, 800, 1600 kPa e 3200 kPa. Também foi obtida a curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas em cada amostra de solo para poder comparar os resultados obtidos com as amostras em que foi aplicada carga única. Foram avaliados também a macroporosidade e a resistência do solo à penetração, e o crescimento radicular e o rendimento da cultura da soja. Os resultados obtidos mostraram que a carga de 1600 kPa foi a melhor pressão para se obter a densidade referência no teste de compressão uniaxial utilizando amostras de solo com estrutura preservada, independente de ser obtida de aplicação de carga única ou da curva de compressão do solo; o maior rendimento da soja é obtido com grau de compactação, em média de 82% para os Argissolos e 85% para os Latossolos; o grau de compactação mostrou-se um bom indicador das

condições físicas do solo, apresentando boa relação com rendimento da cultura da soja, resistência à penetração, macroporosidade e desenvolvimento radicular; o grau de compactação parece ser independente da granulometria do solo, baseado principalmente nos resultados de rendimento e macroporosidade em função do grau de compactação. O quarto capítulo objetivou estudar o efeito de diferentes condições de compactação sobre as propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento das culturas soja, milho e trigo. Para isso, foi conduzido um experimento no campo tecnológico da Cooperativa Regional Triticola Serrana Ltda (COTRIJUÍ), município de Ijuí (RS), em um Latossolo Vermelho distroférico típico. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em um bifatorial com parcelas subdivididas, com três repetições, tendo nas parcelas principais três estados de compactação (PDC - Plantio direto há seis anos que recebeu compactação adicional por quatro passadas de máquina com massa de 10 Mg no ano agrícola 2003/2004; PD - Plantio direto há seis anos; Escarif - Plantio direto há seis anos, sendo escarificado e gradeado no ano agrícola 2003/2004) e nas subparcelas as culturas de verão soja e milho e trigo no inverno. Foram avaliadas as propriedades físicas do solo macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e resistência do solo à penetração e o crescimento e rendimento das culturas soja, milho e trigo. Os resultados mostraram que a compactação adicional apresentou incremento da resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,12 m e afetou negativamente as propriedades físicas do solo; as culturas milho, soja e trigo foram sensíveis à compactação, tendo a altura das culturas soja e milho e comprimento radicular das culturas soja e trigo, reduzidos pela compactação adicional; a compactação do solo influenciou o rendimento das culturas soja, milho e trigo, sendo os maiores rendimentos verificados no plantio direto e os menores no tratamento com compactação adicional, e o maior rendimento do trigo foi observado na sucessão com soja.

Palavras-chave: grau de compactação, plantio direto, escarificação, compressibilidade, produtividade.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

SOIL COMPACTION INFLUENCE ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND ON CROP GROWTH AND YIELD

Author: Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Adviser: Dalvan José Reinert

Date and place of defense: Santa Maria, February 28, 2005.

Soil compaction effects on soil and plants has been subject of several studies. However, several parameters are used to evaluate soil compaction like bulk density and soil penetration resistance, but these parameters are dependent of soil type and moisture, therefore, the study of a parameter that could compare the different soils would facilitate the soil compaction studies. This work was divided in four chapters. In the first chapter the objective was to evaluate some physical-mechanical parameters of Alfisols and Oxisols submitted to different tillages. Six soils from Rio Grande do Sul state, Brazil, were collected, with clay content varying from 100 to 650 g kg⁻¹. The core samples were collected from 0.08-0.13 m layer, equilibrated to the tension of 33 kPa and submitted to uniaxial compression test with application of successive and static loads. Based on the vertical displacement measured in the consolidometer after application of each load, were evaluated initial (D_{si}) and final (D_{sf}) bulk density, deformation (Def), initial saturation degree (G_{si}), initial volumetric moisture (θ_{vi}), pre compression stress (σ_p) and compression index (C_c) by Casagrande's method. Results indicated that managements with larger compaction presented smaller deformation and susceptibility to compaction; managements with recent revolviment of soil presented larger displacement from their compression curves, showing larger susceptibility to compaction; the Oxisol with larger clay content, due ability to retain more water in determined tension and due larger susceptibility to compaction, need to be more careful with traffic of machines than sandy soils. The second chapter aimed to study some physical properties of Alfisols and Oxisols from Rio Grande do

Sul state, Brazil, submitted to different tillages and its influence on root growth and soybean yield. Results showed larger densities in the approximate depth of 0.10 m and the penetration resistance do not appear in layers with uniform resistance, are spaces with larger and smaller resistance; the root evaluation, even visually, it is a good indicative of the soil physical condition and the bulk density and penetration resistance, if appraised with moisture near field capacity, are good indicators of the soil for plant development; crop yield was associated to soil physical conditions. The third chapter had as objective evaluate the effect of the particles size and tillage in the “degree of compactness” and to verify the best pressure to obtain the reference bulk density. Six soils of Rio Grande do Sul” state, Brazil, submitted to different tillages were collected, with clay content varying from 100 to 650 g kg⁻¹. For determination of the bulk density core samples were collected from layers of 0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.20, 0.20-0.25 and 0.25-0.30 m and for evaluation of the reference bulk density core samples were collected in the layer of 0.08-0.13 m. For determination of the reference bulk density samples were equilibrated to the tension of 33 kPa and submitted to the uniaxial compression test, with application in each soil sample only one load of 200, 400, 800, 1600 kPa and 3200 kPa. It was also obtained the soil compression curve with application of successive loads in each soil sample to compare the results obtained with the samples that was applied only one load. They were evaluated also the macroporosity and soil penetration resistance, yield and root development of soybean. In agreement with the obtained results, the load of 1600 kPa was the best pressure to obtain the reference bulk density in the uniaxial compression test using core samples, independent if applying just the load of 1600 kPa or from the load of 1600 kPa of the soil compression curve; the largest soybean yield was obtained with degree of compactness of 82% for Alfisols and 85% for Oxisols and the degree of compactness was a good indicator of the physical conditions of the soil, presenting good relationship with soil penetration resistance, macroporosity, root growth and soybean yield; the degree of compactness looks like independent from particle size, based especially in the results of crop yield and macroporosity in function of degree of compactness. The fourth chapter aimed to study the effect of different compaction states on the soil physical properties and growth and yield of soybean, corn and wheat. An experiment was set in the “Cooperativa Regional Tritícola Serrana Ltda (COTRIJUÍ)”, Ijuí city, Rio Grande do Sul state, Brazil, in an Oxisol. The completely randomized experimental design was

used, in a bifactorial with split plots, with three repetitions. The main plots had three compaction states (PDC – no tillage during six years + four passes of a machine with mass of 10 Mg in the agricultural year 2003/2004; PD – no tillage during six years; Escarif – no tillage during six years + chisel and harrowing in the agricultural year 2003/2004) and the split plots had soybean and corn. The soil physical properties (macroporosity, microporosity, total porosity, bulk density and soil penetration resistance) and development and yield of soybean, corn and wheat were measured. The results showed that the additional compaction presented increment of the soil resistance to penetration until the depth of 0.12 m; soil compaction influenced negatively soil physical properties; soybean and wheat were sensitive to compaction, soybean and corn had reduced heights and the wheat and soybean had their root system reduced length, for the additional compaction; soil compaction affected crop yield of corn, soybean and wheat, been the larger yields verified in no tillage and the smaller in treatments with additional compaction; the larger wheat yield was observed in the succession with soybean.

Keywords: degree of compactness, no tillage, chisel, compressibility, crops yield.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A modernização da agricultura, por meio da mecanização, trouxe facilidades ao homem, possibilitando um trabalho mais rápido e eficiente. Com o passar dos tempos, a tecnologia das máquinas melhorou e foram surgindo máquinas cada vez maiores e mais pesadas, otimizando o trabalho no campo, mas trazendo à tona um grande problema, a compactação do solo.

O resultado da modernização da agricultura não foi apenas melhorias nas máquinas, mas a busca por uma agricultura mais competitiva e rentável. Uma visão mais ambiental e conservacionista trouxe consigo sistemas de manejo do solo mais conservacionistas, como o cultivo mínimo e chegando ao plantio direto.

A compactação do solo sempre esteve presente, desde o tempo onde a agricultura era totalmente realizada por meio do revolvimento do solo até os dias de hoje, onde se visa o menor revolvimento possível do solo. A diferença da compactação causada pelo revolvimento do solo e pelos manejos mais conservacionistas está na intensidade e profundidade da compactação. Com o revolvimento do solo a compactação superficial é rompida, mas leva o problema para maiores profundidades, causando a compactação sub superficial, que é mais difícil de remediar. Nos manejos mais conservacionistas, como o plantio direto, a compactação do solo é mais superficial e esse problema se agrava pelo não revolvimento do solo, máquinas muito pesadas, solos mais argilosos e tráfego em solos mais úmidos.

Para a mensuração da compactação, vários parâmetros físicos e mecânicos do solo são utilizados, bem como a análise da planta, como seu desenvolvimento radicular e aéreo e rendimento. É grande o estudo para obter-se limites ou faixas de parâmetros do solo, como a densidade do solo, que sejam críticos ao desenvolvimento das plantas, e a busca por parâmetros que sejam representativos da compactação do solo e possibilitem uma comparação entre os mais diferentes solos e manejos, como o “grau de compactação” ou “compactação relativa”.

Os estudos sobre compactação do solo são muitos, bem como meios para diminuir esse problema.

A agricultura está cada vez mais competitiva, sendo necessário produzir mais por área, com menor custo e alta qualidade. Sendo a agricultura o meio de

sustentação de muitos países, a busca por tecnologias, qualidade física, química e biológica do solo, qualidade ambiental, menor degradação do solo e do meio ambiente se fazem necessários.

2. HIPÓTESES

Solos sob o sistema de plantio direto possuem maior capacidade de suporte de carga e são menos suscetíveis à compactação, em relação a solos revolvidos.

A compactação do solo afeta de diferentes formas as propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da compactação do solo nas suas propriedades físicas e crescimento e rendimento de culturas, em diferentes solos e sistemas de manejo.

4. CAPÍTULO I

COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL SUBMETIDOS A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

4.1. INTRODUÇÃO

O uso de máquinas agrícolas cada vez maiores e mais pesadas, sem o controle da pressão dos pneus e umidade de trabalho, associado aos diferentes manejos do solo, conduz a questões práticas associadas, principalmente, à capacidade de suporte de carga do solo e sua suscetibilidade à compactação, sendo necessário estudos que avaliem o efeito das máquinas sobre o comportamento físico-mecânico dos diferentes solos.

Por meio da curva de compressão do solo, que considera o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada no solo, obtém-se a pressão de preconsolidação (σ_p), que é um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de pressão do solo (Dias Junior & Pierce, 1996), e o índice de compressão (C_c), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (Casagrande, 1936; Larson et al., 1980; Holtz & Kovacs, 1981).

Vários trabalhos (Larson & Gupta, 1980; Reinert, 1990; Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2000; Imhoff et al., 2001) têm utilizado a pressão de preconsolidação como estimativa da capacidade de suporte de carga do solo. A aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo, enquanto que a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas, não recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981).

Segundo Horn & Lebert (1994) para explicar diferenças na resistência do solo entre locais com condições climáticas e hidráulicas bem definidas, a influência do tipo de solo, resistência interna do solo, variações na estrutura do solo dependentes da carga e fatores externos precisam ser determinados. De acordo com esses autores, o grande número de métodos utilizados para determinar a resistência do

solo podem ser divididos nos que fornecem apenas um resultado indireto, na maioria resultado qualitativo ou relativo, e aqueles que resultam valor direto, com dimensões mecanicamente bem definidas. A vantagem dos métodos dessa segunda categoria é sua direta aplicabilidade, por exemplo, na predição da compressibilidade ou trafegabilidade do solo.

A redução do volume do solo, conseqüentemente aumentando sua densidade, pode ou não causar compactação adicional ao solo. A aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo foi submetido no passado pode ter efeitos benéficos, enquanto que pressões maiores do que a maior pressão sofrida pelo solo no passado pode ter efeitos prejudiciais. Isso mostra a importância de se conhecer os níveis de pressões que o solo sofreu no passado e/ou a umidade do solo no momento das operações agrícolas evitando dessa forma a compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

Canarache et al. (2000) verificaram correlação significativa entre várias propriedades físicas do solo (densidade do solo, estrutura, resistência à penetração) e pressão de preconsolidação, mas nenhuma significância entre essas propriedades físicas e o índice de compressão do solo.

O tráfego de máquinas não é a única causa da degradação da estrutura do solo; assim, fatores climáticos, fertilizantes e biológicos também podem contribuir para estes efeitos. Onde a influência do clima e da biologia é alta, a adoção de um sistema de mecanização que minimize os danos na estrutura do solo reduzirão a degradação estrutural causada primariamente pelo tráfego. Em locais onde o clima possui pouca ou nenhuma influência na estrutura do solo, o manejo e o tráfego permanecerão decisivos em manter a estrutura do solo (Koolen, 1994). A utilização das máquinas e os sistemas de cultivo devem ser adequados para não serem destruidores das boas características originais de determinado solo (Silva et al., 2002a.).

As pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas se situam entre 100 e 200 kPa (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000), ao passo que as carretas agrícolas podem exercer pressões próximas de 600 kPa (Carpenedo, 1994).

Imhoff et al. (2001) verificaram que a pressão crítica para o crescimento das plantas, definida como a pressão que poderá ser aplicada ao solo sem provocar condições restritivas ao crescimento radicular (valores de densidade maiores que a densidade do solo crítica) e sem promover deformação adicional do solo (valores de

pressões maiores que a pressão de preconsolidação) varia entre 360 e 500 kPa em um Argissolo Vermelho para um intervalo de umidade de aproximadamente 0,12 a 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Esses autores consideraram elevados esses valores de pressão, considerando a pressão aplicada ao solo pelos equipamentos motomecanizados tradicionais.

A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total do solo, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maior a deformação do solo maiores serão as reduções de macroporosidade e porosidade total do solo. A deformação do solo pode ser considerada como outra maneira de representar o efeito da aplicação de pressões no solo (Silva et al., 2000).

Trabalhos vêm sendo realizados avaliando a compressibilidade em diferentes solos e manejos. Kondo & Dias Junior (1999) trabalhando com três Latossolos sob cultura anual, mata natural e pastagem, verificaram a faixa de pressão que pode ser aplicada aos solos sob cultura anual, na zona de friabilidade. Os autores verificaram que as pressões variaram de 154 a 167 kPa para um Latossolo Vermelho-Amarelo, 77 a 183 kPa para um Latossolos Roxo e de 77 a 132 kPa para um Latossolo Vermelho-Escuro. Em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico, sob plantio direto e convencional, Silva et al. (2002a) observaram que o preparo do solo reduziu substancialmente a pressão de preconsolidação, verificando para diferentes faixas de densidade, valores de pressão de preconsolidação entre 62 e 132 kPa, no plantio direto, e 15 e 74 kPa, no plantio convencional para o Argissolo, e 50 a 168 kPa, no plantio direto, e 68 a 164 kPa, no plantio convencional para o Latossolo. Oliveira et al. (2003) verificaram, em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa sob vários sistemas de uso e manejo, que a pressão de preconsolidação aumentou significativamente à medida que o solo se tornava seco. Imhoff et al. (2003) relatam uma pressão de preconsolidação média de 138 kPa para um solo cultivado há 20 anos com cana-de-açúcar. Avaliando a heterogeneidade da compactação em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob pomar de laranja, Lima et al. (2004a) observaram em amostras de solo equilibradas no potencial de -10 kPa valores de pressão de preconsolidação de 316 kPa na projeção da copa da laranjeira, 309 e 298 kPa no rodado e entre rodado do trator e 174 kPa na linha de cultivo. Em um Argissolo Vermelho eutrófico típico sob cultivo de pasto, foi verificado por Lima et al. (2004b)

pressão de preconsolidação igual a 268 e 246 kPa, respectivamente, para área sob pastejo irrigado e não irrigado, em amostras equilibradas no potencial de -10 kPa.

Estudando a compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso, Oliveira et al. (2003) mostraram que as tensões de água e os sistemas de uso ou manejo do solo influenciaram nas deformações do solo, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso da umidade do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas.

Tão importante quanto o impacto sobre a pressão de preconsolidação causado no momento do preparo do solo por parte dos órgãos ativos dos implementos é a influência dos tráfegos subseqüentes, que elevam de forma significativa a pressão de preconsolidação, comprometendo a estrutura do solo (Silva et al., 2003).

4.2. OBJETIVOS GERAIS

Avaliar alguns parâmetros físico-mecânicos de Argissolos e Latossolos, estando estes sob diferentes manejos, em propriedades agrícolas.

4.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar a curva de compressão para diferentes solos e relacioná-la com a umidade, o grau de saturação e a densidade do solo no início e ao final do teste de compressão.

Determinar a pressão de preconsolidação e a suscetibilidade do solo à compactação.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram coletadas amostras em seis solos do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo. Em alguns solos, a coleta foi realizada na cabeceira/viradouro da área de plantio com o objetivo de obter amostras com níveis mais elevados de compactação.

4.4.1. Solos e manejos estudados

A classificação dos solos estudados, de acordo com EMBRAPA (1999) e a classificação regional segundo Brasil (1973) e Streck et al. (2002), e seus respectivos manejos foram os seguintes:

Argissolo Vermelho distrófico arênico (unidade de mapeamento São Pedro): solo coletado em parcela experimental e área de produção do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Município de Santa Maria (RS). Localização geográfica: 29° 41" de latitude Sul e 53° 48' de longitude Oeste de Greenwich, e 151 m de altitude.

- ✓ parcela experimental na qual recebeu escarificação no ano de 2002 e plantio direto nos anos seguintes, e anterior à escarificação se encontrava há aproximadamente 8 anos sob plantio direto (Escarif);
- ✓ área de produção há 12 anos sob plantio direto (PD);
- ✓ cabeceira/viradouro da área há 12 anos sob plantio direto (PDC).

Argissolo Vermelho distrófico latossólico (unidade de mapeamento Alto das Canas): solo coletado em duas propriedades no Município de São Sepé (RS). Localização geográfica: 30° 09" de latitude Sul e 53° 33' de longitude Oeste de Greenwich, e 85 m de altitude.

- ✓ propriedade 1: quatro anos sob plantio direto, sendo pastagem cultivada anterior ao início do sistema de plantio direto (PD);
- ✓ cabeceira/viradouro da propriedade 1 (PDC 1);
- ✓ propriedade 2: cultivo de batata em 2002 e plantio direto nos anos seguintes (Batata);

- ✓ propriedade 2: cabeceira/viradouro de área há quatro anos sob plantio direto (PDC 2).

Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (unidade de mapeamento Júlio de Castilhos): solo coletado em duas propriedades no Município de Itaara (RS). Localização geográfica: 29° 36' de latitude Sul e 53° 45' de longitude Oeste de Greenwich, e 425 m de altitude.

- ✓ propriedade 1: plantio convencional de 1980 a 1995, e plantio direto nos anos seguintes (PD 1);
 - ✓ cabeceira/viradouro da propriedade 1 (PDC);
 - ✓ propriedade 2: plantio direto desde 1986 e no inverno há pastejo animal por 90 dias em azevém semeado na área e colhido (PD 2);
 - ✓ propriedade 2: plantio de batata com revolvimento do solo em 1998, escarificação em 2000, e plantio direto nos anos seguintes (Batata).

Latossolo Vermelho distrófico típico (unidade de mapeamento Passo Fundo): solo coletado em duas propriedades no Município de Ibirubá (RS). Localização geográfica: 28° 37' de latitude Sul e 53° 05' de longitude Oeste de Greenwich, e 416 m de altitude.

- ✓ propriedade 1: escarificação no inverno de 2002 e plantio direto nos anos seguintes (PD 1);
 - ✓ cabeceira/viradouro da propriedade 1 (PDC 1);
 - ✓ propriedade 2: escarificação no inverno de 2000 e plantio direto nos anos seguintes (PD 2);
 - ✓ cabeceira/viradouro da propriedade 2 (PDC 2).

Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (unidade de mapeamento Erechim): solo coletado em três propriedades no Município de Campinas do Sul (RS). Localização geográfica: 27° 42' de latitude Sul e 52° 37' de longitude Oeste de Greenwich, e 583 m de altitude.

- ✓ propriedade 1: plantio direto há 10-12 anos (PD 1);
- ✓ propriedade 1: plantio direto há 10-12 anos e recebeu escarificação no inverno de 2003 e posterior semeadura de aveia (Escarif);
- ✓ propriedade 2: pasto cultivado no inverno (Pasto);

- ✓ propriedade 2: plantio direto há 10 anos (PD 2);
- ✓ propriedade 3: plantio direto há 10-12 anos (PD 3);
- ✓ cabeceira/viradouro da propriedade 3(PDC).

Latossolo Vermelho distroférico típico (unidade de mapeamento Santo Ângelo): solo coletado em parcelas experimentais instaladas na COTRIJUI (Cooperativa dos Triticultores de Ijuí), Município de Ijuí (RS). Localização geográfica: 28° 23' de latitude Sul e 53° 54' de longitude Oeste de Greenwich, e 215 m de altitude.

- ✓ plantio direto há seis anos + 4 passadas de máquina de 10 Mg no verão do ano agrícola 2003/2004 para compactar o solo (PDC);
- ✓ plantio direto há seis anos (PD);
- ✓ plantio direto há seis anos e escarificação no ano agrícola 2003/2004 (Escarif).

Durante a realização deste estudo, com exceção do manejo Escarif do Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) que apresentava a cultura do feijão na área, os demais manejos estavam com a cultura da soja implantada na área.

A análise granulométrica dos solos em estudo para as camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20, 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m se encontram na Tabela 1 para os Argissolos e Tabela 2 para os Latossolos. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), com 3 repetições. A dispersão das amostras de solo foi por meio de agitação horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de 1,11 g cm⁻³ (Suzuki et al., 2004a; Suzuki et al., 2004b).

Tabela 1 - Análise granulométrica nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para os Argissolos em estudo.

Profundidade (m)	Areia			Silte	Argila
	Total	Grossa	Fina		
g kg⁻¹					
Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)					
0-0,05	674	202	471	240	86
0,05-0,10	660	196	464	237	103
0,10-0,15	655	187	468	253	92
0,15-0,20	654	189	465	256	90
0,20-0,25	653	204	449	253	94
0,25-0,30	669	201	469	244	87
Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas)					
0-0,05	439	252	187	350	211
0,05-0,10	408	246	162	326	267
0,10-0,15	399	245	155	342	259
0,15-0,20	389	241	149	336	275
0,20-0,25	358	219	139	323	318
0,25-0,30	354	214	141	308	338
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos)					
0-0,05	161	55	106	503	336
0,05-0,10	149	54	95	468	383
0,10-0,15	146	57	89	458	395
0,15-0,20	144	59	85	443	413
0,20-0,25	133	55	78	442	425
0,25-0,30	123	51	72	428	449

Tabela 2 - Análise granulométrica nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para os Latossolos em estudo.

Profundidade (m)	Areia			Silte	Argila
	Total	Grossa	Fina		
g kg ⁻¹					
Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo)					
0-0,05	345	119	226	226	428
0,05-0,10	335	116	219	225	440
0,10-0,15	338	112	226	210	452
0,15-0,20	338	116	222	202	460
0,20-0,25	312	111	201	196	492
0,25-0,30	297	108	189	199	505
Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim)					
0-0,05	127	13	114	368	505
0,05-0,10	120	10	109	352	528
0,10-0,15	121	11	109	340	539
0,15-0,20	120	11	110	333	546
0,20-0,25	118	10	109	338	543
0,25-0,30	76	7	69	312	612
Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo)					
0-0,05	94	24	70	266	640
0,05-0,10	88	23	65	256	656
0,10-0,15	84	23	62	257	658
0,15-0,20	82	23	60	267	651
0,20-0,25	83	22	61	263	654
0,25-0,30	82	20	62	254	664

4.4.2. Coleta das amostras de solo

A coleta dos solos em estudo foi realizada no primeiro semestre de 2004. Para cada condição de coleta foram abertas três trincheiras, próximas uma da outra para evitar a variabilidade entre as amostras e, em cada trincheira, foram coletadas duas repetições, totalizando seis repetições para cada condição de manejo.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas em cilindros com altura de 2,50 cm e diâmetro de 6,10 cm, na camada de 0,08-0,13 m, onde freqüentemente é relatada presença de maior estado de compactação.

4.4.3. Teste de compressão uniaxial

Após o preparo das amostras, elas foram saturadas por capilaridade e, em seguida equilibradas à tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa. Dentro de cada carregamento, utilizou-se um intervalo de tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga. Foi utilizado o consolidômetro de marca Boart Longyear com aplicação de pressão por meio de ar comprimido.

Com base no deslocamento vertical medido no consolidômetro após a aplicação de cada carga, foram calculados por meio dos programas computacionais Compress (Reinert et al., 2003) e planilha eletrônica Excel a densidade do solo, inicial (D_{si}) e final (D_{sf}), índice de vazios, porosidade total, deformação (Def) e deformação relativa, umidade volumétrica e grau de saturação da amostra de solo antes (G_{si}) e após cada aplicação de carga, e a umidade gravimétrica e volumétrica inicial (θ_{vi}). A pressão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressão (C_c) do solo foram determinados pelo método de Casagrande (1936) (Holtz & Kovacs, 1981) com ajuste manual (método 2) no programa computacional Compress (Reinert et al., 2003).

As curvas de compressão foram plotadas com dados observados e, para eliminar o efeito da compactação inicial do solo, as curvas de compressão foram normalizadas, dividindo a densidade do solo ao final da aplicação de cada carga no teste de compressão pela densidade inicial (D_s/D_{si}).

4.4.4. Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando delineamento inteiramente casualizado pelo teste Diferença Mínima Significativa (DMS) a 5% de significância.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Compressão dos Argissolos

O manejo do solo no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) causou diferenças na Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi e Cc, no Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) causou diferenças na Dsi, Def, θ_{vi} , Gsi e Cc, e no Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (u.m. Júlio de Castilhos) causou diferenças no Gsi e Cc.

O Argissolo Vermelho distrófico arênico apresentou maior densidade do solo (Dsi) no PD, atribuído ao acúmulo de pressões no solo durante os 12 anos neste sistema de manejo (Tabela 3). O manejo Escarif obteve maior densidade ao final do teste de compressão (Dsf), acarretando uma maior deformação do solo (Def), porém, essa deformação não diferiu estatisticamente do PDC.

No Argissolo Vermelho distrófico arênico, embora a densidade inicial do PDC tenha sido menor em relação ao PD, os valores de umidade volumétrica (θ_{vi}) e grau de saturação (Gsi) foram maiores, fato que pode ser atribuído a maior quantidade de microporos nesse manejo, conseguindo reter mais água, e sob maior tensão em condições de mesma umidade (Tabela 3). Koolen (1994) diz que durante a compactação, geralmente, a água no solo não é deslocada além de macro-distâncias, mas o potencial é alterado.

Tabela 3 - Valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc para o Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) e Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) e seus manejos.

Manejo	Dsi (Mg m ⁻³)	Dsf	Def (cm)	θ_{vi} (m ³ m ⁻³)	Gsi (%)	σ_p (kPa)	Cc
Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)							
PD	1,69 A	1,85 AB	0,213 B	0,12 B	34,38 B	97,1 A	0,10 B
PDC	1,55 B	1,82 B	0,368 A	0,20 A	50,87 A	81,3 A	0,18 A
Escarif	1,59 B	1,90 A	0,413 A	0,13 B	35,84 B	102,3 A	0,22 A
Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas)							
PD	1,58 B	1,89 A	0,412 B	0,24 A	63,90 AB	120,6 A	0,21 A
PDC 1	1,68 A	1,91 A	0,306 C	0,24 A	71,71 A	100,7 A	0,13 B
Batata	1,52 B	1,89 A	0,504 A	0,23 A	57,04 B	88,5 A	0,25 A
PDC 2	1,60 AB	1,92 A	0,414 B	0,20 B	56,18 B	133,1 A	0,22 A
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos)							
PD 1	1,51 A	1,77 A	0,364 A	0,32 A	82,47 AB	119,5 A	0,20 B
PDC	1,46 A	1,74 A	0,406 A	0,33 A	78,69 B	116,3 A	0,23 B
PD 2	1,50 A	1,76 A	0,325 A	0,34 A	86,70 A	122,7 A	0,20 B
Batata	1,44 A	1,79 A	0,346 A	0,32 A	75,29 B	132,9 A	0,29 A

Médias seguidas de letras iguais para cada solo, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%. Dsi = densidade do solo antes à aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

A pressão de preconsolidação (σ_p) não diferiu entre os manejos e a suscetibilidade à compactação, representada pelo índice de compressão do solo (Cc), foi maior no Escarif e não diferiu do PDC no Argissolo Vermelho distrófico arênico (Tabela 3). Silva et al. (2002a), trabalhando com várias classes de

densidade do solo, verificou, para este mesmo Argissolo, que o revolvimento do solo diminuiu substancialmente a pressão de preconsolidação comparado ao sistema de plantio direto, fato que não foi observado neste trabalho talvez pelas classes de densidade utilizadas serem menores.

O Argissolo Vermelho distrófico latossólico apresentou maior densidade inicial (D_{si}) nos manejos PDC 1 e PDC 2 (Tabela 3). A maior densidade nestes manejos é reflexo do maior tráfego de máquinas nos viradouros/cabeceiras das lavouras. A densidade final (D_{sf}) não diferiu entre os manejos e a maior deformação (Def) foi obtida no manejo que utilizou a cultura da batata (Batata), manejo que apresentou menor densidade inicial. A menor deformação foi obtida no PDC 1, manejo com maior densidade inicial. A menor umidade volumétrica (θ_{vi}) foi obtida no PDC 2 e o maior grau de saturação (G_{si}) no PDC 1.

Embora o manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) tenha apresentado menor pressão de preconsolidação (σ_p) e o PD a maior no Argissolo Vermelho distrófico latossólico, este parâmetro não diferiu estatisticamente entre os manejos (Tabela 3). O PDC 1 apresentou menor índice de compressão (C_c) e deformação do solo.

No Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico, as densidades (D_{si} e D_{sf}), deformação (Def), umidade volumétrica (θ_{vi}) e pressão de preconsolidação (σ_p) não diferiram estatisticamente entre os manejos (Tabela 3). O menor grau de saturação (G_{si}) e maior suscetibilidade à compactação (C_c) foi obtido no manejo que utilizou a cultura da batata (Batata), fato relacionado ao revolvimento do solo para plantio de batata e escarificação em 2000, deixando o solo menos estruturado e com menor estado de compactação inicial. As menores diferenças no comportamento compressivo deste Argissolo, devem-se, principalmente, às menores diferenças do estado inicial de compactação associado aos manejos amostrados neste solo.

Pela curva de compressão dos manejos no Argissolo Vermelho distrófico arênico observou-se acentuado aumento da densidade na curva do manejo Escarif, mostrando elevada deformação deste solo (Figura 1a). Mesmo normalizando a curva de compressão o manejo Escarif apresenta um acentuado deslocamento para densidades mais elevadas (Figura 1b). A curva de compressão normalizada do manejo PD apresenta um baixo deslocamento para elevados valores de densidade, mostrando sua menor suscetibilidade à compactação (Figura 1b).

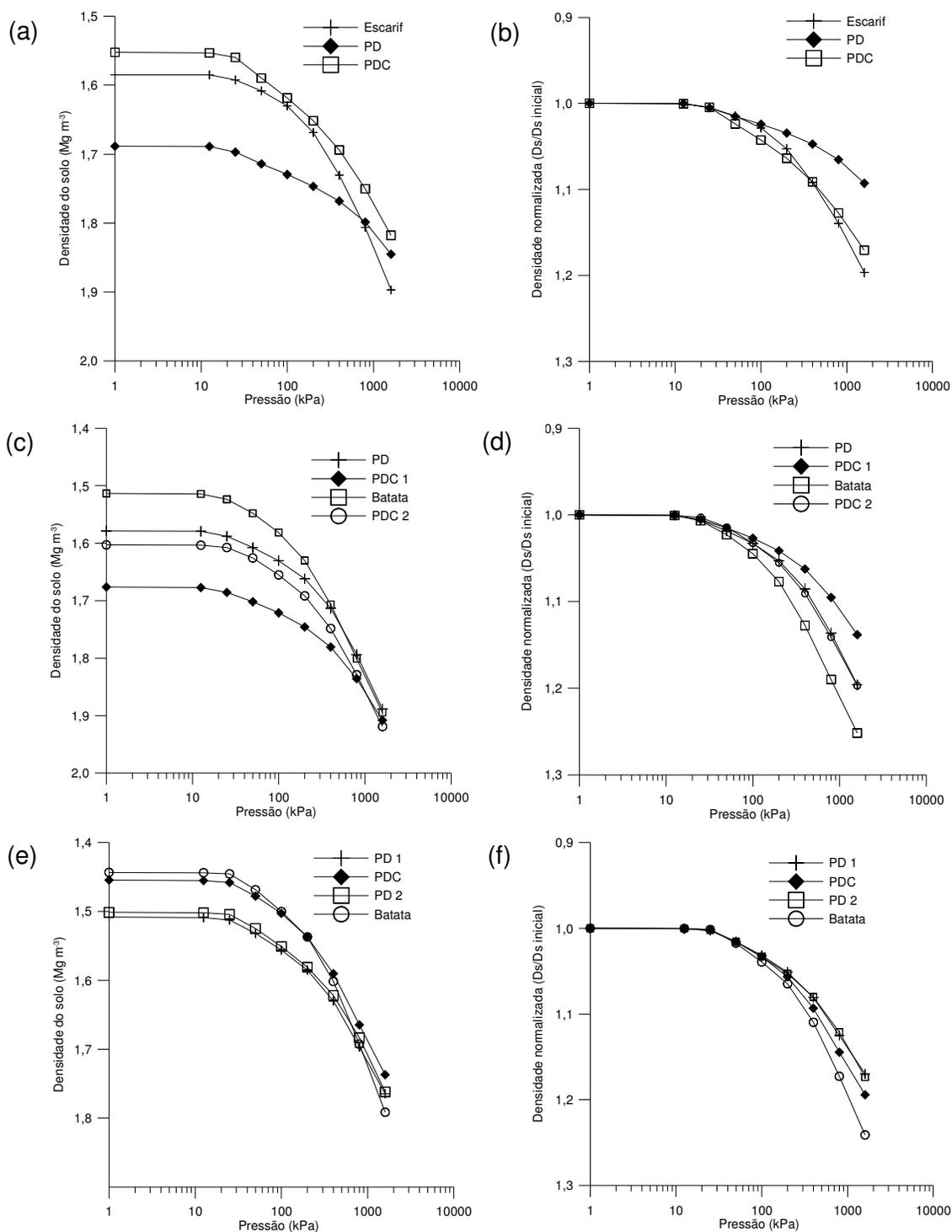


Figura 1 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os manejos no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a, b), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) (c, d) e Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) (e, f).

A curva de compressão para os manejos no Argissolo Vermelho distrófico latossólico mostra o deslocamento acentuado para maiores densidades da curva do manejo Batata, e a do PDC 1 apresenta menor deslocamento (Figura 1c). Isolando o efeito da compactação inicial do solo, ou seja, normalizando as curvas, o comportamento dos manejos é o mesmo, o manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) e o PDC 1, respectivamente, apresentam a maior e menor suscetibilidade à compactação (Figura 1d).

A curva de compressão dos manejos no Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico se agruparam em dois comportamentos distintos, o PDC e o manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) apresentaram a maior deformação e o PD 1 e PD 2 a menor (Figura 1e). Mesmo apresentando diferenças nas curvas, a deformação e a pressão de preconsolidação não foram distintas (Tabela 3). Normalizando as curvas, o PD 1 e PD 2 foram semelhantes, enquanto que o manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) apresentou acentuada deformação (Figura 1f).

4.5.2. Compressão dos Latossolos

No Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) houve significância para Dsi, Dsf, Def, Gsi e Cc; no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) foram significativos Dsi, Dsf, θ_{vi} e Gsi, e no Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo) todos os parâmetros avaliados (Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc) foram significativos.

A densidade inicial (Dsi) no Latossolo Vermelho distrófico típico foi maior nos manejos há quatro anos sob plantio direto (PD 2 e PDC 2), possivelmente pelo maior tempo de acúmulo de pressões nestes manejos em relação ao plantio direto há 2 anos (PD 1 e PDC 1) (Tabela 4). A densidade final (Dsf) também foi maior no plantio direto há 4 anos (PD 2 e PDC 2), mas a deformação do solo (Def) foi menor no PDC 2, diferindo dos demais manejos. A menor deformação no PDC 2 pode estar associada à sua maior compactação inicial, mensurada pela sua densidade inicial.

Para o Latossolo Vermelho distrófico típico o PDC 2 apresentou maior grau de saturação inicial (Gsi), fato que pode estar relacionado à sua maior densidade inicial (Tabela 4). A suscetibilidade do solo à compactação, medida pelo índice de compressão (Cc), aumentou entre os manejos de acordo com decréscimo da

densidade inicial. Sistemas de manejo com histórico de acúmulo de pressões há mais tempo (PD 2 e PDC 2) foram menos suscetíveis à compactação.

No Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, a maior e menor densidade inicial (D_{si}) foram obtidas no PD 1 e PD 3, respectivamente, e a maior densidade final (D_{sf}) obtida no solo com pasto no inverno (Pasto) (Tabela 4). A deformação do solo (Def) não diferiu entre os manejos, embora suas densidades inicial e final tenham diferido. A maior deformação é evitada em alguns desses manejos pela maior resistência à deformação de seus agregados, que é explicada, dentre outros fatores, pelo maior teor de carbono orgânico (Silva et al., 2000; Oliveira et al., 2003).

Embora os sistemas de manejo em plantio direto no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (PD 1, PD 2, PD 3 e PDC) tenham aproximadamente o mesmo tempo sob este manejo, o número de vezes e a umidade em que o solo foi trafegado, o peso das máquinas e de implementos, pressão e tipo de pneu utilizado, manejo dado às culturas, número de cultivos e espécies utilizadas podem diferir entre eles, fato que explica as diferenças significativas em alguns parâmetros físicos do solo. Segundo Torres et al. (1993), a intensidade de compactação nos solos agrícolas é resultante das características de cada solo, aliadas ao esforço de compactação dos veículos e implementos e teores de umidade do solo.

No Latossolo Vermelho distroférico típico, a densidade inicial (D_{si}) foi menor no Escarif, devido ao revolvimento do solo, e sua densidade final (D_{sf}) foi maior, resultando em deformação (Def) de 0,323 cm e 0,431 cm, respectivamente maior do que o PD e PDC (Tabela 4). As menores deformações foram observadas nos sistemas de manejo com maior histórico de acúmulo de pressões.

A umidade volumétrica (θ_{vi}) e grau de saturação (G_{si}) no Latossolo Vermelho distroférico típico foram menores no manejo Escarif, diferindo estatisticamente dos demais manejos, resultado atribuído à menor estruturação e agregação do solo (Tabela 4). Esse mesmo manejo apresentou a menor pressão de preconsolidação (σ_p) e a maior suscetibilidade à compactação (C_c), mostrando a baixa capacidade de suporte de carga e a fragilidade deste manejo à compactação. A menor suscetibilidade à compactação, embora não tenha diferido do PD, foi obtida no PDC, pela maior pressão já acumulada por este manejo devido à passada de máquina de 10 Mg para compactá-lo.

Tabela 4 - Valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc para o Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) e Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo) e seus manejos.

Manejo	Dsi (Mg m ⁻³)	Dsf	Def (cm)	θ_{vi} (m ³ m ⁻³)	Gsi (%)	σ_p (kPa)	Cc
Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo)							
PD 1	1,39 C	1,71 B	0,479 A	0,32 A	71,71 B	102,2 A	0,29 A
PDC 1	1,42 C	1,72 B	0,441 A	0,33 A	75,88 B	136,7 A	0,25 AB
PD 2	1,50 B	1,81 A	0,437 A	0,32 A	75,31 B	106,4 A	0,23 B
PDC 2	1,60 A	1,82 A	0,307 B	0,32 A	84,41 A	121,4 A	0,16 C
Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim)							
PD 1	1,50 A	1,84 AB	0,453 A	0,38 AB	80,23 A	100,6 A	0,26 A
Escarif	1,43 ABC	1,73 C	0,438 A	0,39 A	80,86 A	121,5 A	0,28 A
PD 2	1,41 ABC	1,70 C	0,426 A	0,33 BC	68,09 B	125,2 A	0,29 A
Pasto	1,46 AB	1,86 A	0,396 A	0,31 C	64,60 B	124,8 A	0,35 A
PD 3	1,33 C	1,77 BC	0,429 A	0,33 BC	64,55 B	96,1 A	0,39 A
PDC	1,38 BC	1,72 C	0,485 A	0,43 A	82,80 A	134,4 A	0,32 A
Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo)							
PDC	1,49 A	1,67 AB	0,272 B	0,38 A	86,08 A	130,4 AB	0,17 B
PD	1,40 A	1,65 B	0,380 B	0,37 A	77,84 A	167,1 A	0,27 B
Escarif	1,21 B	1,69 A	0,703 A	0,32 B	58,34 B	101,1 B	0,49 A

Médias seguidas de letras iguais para cada solo, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%. Dsi = densidade do solo antes à aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

Nas curvas de compressão dos manejos no Latossolo Vermelho distrófico típico, notou-se que o PD 2 apresentou uma densidade inicial menor que o PDC 2, mas após aplicação da carga final, praticamente, apresentam a mesma densidade (Figura 2a). Normalizando as curvas de compressão, verificou-se menor deformação no solo submetido ao PDC2 (Figura 2b).

Nas curvas de compressão dos manejos no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, observou-se acentuada curvatura do manejo PD 3 (Figura 2c) e, normalizando as curvas, os maiores valores de densidade, tornam-se mais visíveis, mostrando sua suscetibilidade à compactação (Figura 2d). O manejo com pasto no inverno (Pasto) apresentou um deslocamento intermediário da sua curva de compressão normalizada, e os demais manejos apresentaram deslocamento semelhante entre si.

A alta suscetibilidade à compactação do manejo Escarif no Latossolo Vermelho distroférico típico pode ser visualizada nas curvas de compressão, que apresentam um acentuado deslocamento da sua curva para densidades mais elevadas, enquanto que o deslocamento das curvas do PD e PDC é mais suave (Figuras 2e, 2f).

As compressibilidades dos diferentes solos evidenciam que os sistemas de manejo com densidade inicial (D_{si}) mais elevada apresentaram menor deformação. De modo geral, esses foram os manejos de sistema de plantio direto, que apresentam compactação mais superficial, próxima aos 0,10 m, profundidade onde as amostras foram coletadas para o teste de compressão. Essa maior densidade inicial e conseqüente menor deformação (Def) é resultado do acúmulo de pressões que o solo já sofreu e que continua sofrendo pelo tráfego de máquinas. Os manejos com menor estado de compactação apresentaram maior deformação e mostraram serem mais suscetíveis à compactação. Guérif (1994) afirma que a deformação do solo pode ocorrer quando as partículas são capazes de se separar e mover em direção a outra, e tais movimentos são limitados pela fricção e ligações entre partículas. Quanto mais denso o solo e mais arranjadas as partículas, maiores as forças de fricção, principais responsáveis pela resistência.

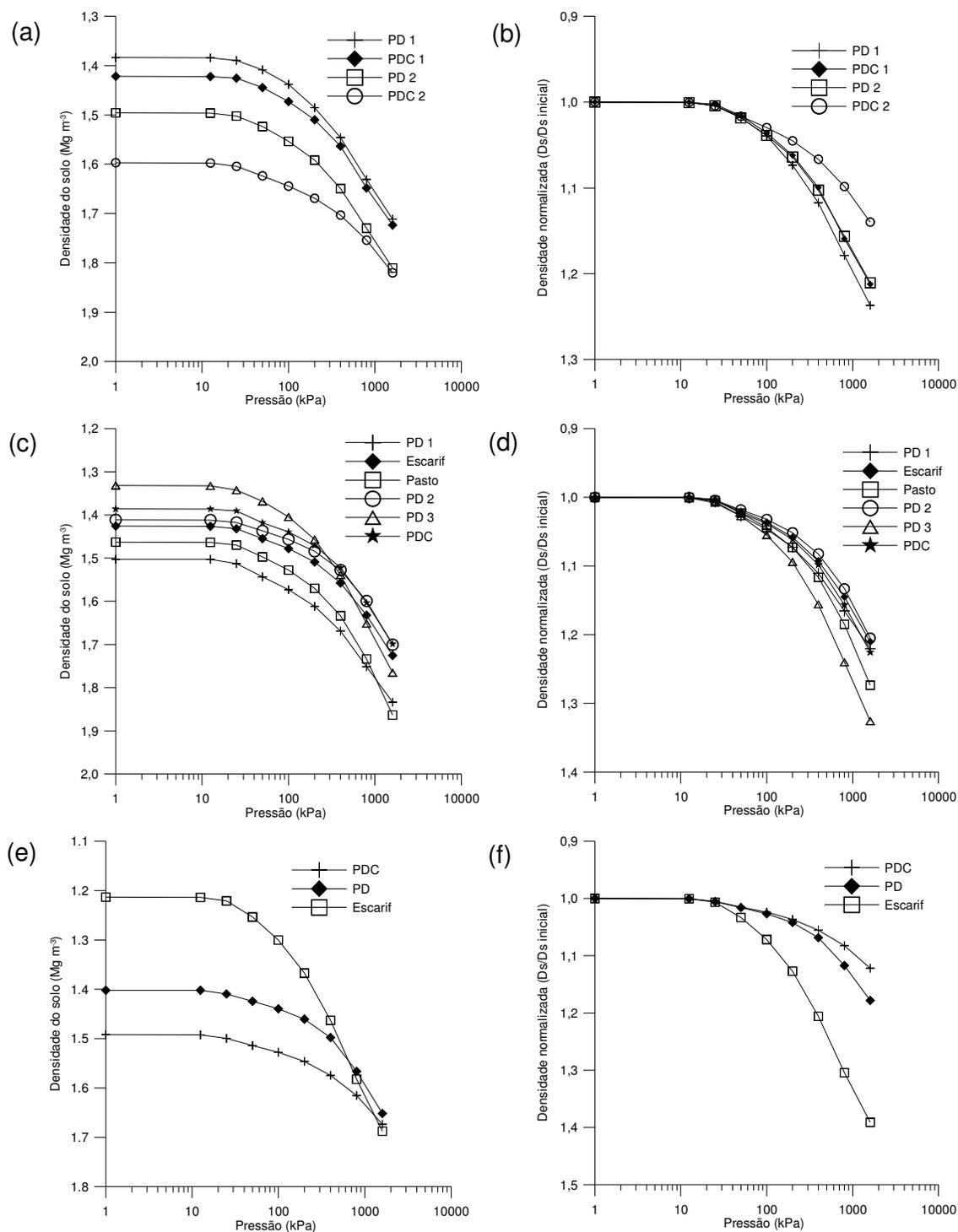


Figura 2 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os manejos no Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) (a, b), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) (c, d) e Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo) (e, f).

A umidade do solo tem grande importância na capacidade do solo em suportar pressões. Para esses manejos em estudo o grau de saturação (G_{si}) e a umidade volumétrica (θ_{vi}) não mostraram grande influência na pressão de preconsolidação por que as amostras foram equilibradas a uma mesma tensão; portanto, a variação de umidade e grau de saturação entre os manejos no mesmo solo foi baixa. Silva et al. (2002a) verificaram em um Argissolo e um Latossolo que o aumento do grau de saturação inicial tornou o solo menos resistente, para densidade do solo maior que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que para densidades menores os valores de pressão de preconsolidação aproximaram-se consideravelmente.

Silva et al. (2002a), trabalhando em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, isolou o efeito da umidade do solo e observou que a pressão de preconsolidação sofreu influência do estado de compactação e do manejo do solo, e o índice de compressão foi influenciado pelo estado de compactação, profundidade e manejo do solo. Segundo esses autores, quanto maior o estado de compactação, maior sua resistência às pressões externas, fenômeno que pode ser atribuído, segundo eles, à maior resistência dos pontos de contato entre as partículas unitárias, geralmente o mineral quartzo, e ao alto grau de empacotamento entre as partículas em razão da alta densidade do solo.

Sistemas de manejo que apresentaram revolvimento do solo mostraram um maior deslocamento de suas curvas de compressão normalizadas, devido seus menores valores de densidade inicial, evidenciando a suscetibilidade desses sistemas de manejo à compactação. Silva et al. (2002a) verificaram maior curvatura da curva de compressão em solos menos compactados.

Os sistemas de manejo com menor densidade inicial (menos compactados) mostraram-se mais suscetíveis à compactação, fato que pode ser atribuído ao maior espaço de vazios e, como consequência, ao menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, resultando em menor atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo (Silva et al., 2002a). Silva et al. (2002b) também observaram menor índice de compressão com aumento da densidade do solo para um Argissolo e um Latossolo.

O revolvimento do solo resultou em menor densidade inicial, porém ocasionou uma menor pressão de preconsolidação (σ_p) em alguns casos e maior índice de compressão (C_c), ocasionando deformações plásticas com aplicação de pequenas pressões no solo e maior inclinação da reta virgem de compressão (Silva et al.

2002a). A dependência da pressão de preconsolidação da densidade inicial do solo foi mencionada por vários autores (Reinert, 1990; Imhoff et al., 2001).

4.5.3. Compressão de Argissolos e Latossolos

Com o objetivo de observar o comportamento dos parâmetros em avaliação em relação ao teor de argila dos solos, foi selecionado dentro de cada solo em estudo um sistema de manejo que apresentasse maior tempo sob plantio direto. Comparando estes sistemas de manejo, todos os parâmetros avaliados (D_{si} , D_{sf} , Def , θ_{vi} , G_{si} , σ_p e C_c) foram significativos.

Os manejos estudados apresentaram decréscimo da densidade inicial (D_{si}) com o aumento do teor de argila, e a densidade final do solo (D_{sf}) foi menor no manejo do solo mais argiloso (Tabela 5).

O manejo no solo mais arenoso (Argissolo Vermelho distrófico arênico) apresentou menor deformação (Def), fato relacionado ao estado de compactação inicial do solo (representado pela densidade inicial do solo) e sua densidade final e pela umidade do solo no momento da aplicação da carga, pois quanto menor a umidade do solo, menor sua suscetibilidade à compactação (Tabela 5). Quanto maior o estado de compactação inicial do solo, densidade do solo mais elevada, menor sua deformação. Horn & Lebert (1994) dizem que a compressibilidade do solo, definida como sendo a resistência do solo em diminuir seu volume quando submetido a uma pressão é menos pronunciada em solos com estrutura grosseira e menos agregados e, dentre os fatores de que depende a resistência do solo se encontram a distribuição do tamanho de partículas, tipo de argilo-mineral, conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, distribuição de raízes, densidade do solo, distribuição do tamanho de poros e continuidade destes no solo e nos agregados simples e conteúdo de água e/ou potencial de água. De acordo com Lima et al. (2004a), solos com estrutura grosseira apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação).

Os manejos nos solos mais argilosos (Latosolo Vermelho aluminoférrico típico e Latossolo Vermelho distroférrico típico) apresentaram maior umidade volumétrica (θ_{vi}), diminuindo esta umidade com decréscimo da argila no solo (Tabela 5), pois em solos argilosos ocorre maior força de retenção da água pela maior microporosidade.

Os manejos nos solos mais arenosos (Argissolo Vermelho distrófico arênico e Argissolo Vermelho distrófico latossólico) apresentaram grau de saturação inicial (Gsi) menores que os demais solos.

Tabela 5 - Valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc para seis solos do Rio Grande do Sul.

Solo/ Manejo	Dsi (Mg m⁻³)	Dsf	Def (cm)	θ_{vi} (m³ m⁻³)	Gsi (%)	σ_p (kPa)	Cc
SP/PD	1,69 A	1,85 B	0,213 C	0,12 D	34,38 C	97,1 C	0,10 C
AC/PDC2	1,60 B	1,92 A	0,414 AB	0,20 C	56,18 B	133,1 B	0,22 AB
JC/PD1	1,51 C	1,76 C	0,363 B	0,32 B	82,47 A	119,5 BC	0,20 B
PF/PD2	1,50 C	1,81 B	0,437 AB	0,31 B	75,31 A	106,4 BC	0,23 AB
ER/PD1	1,50 C	1,83 B	0,453 A	0,38 A	80,22 A	100,6 C	0,26 AB
SA/PD	1,40 D	1,65 D	0,380 AB	0,37 A	77,84 A	167,1 A	0,27 A

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%. SP/PD = Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)/área há 12 anos sob plantio direto; AC/PDC2 = Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas)/cabeceira de área há quatro anos sob plantio direto; JC/PD 1 = Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico/plantio convencional de 1980 a 1995, e plantio direto nos anos seguintes; PF/PD2 = Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo)/escarificação no inverno de 2000 e plantio direto nos anos seguintes; ER/PD1 = Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim)/plantio direto há 10-12 anos; SA/PD = Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo)/plantio direto há seis anos; Dsi = densidade do solo antes à aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

A maior pressão de preconsolidação (σ_p), que é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo, foi obtida no manejo no solo argiloso (Latossolo Vermelho distroférico típico), e o índice de compressão (Cc) mostrou menor suscetibilidade à compactação (representado pelo menor índice de compressão) no manejo no solo arenoso (Argissolo Vermelho distrófico arênico) (Tabela 5). Silva et al. (2002b) também verificaram que um Latossolo Vermelho distrófico típico textura

argilosa apresentou maior capacidade de suportar cargas do que um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico mas foi mais suscetível à compactação. Torres et al. (1993) afirmam que os solos formados por partículas de diferentes tamanhos normalmente são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores. Segundo Horn & Lebert (1994), com aumento das pressões, a magnitude das mudanças no índice de vazios ou densidade depende da distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, potencial de água, conteúdo de matéria orgânica e agregação do solo (fatores internos). A uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, amostras de solo são mais compressivas quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, amostras de solo são mais compressivas quanto menor a densidade e menor o potencial de água.

O aumento da suscetibilidade à compactação do solo com aumento da argila nos solos foi observado por Larson et al. (1980), estudando solos com estrutura não preservada, e Imhoff et al. (2003) estudando solos com estrutura preservada. Larson et al. (1980) e Imhoff et al. (2003) verificaram aumento linear do índice de compressão até o conteúdo de argila de aproximadamente 33% e 30%, respectivamente, e depois o índice de compressão manteve-se constante. Nessas condições de estudo não foi observado tal comportamento, o índice de compressão aumentou com aumento da argila, e não manteve-se constante com teor de argila superior a 30 ou 33%. Mitchell *apud* Larson et al. (1980) relatou que quando o teor de argila é maior que aproximadamente 33%, os solos são essencialmente uma matriz argilosa com material grosseiro embutido na argila, afirmando ser, por isso, razoável que o índice de compressão do solo seja aproximadamente constante em teores de argila maior que 33%.

O solo argiloso (Latosolo Vermelho distroférico típico), devido à sua maior capacidade de retenção de água, mostrou ser o solo que necessita de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresenta maior índice de compressão, portanto, maior suscetibilidade à compactação adicional quando cargas superiores às que o solo já sofreu são aplicadas ao solo. A água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo que irá atuar como um lubrificante, facilitando o deslocamento e rearranjo das partículas nos vazios do solo (Silva et al. (2000).

Silva et al. (2002b) afirmam que, especialmente para solos argilosos deve-se ter cuidado para evitar o tráfego excessivo sobre o solo úmido.

Na curva de compressão normalizada, isolando o efeito da compactação inicial dos solos, notou-se que com o aumento das pressões aplicadas há um deslocamento entre as curvas, resultando em menor deslocamento para o solo arenoso (Argissolo Vermelho distrófico arênico), e maior para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (Figura 3).

O maior incremento na densidade e os valores elevados de densidade do solo na região da curva posterior à pressão de preconsolidação nos manejos estudados implicam em alterações significativas na estrutura do solo.

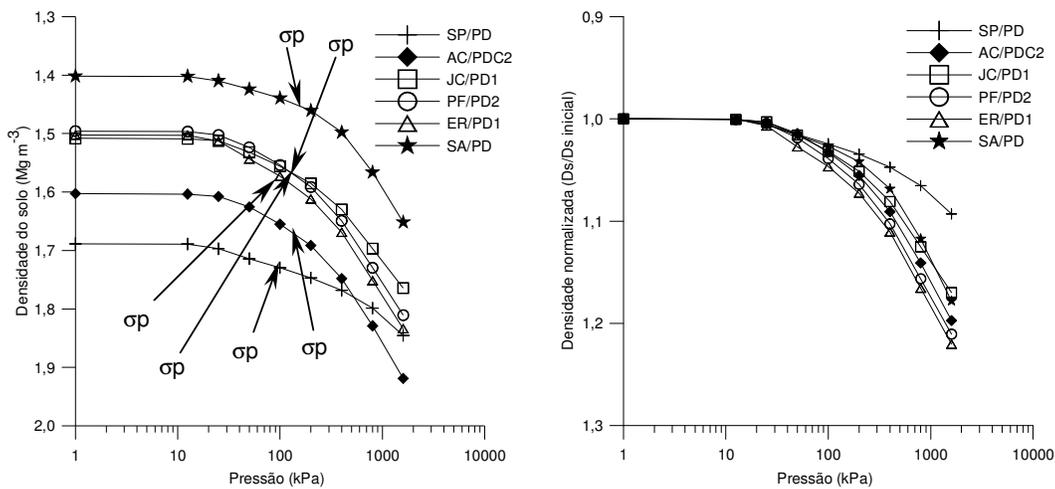


Figura 3 - Curva de compressão (esquerda) e curva de compressão normalizada (direita) para os solos em estudo.

4.6. CONCLUSÕES

Manejos com maior estado de compactação inicial (maior densidade do solo) ou com histórico de acúmulo de pressões há mais tempo apresentaram menor deformação (Def) e menor suscetibilidade à compactação (Cc).

Sistemas de manejo com revolvimento do solo recente apresentaram maior deslocamento de suas curvas de compressão, mostrando maior suscetibilidade à compactação desses sistemas de manejo.

O Latossolo Vermelho distroférico típico, pela capacidade de reter mais água a uma determinada tensão e pela maior suscetibilidade à compactação, necessita de maior cuidado com o tráfego de máquinas do que solos arenosos.

4.7. BIBLIOGRAFIA CITADA

ALLISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analyses**. Part 2. Madison, Wisconsin, USA, 1965. p.1367-1378.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 413p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, v.56, p.185-196, 2000.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: MA Harvard University, 1936. p.60-64.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

GUÉRIF, J. Effects of compaction on soil strength parameters. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 191-214.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.

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

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68 , p.17-24 , 2003.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 23-44.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.1127-1132, 1980.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.450-457, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v.19, p.275-286, 1991.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V.; LEÃO T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.409-414, 2004a.

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

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argilosos de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.773-781, 2003.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. 1990. 128f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Michigan State University, Michigan, 1990.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM)

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**, v.27, p.973-983, 2003.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I –Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002a.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002b.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 107p.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004a. (CD-ROM)

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004b. (CD-ROM)

TORRES, E.; ODILON, F.S.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71p. (Circular Técnica, 12).

5. CAPÍTULO II

ESTADO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO E RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA AFETADOS POR SISTEMAS DE MANEJO EM DISTINTOS SOLOS

5.1. INTRODUÇÃO

O uso de tratores e implementos agrícolas proporcionaram aumentos da produção, resultado de trabalho operacional e eficiente. No entanto, a mecanização é a responsável pela deterioração mais rápida das condições físicas do solo, sendo que o tráfego excessivo, sem o controle das diversas condições do solo, é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo (Beltrame & Taylor, 1980).

O estudo da compactação em solos com diferentes granulometrias, assim como vários níveis de umidade e de matéria orgânica, a fim de verificar em que condições ela ocorre de maneira mais acentuada, é de grande importância, especialmente relacionando-os ao seu manejo (Silva et al., 1986).

A compactação do solo e seus efeitos no rendimento das culturas tem aumentado, resultado do manejo reduzido do solo, uso de equipamentos grandes e com aumento da carga por eixo, e operações de campo quando o solo está úmido. Uma limitada compactação na superfície do solo é considerada benéfica para a semeadura porque promove um melhor contato semente-solo e rápida germinação, e reduz a taxa com que o solo seca. Compactação excessiva, no entanto, pode impedir o crescimento radicular, limitar a absorção de nutrientes, e causar estresse de umidade, resultando em redução no rendimento das culturas (Bicki & Siemens, 1991).

A intensidade e profundidade da camada compactada no solo dependem do peso e características dos implementos e dos veículos de tração utilizados no

preparo, fato que associado ao efeito das outras operações como semeadura, aplicação de defensivos e colheita mecanizada intensificam o problema de compactação. Geralmente, a utilização contínua de um só tipo de implemento, trabalhando sempre a uma mesma profundidade, tende a aumentar a compactação, principalmente quando o preparo é superficial, a velocidade de tração é excessiva e a umidade do solo é inadequada (Torres et al., 1993).

Das etapas do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e na drenagem, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos (Silva et al., 1994).

A compactação do solo pode modificar em diferentes graus algumas propriedades físicas do solo como umidade, aeração, temperatura e resistência mecânica. Essa mudança no ambiente físico do solo pode afetar propriedades biológicas e químicas específicas (Boone & Veen, 1994).

Considerável número de pesquisas de campo e laboratório têm sido realizadas no estudo da compactação nos solos agrícolas e suas conseqüências na produtividade das culturas (Gupta & Raper, 1994). Segundo Pedrotti & Dias Junior (1996), com a expansão da fronteira agrícola e o cultivo de basicamente duas culturas anuais, tem-se observado uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas para o manejo dos solos e culturas, fato que aliado à falta de critérios para o dimensionamento e escolha desses implementos, principalmente tratores, tem contribuído para um significativo aumento da área compactada, alterando de maneira prejudicial a relação solo-planta, podendo dificultar o desenvolvimento máximo da cultura.

A compactação do solo pode ocorrer tanto na superfície como no subsolo, devido principalmente ao tráfego de veículos em condições inadequadas de umidade e peso dos equipamentos. Por isso, a escolha do manejo e a tomada de decisão de quando as operações agrícolas devem ou não serem realizadas ainda permanecem como um grande dilema, devido a não conscientização dos efeitos e dos sintomas da compactação do solo pelos agricultores (Pedrotti & Dias Junior, 1996). Esses autores recomendam algumas práticas mecânicas para prevenir a compactação, tais como a utilização de máquinas e implementos que causem o mínimo de compactação do solo; controle e planejamento do trânsito de veículos na

área; redução do número de passagens de máquinas e implementos no solo; conduzir o trator em velocidades mais altas a fim de diminuir o tempo de compressão do terreno; optar por máquinas e operações alternativas que venham a diminuir ao máximo o contato do implemento com o solo; uso de ferramentas e implementos adequados para as operações a que se destinam, com o objetivo de obter um ótimo resultado com o mínimo de perturbação possível; trabalhar em profundidades diferenciadas com os implementos de preparo do solo; uso de sistemas de cultivo mínimo diminuindo o tráfego e evitando a maior mobilização do solo.

De acordo com Flowers & Lal (1998) na agricultura atual, a maior causa da compactação é o tráfego de máquinas. Segundo esses autores, uma consequência dos equipamentos pesados é o risco da compactação do solo com efeitos no crescimento radicular, rendimento das culturas, e qualidade ambiental.

Em geral, os solos em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresentam características físicas, como permeabilidade, estrutura, densidade do solo e espaço poroso agronomicamente desejáveis, sendo grande o volume de solo explorado pelas raízes. Entretanto, à medida que os solos vão sendo trabalhados motomecanicamente, consideráveis alterações físicas vão ocorrendo (Andreola et al., 2000).

A busca por alternativas tecnológicas que possibilitem o uso racional do solo tem sido a tônica das discussões em torno do tema manejo correto do solo para uma agricultura sustentável (Oliveira et al., 2003).

A escolha do implemento agrícola utilizado no preparo do solo é de grande importância, pois a arquitetura e a forma como os seus órgãos ativos atuam no solo são determinantes na manutenção e sustentabilidade da estrutura do solo durante e após as operações agrícolas (Silva et al. 2003).

De acordo com Bertol et al. (2004) o cultivo do solo altera suas propriedades físicas em relação ao solo não cultivado, sendo tais alterações mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo do solo do que nos conservacionistas, as quais se manifestam, em geral, na densidade do solo, volume e distribuição de tamanho dos poros e estabilidade dos agregados do solo, influenciando a infiltração da água, erosão hídrica e desenvolvimento das plantas.

Avaliar a intensidade e profundidade de ocorrência da compactação, bem como estudar valores e/ou limites críticos de propriedades do solo como, porosidade,

densidade e resistência à penetração, que possam afetar o crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas possibilita uma ação mais consciente em relação ao manejo do solo.

5.2. OBJETIVOS GERAIS

Estudar algumas propriedades físicas associadas à compactação de Argissolos e Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo do solo e sua influência no crescimento radicular e rendimento da cultura da soja.

5.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar a porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo em sistemas de manejo de solos.

Estudar a variabilidade da resistência do solo à penetração em camadas e ao longo da profundidade em sistemas de manejo de solos.

Avaliar o sistema radicular e o rendimento de grãos da soja em diferentes sistemas de manejo de solos.

5.4. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram estudados cinco solos do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo. Em alguns solos a coleta foi realizada na cabeceira/viradouro da área de plantio objetivando amostras com níveis mais elevados de compactação.

5.4.1. Solos e manejos estudados

Os solos em estudo neste capítulo foram os seguintes: Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas), Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos), Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) e Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim). Os manejos em estudo bem como a análise granulométrica dos solos se encontram citadas no capítulo I.

Durante a realização deste estudo, com exceção do manejo Escarif do Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) que apresentava a cultura do feijão na área, os demais manejos estavam com a cultura da soja implantada na área.

5.4.2. Coleta das amostras de solo

Os solos em estudo foram coletados no primeiro semestre de 2004. Foram abertas três trincheiras para cada condição de manejo, próxima uma da outra, evitando assim a variabilidade entre as amostras. Em cada trincheira foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros de 3 cm de altura e 5,55 cm de diâmetro nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m.

5.4.3 Porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas e realizado o procedimento para obtenção da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade pelo método da mesa de tensão, conforme descrito em EMBRAPA (1997).

5.4.4. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi quantificada com penetrômetro digital marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico

dos dados e ponta cônica com ângulo de penetração de 30°. As leituras foram realizadas a cada 1,5 cm de profundidade e, com exceção do Latossolo Vermelho aluminoférrico (u.m. Erechim), foram feitas avaliações da resistência na linha de semeadura e a 0,10; 0,20 e 0,30 m para a esquerda e para a direita da linha de semeadura.

A umidade gravimétrica do solo no momento da avaliação da resistência à penetração foi obtida por meio da coleta dos cilindros, para as profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m.

5.4.5. Rendimento da cultura da soja

Para avaliação do rendimento da cultura da soja, foram coletadas 4 linhas de 3 m de comprimento, perfazendo uma área de aproximadamente 5 m². Os dados de rendimento foram calculados para kg ha⁻¹ a 13% base úmida. Para o manejo Escarif no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) e PD 2 no Latossolo Vermelho aluminoférrico (u.m. Erechim) não foi possível avaliar o rendimento da soja.

Para determinação da umidade dos grãos foi utilizado o método de estufa a 105 °C, seguindo procedimento descrito nas Regras para análise de sementes (1992).

5.4.6. Sistema radicular da soja

Para avaliação do crescimento radicular da cultura da soja foram abertas trincheiras no local de coleta das amostras para avaliação das propriedades físicas do solo. As trincheiras foram abertas até a profundidade de crescimento do sistema radicular, o qual era exposto, medido com uma trena a profundidade de crescimento e fotografado. Em seguida a planta era retirada do solo, feita uma limpeza do sistema radicular e fotografado, colocando ao lado do sistema radicular uma faca como base de tamanho.

5.4.7. Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando o delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, apresentando nas parcelas principais os sistemas de

manejo e nas subparcelas as profundidades. Foi utilizado o teste Diferença Mínima Significativa (DMS) a 5% de significância.

5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1. Argissolos

Para os três solos, os parâmetros avaliados (porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo) variaram significativamente entre profundidades, ao passo que entre manejo apenas alguns parâmetros apresentaram diferença estatística significativa. A interação entre manejo e profundidade foi mais frequente no Argissolo Vermelho distrófico latossólico.

A densidade do Argissolo Vermelho distrófico arênico foi maior na profundidade de 0,10-0,25 m (Tabela 6). Os valores de densidade do solo encontrados são menores ou próximos ao valor considerado crítico ($1,65 \text{ Mg m}^{-3}$) para solos de textura arenosa (argila < 20%), proposto por Reichert et al. (2003).

A resistência do solo à penetração no manejo Escarif e PDC (Figura 4a e 4c) apresentaram valores que indicam não apresentarem problemas para o bom desenvolvimento radicular da planta. No PD (Figura 4b), a partir dos 0,15 m aproximadamente a resistência torna-se crítica ao desenvolvimento da planta, com valor de 2 a 2,5 MPa, porém, essa camada de maior resistência não é uniforme, permitindo o desenvolvimento radicular. Aumentando a profundidade os valores de resistência variam na tendência de ampliarem seus valores à medida que a umidade do solo diminui.

Tabela 6 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Argissolo Vermelho distrófico arênico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos			média
	Escarif	PD	PDC	
0-0,05	1,48	1,41	1,24	1,38 c
0,05-0,10	1,56	1,61	1,46	1,54 b
0,10-0,15	1,64	1,63	1,64	1,64 a
0,15-0,20	1,66	1,60	1,64	1,63 a
0,20-0,25	1,67	1,60	1,60	1,62 a
0,25-0,30	1,64	1,52	1,59	1,58 ab
média	1,61	1,56	1,53	

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Os valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram menores na camada de 0,10-0,25 m, fato associado à maior densidade nessa camada (Tabela 7). Para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas sugere-se uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1966). Embora a profundidade de 0,10-0,25 m tenha diminuído a macroporosidade, os valores ainda se encontram próximos ao valor mínimo para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

O PDC apresentou maior microporosidade em todas as profundidades avaliadas (Tabela 7) e diferiu estatisticamente dos demais manejos.

A boa condição física do solo nesses manejos refletiu em um bom desenvolvimento radicular das plantas. Verificou-se no campo que, em ambos os manejos, o sistema radicular das culturas (soja nos manejos PD e PDC, e feijão no Escarif) se estendia até próximo aos 0,15-0,20 m de profundidade.

No Argissolo Vermelho distrófico arênico, o PDC obteve um rendimento de $2,9 \text{ t ha}^{-1}$ e o PD $2,6 \text{ t ha}^{-1}$, e para o Escarif não foi possível avaliá-lo. Essa diferença de rendimento, embora pequena, pode estar associada à maior microporosidade no PDC, apresentando mais água disponível para a planta. O solo no manejo escarificado, baseado nos indicadores físicos, já perdeu o efeito da escarificação.

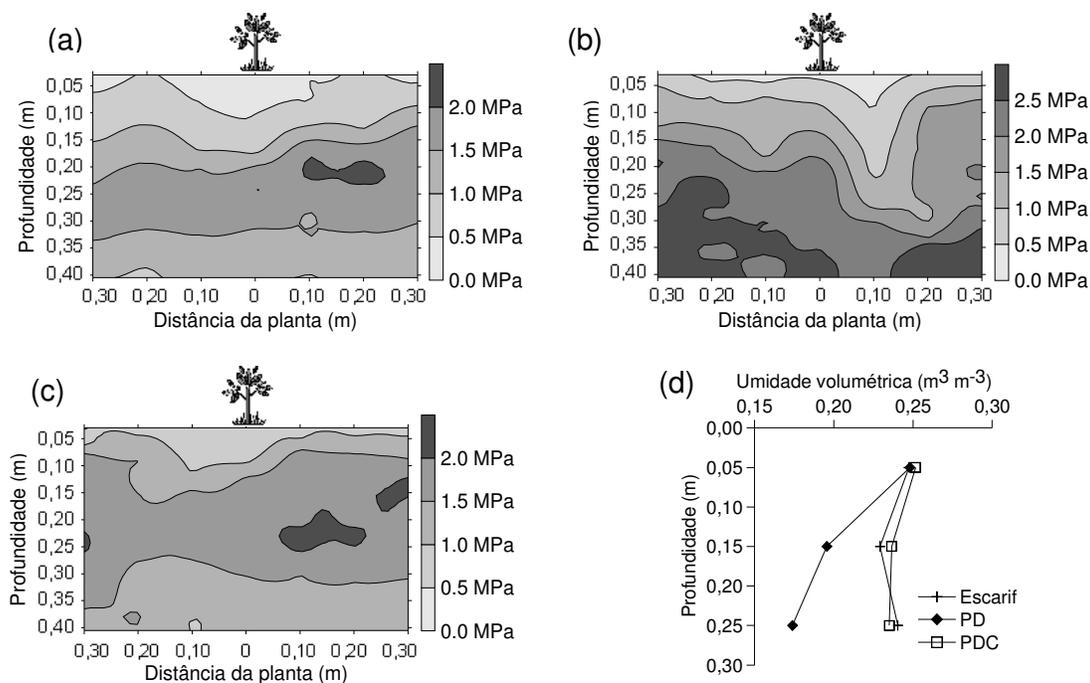


Figura 4 - Resistência à penetração do solo Argissolo Vermelho distrófico arênico nos manejos Escarif (a), PD (b) e PDC (c), e umidade do solo (d) no momento da avaliação da resistência.

O Argissolo Vermelho distrófico latossólico apresentou as maiores densidades na camada de 0,10 a 0,20 m, provavelmente devido às pressões acumuladas pelo tráfego de máquinas, e as menores densidades encontraram-se nas profundidades de 0-0,05 e 0,25-0,30 m (Tabela 8). Alterações na densidade do solo em profundidade é função da tendência natural do solo e do manejo adotado e, de modo geral, o PDC 2 apresentou as maiores densidades, exceto para a profundidade de 0-0,05 m. Considerando a densidade crítica de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ proposta por Reichert et al. (2003) para solos de textura média (20 a 55% de argila), na camada próxima a 0,10 m todos os manejos estariam com valores acima do valor proposto. No PDC 1, a profundidade de 0,05-0,10 m apresentou uma elevada densidade e verificou-se no campo o sistema radicular da soja com crescimento até próximo aos 0,08 m, enquanto que nos demais manejos o sistema radicular se encontrava até próximo a 0,10 m, profundidade com densidade superior à densidade crítica proposta por Reichert et al. (2003), embora não tenha sido verificadas deformações no sistema radicular. Isso demonstra que esses valores de densidade do solo crítica, baseados

no intervalo hídrico ótimo, devem ser revistos. Possivelmente, o valor de resistência à penetração de 2 MPa subestima a capacidade do sistema radicular desenvolver-se em solos sob plantio direto, especialmente naqueles com adequada bioporosidade.

Tabela 7 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho distrófico arênico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejo			média
	Escarif	PD	PDC	
Porosidade total ($m^3 m^{-3}$)				
0-0,05	0,402	0,427	0,477	0,435 a
0,05-0,10	0,377	0,354	0,393	0,375 b
0,10-0,15	0,343	0,346	0,320	0,336 c
0,15-0,20	0,334	0,342	0,309	0,328 c
0,20-0,25	0,336	0,340	0,321	0,332 c
0,25-0,30	0,345	0,380	0,338	0,354 bc
média	0,356	0,365	0,360	
Macroporosidade ($m^3 m^{-3}$)				
0-0,05	0,172	0,182	0,172	0,175 a
0,05-0,10	0,157	0,128	0,112	0,132 b
0,10-0,15	0,111	0,122	0,082	0,105 c
0,15-0,20	0,104	0,116	0,064	0,094 c
0,20-0,25	0,104	0,112	0,077	0,098 c
0,25-0,30	0,115	0,156	0,087	0,119 bc
média	0,127	0,136	0,099	
Microporosidade ($m^3 m^{-3}$)				
0-0,05	0,230 B	0,244 B	0,305 A	0,260
0,05-0,10	0,220 B	0,227 B	0,280 A	0,242
0,10-0,15	0,232 AB	0,224 B	0,238 A	0,231
0,15-0,20	0,230 B	0,227 B	0,245 A	0,234
0,20-0,25	0,231 B	0,228 B	0,244 A	0,235
0,25-0,30	0,230 B	0,224 B	0,251 A	0,235
média	0,229	0,229	0,261	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

A resistência do solo à penetração, com exceção do PDC 1 que apresentou elevada resistência desde os primeiros centímetros da superfície, nenhum dos manejos apresentaram resistência superior a 2MPa (Figura 5). No entanto, essa maior resistência no PDC 1 é a aproximadamente 0,10 m da linha de semeadura, o que não deve impedir o desenvolvimento radicular inicial.

Tabela 8 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Argissolo Vermelho distrófico latossólico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD	PDC 1	Batata	PDC 2	
0-0,05	1,46 AB	1,60 A	1,32 B	1,41 B	1,45
0,05-0,10	1,66 A	1,71 A	1,37 B	1,61 A	1,59
0,10-0,15	1,61 A	1,64 A	1,61 A	1,67 A	1,63
0,15-0,20	1,51 B	1,60 AB	1,61 AB	1,72 A	1,61
0,20-0,25	1,49 B	1,52 AB	1,58 A	1,58 A	1,55
0,25-0,30	1,48 A	1,46 A	1,48 A	1,51 A	1,48
média	1,53	1,59	1,50	1,58	

Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

No Argissolo Vermelho distrófico latossólico, a porosidade total, macro e microporosidade diferiram nas profundidades estudadas, e essas diferenças em profundidade foram função do manejo adotado (Tabela 9). Entre os manejos em estudo, a macroporosidade foi maior no manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) e menor no PDC 1, e a microporosidade foi maior no PD e PDC 1.

Notou-se que, de modo geral, as propriedades físicas variaram pouco entre os sistemas de manejo no Argissolo Vermelho distrófico latossólico. O rendimento também não apresentou grandes diferenças, o manejo que utilizou a cultura da batata (Batata) produziu $1,8 \text{ t ha}^{-1}$, o PD e PDC 2 produziram $1,7 \text{ t ha}^{-1}$ e o PDC 1 produziu $1,6 \text{ t ha}^{-1}$.

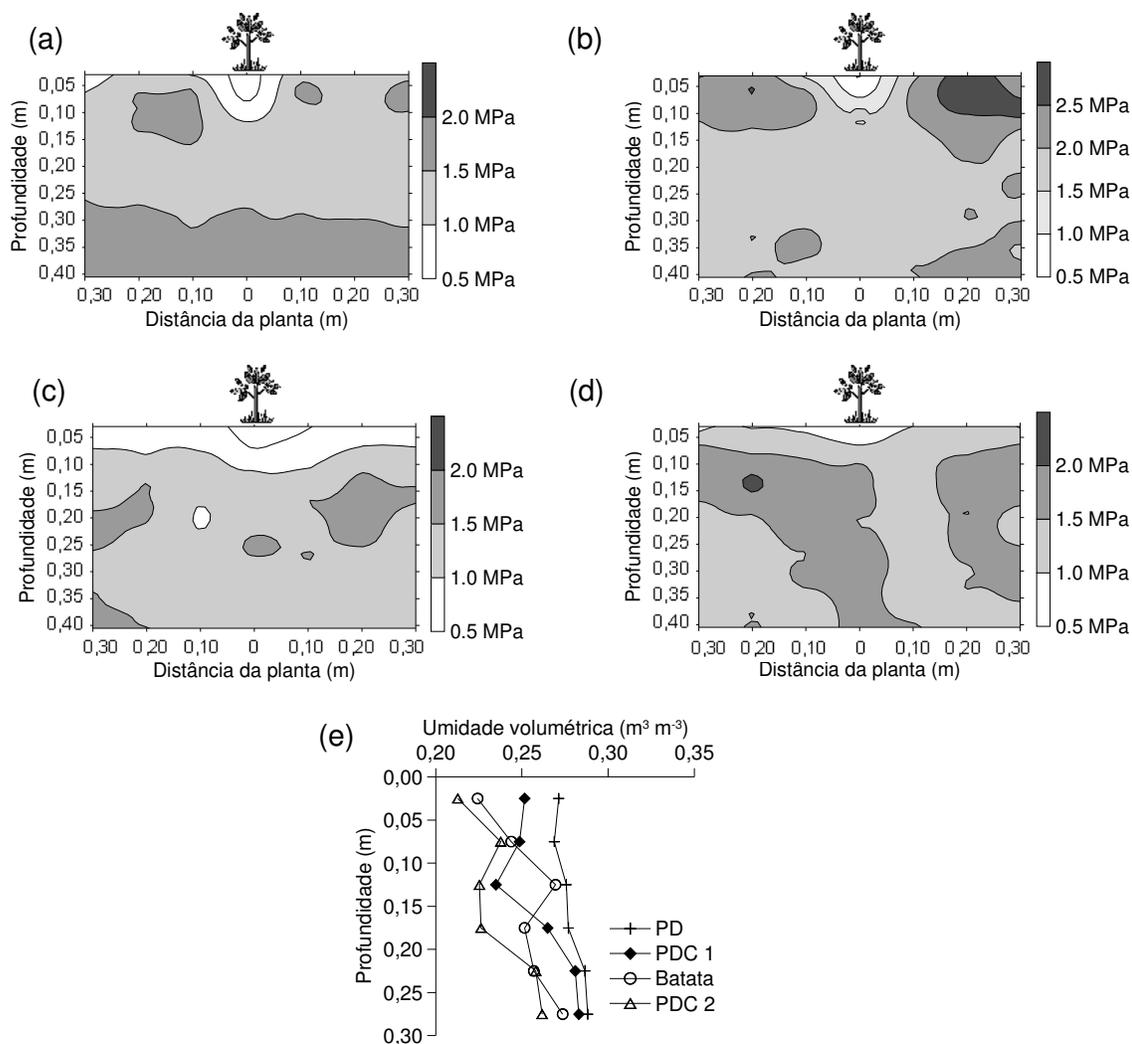


Figura 5 - Resistência à penetração do Argissolo Vermelho distrófico latossólico nos manejos PD (a), PDC 1 (b), Batata (c) e PDC 2 (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.

Assim como para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico e Argissolo Vermelho distrófico latossólico, o comportamento da densidade em profundidade no Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico foi semelhante, onde as camadas de 0-0,05 e 0,20 a 0,30 m apresentaram as menores densidades (Tabela 10).

Tabela 9 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho distrófico latossólico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD	PDC 1	Batata	PDC 2	
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0-0,05	0,417 AB	0,377 B	0,470 A	0,455 A	0,430
0,05-0,10	0,374 B	0,330 C	0,440 A	0,358 BC	0,376
0,10-0,15	0,373 A	0,351 A	0,365 A	0,360 A	0,362
0,15-0,20	0,402 A	0,364 A	0,354 A	0,301 B	0,355
0,20-0,25	0,395 A	0,374 AB	0,356 B	0,352 B	0,369
0,25-0,30	0,396 A	0,390 A	0,383 A	0,375 A	0,386
média	0,393	0,364	0,395	0,367	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0-0,05	0,106 B	0,058 B	0,212 A	0,195 A	0,143
0,05-0,10	0,068 B	0,042 B	0,164 A	0,086 B	0,090
0,10-0,15	0,068 AB	0,057 B	0,072 AB	0,098 A	0,074
0,15-0,20	0,103 A	0,067 B	0,078 AB	0,054 B	0,075
0,20-0,25	0,082 A	0,068 A	0,079 A	0,068 A	0,074
0,25-0,30	0,085 A	0,079 A	0,085 A	0,086 A	0,084
média	0,086	0,062	0,115	0,098	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0-0,05	0,311 A	0,320 A	0,258 B	0,260 B	0,287
0,05-0,10	0,306 A	0,289 B	0,276 BC	0,272 C	0,286
0,10-0,15	0,304 A	0,295 A	0,293 A	0,262 B	0,289
0,15-0,20	0,300 A	0,297 A	0,276 AB	0,247 B	0,280
0,20-0,25	0,313 A	0,306 A	0,278 B	0,284 B	0,295
0,25-0,30	0,311 A	0,311 A	0,299 B	0,289 C	0,302
média	0,307	0,303	0,280	0,269	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Tabela 10 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD 1	PDC	PD 2	Batata	
0-0,05	1,13	1,19	1,29	1,31	1,23 d
0,05-0,10	1,52	1,41	1,51	1,53	1,49 a
0,10-0,15	1,47	1,43	1,45	1,46	1,45 ab
0,15-0,20	1,44	1,41	1,48	1,41	1,44 ab
0,20-0,25	1,39	1,39	1,37	1,38	1,38 bc
0,25-0,30	1,43	1,35	1,24	1,36	1,34 c
média	1,40	1,36	1,39	1,41	

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Embora os valores densidade do solo não sejam considerados restritivos ao desenvolvimento da planta, a resistência à penetração apresentou valores maiores que 2MPa (Figura 6), principalmente em subsuperfície para os manejos PD 1 e PDC e em superfície para os manejos PD 2 e Batata. Foi observado no campo desenvolvimento radicular até próximo a 0,16 m no PD 2 e nos demais manejos até próximo a 0,10 m de profundidade. Com exceção do PD 2, notou-se que a camada de resistência superior a 2 MPa não é uniforme, há espaços de menor resistência, o que possibilita a planta procurar esses espaços e desenvolver seu sistema radicular. Segundo Queiroz-Voltan et al. (2000), como no campo a compactação não se apresenta como uma massa contínua, as raízes procuram os espaços livres no solo para se desenvolver.

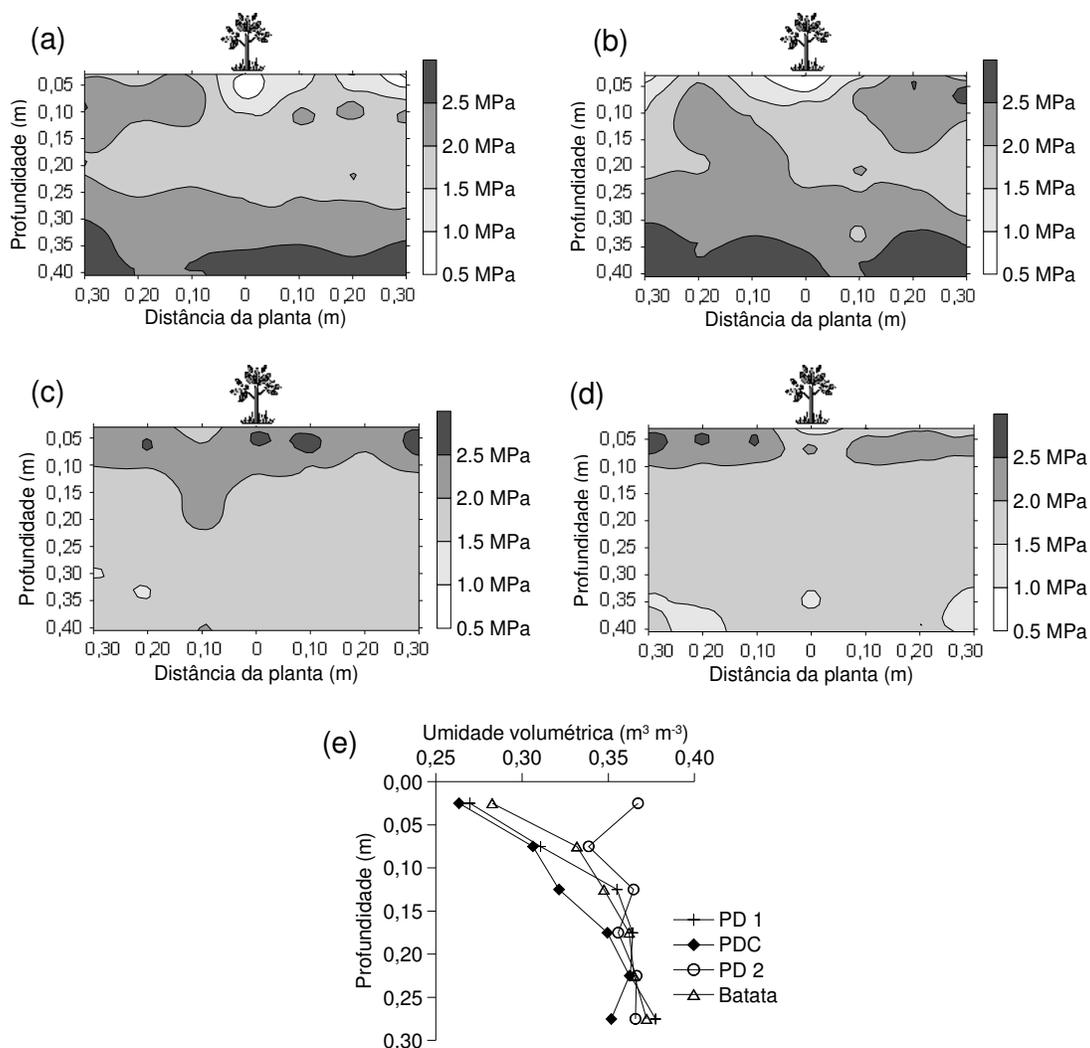


Figura 6 - Resistência à penetração do Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico nos manejos PD 1 (a), PDC (b), PD 2 (c) e Batata (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.

A porosidade total diferiu nas profundidades estudadas, sendo a profundidade de 0-0,05 a que apresentou maior volume de poros (Tabela 11). A alteração da macroporosidade em profundidade, foi função além da tendência natural dos solos, do sistema de manejo adotado e, de modo geral, com exceção do PDC e da camada superficial de 0-0,05 m nos demais manejos, os valores de macroporosidade estão abaixo do mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ recomendado por Vomocil & Flocker (1966) para o bom desenvolvimento da planta. A microporosidade apresentou diferenças

significativas principalmente nas três camadas superficiais do solo e essas diferenças foram função do manejo adotado.

Tabela 11 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD 1	PDC	PD 2	Batata	
Porosidade total ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,546	0,536	0,508	0,500	0,522 a
0,05-0,10	0,441	0,460	0,433	0,416	0,438 bc
0,10-0,15	0,437	0,459	0,438	0,419	0,438 bc
0,15-0,20	0,432	0,444	0,433	0,438	0,437 c
0,20-0,25	0,453	0,451	0,455	0,460	0,455 bc
0,25-0,30	0,444	0,462	0,481	0,454	0,460 b
média	0,459	0,469	0,458	0,448	
Macroporosidade ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,185 A	0,192 A	0,061 B	0,107 AB	0,136
0,05-0,10	0,060 A	0,106 A	0,050 A	0,044 A	0,065
0,10-0,15	0,053 AB	0,106 A	0,045 B	0,050 B	0,064
0,15-0,20	0,048 A	0,068 A	0,050 A	0,054 A	0,055
0,20-0,25	0,068 AB	0,060 B	0,066 AB	0,077 A	0,068
0,25-0,30	0,052 B	0,084 A	0,088 A	0,065 AB	0,072
média	0,078	0,103	0,060	0,066	
Microporosidade ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,361 C	0,344 C	0,447 A	0,394 B	0,386
0,05-0,10	0,380 A	0,354 B	0,383 A	0,372 AB	0,373
0,10-0,15	0,384 AB	0,353 C	0,393 A	0,369 BC	0,375
0,15-0,20	0,384 A	0,375 A	0,384 A	0,383 A	0,381
0,20-0,25	0,385 A	0,391 A	0,390 A	0,383 A	0,387
0,25-0,30	0,392 A	0,377 B	0,393 A	0,389 AB	0,388
média	0,381	0,366	0,398	0,381	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

No Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico, os sistemas de manejo PD 1 e PDC receberam duas irrigações durante seu ciclo, sendo verificado maior rendimento no PD 1 ($3,6 \text{ t ha}^{-1}$) e menor rendimento no PDC ($2,8 \text{ t ha}^{-1}$). Considerando que os parâmetros físicos avaliados foram semelhantes entre estes dois manejos, a cabeceira da lavoura não ter recebido adequadamente a irrigação pode explicar estas diferenças no rendimento, já que a fertilidade do solo entre esses dois manejos pouco variou. Os manejos PD 2 e Batata apresentaram rendimentos de $2,5$ e $2,6 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, sendo essa mínima diferença função das características físicas do solo semelhantes entre esses dois manejos.

5.5.2. Latossolos

Para os dois solos, os parâmetros avaliados (porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo) variaram significativamente em profundidade e, para manejo, houve diferença estatística apenas no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico. A interação entre manejo e profundidade foi significativa apenas para porosidade total no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico.

No Latossolo Vermelho distrófico típico, os maiores valores de densidade foram encontrados na profundidade de $0,10$ a $0,20$ m, porém esses valores encontram-se abaixo do considerado crítico para desenvolvimento das plantas (Tabela 12).

Embora não se tenha verificado valores restritivos de densidade do solo ao desenvolvimento da planta nas camadas avaliadas, a resistência à penetração mostrou valores superiores a 2 MPa , principalmente nas camadas superficiais nos manejos PDC 1 e PDC 2 (Figura 7). No PD 1 ocorreu uma camada de maior resistência apenas na linha de semeadura próxima aos $0,25$ m de profundidade. No PDC 1 a resistência é alta desde a superfície até aproximadamente $0,15$ - $0,20$ m de profundidade. No PD 2 não se evidenciou elevada resistência à penetração, e no PDC 2, assim como no PDC 1 ocorreu elevada resistência desde a superfície. As elevadas resistências e densidades encontradas nos manejos PDC 1 e PDC 2 evidenciam o maior tráfego de máquinas nas cabeceiras/viradouros das lavouras.

Tabela 12 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Latossolo Vermelho distrófico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD 1	PDC 1	PD 2	PDC 2	
0-0,05	1,15	1,27	1,14	1,48	1,26 d
0,05-0,10	1,33	1,39	1,37	1,55	1,41 b
0,10-0,15	1,36	1,47	1,44	1,59	1,47 a
0,15-0,20	1,38	1,44	1,48	1,57	1,47 a
0,20-0,25	1,29	1,32	1,37	1,47	1,36 bc
0,25-0,30	1,32	1,33	1,36	1,38	1,35 c
média	1,30	1,37	1,36	1,51	

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

A porosidade total no Latossolo Vermelho distrófico típico diferiu em profundidade, tendo na profundidade de 0,05 a 0,20 m os menores valores em função da maior densidade nestas profundidades (Tabela 13). Alterações na densidade do solo levaram a modificações apenas na porosidade total e macroporosidade, enquanto a microporosidade não foi alterada. Esse comportamento foi diferente dos Argissolos, onde alterações na densidade também modificaram a porosidade total, macro e microporosidade.

A menor macroporosidade foi verificada nos manejos PDC 1 e PDC 2 (Tabela 13), que apresentam valores abaixo do mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerado para o bom desenvolvimento das plantas. A menor macroporosidade nesses manejos é reflexo da maior densidade do solo verificada na cabeceira/viradouro das lavouras.

No Latossolo Vermelho distrófico típico, o rendimento da soja no PD 1 foi $2,3 \text{ t ha}^{-1}$, no PDC 1 foi $2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e nos manejos PD 2 e PDC 2 foi, respectivamente, $2,0$ e $1,9 \text{ t ha}^{-1}$, reduzindo dos manejos que apresentaram melhores indicadores físicos para os mais limitantes.

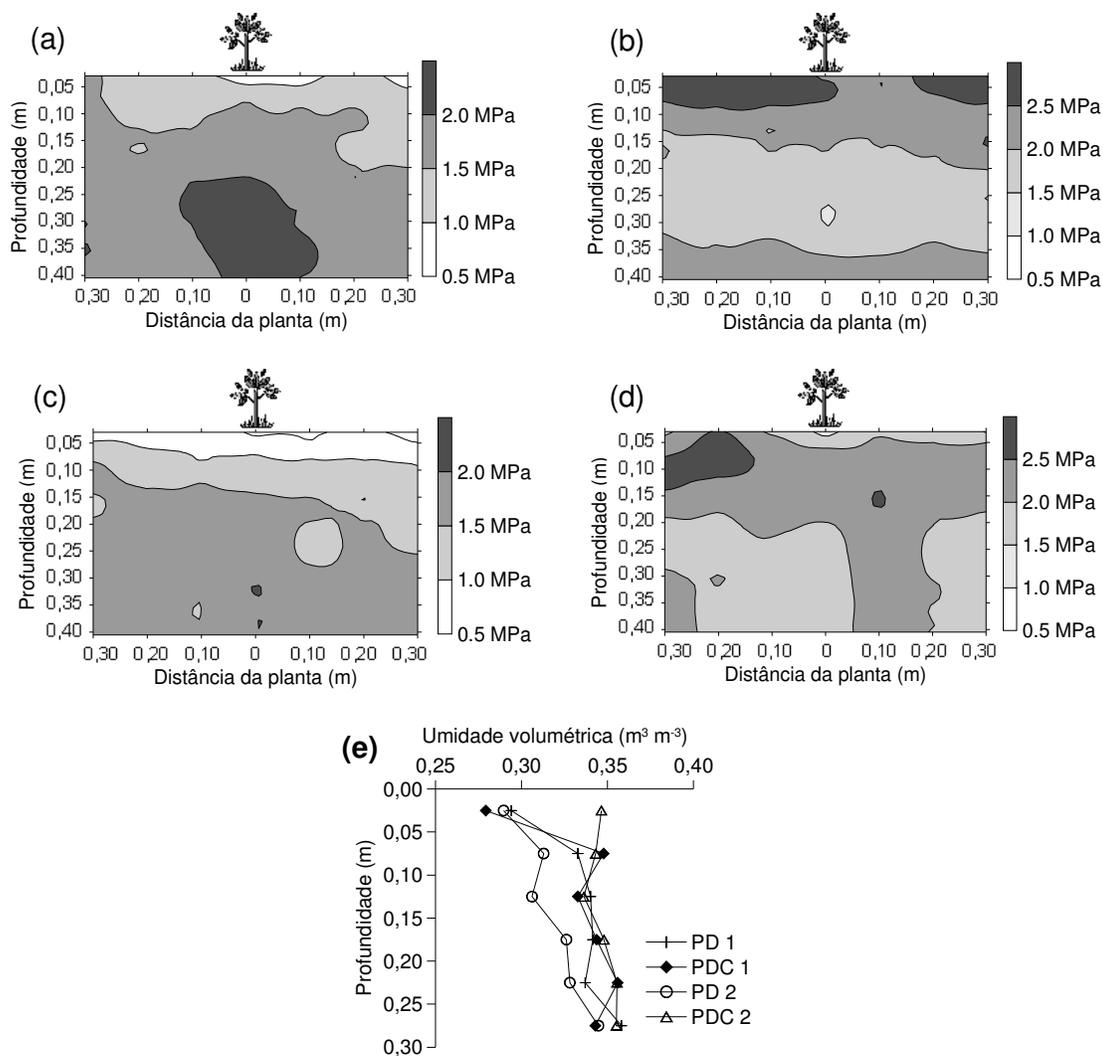


Figura 7 - Resistência à penetração do Latossolo Vermelho distrófico típico nos manejos PD 1 (a), PDC 1 (b), PD 2 (c) e PDC 2 (d), e umidade do solo (e) no momento da avaliação da resistência.

No Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, a camada de 0,05 a 0,20 m apresentou os maiores valores de densidade do solo (Tabela 14). O solo com pasto cultivado no inverno (Pasto) apresenta elevada densidade do solo, fato que pode estar associado ao pisoteio do gado no inverno.

Tabela 13 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Latossolo Vermelho distrófico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos				média
	PD 1	PDC 1	PD 2	PDC 2	
Porosidade total ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,546	0,513	0,520	0,444	0,506 a
0,05-0,10	0,471	0,460	0,461	0,406	0,450 bc
0,10-0,15	0,458	0,440	0,436	0,396	0,432 c
0,15-0,20	0,454	0,445	0,425	0,408	0,433 c
0,20-0,25	0,476	0,466	0,451	0,427	0,455 b
0,25-0,30	0,474	0,464	0,457	0,448	0,461 b
média	0,480	0,465	0,458	0,422	
Macroporosidade ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,187	0,131	0,177	0,048	0,136 a
0,05-0,10	0,094	0,080	0,106	0,033	0,078 b
0,10-0,15	0,077	0,053	0,092	0,031	0,063 b
0,15-0,20	0,082	0,075	0,059	0,035	0,063 b
0,20-0,25	0,106	0,074	0,080	0,041	0,075 b
0,25-0,30	0,084	0,087	0,069	0,057	0,074 b
média	0,105	0,083	0,097	0,041	
Microporosidade ($m^3 m^{-3}$)					
0-0,05	0,359	0,382	0,343	0,396	0,370
0,05-0,10	0,377	0,381	0,355	0,373	0,371
0,10-0,15	0,381	0,387	0,344	0,365	0,369
0,15-0,20	0,372	0,371	0,366	0,373	0,370
0,20-0,25	0,370	0,392	0,370	0,386	0,380
0,25-0,30	0,390	0,377	0,388	0,391	0,386
média	0,375	0,382	0,361	0,381	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Tabela 14 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos						média
	PD 1	Escarif	Pasto	PD 2	PD 3	PDC	
0-0,05	1,04	1,03	1,38	1,16	1,15	1,12	1,15 c
0,05-0,10	1,49	1,32	1,56	1,47	1,37	1,36	1,43 a
0,10-0,15	1,44	1,39	1,57	1,46	1,36	1,26	1,41 a
0,15-0,20	1,53	1,41	1,60	1,43	1,35	1,31	1,44 a
0,20-0,25	1,42	1,35	1,59	1,41	1,37	1,21	1,39 a
0,25-0,30	1,38	1,25	1,51	1,31	1,32	1,18	1,33 b
média	1,38	1,29	1,53	1,37	1,32	1,24	

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

No PD 1, próximo aos 0,20 m, a resistência foi maior que 2 MPa e no campo foi verificado que o sistema radicular da soja estendeu-se aproximadamente até os 0,20 m de profundidade (Figura 8a). No PD 2, a resistência foi superior a 2 MPa a partir dos 0,05 m, mas no campo notou-se o sistema radicular até próximo dos 0,12 m, profundidade que se verificou a maior resistência. Assim como no PD 2, a partir de 0,05 m de profundidade a resistência foi superior a 2 MPa no PD 3, mas a maior resistência encontrou-se na profundidade de 0,15-0,18 m, profundidade esta alcançada pelo sistema radicular.

O manejo Escarif apresentou resistência superior a 2 MPa próximo a 0,08 m de profundidade, mas no campo foi visualizado o sistema radicular da soja até próximo a profundidade de 0,12 m, profundidade em que se iniciam os maiores valores de resistência à penetração (Figura 8b). Para o manejo com pasto no inverno a resistência à penetração não foi crítica e foi verificada, no campo, a presença de raízes de soja até próximo aos 0,30 m de profundidade. No PDC, a maior resistência foi encontrada na profundidade de 0,17 m aproximadamente, profundidade na qual foi observado o desenvolvimento radicular da soja.

Possivelmente o valor de 2 MPa, considerado crítico para o desenvolvimento radicular, seja subestimado nesse caso, já que foi observado raízes em profundidades maiores do que a profundidade que apresentou resistência de 2 MPa.

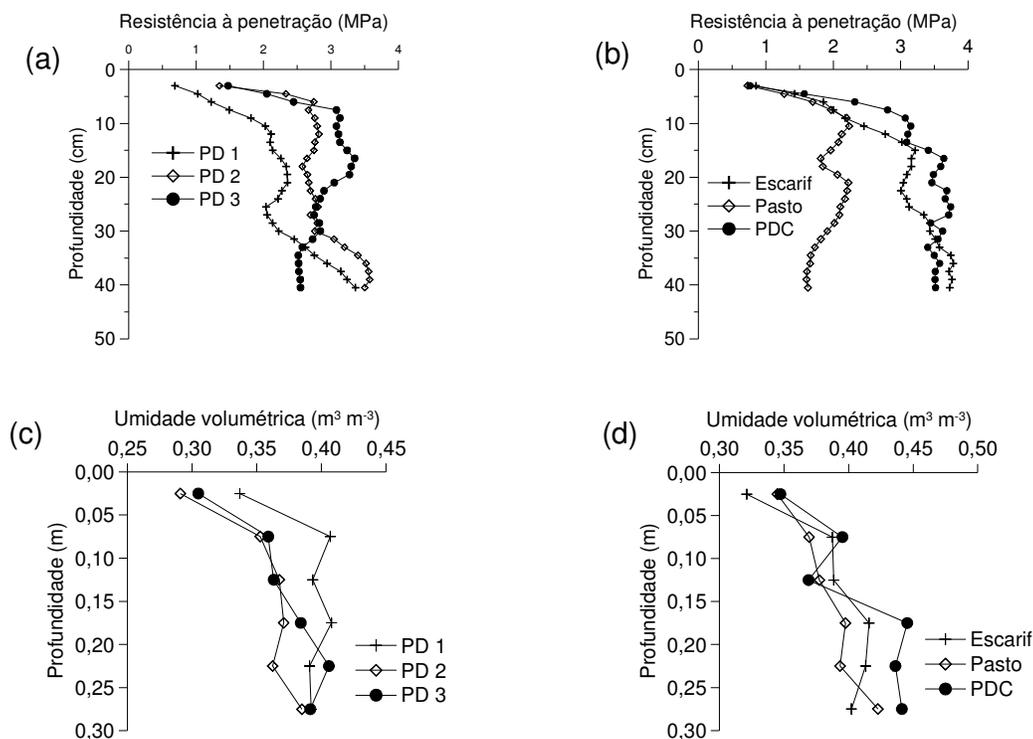


Figura 8 - Resistência à penetração do Latossolo Vermelho aluminoférrico típico nos manejos PD 1, PD 2 e PD 3 (a), Escarif, Pasto e PDC (b), e umidade do solo no momento da avaliação da resistência (c, d).

A porosidade total, a macro e a microporosidade diferiram entre as profundidades; para porosidade total essa variação foi função do manejo (Tabela 15). O manejo PDC apresentou maior porosidade total e microporosidade e o Pasto apresentou menor porosidade total e microporosidade.

Os maiores rendimentos da cultura da soja no solo Latossolo Vermelho aluminoférrico típico foram obtidos nos manejos PD 1, Pasto e PD 3, com cerca de 2,2, a 2,4 $t ha^{-1}$. No PD 2 não foi possível avaliar o rendimento, e os menores rendimentos foram alcançados pelo PDC e Escarif, com 1,5 e 0,9 $t ha^{-1}$, respectivamente.

Tabela 15 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico e seus respectivos manejos em estudo.

Prof. (m)	Manejos						média
	PD 1	Escarif	Pasto	PD 2	PD 3	PDC	
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
0-0,05	0,633 A	0,632 A	0,536 B	0,589 AB	0,611 A	0,630 A	0,605
0,05-0,10	0,475 B	0,554 A	0,482 B	0,481 B	0,542 A	0,580 A	0,519
0,10-0,15	0,521 BC	0,561 AB	0,482 CD	0,477 D	0,536 AB	0,577 A	0,526
0,15-0,20	0,483 D	0,546 B	0,476 D	0,503 CD	0,525 BC	0,576 A	0,518
0,20-0,25	0,511 C	0,554 B	0,485 C	0,491 C	0,511 C	0,609 A	0,52
0,25-0,30	0,535 B	0,598 A	0,494 C	0,528 B	0,532 B	0,607 A	0,549
média	0,526	0,574	0,492	0,511	0,543	0,597	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
0-0,05	0,261	0,246	0,142	0,212	0,215	0,205	0,213 a
0,05-0,10	0,041	0,103	0,074	0,053	0,111	0,111	0,082 b
0,10-0,15	0,094	0,104	0,067	0,042	0,115	0,116	0,090 b
0,15-0,20	0,045	0,071	0,050	0,073	0,101	0,074	0,069 b
0,20-0,25	0,083	0,073	0,060	0,061	0,072	0,105	0,076 b
0,25-0,30	0,096	0,111	0,040	0,084	0,096	0,085	0,085 b
média	0,103	0,118	0,072	0,087	0,119	0,116	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
0-0,05	0,3720	0,386	0,395	0,376	0,396	0,425	0,392 d
0,05-0,10	0,4337	0,451	0,408	0,428	0,430	0,469	0,437 c
0,10-0,15	0,4277	0,457	0,415	0,435	0,420	0,461	0,436 c
0,15-0,20	0,4381	0,475	0,426	0,430	0,424	0,502	0,449 bc
0,20-0,25	0,4273	0,482	0,425	0,430	0,438	0,504	0,451 ab
0,25-0,30	0,4381	0,487	0,454	0,444	0,436	0,522	0,463 a
média	0,423 C	0,456 B	0,420 C	0,424 C	0,424 C	0,481 A	

Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

5.5.3. Argissolos e Latossolos

De modo geral, a porosidade e a densidade foram menos influenciadas pelo manejo e as maiores alterações ocorreram quando se compararam as profundidades. Falleiro et al. (2003) trabalhando em um Argissolo Vermelho-Amarelo câmbico sob diferentes sistemas de preparo do solo, verificaram que a micro e macroporosidade não foram afetadas pelos diferentes sistemas de preparo e profundidades amostradas. Segundo Schaefer et al. (2001) o efeito do preparo sobre os valores de porosidade do solo pode ser pouco evidente, sendo mais comuns os efeitos na forma e distribuição dos poros ao longo do perfil do solo.

Notou-se que, na entrelinha da cultura, se encontrou a maior resistência à penetração, pois na linha o disco de corte ou haste da semeadora rompem a camada de maior resistência, permitindo o desenvolvimento do sistema radicular até os primeiros centímetros. Os diferentes níveis de resistência à penetração não são uma camada uniforme, ocorrem espaços de maior e menor resistência. De acordo com Unger & Kaspar (1994) os solos não são uniformemente compactados pelo tráfego de máquinas. Segundo esses autores, devido à direção do tráfego para muitas operações no campo ser paralela a linha de plantio, o tráfego tende a se concentrar nas entrelinhas, e algumas entrelinhas são compactadas enquanto outras não. Como resultado, o tráfego pode causar enormes diferenças nas condições físicas do solo nas entrelinhas trafegadas e não trafegadas.

A profundidade alcançada pelo sistema radicular nos solos e manejos em estudo foi, de certo modo, função de propriedades do solo como a densidade do solo e a resistência do solo à penetração. Reichert et al. (2003) dizem que o sistema radicular percebe e integra todas as condições, no espaço e tempo, de modo semelhante à parte aérea das plantas, que está exposta a trocas constantes de ambiente, indicando claramente que estresses na parte aérea e sistema radicular são igualmente importantes.

O Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas), até a densidade próxima de $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$ praticamente não apresentou redução do rendimento, porém foi verificado no campo crescimento radicular da soja até próximo a 0,10 m de profundidade (Figura 9). No Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) e Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim), a densidade de $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$ praticamente não reduziu o rendimento da soja,

comparado às demais densidades verificadas nesses solos. Possivelmente, o valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ proposto como crítico por Reichert et al. (2003) para solos de textura média pode estar subestimado, já que não foram observadas reduções no rendimento da soja e restrição ao crescimento radicular (no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico – u.m. Erechim) para densidade de $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$. Para densidade próxima a $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$, verificada no Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas), é dúvida se essa densidade é crítica à planta pois, embora não tenha ocorrido redução no rendimento, o sistema radicular da soja se encontrava próximo a $0,10 \text{ m}$ de profundidade. Contudo, é preciso mais faixas de densidade para esses solos para que possa ser verificado qual densidade é crítica para solos de textura média.

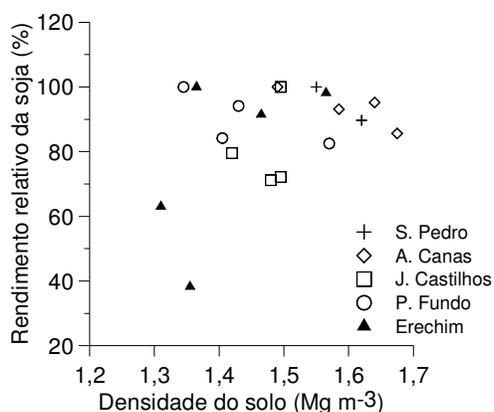


Figura 9 - Densidade do solo na profundidade média de $0,05\text{-}0,15 \text{ m}$ e rendimento relativo da cultura da soja para os solos e manejos em estudo.

O rendimento das culturas é função de vários fatores, como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manejo dado à cultura, além do fator climático. Alguns solos podem apresentar condições inadequadas, mas uma boa condição climática e boa condição de precipitação podem minimizar esses efeitos. Nas constantes adversidades climáticas que estão ocorrendo, um solo em boas condições permite o produtor se planejar, pois as variações no rendimento são menos oscilantes. De acordo com Lipiec & Simota (1994) a variável resposta das

culturas à compactação pelos veículos agrícolas depende das interações entre espécie de planta, tipo de solo, condições climáticas e grau de compactação e, nessas interações, a umidade do solo desempenha um importante papel. Com redução ou com estado ótimo de compactação, as plantas apresentam maior faixa de variação de umidade do solo com menos limitações, reduzindo riscos de redução de produtividade.

5.6. CONCLUSÕES

Independente do solo e manejo, de modo geral as maiores densidades foram encontradas na profundidade aproximada de 0,10 m.

Os níveis de resistência do solo à penetração não se apresentam em camadas uniformes, ocorrem espaços de maior e menor resistência.

De modo geral, os solos e manejos avaliados apresentaram boas condições físicas do solo.

A densidade do solo e a resistência à penetração se avaliada com umidade próxima à capacidade de campo, mostraram-se bons indicadores do solo para desenvolvimento da planta.

A avaliação do sistema radicular, mesmo que apenas visual, é um bom indicativo da condição física do solo.

O rendimento esteve associado às condições físicas dos solos.

5.7. BIBLIOGRAFIA CITADA

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

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.32, p.59-62, 1980.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.155-163, 2004.

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.34, p.909-913, 1991.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 413p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

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

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 & Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

GUPTA, S.C.; RAPER, R.L. Prediction of soil compaction under vehicles. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 71-90.

LIPIEC, J.; SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.365-390.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Determinação do grau de umidade. In: **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.185-190, 1992.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argilosos de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.773-781, 2003.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, v.9, p.50-52, 1996.

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

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, edição 27, p.29-48, 2003.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, C.M.; VALLEJOS, M.F.J.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.C.C.; RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.765-769, 2001.

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

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.91-95, 1986.

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**, v.27, p.973-983, 2003.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 107p.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004a. (CD-ROM)

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004b. (CD-ROM)

TORRES, E.; ODILON, F.S.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71p. (Circular Técnica, 12).

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v.86, p.759-766, 1994.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1966.

6. CAPÍTULO III

GRAU DE COMPACTAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DA SOJA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

6.1. INTRODUÇÃO

Estudos avaliando o manejo nas diferentes classes de solos são facilitados quando as propriedades físicas consideradas podem ser comparadas para os diferentes solos, pois algumas propriedades físicas, como a densidade do solo, que apresentam valores considerados críticos para alguns solos de textura argilosa não o são para outros solos de textura arenosa.

Várias propriedades têm sido utilizadas para caracterizar o estado de compactação dos solos, tais como densidade ou porosidade total, porosidade de aeração a uma certa tensão de água ou resistência do solo. Pelo fato da compactação ser caracterizada por mudanças no volume, parece ser mais apropriado o uso de métodos baseados nas relações volumétricas, preferencialmente densidade e porosidade do solo. Contudo, esses parâmetros variam entre os solos e tem valores limitados quando diferentes solos são comparados, por exemplo, uma densidade que indique um estado extremamente compactado em um solo pode indicar estado pouco compactado em outro solo (Hakansson, 1990; Lipiec & Hakansson, 2000).

A densidade do solo e o volume de poros podem ser expressos em termos relativos (Soane et al., 1981). A expressão da relação entre densidade atual do solo em relação a algum estado padrão ou de compactação máxima tem se mostrado útil na caracterização da compactação do solo e resposta das culturas em diferentes tipos de solo (Carter, 1990; Hakansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Silva et al., 1997), especialmente para solos minerais (Hakansson, 1990).

Segundo Hakansson (1990) comparações entre solos são facilitadas quando a densidade ou porosidade é relacionada à densidade ou porosidade do solo em algum estado de referência. De acordo com esse autor, em estudos geotécnicos, diferentes métodos têm sido utilizados para caracterizar o estado de compactação do solo, um deles é o cálculo da “compactação relativa”, que implica no índice de vazios de um solo em relação ao índice de vazios do mesmo solo em um estado de referência compactado. O estudo do “grau de compactação” ou “compactação relativa” surgiu da necessidade de se encontrar um parâmetro para caracterizar o estado de compactação do solo que fosse simples o suficiente para ser usado em extensivas experimentações de campo e capaz de formar uma ligação entre estudos de resposta do solo ao tráfego de máquinas e estudos de resposta das culturas à compactação do solo. O objetivo de Hakansson (1990) foi obter um máximo rendimento das culturas a um mesmo valor de “grau de compactação”, independente do tipo de solo.

O estado de referência ou densidade máxima do solo é o estado mais adensado que pode ser obtido por uma pressão estática de 200 kPa obtida no teste de compressão uniaxial. Segundo Hakansson (1990) essa pressão foi escolhida pois, se a pressão para o teste referência de compressão uniaxial fosse muito baixa, parte das amostras teriam sido pré-compactadas no campo por pressões maiores; por outro lado, uma pressão referência muito elevada causaria variações maiores que o necessário entre os solos. Sendo assim, a pressão de 200 kPa foi escolhida, uma vez que limitados volumes de solo são submetidos a pressões acima desse valor pela maioria dos veículos agrícolas. Alguns estudos (Carter, 1990; Twerdoff et al., 1999) tem feito uso do teste de Proctor para se obter este estado de compactação máxima ou estado de compactação referência, mas de acordo com Hakansson (1990) o teste uniaxial parece ser muito reproduzível e menos trabalhoso que o teste de Proctor.

Hakansson (1990), comparando a compactação pelo teste de Proctor com o teste oedômetro, observou que o teste de Proctor provocou uma compactação mais intensiva, resultando em densidades entre 7 a 17% maiores que o teste oedômetro. Desse modo, tais densidades normalizadas, utilizando qualquer um destes testes referências, devem ser comparáveis (Twedorff et al., 1999).

Segundo Hakansson (1990) o uso do “grau de compactação” visou apenas camadas de solo revolvidas anualmente pelo manejo do solo, sendo testado apenas

para este propósito, e os métodos de proctor, assim como de compressão, utiliza solos com estrutura não preservada.

Portanto, há necessidade de se estudar o “grau de compactação” ou “compactação relativa” para solos não revolvidos anualmente, sendo necessário trabalhar a melhor pressão (200, 400, 800, 1200 ou até 3200 kPa) para se obter a melhor densidade máxima ou densidade referência pelo teste de compressão uniaxial para que os diferentes solos possam ser comparados.

A compactação relativa ou grau de compactação pode servir com um parâmetro útil e de fácil medição para indicar mudanças nas propriedades físicas do solo, como macroporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e resistência à penetração (Carter 1990). Esse autor verificou uma relação próxima da compactação relativa com macroporosidade e rendimento relativo. Lipiec et al. (1991) verificaram que a faixa de tensão de água onde a porosidade de aeração e resistência à penetração não são restritivas para o crescimento das plantas torna-se mais estreita à medida que o grau de compactação aumenta. Estes autores também observaram uma boa correlação entre o grau de compactação e resistência à penetração e porosidade de aeração do solo.

A utilidade do grau de compactação para caracterizar o nível de compactação de camadas de solo cultivados do ponto de vista das condições físicas para a produção das culturas foi demonstrado por Lipiec et al. (1991). O estudo baseou-se nas correlações obtidas entre o grau de compactação e algumas propriedades do solo de direta significância biológica, bem como na consistência entre os resultados de rendimento de culturas obtidos na Polônia e em outros países.

A compactação dos solos agrícolas é uma das principais causas da degradação do solo. Ela afeta todas as propriedades e processos do solo, algumas vezes positivamente, mas freqüentemente afeta negativamente. A suscetibilidade do solo à compactação depende primeiramente de suas propriedades físico-mecânicas, que dependem do tipo de solo e conteúdo de água, juntamente com sua condição precedente (Etana et al., 1997). Pelo fato da compactação ser um sério problema para os solos agrícolas, seu estudo é intenso, bem como a busca por parâmetros que permitam sua mensuração e comparação entre os diferentes solos.

Silva et al. (1997) verificaram maior facilidade com que o impacto do manejo na densidade pode ser entendido utilizando o grau de compactação, sendo significativo para a tomada de decisão do manejo do solo. Segundo os autores, havendo valores

de densidade obtidos em diferentes solos para comparação de práticas de manejo, esses valores poderiam ser convertidos em grau de compactação, que resultaria em valores mais úteis para caracterizar os efeitos de práticas específicas de manejo.

Hakansson & Lipiec (2000), em uma revisão da utilidade do grau de compactação em estudos da estrutura do solo e compactação, dizem que, embora a densidade e porosidade ótimas para o crescimento das culturas variem entre os solos, o grau de compactação ótimo para solos revolvidos anualmente é independente da textura e matéria orgânica. A principal razão é que limites críticos de resistência à penetração e porosidade de aeração se relacionam com o grau de compactação e tensão da água do solo de maneira similar na maioria dos solos. Sendo assim, o grau de compactação é um parâmetro mais útil que densidade ou porosidade em estudos de efeitos biológicos da compactação do solo, além de ser útil em estudo dos efeitos no tráfego de máquinas nas condições do solo, pois embora a densidade e porosidade da camada arável do solo variem entre os solos de acordo com o número de passadas de uma máquina, o grau de compactação é muito similar, desde que a condição de umidade seja comparável.

De acordo com Hakansson & Lipiec (2000), o grau de compactação pode formar uma ligação no estudo da cadeia tráfego de máquinas-compactabilidade do solo-propriedades do solo-crescimento de culturas. Segundo os autores, pode ser possível estender o uso do grau de compactação para solos não revolvidos anualmente, mas isso exigiria maiores estudos metodológicos.

Klein et al. (2004) observaram que a densidade relativa ou grau de compactação do solo depende do manejo adotado e é um bom parâmetro para indicar a qualidade física do solo. Esses autores utilizaram o teste de Proctor para obtenção da densidade referência para cálculo do grau de compactação.

6.2. OBJETIVOS GERAIS

Estudar a melhor pressão para se obter a densidade referência e o efeito da textura e do manejo do solo no grau de compactação.

6.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar a densidade referência e o grau de compactação obtido com as pressões de 200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa no teste de compressão uniaxial.

Relacionar porosidade e resistência do solo à penetração com o grau de compactação.

Relacionar crescimento radicular e rendimento da cultura da soja com o grau de compactação.

6.4. MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras em seis solos do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo para realização deste trabalho. Em alguns solos a coleta foi realizada na cabeceira/viradouro da área de plantio com o objetivo de obter amostras com níveis mais elevados de compactação.

6.4.1. Solos e manejos estudados

Os solos em estudo neste capítulo foram os seguintes: Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas), Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos), Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo). Os manejos em estudo bem como a análise granulométrica dos solos se encontram citadas no capítulo I.

Durante a realização deste estudo, com exceção do manejo Escarif do Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) que apresentava a cultura do feijão na área, os demais manejos estavam com a cultura da soja implantada na área.

6.4.2. Macroporosidade do solo

Foram abertas três trincheiras para cada condição de manejo, próximas uma da outra, evitando assim a variabilidade entre as amostras. Em cada trincheira foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros de 3 cm de altura e 5,55 cm de diâmetro nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m. Após o preparo das amostras, estas foram saturadas e realizado todo procedimento para obtenção da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade pelo método da mesa de tensão, descrito em EMBRAPA (1997).

6.4.3. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi realizada com penetrômetro digital marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico dos dados e ponta cônica com ângulo de penetração de 30°. As leituras foram realizadas a cada 1,5 cm de profundidade. A umidade gravimétrica do solo no momento da avaliação da resistência à penetração foi obtida através da coleta dos cilindros, para as profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m.

6.4.4. Grau de compactação ou compactação relativa

A normalização da densidade do solo denota o “grau de compactação” ou “compactação relativa” do solo, GC, que é definida como:

$$GC = 100 D_s / D_{ref}$$

onde D_s é a densidade atual do solo e D_{ref} é a densidade do mesmo solo em um estado de referência obtido em laboratório. O grau de compactação ou compactação relativa é expresso em porcentagem.

Para a determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m, utilizando cilindros de 3 cm de altura e 5,55 cm de diâmetro. As

amostras foram secas em estufa a 105°C e a densidade do solo foi calculada pela relação da massa de solo seco em estufa a 105°C e o volume do cilindro utilizado na coleta.

As amostras com estrutura preservada para avaliação da densidade referência foram coletadas em cilindros com altura de 2,50 cm e diâmetro de 6,10 cm, na camada de 0,08-0,13 m, pois na profundidade de 0,10 m tem sido observado camada mais compactada devido ao tráfego de máquinas. Em cada condição de manejo do solo foram abertas três trincheiras, próximas uma da outra para evitar a variabilidade entre as amostras. Em cada trincheira foram coletadas duas repetições para aplicação das cargas de 200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa e curva de compressão do solo, totalizando seis repetições para cada condição de manejo. As amostras foram saturadas e em seguida equilibradas à tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação em cada amostra de solo carga única de 200, 400, 800 e 1600 kPa, e para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) foi aplicada carga única de 3200 kPa. Também foi obtida a curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas em cada amostra de solo para poder comparar os resultados obtidos com as amostras em que foi aplicada carga única. Para o teste de compressão uniaxial foi utilizado o consolidômetro de marca Boart Longyear com aplicação de pressão por meio de ar comprimido.

As leituras de deformação das amostras em que foi aplicada uma única carga eram obtidas de minuto a minuto até completar 15 minutos, para que ocorresse pelo menos 95 ou 99% de deformação do solo. Para verificar o momento que ocorresse tal deformação do solo durante a aplicação da carga na amostra de solo, seguiu-se metodologia da raiz quadrada do tempo, apresentada por Taylor (1948), na qual ajusta-se uma reta a partir das seis primeiras leituras no defletômetro e estende-se esta linha até a interseção no eixo das ordenadas e da raiz quadrada do tempo no eixo das abscissas, que corresponde ao tempo zero. A partir desse ponto, é traçada uma segunda linha no valor 15% maior que o valor correspondente na primeira linha. A interseção desta segunda linha com os pontos obtidos é definido o tempo no qual ocorre 90% de deformação da amostra de solo. Pelos resultados obtidos, o tempo de aproximadamente 1 ou 3 minutos é suficiente para que ocorra 95 ou 99% de deformação do solo.

6.4.5. Teste de compressão uniaxial

As amostras com estrutura preservada foram coletadas em cilindros com altura de 2,50 cm e diâmetro de 6,10 cm, na profundidade de 0,08-0,13 m. Após o preparo das amostras, elas foram saturadas por capilaridade e em seguida equilibradas a tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa,. Dentro de cada carregamento utilizou-se um intervalo de tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de carregamento. Foi utilizado o consolidômetro de marca Boart Longyear com aplicação de pressão por meio de ar comprimido.

Com base no deslocamento vertical medido no consolidômetro após a aplicação de cada carga e pesagens clássicas em laboratório, foi calculado pelo programa computacional Compress (Reinert et al., 2003) a densidade do solo após cada aplicação de carga, e a umidade gravimétrica e volumétrica inicial.

6.4.6. Rendimento da cultura da soja

Para avaliação do rendimento da cultura da soja foram coletadas 4 linhas de 3 m de comprimento, perfazendo uma área de aproximadamente 5 m². Os dados de rendimento foram calculados para obter resultados em kg ha⁻¹ a 13% base úmida.

Para determinação da umidade dos grãos foi utilizado o método de estufa a 105°C, seguindo procedimento descrito nas Regras para análise de sementes (1992).

6.4.7. Sistema radicular da soja

Para avaliação do crescimento radicular da cultura da soja foram abertas trincheiras no local de coleta das amostras para avaliação das propriedades físicas do solo. As trincheiras foram abertas até a profundidade de crescimento do sistema radicular, o qual era exposto, medido com uma trena a profundidade de crescimento e fotografado. Em seguida a planta era retirada do solo, feita uma limpeza do

sistema radicular e fotografado, colocando ao lado do sistema radicular uma faca como base de tamanho.

6.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a escolha da melhor pressão para se obter a densidade referência em amostras de solo com estrutura preservada, foi necessário a aplicação de diferentes cargas de modo a obter uma densidade referência que não fosse muito baixa, resultando em um grau de compactação muito elevado, ou uma densidade referência muito elevada gerando um baixo grau de compactação.

Tentou-se coletar as amostras no campo na camada de solo com maior compactação (0,08-0,13 m) para se obter a densidade referência, pois caso contrário, para pressões como a de 200 kPa a densidade referência seria menor que a densidade atual do solo obtida no campo, gerando valores de grau de compactação maiores que 100%.

Os valores de densidade do solo obtidos na curva de compressão do solo e aqueles obtidos pela aplicação de uma única carga de 200, 400, 800 e 1600 kPa nas amostras de solo foram semelhantes ou um pouco maior se aplicada carga única, mostrando que para obter a densidade referência pode ser utilizado a curva de compressão do solo ou pode-se aplicar apenas a carga desejada para se obter a densidade referência (Figura 10).

Em algumas amostras de solo foi aplicada a carga de 3200 kPa com o objetivo de verificar se a densidade do solo obtida na curva de compressão e com a aplicação de carga única apresentavam a tendência de estabilizar seus valores e tornar-se constante. Verifica-se na Figura 11 que aumentando a pressão também ocorre um aumento da densidade, mostrando que para se alcançar a densidade máxima do solo nessas condições de umidade e manejo seria preciso maior pressão.

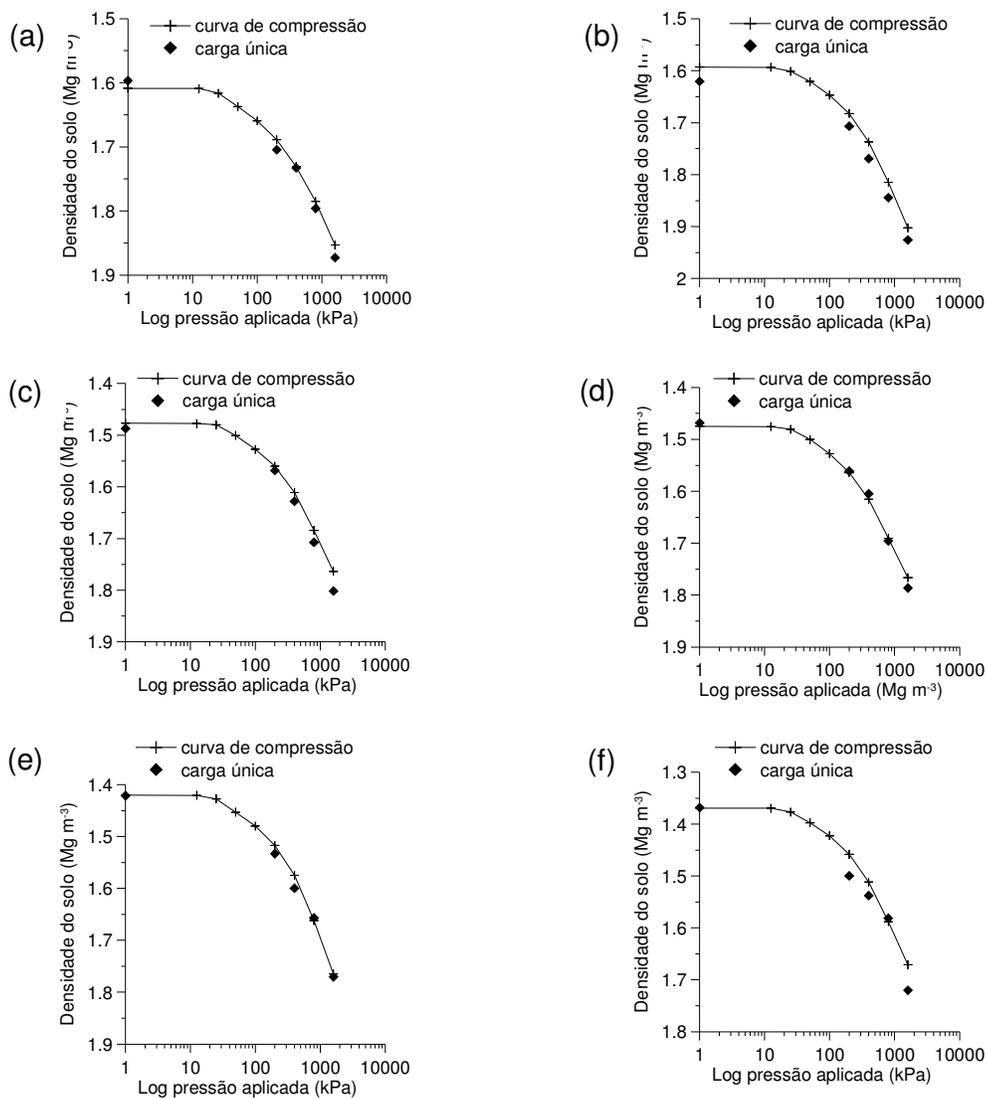


Figura 10 - Curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas e densidade do solo após aplicação de uma única carga (200, 400, 800 e 1600 kPa) em cada amostra para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a), Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) (b), Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) (c), Latossolo Vermelho distrófico típico (d), Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim) (e) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) (f).

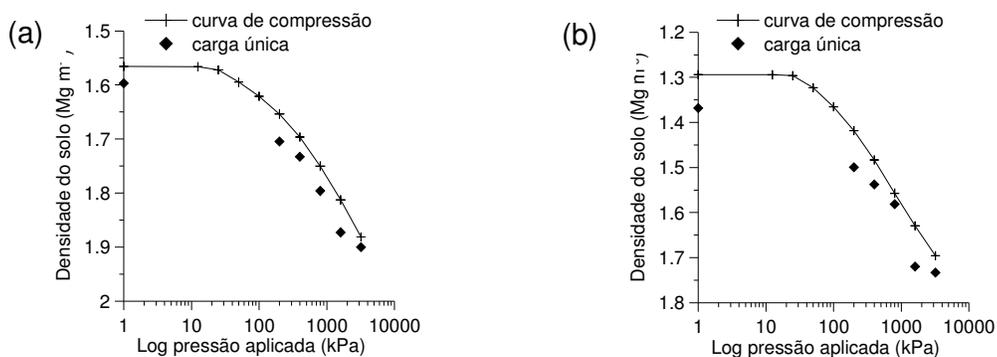


Figura 11 - Curva de compressão do solo com aplicação de cargas sucessivas e densidade do solo após aplicação de uma única carga (200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa) em cada amostra para os solos Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) (a) e Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo) (b).

Considerando os resultados de grau de compactação obtidos com as diferentes pressões estudadas, para as pressões de 200, 400 e 800 kPa foram verificados valores de grau de compactação oscilando entre cerca de 60 a 100%. Para a pressão de 1600 kPa o grau de compactação variou entre aproximadamente 60 a 90%, bem como para a pressão de 3200 kPa.

Dessa maneira, considerando os valores de grau de compactação obtidos para cada pressão e os resultados obtidos na literatura utilizando o teste de Proctor e pressão de 200 kPa com amostras não preservadas, propôs-se a carga ou pressão de 1600 kPa como a pressão para se obter a densidade referência no teste de compressão uniaxial usando carga única ou sucessivas na mesma amostra com estrutura preservada.

Os valores de grau de compactação com densidade referência obtida pela carga de 1600 kPa da curva de compressão e pela aplicação da carga de 1600 kPa apenas apresentaram resultados similares. A relação entre esses dados mostrados na Figura 12 indica intersecção próxima a zero e inclinação próxima a um.

Os maiores rendimentos de soja foram obtidos no grau de compactação de aproximadamente 85% para os Argissolos e 82% para os Latossolos (Figura 13). Notou-se que não é apenas um elevado grau de compactação que reduz o rendimento das culturas, mas também um grau de compactação muito baixo. Grau de compactação elevado pode reduzir a porosidade do solo, diminuindo a aeração

do solo, e aumentando a densidade e resistência do solo à penetração, dificultando o desenvolvimento radicular, enquanto que um grau de compactação muito baixo pode ser indicativo de um solo muito solto, comprometendo a retenção de água e o contato solo semente na semeadura. De acordo com Arvidsson & Hakansson (1991), de modo geral, o crescimento da cultura é afetado adversamente pela compactação do solo; contudo, a máxima produção não será obtida de um solo após seu revolvimento, pois o solo estará muito solto. Beutler et al. (2004) verificaram que o grau de compactação ótimo, medindo a densidade referência pelo teste de Proctor, para a soja é de 80% em um Latossolo Vermelho de textura média. Lipiec et al. (1991) observaram para dois solos com 6 e 7% de argila e 68 e 15% de silte, respectivamente, que o índice de área foliar e o rendimento de grãos da cultura da cevada decresceram quando o grau de compactação foi aproximadamente 88 e 91%, respectivamente, para ambos os solos. Carter (1990) verificou que uma compactação relativa entre 77,5-84% apresentou um rendimento relativo maior ou igual a 95%.

Hakansson (1990) trabalhando com mais de 100 experimentos de compactação do solo com a cultura da cevada, em vários tipos de solo da Suécia, considerou um grau de compactação de 87% como sendo ótimo para a cultura da cevada. Embora o grau de compactação ótimo para a cevada tenha sido independente da distribuição do tamanho de partículas, houve tendência para menor grau de compactação ótimo para solos com conteúdo de argila intermediário em relação a solos com conteúdo de argila baixo ou alto.

Considerando resistência do solo à penetração de 2 MPa como sendo prejudicial ao desenvolvimento radicular das plantas, observou-se na Figura 14 para o Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro) que essa resistência se encontra próxima do grau de compactação de 93%, enquanto que, para Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas) e Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos) o valor de 2 MPa se encontra próximo, respectivamente, do grau de compactação de 88 e 83%. Para os Latossolos, a resistência de 2 MPa corresponde ao grau de compactação de aproximadamente 71% para o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim), 79% para o Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo) e 82% para o Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo) (Figura 15). Deve-se considerar que a

resistência do solo é função da umidade e textura do solo; portanto, solo muito seco ou argiloso apresenta maior resistência se comparado com solo úmido ou arenoso.

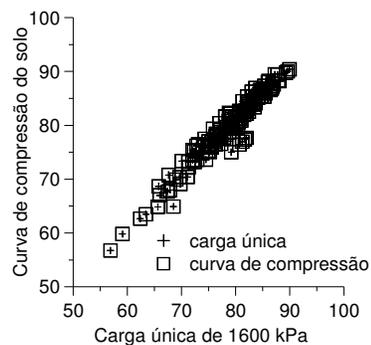


Figura 12 - Grau de compactação utilizando densidade referência obtida com a carga de 1600 kPa da curva de compressão em função do grau de compactação obtido com a densidade referência aplicando apenas 1600 kPa.

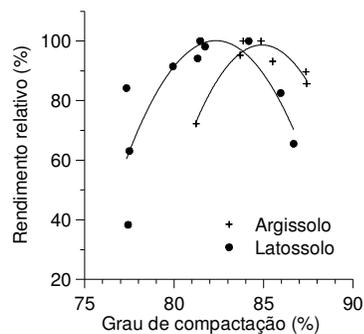


Figura 13 - Rendimento relativo em função do grau de compactação com densidade referência obtida com aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Argissolos e Latossolos em estudo.

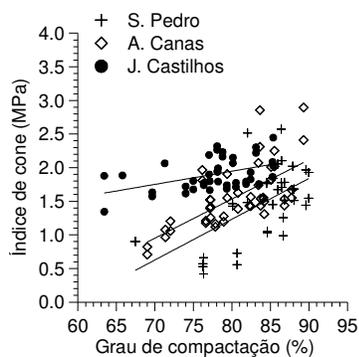


Figura 14 - Índice de cone em função do grau de compactação com densidade referência obtida com a aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Argissolos em estudo.

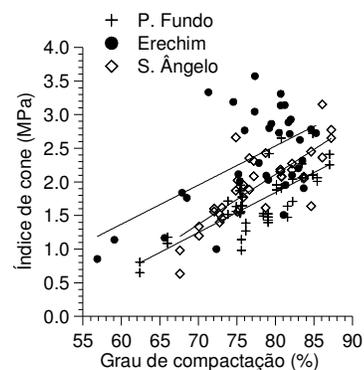


Figura 15 - Índice de cone em função do grau de compactação com densidade referência obtida com a aplicação apenas da carga de 1600 kPa para os Latossolos em estudo.

A macro porosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerada mínima por Vomocil & Flocker (1966) para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas, corresponde a um grau de compactação de aproximadamente 89% para solos com 10% de argila, 80% para solos com 20-30% de argila e 75% para solos com 30-70% de argila (Figura 16). De acordo com Hakansson & Lipiec (2000), quando o grau de compactação for menor que aproximadamente 85%, a aeração do solo e a resistência à penetração não são críticas dentro de uma faixa de tensão entre 10-1500 kPa. Carter (1990) evidenciou uma estreita relação entre a compactação relativa e macroporosidade no horizonte Ap de dois solos com 12 e 7% de argila e 30 e 29% de silte (solos franco arenosos). Esse autor verificou que macro porosidade de 10%, considerada adequada para uma porosidade funcional ou permeabilidade, correspondeu a uma compactação relativa de 89%.

Grau de compactação de aproximadamente 90% restringe o crescimento radicular das plantas de soja a uma profundidade de aproximadamente 0,10 m (Figura 17). Lipiec et al. (1991) verificaram uma concentração de raízes na superfície do solo (0-0,10 m) e um decréscimo da profundidade radicular com aumento do grau de compactação. Esses autores verificaram que raízes crescidas em solo altamente compactado caracterizaram-se por um maior diâmetro, alto grau de achatamento e superfície irregular com células da epiderme deformadas.

Embora tenha-se observado valores de grau de compactação críticos para o crescimento e desenvolvimento das plantas, a condição climática tem grande influência no desenvolvimento das plantas. Arvidsson & Hakansson (1991) relatam que o grau de compactação ótimo tende a ser elevado em anos secos e menores em anos com boa precipitação. Além disso, o valor ótimo difere entre as espécies, cevada, trigo e beterraba açucareira exigem um elevado grau de compactação e batata um menor grau, enquanto que aveias e ervilhas exigem níveis intermediários. Lipiec et al (1991) verificaram que o índice de área foliar e o rendimento de cevada apresentou interação entre condições meteorológicas e grau de compactação.

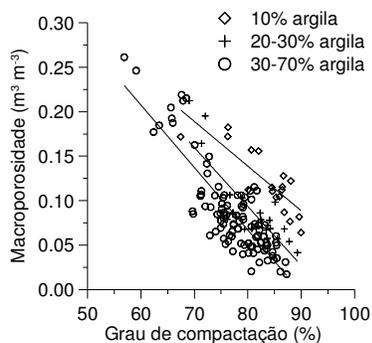


Figura 16 - Macroporosidade em função do grau de compactação para os diferentes teores de argila com densidade referência obtida pela aplicação de carga única de 1600 kPa.

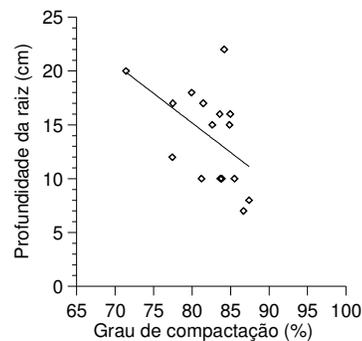


Figura 17 - Profundidade de raiz em função do grau de compactação para os diferentes teores de argila com densidade referência obtida com a aplicação de carga única de 1600 kPa.

Considerando os valores ótimos de grau de compactação observados para obtenção do maior rendimento da cultura da soja, esses valores poderão ser diferentes para outras culturas ou mesmo para diferentes condições climáticas que poderão amenizar ou intensificar os efeitos da compactação.

6.6. CONCLUSÕES

A carga de 1600 kPa foi a melhor pressão para se obter a densidade referência no teste de compressão uniaxial utilizando amostras de solo com estrutura preservada, independente de ser obtida de aplicação de carga única ou da curva de compressão do solo.

O maior rendimento da soja é obtido com grau de compactação, em média de 82% para os Argissolos e 85% para os Latossolos.

O grau de compactação mostrou-se um bom indicador das condições físicas do solo, apresentando boa relação com rendimento da cultura da soja, resistência à penetração, macroporosidade e desenvolvimento radicular.

O grau de compactação parece ser independente da granulometria do solo, baseado principalmente nos resultados de rendimento e macroporosidade em função do grau de compactação.

6.7. BIBLIOGRAFIA CITADA

ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil & Tillage Research**, v.20, p.319-332, 1991.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G; FERRAZ, M.V. Densidade relativa de Latossolos e produtividade de soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROM)

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 413p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

ETANA, A.; COMIA, R.A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.13-21, 1997.

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, 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 & Tillage Research**, v.53, p. 71-85, 2000.

KLEIN, V.A.; MASSING, J.P.; CÂMARA, R.K.; BIASUZ JÚNIOR, I.J.; SIMON, M.A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROM)

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.87-94, 2000.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & tillage Research**, v.19, p.307-317, 1991.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Determinação do grau de umidade. In: **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.185-190, 1992.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...**Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM)

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. **Soil & Tillage Research**, v. 1, p. 207-237, 1981.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 107p.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004a. (CD-ROM)

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004b. (CD-ROM)

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948. 770p.

TWEDORFF, D.A.; CHANASYK, D.S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M.A.; BARON, V.S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, v.79, p.465-471, 1999.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the Am. Soc. Agric. Eng.**, v.4, p.242-246, 1966.

7. CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO ADICIONAL E ESCARIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CRESCIMENTO E RENDIMENTO DE CULTURAS

7.1. INTRODUÇÃO

Os efeitos no solo e no desenvolvimento e rendimento das culturas devido à compactação causam diminuição da capacidade de aeração e da capacidade de armazenamento de água, pela redução dos espaços vazios do solo; diminuição da permeabilidade, pela eliminação dos macroporos do solo; e impedimento à penetração das raízes, pelo adensamento das camadas do solo (Beltrame & Taylor 1980a).

A taxa potencial de crescimento de uma cultura, e a demanda por água, oxigênio e nutrientes do solo são determinadas pelo estágio de crescimento da cultura, seu tamanho atual e condições climáticas predominantes. O crescimento da cultura é menor que seu potencial se a absorção de um ou mais desses elementos é menor que sua demanda. Isso pode ser causado por um limitado fornecimento do solo para o sistema radicular ou por uma limitada atividade da raiz (Boone & Veen, 1994).

De acordo com Boone & Veen (1994) a resposta das culturas à compactação do solo pode ser explicada se apropriados fatores do solo e crescimento das culturas são adequadamente determinados.

A trafegabilidade do solo resulta das interações entre solo-rodado que determina o desempenho do rodado do veículo em certas situações de campo. Técnicas de manejo do solo, como tráfego em faixa e plantio direto, são freqüentemente utilizadas com o objetivo de melhorar as condições de acesso à área pelos veículos durante os períodos úmidos (Guérif, 1994).

As medidas práticas que vêm sendo utilizadas na tentativa de solucionar o problema da compactação do solo carecem de um conhecimento mais aprofundado dos sintomas e da influência no solo e na planta do fenômeno da compactação. Um melhor entendimento deste fenômeno promoverá uma maior prevenção da compactação com conseqüente recuperação/manutenção das condições físicas desejáveis do solo (Pedrotti & Dias Junior, 1996).

Pedrotti & Dias Junior (1996) dizem que quando a compactação do solo começa a limitar o desenvolvimento das culturas, tornam-se necessárias medidas curativas com o objetivo de quebrar a camada compactada. Porém, a restauração das condições físicas iniciais do solo, se possível, é de alto custo e consome muito tempo. Segundo os autores, somente quando for realmente necessário e em condições adequadas de umidade e nas profundidades adequadas a operação de subsolagem deve ser realizada por ser uma operação de alto consumo energético, talvez o maior entre as operações de preparo do solo.

O efeito da compactação no crescimento da planta pode ser importante apenas quando alterações na distribuição do sistema radicular limitam o suprimento de água e nutrientes (Unger & Kaspar 1994). Por exemplo, a compactação superficial nas entrelinhas pode limitar a absorção de fertilizantes aplicados na ou próximo à superfície das entrelinhas. Somado a isso, condições climáticas por meio do efeito da água do solo na sua resistência, podem aumentar ou diminuir o efeito da compactação no crescimento radicular.

A subsolagem provoca a deterioração da resistência do agregado, o que, especialmente em solos muito compactados, resulta em solo mais fraco e menos estável, sendo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa (Canarache et al., 2000).

A intensa mecanização na agricultura tem ocasionado compactação do solo. Um solo pode ser quimicamente bom, mas ocorrendo a compactação as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado, e é nelas que ocorre a maior taxa de absorção. Além disso, com a compactação, diminuem os espaços livres do solo e, conseqüentemente, a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera, podendo ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos da planta (Queiroz-Voltan et al., 2000).

Canarache et al. (2000) observaram correlação significativa entre densidade do solo e tamanho de agregados com rendimento de culturas, enquanto a pressão de preconsoidação e índice de compressão não afetaram diretamente o rendimento das culturas.

A permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, continuidade e tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo à água (Beutler et al., 2001).

Trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, Silva et al. (2003) observaram que a intensidade do tráfego do rodado e a ação da soleira dos implementos alteraram a compressibilidade, a densidade do solo, a porosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado nas profundidades superficial (0,00-0,05 m), profundidade média de trabalho (0,24-0,27 m) e profundidade de corte dos implementos arado de discos, arado de aivecas e grade aradora.

Estando o solo com sua estrutura alterada de forma negativa, Oliveira et al. (2003) afirmam que uma pequena pressão é suficiente para torná-lo inadequado, em termos de macroporosidade, para o bom crescimento e desenvolvimento de plantas, quando comparado com o mesmo solo em condições naturais e com o mesmo teor de água.

De acordo com Reichert et al. (2003), a agregação e a compactação do solo são dois processos importantes que ocorrem nos solos agrícolas e que tem grande relação com a sua qualidade. Segundo eles, sua avaliação, por meio de indicadores, associada a informações sobre crescimento vegetal e aspectos ambientais, pode ser útil para o estabelecimento de uma agricultura mais sustentável.

O peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado com a modernização da agricultura. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações das propriedades físicas do solo. Aliado a isso, ocorreu a adoção do sistema de plantio direto, deixando o solo de ser revolvido e a compactação deixando de ser aliviada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos (Streck, et al., 2004).

Não há afirmação concreta sobre os níveis de compactação e intensidade de alterações nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento das culturas, sendo necessário o estudo de indicadores do solo (porosidade, densidade,

resistência à penetração, entre outros) e da planta (altura, raiz, rendimento), e resposta das culturas aos níveis de compactação, podendo dessa forma quantificar reduções no rendimento e definir a melhor estratégia para o manejo do solo e das culturas.

7.2. OBJETIVOS GERAIS

Estudar o efeito de diferentes condições de compactação, representadas por diferentes manejos do solo, sobre as propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas.

7.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a porosidade, densidade e resistência do solo à penetração em solo submetido a níveis de compactação (diferentes sistemas de manejo do solo).

Verificar o crescimento das culturas de milho, soja e trigo influenciadas pela compactação do solo.

Quantificar a redução no rendimento das culturas de milho, soja e trigo causada pela compactação do solo.

7.4. MATERIAL E MÉTODOS

Foi conduzido um experimento no campo tecnológico da Cooperativa Regional Tritícola Serrana Ltda (COTRIJUÍ), Município de Ijuí (RS), em um Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999), unidade de mapeamento Santo Ângelo (Brasil, 1973; Streck et al., 2002).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), com 3 repetições. A dispersão das amostras de solo foi realizada pela agitação horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de $1,11 \text{ g cm}^{-3}$ (Suzuki et al., 2004a; Suzuki et al. 2004b). A granulometria do solo em estudo é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise granulométrica para as camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m para o Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo).

Profundidade (m)	Areia			Silte	Argila
	Total	Grossa	Fina		
	g kg ⁻¹				
0-0,05	94	24	70	266	640
0,05-0,10	88	23	65	256	656
0,10-0,15	84	23	62	257	658
0,15-0,20	82	23	60	267	651
0,20-0,25	83	22	61	263	654
0,25-0,30	82	20	62	254	664

7.4.1. Tratamentos e delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em um bifatorial com parcelas subdivididas, com três repetições, tendo nas parcelas principais três estados de compactação (PDC - Plantio direto há seis anos que recebeu compactação adicional por quatro passadas de máquina com massa de 10 Mg no ano agrícola 2003/2004; PD - Plantio direto há seis anos; Escarif - Plantio direto há seis anos, sendo escarificado e gradeado no ano agrícola 2003/2004) e nas subparcelas as culturas de verão soja e milho e trigo no inverno. O tamanho da parcela foi de 10 m de largura e 15 m de comprimento.

7.4.2. Especificações da carregadeira utilizada para compactar o solo

A compactação do solo foi feita com uma carregadeira pesando 10 Mg, de marca CASE modelo W 20 turbo. O pneu da carregadeira era da marca Goodyear type 45 17,5-25 SGL D/L-2A L-2/G-2. O contato do pneu com o solo foi de aproximadamente 70,5 cm de comprimento e 40 cm de largura.

7.4.3. Propriedades físicas avaliadas

7.4.3.1. Porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo

Foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros de 3 cm de altura e 5,55 cm de diâmetro nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m, sendo realizadas as seguintes determinações: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, determinadas pelo método da mesa de tensão, descrito em EMBRAPA (1997). Foram utilizadas quatro repetições.

7.4.3.2. Resistência do solo à penetração

Foi medida a resistência do solo à penetração com penetrômetro digital marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico dos dados e ponta cônica com ângulo de penetração de 30°. As leituras foram realizadas a cada 1,5 cm de profundidade. A resistência à penetração foi realizada de duas maneiras: a) leituras apenas na entrelinha da cultura; b) leituras na linha de semeadura, e a cada 0,10; 0,20 e 0,30 m para a esquerda e para a direita da linha de semeadura da soja; 0,15; 0,30 e 0,45 m da linha de semeadura do milho e 0,03 e 0,06 m da linha de semeadura do trigo.

A umidade do solo no momento da avaliação da resistência à penetração foi obtida pelo TDR (Time Domain Reflectometry) da Soil Moisture. Para obtenção da umidade volumétrica do solo foi utilizada a equação de Topp et al. (1980):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,9 \times 10^{-2} \varepsilon_r - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3$$

$$\varepsilon_r = (ct/2L)^2$$

onde:

ε_r : constante dielétrica;

c : velocidade de propagação de uma onda eletromagnética (3×10^8 m/segundo);

t : tempo de sinal no solo medido pelo TDR;

L : comprimento da haste transmissora de sinais.

O comprimento das hastes transmissoras de sinais foi de 0,23 m. As hastes foram colocadas no solo horizontalmente no perfil nas profundidades de 0,05; 0,15; 0,25 e 0,35 m.

7.4.4. Avaliação do crescimento e rendimento das culturas

7.4.4.1. Cultura da soja e milho

Para o rendimento das culturas foram coletadas 3 repetições para cada tratamento, sendo cada repetição constituída por 3 linhas de 2 m para a soja e 2 linhas de 4 m para o milho. A cultivar de soja foi BRS 153 e do milho AGN 35 A 42. Os cálculos de rendimento foram realizados em kg ha^{-1} a 13% base úmida.

Para determinação da umidade dos grãos foi utilizado o método de estufa a 105°C , seguindo procedimento descrito nas Regras para análise de sementes (1992).

Foi avaliada a altura de plantas na fase de grão leitoso (fase R2) para o milho, e para a soja foram feitas duas avaliações, a primeira no início da formação do grão (fase R5) e a segunda 17 dias após a primeira avaliação (fase R5). Foram utilizadas 6 plantas para cada tratamento para avaliação da altura. Para determinar a altura da soja, mediu-se a distância do primeiro nó até o último nó da haste principal, e para o milho foi medido do primeiro nó até a inserção do pendão.

7.4.4.2. Cultura do trigo

Para a semeadura do trigo foi utilizada a cultivar BRS-Angico. No florescimento do trigo foi feita a avaliação do seu sistema radicular pelo método do perfil cultural, descrito por Böhm (1979). Para isto, foi utilizado um quadro de 0,50 m de largura x 0,30 m de altura, com malha de 0,05 m x 0,05 m.

7.4.5. Condução do experimento

O preparo do solo com escarificação e gradagem e a aplicação da compactação nos tratamentos foi realizada dia 08/12/2003. No dia 10/12/2003 foi realizada a semeadura das culturas de verão soja (espaçamento de 0,45 m) e milho (espaçamento de 0,90 m). A adubação de base utilizada foi de 300 kg ha⁻¹ de 02-20-20 para a soja e 350 kg ha⁻¹ de 05-20-20 para o milho. A adubação de cobertura no milho foi de 150 kg ha⁻¹ de uréia. Para o controle fitossanitário foram feitas aplicações de fungicidas, inseticidas e herbicidas quando necessário. No dia 05/02/2004 foram feitas coletas para determinações de porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, além da avaliação da resistência do solo à penetração. Dia 03/03/2004 foi medida a altura do milho e realizada a primeira avaliação da altura da soja. Dia 20/03/2004 foi realizada a segunda avaliação da altura da soja. Dia 19/04/2004 avaliou-se o rendimento das culturas da soja e milho e a resistência do solo à penetração.

A semeadura do trigo (espaçamento de 0,18 m) foi realizada dia 02/06/2004, com adubação de base de 250 kg ha⁻¹ de 05-20-20. Dia 05/07/2004 foi realizada a primeira adubação de cobertura no trigo, com 100 kg ha⁻¹ de uréia, e dia 20/07/2004 a segunda cobertura, com 50 kg ha⁻¹ de uréia. Para o controle fitossanitário foram feitas aplicações de fungicidas, inseticidas e herbicidas quando necessário. Dia 19/09/2004 foi feita a avaliação do sistema radicular do trigo e resistência do solo à penetração.

7.4.6. Análise estatística

Os dados foram analisados estatisticamente pelo programa computacional SAS (1990), utilizando o teste Diferença Mínima Significativa (DMS) a 5% de significância.

7.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.5.1. Propriedades físicas do solo

A resistência do solo à penetração logo após a aplicação da compactação, apresentou aumento significativo até a profundidade de 0,12 m (Figura 18). Streck et al. (2004) verificaram, em um solo franco-arenoso, aumento da resistência até 0,28 m em tratamentos com tráfego e sem tráfego. Essas diferenças podem estar associadas ao tipo de solo e argilo-mineral, a pressões sofridas anteriormente e à capacidade de suporte de carga de cada solo.

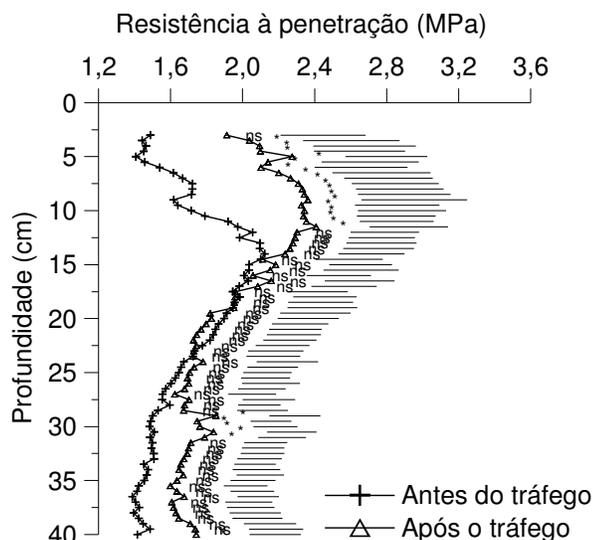


Figura 18 - Resistência do solo à penetração antes e logo após quatro passadas de máquina de 10 Mg. Barras horizontais comparam os valores de resistência à penetração para cada profundidade, pelo teste DMS a 5%.

Os maiores valores de resistência do solo nas culturas de soja e milho no PDC foram até a profundidade de 0,10 m, devido à compactação adicional (Figuras 19a e 19b). Esses valores superaram 2 MPa, considerado restritivo ao desenvolvimento radicular da planta. O Escarif apresentou menor resistência, apesar da menor

umidade (Figura 20), até a profundidade de 0,10 m, embora mantenha a tendência até 0,20 m. Após essa profundidade a resistência foi maior e igual aos outros tratamentos, devido à haste do escarificador não ter alcançado profundidades maiores que 0,20 m. Secco & Reinert (1997) verificaram em um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa sob sistema de plantio direto há quatro anos que dez meses após a escarificação o solo não havia retornado ao seu estado inicial. De acordo com Beltrame & Taylor (1980b), considerando que o teor de umidade no momento da aplicação da subsolagem seja ideal para tal operação, a duração do efeito da subsolagem será por três ou quatro anos em solos argilosos e sob preparo convencional. Contudo, em solo sob sistema de plantio direto esse tempo parece ser menor.

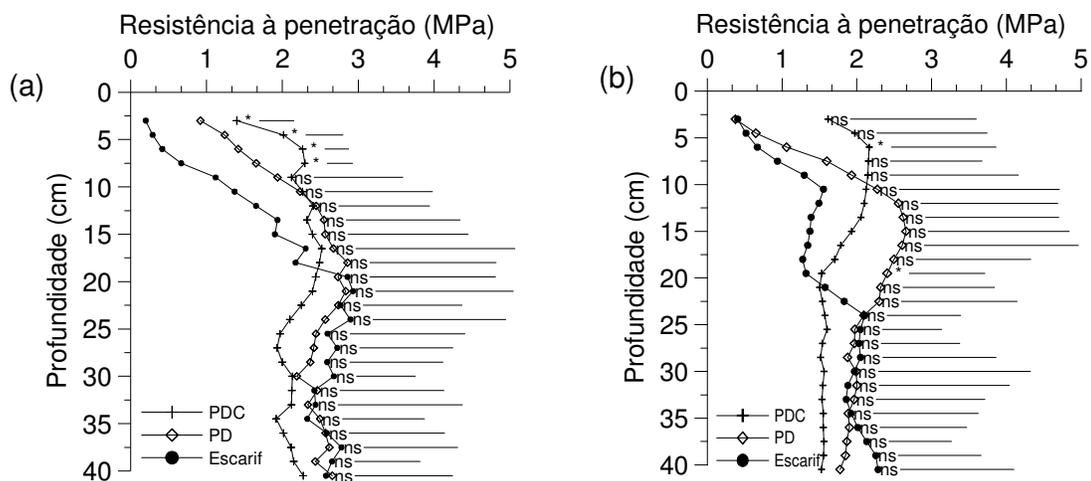


Figura 19 - Resistência à penetração do solo na cultura da soja (a) e milho (b) nos três tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 05/02/2004 (57 dias após a semeadura). Barras horizontais comparam os valores de resistência à penetração para cada profundidade, pelo teste DMS a 5%.

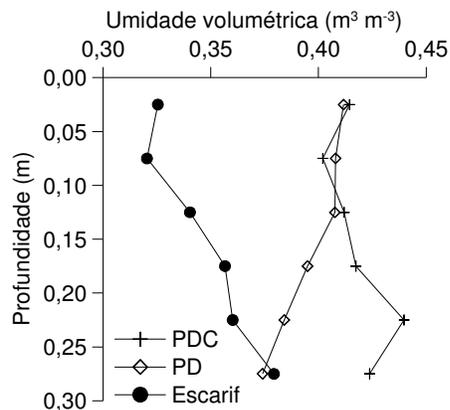


Figura 20 - Umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) obtida no momento da avaliação da resistência à penetração nos três tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 05/02/2004 (57 dias após a semeadura).

Em um Vertissolo, Radford et al. (2000) observaram que a compactação causada por uma passada de uma máquina com 10 Mg e 2 Mg, respectivamente no eixo dianteiro e traseiro, apresentou um aumento significativo na densidade do solo a uma profundidade de 0,11 m, e o índice de cone aumentou significativamente em duas zonas, 0-0,11 e 0,13-0,18 m de profundidade.

A macroporosidade e microporosidade foram afetados pelo tratamento. Para profundidade, todos os parâmetros avaliados (porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo) foram significativos, e para a interação manejo x profundidade apenas a densidade do solo não foi significativa.

A maior densidade do solo foi verificada na camada de 0,10-0,15 m (Tabela 17). Considerando a densidade do solo de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ como sendo crítica ao desenvolvimento das plantas em solos argilosos (> 55% de argila) (Reichert et al. 2003), notou-se que para o PDC valores superiores ao crítico encontraram-se na camada de 0,05-0,15 m, enquanto que, para os demais manejos, a densidade encontrou-se abaixo da considerada crítica.

Tabela 17 - Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) para os tratamentos em estudo no Latossolo Vermelho distroférico típico.

Prof. (m)	Manejos			média
	PDC	PD	Escarif	
0-0,05	1,36	1,26	1,19	1,27 c
0,05-0,10	1,48	1,42	1,24	1,38 ab
0,10-0,15	1,50	1,41	1,29	1,40 a
0,15-0,20	1,41	1,36	1,29	1,35 ab
0,20-0,25	1,39	1,29	1,27	1,31 bc
0,25-0,30	1,33	1,26	1,34	1,31 bc
média	1,41	1,33	1,27	

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

A resistência à penetração evidenciou comportamento semelhante da resistência para as culturas da soja e do milho dentro de cada nível de compactação (Figuras 21, 22 e 23). No PDC valores de resistência elevados logo nos primeiros centímetros da superfície do solo, enquanto no PD foram verificados valores críticos de resistência (2 MPa) abaixo de 0,10 m. No manejo Escarif, é evidente a maior resistência próxima à camada de 0,25-0,30 m, profundidade onde a haste do escarificador não conseguiu romper. No entanto, verificou-se que, em alguns casos, a camada de maior resistência não é uniforme, permitindo ao sistema radicular procurar os espaços de menor resistência para se desenvolver. Segundo Queiroz-Voltan et al. (2000), como no campo a compactação não se apresenta como uma massa contínua, as raízes procuram os espaços livres no solo para se desenvolver. De acordo com Unger & Kaspar (1994) os solos não são uniformemente compactados pelo tráfego de máquinas. Segundo eles, devido à direção do tráfego para muitas operações no campo ser paralela a linha de plantio, o tráfego tende a se concentrar nas entrelinhas, e algumas entrelinhas são compactadas enquanto outras não. Como resultado, o tráfego pode causar enormes diferenças nas condições físicas do solo nas entrelinhas trafegadas e não trafegadas.

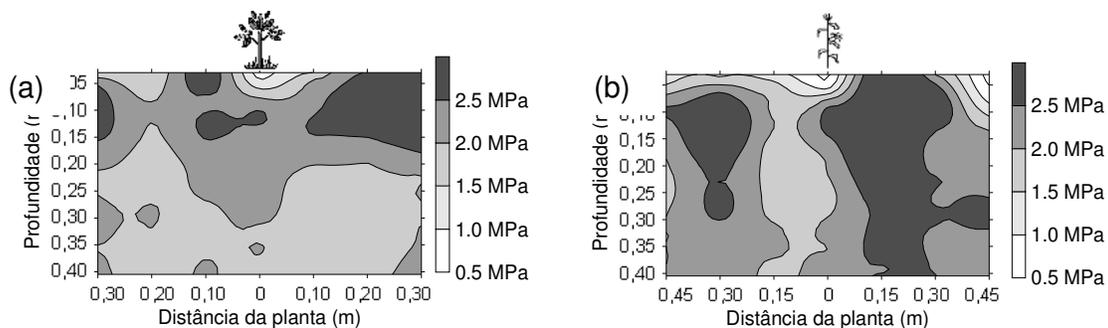


Figura 21 - Resistência à penetração no tratamento PDC, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).

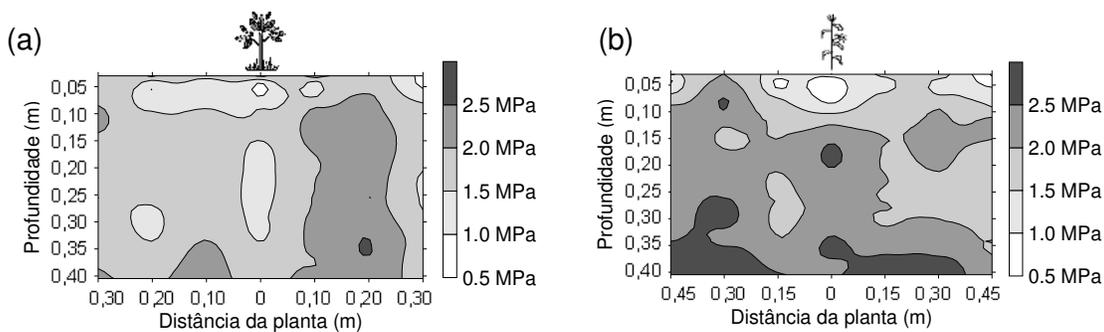


Figura 22 - Resistência à penetração no tratamento PD, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).

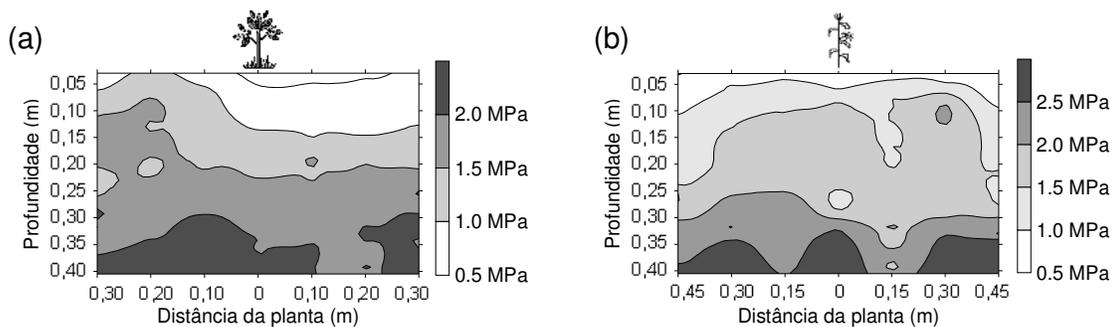


Figura 23 - Resistência à penetração no tratamento Escarif, nas culturas da soja (a) e milho (b). Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).

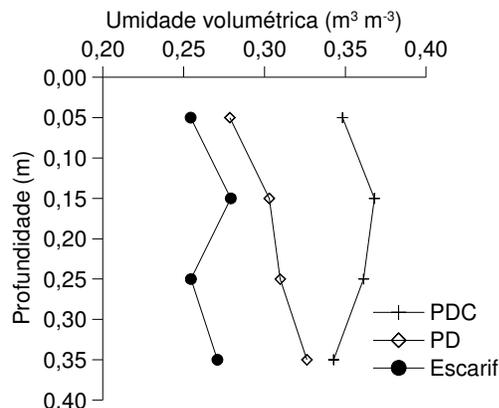


Figura 24 - Umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no momento da avaliação da resistência do solo à penetração nos tratamentos em estudo. Avaliação realizada dia 19/04/2004 (131 dias após a semeadura).

No campo verificou-se, no PDC crescimento radicular até aproximadamente 0,05-0,08 m de profundidade, enquanto que no PD e Escarif as raízes eram encontradas próximo de 0,20-0,22 m de profundidade.

A porosidade total, macro e microporosidade variaram com a profundidade e foi função da interação com o manejo adotado (Tabela 18). Fato discordante do observado por Streck et al. (2004), os quais, trabalhando com diferentes intensidades de tráfego em um Argissolo Vermelho, verificaram que a microporosidade não foi alterada pelo tráfego de máquinas em nenhuma profundidade.

O manejo Escarif apresentou maior macroporosidade e menor microporosidade devido ao revolvimento do solo, enquanto que o PDC apresentou menor macroporosidade e maior microporosidade devido à compactação adicional (Tabela 18). Observou-se que os valores de macroporos no PD e PDC se encontram menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, valor considerado mínimo por Vomocil & Flocker (1966) para o bom desenvolvimento da planta.

A porosidade total apresentou diferença significativa entre os tratamentos apenas na superfície do solo (profundidades de 0-0,5 e 0,05-0,10 m), sendo o Escarif o tratamento com maior volume de poros, principalmente macroporos, originados pelo revolvimento do solo (Tabela 18).

Para as camadas de 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m, os tratamentos não apresentaram diferença para macroporosidade (Tabela 18). O fato de não haver

diferenças significativas nas camadas mais subsuperficiais para macroporosidade evidencia o rompimento da camada compactada pelo escarificador até os 0,15-0,20 m de profundidade. Todavia, provavelmente, o método de coleta não seja preciso suficiente para representar o cisalhamento realizado pela escarificação.

Tabela 18 - Valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade para os tratamentos em estudo no Latossolo Vermelho distroférico típico.

Prof. (m)	Manejo			média
	PDC	PD	Escarif	
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,05	0,496 B	0,520 AB	0,573 A	0,530
0,05-0,10	0,466 B	0,466 B	0,544 A	0,492
0,10-0,15	0,460 A	0,464 A	0,530 A	0,484
0,15-0,20	0,483 A	0,482 A	0,505 A	0,490
0,20-0,25	0,497 A	0,494 A	0,513 A	0,501
0,25-0,30	0,510 A	0,510 A	0,488 A	0,503
média	0,485	0,489	0,526	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,05	0,052 B	0,091 B	0,219 A	0,120
0,05-0,10	0,020 B	0,038 B	0,163 A	0,073
0,10-0,15	0,017 B	0,033 B	0,150 A	0,066
0,15-0,20	0,031 B	0,049 AB	0,093 A	0,057
0,20-0,25	0,021 A	0,061 A	0,094 A	0,058
0,25-0,30	0,043 A	0,086 A	0,051 A	0,060
média	0,031	0,059	0,128	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,05	0,444 A	0,429 A	0,354 B	0,409
0,05-0,10	0,446 A	0,429 A	0,381 B	0,419
0,10-0,15	0,442 A	0,431 A	0,380 B	0,418
0,15-0,20	0,453 A	0,433 AB	0,413 B	0,433
0,20-0,25	0,476 A	0,433 B	0,419 B	0,443
0,25-0,30	0,467 A	0,424 B	0,437 AB	0,443
média	0,455	0,430	0,397	

Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Para microporosidade, todas as profundidades apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que para as profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m os tratamentos sob plantio direto (PDC e PD) apresentaram os maiores valores de microporos, fato que está relacionado ao acúmulo de pressões no solo pelo tráfego de máquinas, reduzindo os poros de maior tamanho (macroporos) e aumentando o volume de poros menores (microporos) (Tabela 18). Durante a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente poros que retêm água, e esse decréscimo da porosidade de aeração pode ser 1,5-2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total (Boone & Veen, 1994). A diminuição do coeficiente de difusão do oxigênio vai depender da geometria e estabilidade dos canais de poros de aeração e do grau de deformação durante a compactação (Boone & Veen, 1994).

7.5.2. Crescimento e rendimento das culturas de milho e soja

As plantas de milho foram maiores no PD (Tabela 19), diferindo do Escarif, que diferiu do PDC, mas mesmo com melhor desenvolvimento em altura, não houve diferença estatística significativa no rendimento do milho entre os tratamentos (Figura 25a). O PD e Escarif apresentaram maior altura da cultura da soja, diferindo do PDC (Tabela 19).

O crescimento do sistema radicular da soja no PDC foi até os 0,05-0,08 m de profundidade, enquanto que no PD e Escarif o sistema radicular da soja apresentava bom desenvolvimento, chegando a profundidades maiores que 0,20 m. O potencial de crescimento da cultura bem como as condições físicas do solo determinam a taxa de crescimento da raiz e seu tamanho (Boone & Veen, 1994). As condições físicas do solo inadequadas no PDC, somado a um déficit hídrico durante o ciclo da cultura, dificultaram o desenvolvimento radicular da soja e o fornecimento de água, oxigênio e nutrientes para a cultura, afetando o crescimento da parte aérea e seu rendimento de grãos. De certa maneira, a compactação do solo determina as relações entre ar, água e temperatura que influenciam a germinação, a emergência das plântulas, o crescimento radicular e, praticamente todas as fases do desenvolvimento (Camargo, 1983).

Tabela 19 - Altura média da cultura do milho e soja (obtida na primeira e segunda avaliação) nos tratamentos em estudo.

Cultura de verão	Tratamentos		
	PDC	PD	Escarif
	cm		
Milho	125 C	193 A	169 B
Soja (1 ^a avaliação)	43 B	57 A	52 A
Soja (2 ^a avaliação)	46 B	59 A	54 A

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

Boa condição física do solo, e possivelmente química e biológica, também contribuíram para a maior produtividade da soja no PD, que diferiu dos tratamentos PDC e Escarif (Figura 25b). Devido a período de déficit hídrico durante o desenvolvimento das culturas, seus rendimentos foram baixos, porém essa condição foi ideal para que o PD mostrasse sua capacidade em favorecer o desenvolvimento das culturas sob condições críticas, em relação aos demais tratamentos. Flowers & Lal (1998) verificaram em um solo “Mollic Ochraqualf” (18,7; 42,4 e 38,9% respectivamente de areia, silte e argila, na superfície) que o rendimento da soja foi reduzido significativamente em 9 e 19%, respectivamente pelo tráfego de uma máquina de 10 Mg e 20 Mg, comparado a área que não foi aplicada carga. E redução de 9 e 14% respectivamente para a área escarifada e gradeada, comparada ao plantio direto. Secco (2003) trabalhando com diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho distrófico típico e um Latossolo Vermelho distroférrico típico, verificou que para a soja os níveis de compactação não promoveram decréscimo da produção nos dois solos, e para o milho ocorreu decréscimo apenas no Latossolo Vermelho distroférrico típico.

Trabalhando com diferentes níveis de compactação em um Vertissolo na Austrália, Radford et al. (2001) também verificaram que cargas no eixo de 6-10 Mg reduziram o rendimento de milho e trigo, devido à redução do armazenamento de água e/ou eficiência no uso da água. Bicki & Siemens (1991) verificaram em um “Argiaquic Argiaboll” que, na média de quatro anos, o rendimento de milho e soja não diferiu significativamente para os tratamentos com compactação por uma

máquina de 8,5 Mg e sem compactação adicional. Contudo, sob condições de baixa umidade do solo, o rendimento do milho nas parcelas compactadas foram maiores do que as que não receberam compactação adicional, enquanto com condição de umidade mais favorável a parcela compactada reduziu o rendimento.

Resultados de 1977 a 1984, em estudo realizado por Derpsch et al. (1986) em um Latossolo, mostraram que o rendimento de trigo e soja foram maiores no plantio direto do que no cultivo mínimo e convencional. Alves & Suzuki (2002) observaram, em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, maior rendimento da soja no plantio direto há cinco anos em relação ao preparo convencional (grade aradora e grade niveladora). Na mesma época e solo e manejos citados anteriormente, Suzuki & Alves (2004) não observaram diferenças significativas no rendimento do milho.

Foi observado uma redução do número de plantas de milho no Escarif, enquanto que para a soja não foi observada essa redução, podendo estar associado a uma germinação mais rápida da cultura da soja, tendo um melhor aproveitamento da umidade do solo. O menor contato do solo com a semente e as elevadas temperaturas do solo no manejo Escarif, devido ao seu revolvimento, também contribuíram para a baixa taxa de germinação neste manejo. Lipiec et al. (1991) verificaram que a umidade do solo ou o potencial de água são de particular importância, pois afetam diretamente a crescimento da cultura e indiretamente afetam outros fatores significativos como aeração, impedimento mecânico e temperatura do solo.

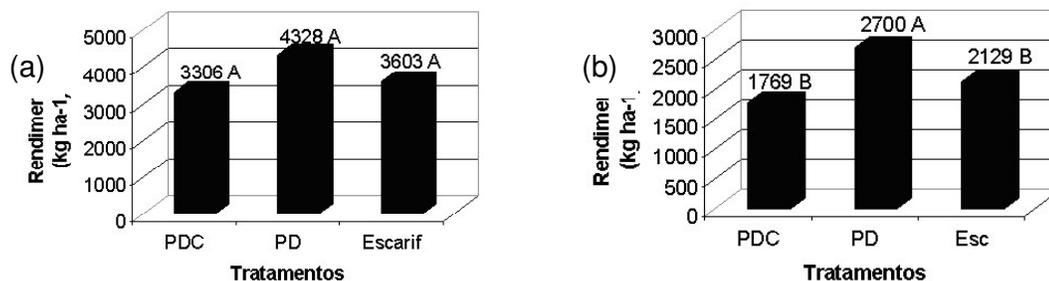


Figura 25 - Rendimento da cultura do milho (a) e da soja (b) obtido nos tratamentos em estudo. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5%.

De acordo com Pedrotti & Dias Junior (1996) a operação de subsolagem tem por objetivos quebrar a camada compactada ou adensada temporariamente, sendo os principais benefícios da subsolagem a redução da densidade do solo na linha subsolada com conseqüente aumento da porosidade, aeração, drenagem interna e aumento da infiltração de água no solo. Porém, notou-se que para essas condições de déficit hídrico ocorrido no período de estudo, esta operação não foi uma boa opção.

7.5.3. Cultura do trigo

7.5.3.1. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração, quantificada nos tratamentos com a cultura do trigo na área apresentou valores elevados provavelmente devido à baixa umidade do solo no momento dessa avaliação (Figura 26). O PDC apresentou valores elevados de resistência à penetração nos primeiros centímetros da superfície do solo, no PD os valores críticos de resistência encontraram-se mais abaixo, próximo aos 0,05 m, e no Escarif, com exceção da sucessão com milho, os valores críticos de resistência encontraram-se a 0,10-0,15 m de profundidade (Figura 27). Observou-se que a camada de resistência maior que 2 MPa, considerada crítica, não é uniforme, permitindo o sistema radicular desenvolver nesses espaços de menor resistência.

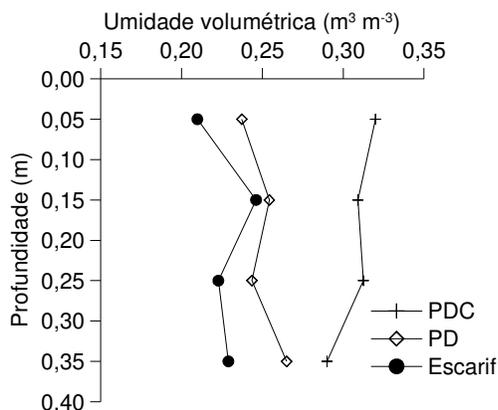


Figura 26 - Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) no momento da avaliação da resistência. Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).

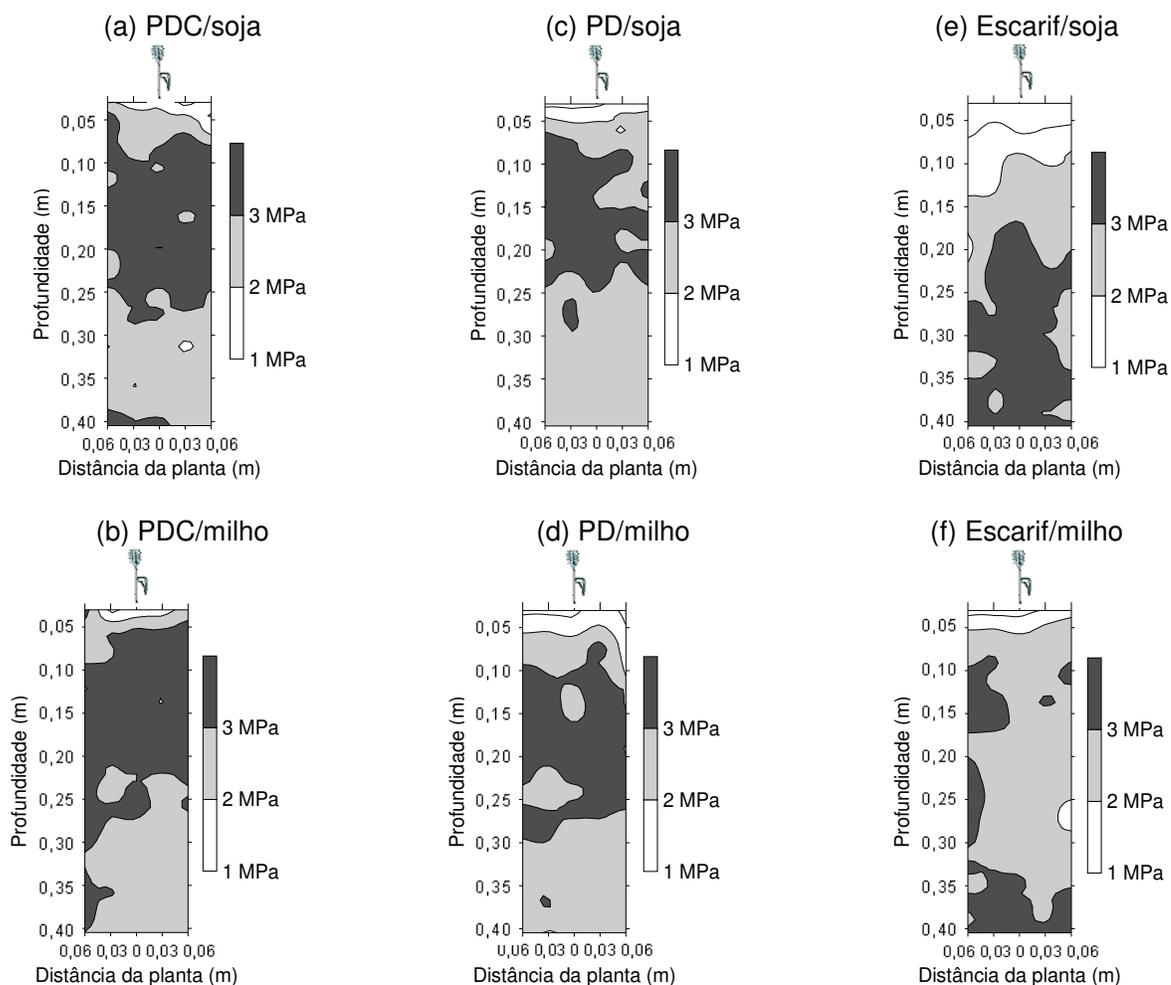


Figura 27 - Resistência do solo à penetração nos diferentes níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja/milho). Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).

7.5.3.2. Crescimento radicular e rendimento do trigo

Em cada nível de compactação, o desenvolvimento radicular do trigo, onde anteriormente se encontrava milho ou soja, é semelhante (Figura 28). Comparando os níveis de compactação, notou-se no PDC um sistema radicular mais superficial, com maior concentração até os 0,10 m de profundidade, embora houvesse raízes até 0,20 m. No Escarif observou-se mais raízes em relação ao PD, mas notou-se em ambos os manejos uma boa distribuição do sistema radicular, alcançando 0,30 m de profundidade. No campo foi possível visualizar menor altura do trigo no PDC, em

relação aos outros dois manejos, que aparentemente apresentavam altura semelhante.

Na Europa Central e Oriental, Lipiec & Simota (1994) reportam que raízes de culturas como milho e beterraba açucareira são muito sensíveis à compactação do solo, enquanto que, sob as mesmas condições locais, cereais como cevada e trigo são menos sensíveis à compactação que soja e ervilha.

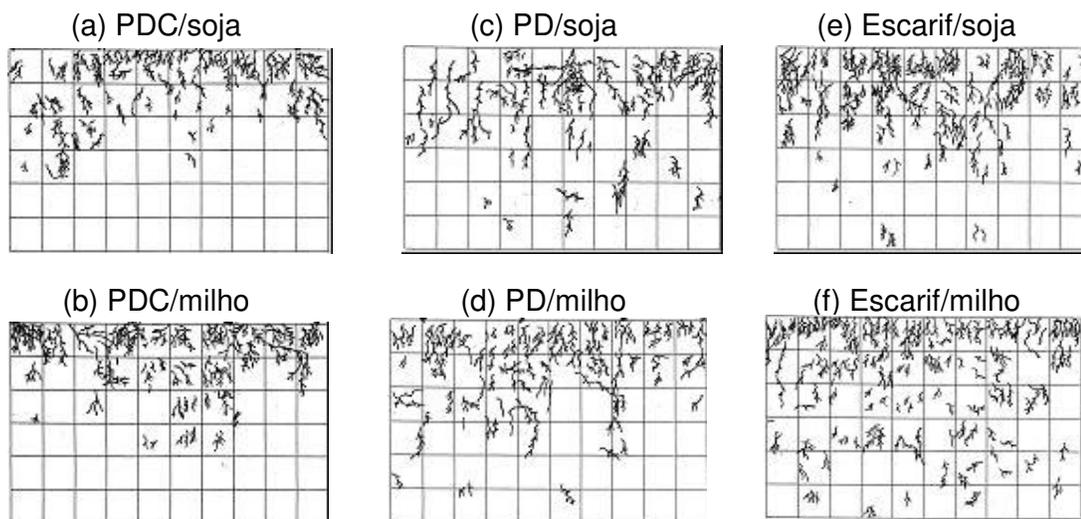


Figura 28 - Crescimento radicular da cultura do trigo nos diferentes níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja/milho). Malha de 0,05 m x 0,05 m. Avaliação realizada dia 19/09/2004 (109 dias após a semeadura do trigo).

Os maiores rendimentos da cultura do trigo foram obtidos na sucessão com soja, mostrando que a sucessão leguminosa-gramínea foi melhor que a sucessão gramínea-gramínea em termos de rendimento do trigo (Tabela 20). O maior rendimento da cultura do trigo na sucessão com soja foi obtido no PD, enquanto que na sucessão com milho o maior rendimento foi verificado no PDC.

Tabela 20 - Rendimento da cultura do trigo obtido nos níveis de compactação (PDC, PD e Escarif) e sucessão de culturas (soja e milho).

Sucessão de culturas	Níveis de compactação		
	PDC	PD	Escarif
		kg ha ⁻¹	
Soja	2382	2551	2399
Milho	2287	2082	2257

Radford et al. (2000) não observaram efeito significativo da compactação causada por uma passada de uma máquina com 10 Mg e 2 Mg no eixo dianteiro e traseiro, respectivamente, no rendimento de trigo, talvez pelo fato da água no solo não ter sido um fator limitante. Secco (2003) trabalhando com diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho distrófico típico e um Latossolo Vermelho distroférico típico, verificou que o trigo foi sensível à compactação do solo. Essas diferenças estão associadas às condições climáticas e do solo, além de outros possíveis fatores.

7.6. CONCLUSÕES

A compactação adicional apresentou incremento da resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,12 m.

A compactação adicional afetou negativamente as propriedades físicas do solo.

As culturas milho, soja e trigo foram sensíveis à compactação, tendo a altura das culturas soja e milho e, comprimento radicular das culturas soja e trigo, reduzidos pela compactação adicional.

A compactação do solo influenciou o rendimento das culturas soja, milho e trigo, sendo os maiores rendimentos verificados no plantio direto e os menores no tratamento com compactação adicional.

O maior rendimento do trigo foi observado na sucessão com soja.

7.7. BIBLIOGRAFIA CITADA

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S. Influência de plantas de cobertura, preparo do solo e sucessão de culturas no rendimento da soja (*Glycine max*) num Latossolo Vermelho de cerrado. **Ciências Agrárias e da Saúde**, Andradina, v.2, p.7-13, 2002.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.32, p. 59-62, 1980a.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Porque, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.33, p. 34-44, 1980b.

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

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.34, n.3, p.909-913, 1991.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1979. 190p.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 413p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, v.56, p.185-196, 2000.

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 & Tillage Research**, v.8, p.253-263, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

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 & Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

GUÉRIF, J. Effects of compaction on soil strength parameters. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 191-214.

LIPIEC, J.; SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.365-390.

LIPIEC, J.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J.; HAKANSSON, I. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & tillage Research**, v.19, p.307-317, 1991.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Determinação do grau de umidade. In: **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.185-190, 1992.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURTI, N.; RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argilosos de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.773-781, 2003.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, v.9, p.50-52, 1996.

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

RADFORD, B.J.; BRIDGE, B.J.; DAVIS, R.J.; McGARRY, D.; PILLAI, U.P.; RICKMAN, J.F.; WALSH, P.A.; YULE, D.F. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil & Tillage Research**, v.54, p.155-170, 2000.

RADFORD, B.J.; YULE, D.F.; McGARRY, D.; PLAYFORD, C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. **Soil & Tillage Research**, v.61, p.157-166, 2001.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, edição 27, p.29-48, 2003.

SAS Institute Inc. **SAS/STAT User's Guide**. Version G. 4 ed. Cary: NC; SAS Institute Inc., 1990.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas.**

2003. 108f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeito imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, p.52-61, 1997.

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**, v.27, p.973-983, 2003.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 107p.

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, p.755-760, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S.; ALVES, M.C. Produtividade do milho (*Zea mays* L.) influenciada pelo preparo do solo e por plantas de cobertura em um Latossolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, v.26, p.61-65, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004a. (CD-ROM)

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004b. (CD-ROM)

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.547-582, 1980.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v.86, p.759-766, 1994.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 4, p. 242-246, 1966.

8. CONCLUSÃO GERAL

A compactação do solo alterou as propriedades físicas e mecânicas do solo, bem como o crescimento e rendimento das culturas.

A suscetibilidade do solo à compactação foi dependente da densidade inicial e deformação do solo.

A densidade do solo, resistência do solo à penetração e grau de compactação se mostraram bons indicadores da qualidade física do solo.

ANEXOS

ANEXO A - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc dos manejos nos Argissolos em estudo no Capítulo I.

Causa de variação	Dsi	Dsf	Def	θ_{vi}	Gsi	σ_p	Cc
	(Mg m⁻³)		(cm)	(m³ m⁻³)	(%)	(kPa)	
Argissolo Vermelho distrófico arênico							
(u.m. São Pedro)							
Manejo	4,83*	4,50*	17,46**	28,31**	16,66**	2,62 ns	10,63**
CV	4,61	2,47	17,07	12,89	13,20	15,72	25,52
DMS 5%	0,095	0,058	0,074	0,025	6,874	21,161	0,060
Argissolo Vermelho distrófico							
(u.m. Alto das Canas)							
Manejo	4,69*	1,12 ns	6,81**	7,33**	6,83**	2,67 ns	6,96**
CV	4,56	1,72	17,54	6,43	10,38	26,73	20,83
DMS 5%	0,090	0,040	0,090	0,018	7,940	36,790	0,053
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico							
(u.m. Júlio de Castilhos)							
Manejo	2,28 ns	1,09 ns	2,59 ns	0,52 ns	3,27*	0,49 ns	6,57**
CV	3,48	2,91	14,08	10,02	7,91	20,48	16,74
DMS 5%	0,064	0,063	0,063	0,040	7,884	31,16	0,048

**significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; Dsi = densidade do solo antes da aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

ANEXO B - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc dos manejos nos Latossolos em estudo no Capítulo I.

Causa de variação	Dsi (Mg m⁻³)	Dsf	Def (cm)	θ_{vi} (m³ m⁻³)	Gsi (%)	σ_p (kPa)	Cc
Latossolo Vermelho distrófico							
Manejo	18,80**	34,05**	8,56**	0,31 ns	9,07**	2,95 ns	10,77**
CV	3,42	1,32	14,15	7,80	5,52	17,10	15,65
DMS 5%	0,063	0,029	0,074	0,031	5,253	27,505	0,052
Latossolo Vermelho aluminoférrico (u.m. Erechim)							
Manejo	3,45*	7,81**	0,46 ns	5,76**	7,19**	2,43 ns	1,55 ns
CV	5,50	3,07	21,30	11,56	10,07	17,68	27,53
DMS 5%	0,099	0,069	0,118	0,053	9,408	28,475	0,120
Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo)							
Manejo	17,85**	4,55*	20,57**	4,36*	19,46**	3,70*	17,12**
CV	5,26	1,14	25,20	8,93	9,13	27,80	27,98
DMS 5%	0,098	0,026	0,143	0,044	9,358	53,319	0,115

**significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo; Dsi = densidade do solo antes à aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

ANEXO C - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de Dsi, Dsf, Def, θ_{vi} , Gsi, σ_p e Cc para o manejo dentro de cada solo em estudo do Capítulo I.

Causa de variação	Dsi (Mg m⁻³)	Dsf	Def (cm)	θ_{vi} (m³ m⁻³)	Gsi (%)	σ_p (kPa)	Cc
Manejo	11,44**	35,22**	7,88*	78,91**	50,47**	7,36**	7,18**
CV	4,47	2,06	18,62	9,27	8,95	18,84	24,75
DMS 5%	0,082	0,045	0,085	0,032	7,376	28,654	0,066

**significativo a 1%; * significativo a 5%; ns=não significativo; Dsi = densidade do solo antes à aplicação das cargas no teste de compressão; Dsf = densidade do solo ao final do teste de compressão; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão; θ_{vi} = umidade volumétrica antes do teste de compressão; Gsi = grau de saturação antes do teste de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.

ANEXO D - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e densidade do solo (DS) para os Argissolos em estudo no Capítulo II.

Causa de variação	PT (m³ m⁻³)	Mac (m³ m⁻³)	Mic (m³ m⁻³)	DS (Mg m⁻³)
Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)				
Manejo	0,24 ns	0,23 ns	69,19**	0,99 ns
Profundidade	15,39**	11,96**	13,25**	14,35**
Manejo x prof.	1,76 ns	0,88 ns	8,68**	1,72 ns
CV (%)	8,62	21,83	3,64	5,04
DMS 5% (Manejo)	0,021	0,018	0,006	0,053
DMS 5% (Prof.)	0,030	0,025	0,008	0,076
Argissolo Vermelho distrófico (u.m. Alto das Canas)				
Manejo	4,97 ns	9,58*	5,62 ns	3,03ns
Profundidade	15,24**	13,60**	7,54**	16,70**
Manejo x prof.	4,86**	5,69**	3,78**	5,78**
CV (%)	6,26	27,78	3,42	3,91
DMS 5% (Manejo)	0,016	0,017	0,007	0,041
DMS 5% (Prof.)	0,020	0,021	0,008	0,050
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico (u.m. Júlio de Castilhos)				
Manejo	0,83 ns	0,44 ns	13,92**	0,47 ns
Profundidade	16,17**	11,91**	4,12**	14,87**
Manejo x prof.	0,70 ns	2,62**	7,38**	1,40 ns
CV (%)	6,19	38,86	2,95	6,03
DMS 5% (Manejo)	0,019	0,020	0,008	0,056
DMS 5% (Prof.)	0,023	0,024	0,009	0,069

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo

ANEXO E - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e densidade do solo (DS) para os Latossolos em estudo no Capítulo II.

Causa de variação	PT (m³ m⁻³)	Mac (m³ m⁻³)	Mic (m³ m⁻³)	DS (Mg m⁻³)
Latossolo Vermelho distrófico				
Manejo	1,85 ns	2,22 ns	0,93 ns	2,05 ns
Profundidade	13,39**	9,29**	2,32 ns	18,21**
Manejo x prof.	0,71 ns	1,36 ns	1,66 ns	1,85 ns
CV (%)	5,59	38,12	4,23	4,67
DMS 5% (Manejo)	0,017	0,021	0,011	0,043
DMS 5% (Prof.)	0,021	0,026	0,013	0,053
Latossolo Vermelho aluminoférrico (u.m. Erechim)				
Manejo	75,53**	0,69 ns	4,78*	1,10 ns
Profundidade	37,85**	36,86**	27,18**	38,24**
Manejo x prof.	1,84*	1,07 ns	1,15 ns	1,34 ns
CV (%)	4,27	37,35	4,62	5,60
DMS 5% (Manejo)	0,015	0,025	0,013	0,051
DMS 5% (Prof.)	0,015	0,025	0,013	0,051

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo

ANEXO F - Valores de F, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS) a 5% para valores de porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e densidade do solo (DS) para o Latossolo Vermelho distroférico típico em estudo no Capítulo IV.

Causa de variação	PT (m³ m⁻³)	Mac (m³ m⁻³)	Mic (m³ m⁻³)	DS (Mg m⁻³)
Tratamento	4,43 ns	9,96 *	19,03**	3,42 ns
Profundidade	3,62**	4,41**	8,61**	3,62**
Tratamento x prof.	2,39*	3,38**	3,97**	1,43 ns
CV (%)	5,87	54,89	3,90	6,56
DMS 5% (Tratam.)	0,017	0,023	0,010	0,051
DMS 5% (Prof.)	0,024	0,033	0,014	0,072

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns = não significativo

ANEXO G - Análise química do solo nos manejos PD e Escarif no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P	K	Al	Ca	Mg
			mg L ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		
PD							
0-0,10	4,7	6,4	28,1	82,1	0,7	0,9	0,7
0,10-0,20	4,4	6,3	39,3	41,2	1,0	0,3	0,3
0,20-0,30	4,5	6,3	11,5	37,4	1,1	0,3	0,3
Escarif							
0-0,10	4,6	6,4	15,9	66,1	0,6	0,9	0,6
0,10-0,20	4,9	6,4	8,2	21,9	0,5	0,9	0,7
0,20-0,30	5,1	6,4	2,0	18,4	0,4	1,0	0,8
PDC							
(não determinado)							

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO H - Análise química do solo nos manejos PD e Escarif no Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PD						
0-0,10	2,9	2,0	4,7	35,6	18,1	1,4
0,10-0,20	3,3	1,0	4,0	18,5	32,9	0,4
0,20-0,30	2,9	1,0	3,6	19,1	34,8	0,4
Escarif						
0-0,10	2,9	1,9	4,6	36,9	10,1	0,8
0,10-0,20	2,6	1,9	4,2	38,8	9,6	0,6
0,20-0,30	2,7	2,0	4,6	40,7	8,3	0,4
PDC						
(não determinado)						

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO I - Análise química do solo nos manejos PD, PDC 1, Batata e PDC 2 no Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P	K	Al	Ca	Mg
			mg L ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		
PD							
0-0,10	6,2	6,7	5,8	226,0	0,1	5,7	4,7
0,10-0,20	5,4	6,3	5,7	141,0	0,2	3,5	3,0
0,20-0,30	5,1	6,0	1,3	132,5	0,7	3,4	2,5
PDC 1							
0-0,10	6,3	6,8	6,0	210,2	1,2	5,1	4,3
0,10-0,20	5,7	6,4	2,3	175,4	0,9	4,2	3,5
0,20-0,30	5,3	6,1	1,7	196,0	1,3	3,6	2,8
Batata							
0-0,10	5,7	6,6	48,4	165,0	0,1	5,0	3,9
0,10-0,20	5,9	6,6	8,6	70,0	0,3	5,0	4,0
0,20-0,30	5,5	6,6	2,7	48,0	0,3	4,3	4,0
PDC 2							
0-0,10	5,4	6,3	24,4	109,6	0,4	3,0	2,3
0,10-0,20	5,1	6,3	10,0	54,5	0,6	2,7	2,2
0,20-0,30	4,9	6,0	2,2	34,0	1,1	2,1	2,1

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO J - Análise química do solo nos manejos PD, PDC 1, Batata e PDC 2 no Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PD						
0-0,10	1,8	11,1	12,8	85,9	0,9	1,7
0,10-0,20	2,8	7,1	9,8	71,0	3,1	1,2
0,20-0,30	4,2	6,9	10,4	59,9	10,7	1,2
PDC 1						
0-0,10	1,7	11,3	11,7	85,4	10,0	1,2
0,10-0,20	2,7	9,1	10,8	75,2	10,4	1,4
0,20-0,30	3,8	8,3	10,7	64,8	16,4	1,0
Batata						
0-0,10	2,2	9,0	11,0	81,0	1,6	1,5
0,10-0,20	2,0	10,8	11,0	82,0	3,4	1,4
0,20-0,30	2,2	8,0	10,0	79,0	4,3	1,0
PDC 2						
0-0,10	2,8	6,1	8,5	66,8	7,0	1,0
0,10-0,20	3,2	5,7	8,3	61,7	11,3	0,9
0,20-0,30	4,3	5,5	8,6	50,5	20,0	0,8

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO K - Análise química do solo nos manejos PD 1, PDC, PD 2 e Batata no Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P	K	Al	Ca	Mg
			mg L ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		
PD 1							
0-0,10	6,1	6,5	11,8	94,0	0,4	7,7	5,8
0,10-0,20	5,4	5,8	5,0	40,0	1,0	4,6	3,9
0,20-0,30	5,0	5,6	3,4	24,0	2,2	1,6	2,0
PDC							
0-0,10	6,1	6,5	19,9	54,0	0,4	9,4	5,7
0,10-0,20	5,9	6,3	6,2	45,0	1,0	6,4	5,1
0,20-0,30	5,1	5,7	3,0	41,0	2,0	3,3	3,4
PD 2							
0-0,10	6,5	6,6	15,2	65,5	1,1	8,8	6,3
0,10-0,20	5,6	6,0	6,4	78,0	1,3	4,3	3,7
0,20-0,30	5,2	5,8	3,0	48,5	1,9	2,5	2,3
Batata							
0-0,10	6,5	6,8	21,3	135,5	0,7	9,4	6,4
0,10-0,20	5,3	6,0	6,0	40,0	1,7	3,9	3,1
0,20-0,30	5,1	6,1	4,3	31,0	1,6	4,4	3,1

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO L - Análise química do solo nos manejos PD 1, PDC, PD 2 e Batata no Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (u.m. Júlio de Castilhos).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PD 1						
0-0,10	2,3	14,2	16,0	85,0	3,2	2,7
0,10-0,20	5,0	9,8	14,1	60,8	12,5	2,0
0,20-0,30	6,4	6,1	10,3	37,0	38,0	1,7
PDC						
0-0,10	2,4	14,0	16,0	85,3	2,8	2,6
0,10-0,20	3,2	12,6	14,8	78,3	8,2	1,8
0,20-0,30	6,3	8,9	13,1	52,1	23,6	1,8
PD 2						
0-0,10	2,1	16,5	17,5	87,7	6,8	2,6
0,10-0,20	4,1	9,5	12,3	66,6	13,9	1,8
0,20-0,30	5,7	7,0	10,8	47,1	27,8	1,7
Batata						
0-0,10	1,8	16,9	18,0	89,7	4,5	2,5
0,10-0,20	4,4	8,9	11,5	62,1	19,5	1,6
0,20-0,30	3,9	9,3	11,5	67,1	17,9	1,7

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO M - Análise química do solo nos manejos PD 1, e PD 2 no Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P	K	Al	Ca	Mg
			mg L ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		
PD 1							
0-0,10	5,8	6,7	10,0	144,0	0,0	5,7	3,5
0,10-0,20	5,2	6,5	2,4	47,0	0,3	4,2	2,4
0,20-0,30	5,1	6,3	2,1	27,0	0,6	3,5	2,1
PDC 1							
(não determinado)							
PD 2							
0-0,10	6,3	7,1	11,7	100,0	0,0	5,3	3,3
0,10-0,20	5,8	6,9	4,0	32,0	0,0	4,6	2,8
0,20-0,30	5,6	6,7	1,1	21,0	0,4	3,4	2,4
PDC 2							
(não determinado)							

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO N - Análise química do solo nos manejos PD 1, e PD 2 no Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PD 1						
0-0,10	1,9	9,6	11,5	83,6	0,0	2,5
0,10-0,20	2,3	7,0	9,0	74,0	4,9	1,9
0,20-0,30	3,0	6,3	8,7	65,4	9,3	1,8
PDC 1 (não determinado)						
PD 2						
0-0,10	1,3	8,8	11,3	87,4	0,0	1,9
0,10-0,20	1,6	7,0	9,0	82,0	0,0	1,5
0,20-0,30	2,0	6,3	8,7	74,9	6,2	1,5
PDC 2 (não Determinado)						

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO O - Análise química do solo nos manejos PD 1, Escarif, PD 2 e PD 3 no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P		K	Al			Ca	Mg
			mg L ⁻¹			cmol _c kg ⁻¹				
PD 1										
0-0,10	5,6	5,7	9,2	135,7	0,2	6,5	3,9			
0,10-0,20	5,5	5,6	11,4	66,4	0,5	6,7	3,3			
0,20-0,30	5,3	5,6	2,3	29,1	0,6	5,1	3,1			
Escarif										
0-0,10	5,6	5,7	15,5	139,3	0,2	7,9	1,4			
0,10-0,20	5,4	5,6	4,3	121,2	0,5	6,1	1,2			
0,20-0,30	5,1	5,5	2,0	86,0	1,0	3,3	0,8			
PD 2										
0-0,10	6,0	6,0	13,7	136,9	0,2	6,4	1,5			
0,10-0,20	6,0	6,0	6,4	71,3	0,3	6,0	1,4			
0,20-0,30	6,4	5,9	2,9	46,2	0,4	4,7	1,2			
Pasto (não determinado)										
PD 3										
0-0,10	5,6	5,6	7,5	87,9	0,1	6,2	3,4			
0,10-0,20	5,7	5,7	1,7	30,6	0,1	5,5	3,2			
0,20-0,30	5,5	5,5	0,8	21,1	0,9	2,5	2,1			
PDC (não determinado)										

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO P - Análise química do solo nos manejos PD 1, Escarif, PD 2 e PD 3 no Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PD 1						
0-0,10	6,0	10,9	16,6	64,5	2,6	1,6
0,10-0,20	6,9	10,6	15,1	60,0	4,8	2,4
0,20-0,30	6,8	8,9	15,1	55,2	7,2	1,8
Escarif						
0-0,10	6,1	10,1	16,0	59,9	3,3	1,8
0,10-0,20	6,9	8,1	14,5	50,4	8,9	2,2
0,20-0,30	8,2	5,3	12,5	35,1	25,2	1,6
PD 2						
0-0,10	4,8	8,6	13,2	62,8	3,7	1,7
0,10-0,20	5,5	7,3	12,4	56,6	6,8	1,4
0,20-0,30	6,0	6,4	12,1	51,9	7,5	1,0
Pasto (não determinado)						
PD 3						
0-0,10	7,2	10,2	17,4	58,7	0,7	1,9
0,10-0,20	5,9	9,0	14,8	58,7	2,7	1,9
0,20-0,30	7,8	5,6	12,5	37,5	18,5	1,4
PDC (não determinado)						

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO Q - Análise química do solo nos manejos PDC e PD no Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo).

Profundidade (m)	pH H ₂ O	Índice SMP	P		K		Al	Ca	Mg
			mg L ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
PDC									
0-0,10	5,1	5,8	34,4	274,7	0,8	3,7	3,2		
0,10-0,20	5,5	6,3	8,8	155,6	0,7	4,0	3,6		
0,20-0,30	5,4	6,1	3,0	79,3	0,9	3,1	3,2		
PD									
0-0,10	5,1	5,8	14,1	127,6	0,7	4,7	2,5		
0,10-0,20	5,1	5,9	2,3	46,8	0,8	4,3	2,5		
0,20-0,30	5,1	6,0	1,5	39,4	0,8	3,6	2,7		
Escarif (não determinado)									

P = fósforo; K = potássio; Al = alumínio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; mg/L = ppm, cmol_c/L = meq/100g.

ANEXO R - Análise química do solo nos manejos PDC e PD no Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo).

Profundidade (m)	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	V	m	C
	cmol _c L ⁻¹			%		
PDC						
0-0,10	5,3	8,4	12,9	59,1	10,1	2,4
0,10-0,20	3,5	8,7	11,5	69,3	3,5	1,4
0,20-0,30	4,6	7,4	11,1	60,4	4,6	1,0
PD						
0-0,10	5,4	8,2	12,9	58,6	10,1	1,7
0,10-0,20	4,7	8,4	11,6	59,4	9,2	1,4
0,20-0,30	4,4	7,3	10,8	59,3	12,9	1,4
Escarif (não Determinado)						

H + Al = hidrogênio + alumínio; CTC efetiva = quantidade de carga ao pH natural do solo; CTC pH 7,0 = quantidade de carga estimada a pH 7,0; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; C = carbono orgânico.

ANEXO S - Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) na tensão de 33 kPa e profundidade de 0,08-0,13m, para os manejos nos solos em estudo.

Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)					
PD		PDC		Escarif	
0,12		0,20		0,13	
Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas)					
PD		PDC 1		Batata	
PDC 2					
0,24		0,24		0,23	
				0,20	
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos)					
PD 1		PDC		PD 2	
Batata					
0,32		0,24		0,34	
				0,32	
Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo)					
PD 1		PDC 1		PD 2	
PDC 2					
0,32		0,33		0,32	
				0,32	
Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim)					
PD 1		Escarif		PD 2	
Pasto		PD 3		PDC	
0,38		0,39		0,33	
				0,31	
				0,33	
				0,43	
Latossolo Vermelho distroférrico típico (u.m. Santo Ângelo)					
PDC		PD		Escarif	
0,38		0,37		0,32	

ANEXO T – Espaçamento entrelinhas (m) e número de plantas/metro para a cultura da soja nos manejos em estudo.

Argissolo Vermelho distrófico arênico (u.m. São Pedro)						
Manejo	PD		PDC		Escarif	
Espaçamento	0,45		0,45		–	
nº plantas/m	12		12		–	
Argissolo Vermelho distrófico latossólico (u.m. Alto das Canas)						
Manejo	PD		PDC 1	Batata		PDC 2
Espaçamento	0,45		0,45	0,45		0,45
nº plantas/m	19		19	13		13
Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (u.m. Júlio de Castilhos)						
Manejo	PD 1		PDC	PD 2		Batata
Espaçamento	0,40		0,40	0,45		0,45
nº plantas/m	14		14	13		13
Latossolo Vermelho distrófico típico (u.m. Passo Fundo)						
Manejo	PD 1		PDC 1	PD 2		PDC 2
Espaçamento	0,45		0,45	0,45		0,45
nº plantas/m	–		–	–		–
Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (u.m. Erechim)						
Manejo	PD 1	Escarif	PD 2	Pasto	PD 3	PDC
Espaçamento	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
nº plantas/m	12	12	12	12	12	12
Latossolo Vermelho distroférico típico (u.m. Santo Ângelo)						
Manejo			PDC		PD	Escarif
Espaçamento			0,45		0,45	0,45
nº plantas/m			9		9	10

ANEXO U - Precipitação ocorrida em algumas regiões de estudo durante o período de avaliação.

Ano	Mês	Município/RS		
		Santa Maria	Itaara	Ibirubá
2003	Agosto	63,0		54,0
	Setembro	56,8		96,0
	Outubro	193,4		180,4
	Novembro	83,4		132,4
	Dezembro	257,0	364,4	254,2
2004	Janeiro	20,4	246,6	60,8
	Fevereiro	290,2	55,2	198,8
	Março	93,4	63,3	43,0
	Abril	83,2	177,5	94,8
	Maiο	31,2	152,7	104,4
	Junho	54,6	124,8	72,4

ANEXO V - Precipitação ocorrida no campo tecnológico da Cooperativa Regional Triticola Serrana Ltda (COTRIJUÍ), Município de Ijuí (RS), no período compreendido entre dezembro/2003 a setembro/2004. Anexo referente ao Capítulo IV.

Dia	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
	2003	2004								
1						3,0				
2			8,0	17,0	44,0					
3						4,0		65,0		2,0
4			28,0							
5	22,0		16,0		19,0				22,5	
6		10,0				2,0				
7		10,0		7,0		28,0		11,0		
8	18,0	30,0		52,0			21,0			
9	1,0									
10							51,0			
11	102,0									21,0
12				22,0		25,0				19,0
13	5	4		1,0		13,0				
14	126,0		8							
15	68,0									
16										
17										
18										
19								3,0		
20	51,0	40,0							11,0	41,0
21		19,0								8,0
22	38,0				59,0	5,0			2,0	43,0
23						7,0	32,0			
24		35,0				25,0				
25						18,0				
26	12,0					3,0	3,0			15,0
27										6,0
28									26,0	29,0
29		36,0						19,0		
30					38		16,0			
31								15,0		
total	443,0	184,0	60,0	99,0	160,0	133,0	123,0	113,0	61,5	184,0