

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

**PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM
LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE
MANEJO E NÍVEIS DE TRÁFEGO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eracilda Fontanela

Santa Maria, RS, Brasil

2008

PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E NÍVEIS DE TRÁFEGO

por

Eracilda Fontanela

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em 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. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2008

Fontanela, Eracilda,

F679p

Parâmetros físico-hídricos de um latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego / por Eracilda Fontanela ; orientador José Miguel Reichert. – Santa Maria, 2008.

78 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2008.

1. Ciência do solo 2. Intervalo hídrico ótimo 3. Permeabilidade ao ar 4. Pressão de pré-consolidação 5. Resistência do solo à penetração 6. Tráfego controlado I. Reichert, José Miguel, orient. II. Título

CDU: 631.587

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

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Eracilda Fontanela. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Solos/Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900.

Fone/Fax: (055) 3220-8108; End. Eletr: eracildafontanela@yahoo.com.br

**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

**PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E NÍVEIS DE TRÁFEGO**

elaborada por
Eracilda Fontanela

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, Dr.
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)

Milton da Veiga, Dr. (Epagri / SC)

Santa Maria, 29 de fevereiro de 2008.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, agradeço pelo dom da vida e por tantas bênçãos e força para que eu não esmorecesse em nenhuma das etapas.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade para realização desse trabalho.

Ao CNPq pela concessão de bolsa durante a execução desse trabalho.

Ao meu orientador, professor José Miguel Reichert, agradeço muito pela paciência, amizade e profissionalismo. Muito obrigada pela orientação e ensinamentos.

À Embrapa Trigo representada pelos pesquisadores, Rainoldo Alberto Kochhann, Arcenio Sattler e José Eloir Denardin, pelo apoio financeiro, pela área concedida, pelo auxílio e disposição prestados.

Ao pesquisador Milton da Veiga e a toda sua equipe da Epagri-SC, pela dedicação nas determinações físicas do solo.

Aos funcionários e professores do programa, em especial ao amigo e funcionário do Laboratório de Física do Solo, Flavio Fontinelli.

A todos os colegas de pós-graduação, pela companhia e convívio, por compartilhar os conhecimentos e, principalmente, pela amizade. Também, ao David e à Vanderleia, que me acolheram em seu apartamento no início do curso, pelas instruções e auxílio, além da ajuda na coleta dos dados no campo.

A todos os bolsistas da graduação, que colaboraram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído, principalmente ao Davi Vieira e Marcelo Mentges, que desde a coleta foram imprescindíveis, bem como nos procedimentos em laboratório juntamente com Cláudia Barros e Eduardo Vogelmann.

Ao Mario por ter acreditado em meus sonhos e ter depositado sua confiança e credibilidade. Sem você, certamente hoje eu não estaria nesse degrau. Muito Obrigada por tudo “paizão”. Também, à Ana Claudia por ter me dado tanta força e incentivo para que eu conquistasse meu espaço.

Aos meus grandes amigos de muitas horas, pelo carinho e grande amizade: Juliana Prevedello, André Brandt, Douglas Kaiser, Eduardo Suzuki, Leonir Uhde e Adão Corcini.

Enfim, agradeço a minha família, que embora estejam distantes, não faltou carinho e incentivo na realização deste trabalho: meus pais (Bento e Joana) minhas irmãs (Zenir, Evanir e Juliana), cunhados (Valmir, Itacir e Ivoney) e lindos sobrinhos – fontes de minha inspiração (Andressa, Anael e Larruana). Em especial, ao meu noivo, Jerônimo que mesmo à distância, esteve sempre presente em cada passo ao longo desse trabalho. Muito Obrigada pela força, inspiração e existência. Amo todos vocês!!!

RESUMO

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

PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E NÍVEIS DE TRÁFEGO

AUTORA: ERACILDA FONTANELA

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 29 de fevereiro de 2008.

A qualidade do solo tem sido amplamente estudada por esta ser considerada um recurso fundamental na produção agrícola. Assim, torna-se necessário avaliar uma série de indicadores, entre eles os de qualidade do solo, a fim de monitorar parâmetros que indiquem a qualidade ou degradação do solo nas ações agrícolas. O objetivo deste estudo foi avaliar indicadores físico-hídricos de qualidade do solo, em diferentes preparos e sistemas de manejos do solo e dois níveis de tráfego. Os objetivos específicos foram: determinar limites críticos de densidade do solo onde a resistência mecânica à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas, utilizando a metodologia do intervalo hídrico ótimo (IHO); avaliar a água disponível às plantas nos diferentes estados de compactação do solo, com o período em que o solo apresenta umidade abaixo ou acima das condições físicas consideradas ótimas, determinadas pelo IHO; avaliar a compactação do solo através dos parâmetros de compressibilidade do solo; e verificar a relação entre permeabilidade ao ar, continuidade de poros e curva característica de água no solo. O experimento foi implantado no ano de 2001, em um Latossolo Vermelho Distrófico, na área experimental da Embrapa Trigo, Passo Fundo-RS. Os manejos do solo em estudo foram: escarificado há seis meses, escarificado há doze meses, escarificado há dezoito meses, plantio direto contínuo por 13 anos e mata nativa; todos com e sem tráfego. Foram coletadas amostras de solo, com estrutura preservada, em cada condição de manejo, nos dois níveis de tráfego em três camadas (0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m). As amostras foram equilibradas nos potenciais matriciais de -0,004; -0,006; -0,008; -0,01; -0,03; -0,05; -0,07; -0,1; -0,5 e -1,5 MPa e, após, utilizadas para a determinação da densidade do solo, resistência à penetração, umidade volumétrica e condutividade do solo ao ar. A curva de compressão do solo foi obtida na tensão de 0,03 MPa. O aumento da densidade do solo influenciou na redução do IHO associada aos efeitos da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração que determinaram, respectivamente, o limite inferior e o superior de água disponível. O manejo escarificado foi o que apresentou menor restrição física quanto à resistência à penetração com valor de densidade do solo crítica igual a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$. O IHO foi mais sensível às variações da estrutura do solo do que à água disponível, refletindo melhor a qualidade física do solo para o crescimento das culturas. A permeabilidade do solo ao ar apresentou elevada variabilidade amostral, podendo ser observada pela variação da densidade do solo e com as relações com o potencial matricial e a distribuição do tamanho de poros. Os baixos valores do índice de continuidade de poros indicam redução do espaço poroso e baixa presença de poros maiores. A pressão de preconsolidação não apresentou diferença significativa para os diferentes manejos. A susceptibilidade à compactação apresentou interação entre os manejos do solo e trafegabilidade nas duas camadas mais superficiais do solo (0,00 a 0,06 e 0,10 a 0,15 m). Portanto, os indicadores físico-hídricos foram influenciados pelas modificações na estrutura do solo. O tráfego sobre solo escarificado teve maior influência nos atributos físico-hídricos do solo.

Palavras-chaves: intervalo hídrico ótimo, permeabilidade ao ar, pressão de pré-consolidação, resistência do solo à penetração, tráfego controlado.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

PHYSICOHYDRICAL SOIL PARAMETERS OF AN OXISOL UNDER DIFFERENT SOIL MANAGERMENTS AND TRAFFIC LEVELS

AUTHOR: ERACILDA FONTANELA

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, March 06, 2008.

Soil quality has been widely studied since the soil is recognized as a key resource in agricultural production. Thus, it is necessary to assess a range of indicators of soil quality, in order to monitor parameters that indicate quality or soil degradation in agricultural activities. The objective was to assess indicators of physical and hydric soil quality, for different soil tillage, management and levels of traffic. The specific objectives were: to determine critical limits of soil density where mechanical penetration resistance and aeration porosity are restrictive to crop growth, using a methodology of the least limiting water range (LLWR); evaluate plant water available in different states of soil compaction with the period in which the soil moisture is below or above the physical conditions considered optimal, determined by the LLWR; evaluate soil compaction through the parameters of soil compressibility; and verify relationships between air permeability, continuity of soil pores and water retention curve. The experiment was established in 2001 in an Oxisol, in the experimental station of Embrapa Trigo in Passo Fundo-RS. The soil management under study were: chisel plowed six months ago, chisel plowed twelve months ago, chisel plowed eighteen months ago, continuous no-tillage for 13 years, and native forest; all with and without traffic. Soil samples were collected with preserved structure in each treatment, in both levels of traffic, in three soil layers (0.00-0.06, 0.10-0.15, and 0.20-0.25m). The soil samples were equilibrated at -0.004, -0.006, -0.008, -0.01, -0.03, -0.05, -0.07, -0.1, -0.5 and -1.5MPa and then used for determining soil bulk density, resistance to penetration, volumetric moisture, and air conductivity. The soil compression curve was obtained in the tension of 0.03MPa. Increased bulk density caused a reduction in the LLWR associated to the effects of soil resistance to penetration and aeration porosity that, respectively, determined the lower and upper limits of available water. The chisel plow treatment had lower physical restriction based on the resistance to penetration, with a value of critical soil density equal 1.60 Mg m^{-3} . The LLWR was more sensitive to changes in soil structure than the available water, reflecting better physical quality of the soil for the growth of crops. Air permeability showed high variability that can be observed by the change in bulk density and by the relationship with the matric potential and pore size distribution. The low values of pore continuity index indicate reduced pore space and low presence of large pores. The pre-consolidation stress was not affected by the different soil managements. Susceptibility to soil compaction showed statistical interaction between the soil management and traffic in the two uppermost soil layers (0.00-0.06 and 0.10-0.15m). Therefore, the physical and hydric indicators were influenced by changes in soil structure. Traffic on chisel plowed soil had greater influence on those indicators.

Key-words: least limiting water range, air permeability, pre-consolidation stress, resistance to penetration, controlled traffic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Esquema representando o efeito da densidade do solo no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) com base na θ_{RP} , θ_{PMP} , θ_{CC} e θ_{PA}	26
FIGURA 2 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, sem tráfego (ST).....	28
FIGURA 3 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, com tráfego (CT).	28
FIGURA 4 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, sem tráfego (ST).	28
FIGURA 5 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, com tráfego (CT).....	28
FIGURA 6 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, sem tráfego (ST).....	29
FIGURA 7 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, com tráfego (CT).....	29

FIGURA 8 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob plantio direto (PD) por 13 anos, sem tráfego (ST).	30
FIGURA 9 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob plantio direto (PD) por 13 anos, com tráfego (CT).	30
FIGURA 10 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob mata nativa (MN).	30
FIGURA 11 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado (média das três épocas - Esc), sem tráfego (ST).	32
FIGURA 12 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado (média das três épocas - Esc), com tráfego (CT).	32
FIGURA 13 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade ao ar em amostras indeformadas de solo.	43
FIGURA 14 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).	45
FIGURA 15 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).	45
FIGURA 16 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).	46

FIGURA 17 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (ψ_m), em três camadas do solo sob sistema plantio direto contínuo por 13 anos (PD), sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).	46
FIGURA 18 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (ψ_m), em três camadas sob mata nativa.	47
FIGURA 19 – Relação entre o espaço aéreo ε_a e a permeabilidade do solo ao ar (K_a) para os preparos e manejos estudados (E6, E12, E18, PD e MN), sem e com tráfego, nas três camadas.	48
FIGURA 20 – Esquema para determinação da σ_p , e IC.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostrados.....	23
TABELA 2 – Composição granulométrica do solo. Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas.	40
TABELA 3 – Parâmetros de regressão ($\log M$ e N) e porosidade obstruída para todos os manejos estudados ($Ei5$, $Ev5$, $Ei6$, PD e MN), sem e com tráfego (ST e CT) nas três camadas (0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,25 m).....	49
TABELA 4 – Valores médios de areia, silte e argila, nas três camadas de solo amostrados.....	57
TABELA 5 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) para os preparos e manejos e nas camadas do solo em estudo.	59
TABELA 6 – Valores médios de índice compressão (IC) para os preparos e manejos e nas camadas do solo em estudo.....	60

SUMÁRIO

	PÁGINA
1 INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 Qualidade do Solo	14
1.2 Manejo e Preparo do Solo	16
1.3 Tráfego Controlado	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 CAPÍTULO I INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS	20
3.1 Introdução	21
3.2 Material e Métodos	23
3.3 Resultados	27
3.4 Discussão	32
3.5 Conclusões	35
4 CAPÍTULO II AERAÇÃO DO SOLO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES MANEJOS DO SOLO E NÍVEIS DE TRÁFEGO	36
4.1 Introdução	37
4.2 Material e Métodos	39
4.2.1 Curvas de Retenção de Água (CRA)	41
4.2.2 Permeabilidade ao ar e espaço aéreo	42
4.3 Resultados	44
4.4 Discussão	50
4.5 Conclusões	52
5 CAPÍTULO III COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES PREPAROS DO SOLO E NÍVEIS DE TRÁFEGO. 53	

5.1	Introdução.....	54
5.2	Material e Métodos	56
5.3	Resultados.....	58
5.4	Discussão	60
5.5	Conclusões.....	62
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
7	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICES.....	71

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Qualidade do Solo

A qualidade do solo tem sido amplamente estudada por esta ser considerada como um recurso fundamental na produção agrícola. A importância do solo não está relacionada somente com a produção de alimentos, mas também por ser importante para que se mantenha a qualidade ambiental, em nível local, regional e mundial (DORAN; PARKIN, 1994). O solo é uma fonte vital, um recurso imprescindível e de inegável importância na escala evolutiva humana na terra (JENNY, 1980).

Devido à importância na questão da qualidade do solo, muitas tentativas da sua definição estão descritas na literatura, bem como sugestões de métodos e estratégias para sua caracterização. Doran & Parkin (1994) propõem que a qualidade do solo seja definida como sendo: “a capacidade de um dado solo em funcionar no ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais”.

No Brasil, muitas regiões apresentam sérios desequilíbrios ambientais e climáticos, em face da interferência desordenada do homem. Modelos agrícolas inadequados ou insustentáveis (ecológica, econômica e socialmente) podem levar a quedas na produtividade, na qualidade ou no cenário ambiental e, conseqüentemente, no potencial de desenvolvimento regional.

Sabe-se, no entanto, que a qualidade dos solos pode melhorar ou piorar dependendo dos fatores que a influenciam. Existem fatores que são pouco variáveis (geológicos, topográficos, climáticos) e, portanto, não podem ser modificados totalmente. Também, devido à complexidade dos parâmetros químicos, físicos e biológicos dos solos, qualquer índice de qualidade deve incluir diversas variáveis desses parâmetros para que, em conjunto, possam refletir a realidade dos complexos processos que compõem a qualidade do solo. Um dos grandes desafios, portanto, é desenvolver ou adaptar métodos para monitorar e avaliar o impacto antropogênico sobre os processos do solo e sobre os organismos que nele habitam (FRIGHETTO; VALARINI, 2000).

Qualidade do solo, como definido por Dexter (2004), compreende as características físicas, químicas e as biológicas do solo. De acordo com Karlen (2004), a qualidade do solo é considerada como o indicador de práticas agrícolas sustentáveis. Assim, torna-se necessário avaliar uma série de indicadores, entre eles os indicadores de qualidade do solo, a fim de monitorar parâmetros que indiquem a preservação, melhoria ou degradação do solo nas ações agrícolas. Indicadores quantitativos e, principalmente, qualitativos, são fundamentais para que os agricultores possam observar na sua propriedade os progressos ou retrocessos, bem como sirva de monitoramento para manejar seus solos agrícolas (REICHERT et al., 2003). Indicadores de qualidade do solo podem ser selecionados de acordo com as funções de interesse do solo, e valores iniciais devem ser identificados baseados nas condições locais, para generalizar o índice de qualidade do solo (LIMA et al., 2007).

Indicadores de qualidade física do solo deveriam abranger os atributos físicos, químicos e biológicos do solo e serem exeqüíveis e possíveis de serem monitorados pelo produtor. Imhoff (2002) propõe indicadores da qualidade física do solo que englobem atributos físicos, influenciadores diretos na produção das culturas, como a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação e a capacidade do solo em fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado por Silva et al. (1994) como o melhor indicador da qualidade física e estrutural do solo, pois engloba determinações de resistência do solo à penetração de raízes, densidade e retenção de água (curva) no solo, que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas.

Outros autores, como Dias Júnior (1994) e Imhoff et al. (2001), sugerem estudos utilizando a pressão de preconsolidação (σ_p) como indicadora da máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional. Tais resultados fornecem importantes informações que podem ser usadas para a prevenção da compactação do solo. Silva et al. (2000) consideram o índice de compressão (IC) como um importante indicador, o qual representa a susceptibilidade do solo à compactação. A σ_p e o IC são obtidos por meio da curva de compressão do solo, oriunda dos ensaios de compressão uniaxial, a qual

representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou o índice de vazios.

O tráfego de maquinários agrícolas, equipamentos de transporte ou de animais causa compactação do solo, processo esse em que há decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, ou seja, ocorre um rearranjo nas partículas constituintes do solo (LIMA, 2004). Richart et al. (2005) consideram a compactação do solo como um fator limitante da qualidade física do solo, com influência na produtividade e na desagregação dos solos.

Além da densidade do solo, da resistência do solo à penetração das raízes, do intervalo hídrico ótimo, do índice de compressão e da pressão de preconsolidação, a porosidade total e a distribuição do tamanho de poros também são amplamente utilizadas como indicadores de qualidade física (DEXTER, 2004).

O monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, propiciando melhor qualidade dos produtos agrícolas, mecanização consciente, ambiente mais sadio para o homem e racionalização no uso de matérias-primas e dos recursos naturais, reduzindo a degradação ambiental (DORAN; PARKIN, 1994).

1.2 Manejo e Preparo do Solo

O manejo do solo nas atividades agrícolas tem sido o grande responsável pelas grandes alterações na estrutura do solo, afetando suas propriedades físico-hídricas (KLEIN; CAMARA, 2007).

O surgimento do plantio direto objetivou viabilizar a sustentabilidade da capacidade produtiva do solo, por meio da redução de perdas por erosão hídrica e eólica, mantendo a cobertura vegetal no solo (palhada) e reduzindo o assoreamento e a eutrofização de represas e cursos d'água. Também há melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, elevando sua capacidade de infiltração e retenção de água e seu teor de matéria orgânica, promovendo, portanto, a preservação do meio ambiente.

O sistema de plantio direto (PD) consiste na semeadura diretamente no solo coberto por palha, com mínimo revolvimento da camada superficial do solo. Embora esse sistema tenha surgido a fim de reduzir os processos erosivos do solo, tende a proporcionar formação de camadas compactadas no solo. Esse manejo, dependendo das práticas utilizadas e do tempo de adesão, pode resultar em aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, a compactação do mesmo, um dos principais problemas físicos que limitam a produtividade das culturas. Isso ocorre devido à pressão exercida pelos rodados das máquinas e de implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de umidade inadequadas ao seu manuseio.

A ausência de revolvimento do solo, associada à maior intensidade de uso, expõe o solo a intenso e continuado tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade e contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob esse sistema (COLLARES et al., 2006).

A compactação do solo é caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar, limitando a infiltração e a redistribuição de água no solo e reduzindo as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, que afeta o crescimento das raízes em busca de água e nutrientes e limita o crescimento radicular por impedimento mecânico. Isso culmina com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (VIEIRA, 2006).

Há inúmeros estudos voltados a diferentes níveis de compactação do solo em plantio direto. Contudo, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação do solo, sob PD, que influi negativamente na produção das culturas e quais os limites críticos das propriedades físico-mecânicas que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004).

A escarificação é uma das alternativas recomendadas freqüentemente para reduzir a compactação dos solos. Para Silveira (1988), escarificar significa romper o solo até a camada de 0,30 m, com o uso de implementos denominados escarificadores. Esses implementos contêm hastes que são utilizados no manejo primário do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos por não promoverem uma inversão de camadas, obtendo-se com isto, maior capacidade operacional e, principalmente, menor alteração da estrutura do solo. São utilizados

no preparo do solo e rompimento de camadas compactadas superficial, facilitando, assim, a penetração das raízes e a infiltração da água no solo.

Conforme resultados apresentados por Rosa (2007), o solo escarificado há dois anos apresentou boas condições estruturais para o desenvolvimento das culturas, pois apresentou menor densidade na linha de tráfego e maior porosidade total. Essas intervenções mecânicas são uma alternativa para reduzir as limitações físicas que o solo possa propiciar ao desenvolvimento das plantas. Por outro lado, reduz a capacidade de suporte de carga do solo (menor pressão de preconsolidação) (VEIGA et al., 2006).

1.3 Tráfego Controlado

A mecanização é a responsável pela deterioração acelerada 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 maquinário sobre o solo.

O tráfego intensivo causa deformação do solo. A avaliação do efeito do tráfego é importante em estudos sobre espaço poroso do solo, pois o tráfego atua diretamente na produtividade, crescimento e desenvolvimento das culturas. Muitos dos estudos de tráfego, como apresentado por Peth & Horn (2006), têm sido feito para investigar a estabilidade mecânica do solo quando submetido a cargas externas. Comumente avalia-se a susceptibilidade do solo à compactação causada pelo tráfego intensivo de máquinas conjuntamente com o momento ideal para executar as operações agrícolas no solo, a fim de minimizar os problemas na degradação e conseqüentemente na qualidade do solo.

Diante disso, e partindo-se da premissa de que a busca do uso do solo de maneira sustentável é parte crucial do processo de conservação dos recursos naturais em todas as regiões tipicamente agrícolas, o presente estudo buscou avaliar parâmetros físico-mecânicos de um Latossolo Vermelho em Passo Fundo - RS, a fim de contribuir na avaliação da qualidade das práticas agrícolas locais, das

quais dependem a qualidade ambiental e o avanço em direção à agricultura sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar indicadores físico-hídricos de qualidade do solo, em sistema sob plantio direto contínuo por 13 anos e escarificado em diferentes épocas, sob dois níveis de tráfego.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Determinar limites críticos de densidade do solo crítica onde a resistência mecânica à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas, utilizando a metodologia do intervalo hídrico ótimo;
- (ii) Avaliar a água disponível às plantas nos diferentes estados de compactação do solo, no período em que o solo apresenta umidade abaixo ou acima das condições físicas consideradas ótimas, determinadas pelo intervalo hídrico ótimo;
- (iii) Avaliar a suscetibilidade do solo à compactação, através dos parâmetros de compressibilidade do solo;
- (iv) Verificar a relação entre permeabilidade ao ar e continuidade de poros e curva característica de água no solo.

3 CAPÍTULO I INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar os diferentes preparos e manejos do solo nos dois níveis de tráfego sobre o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A amostragem foi realizada na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Trigo) em Passo Fundo (RS). O solo estudado foi classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico. Foram coletadas 320 amostras de solo, com estrutura preservada, nas condições de preparo e manejo (plantio direto há 13 anos e mata nativa) e de preparo (escarificado em três diferentes épocas), em dois níveis de tráfego (sem e com), no centro das camadas de 0,00 a 0,06 e 0,10 a 0,15 m. As amostras de solo foram preparadas, saturadas com água e separadas em grupos de tensão as quais foram submetidas (0,004; 0,006; 0,008; 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa). Depois de atingido o equilíbrio nas tensões, as amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo (D_s), resistência à penetração mecânica (RP) e umidade volumétrica (θ_v). Os resultados foram utilizados para o ajuste das curvas de retenção de água do solo (CRA). Através da CRA e da RP foi possível quantificar o IHO e a densidade crítica (D_{sc}) do solo. O intervalo hídrico ótimo foi mais sensível às variações da estrutura do solo do que à água disponível, refletindo melhor a qualidade física do solo para o crescimento das culturas. A resistência à penetração foi fortemente influenciada pela densidade do solo determinando o limite inferior do intervalo hídrico ótimo nos diferentes preparos e sistemas de manejo. Dentre os preparos e sistemas de manejo, o escarificado apresentou maior restrição e limitação físico-hídrica comparado ao plantio direto e mata nativa. O sistema plantio direto com tráfego apresentou maior limitação quanto à resistência à penetração do solo restringindo o intervalo hídrico ótimo.

3.1 Introdução

Parâmetros de qualidade do solo são necessários na identificação de problemas nas áreas de lavoura, para que se estabeleçam estimativas realistas de produção de alimentos, monitoramento das alterações de sustentabilidade e qualidade ambiental, auxiliando na tomada de decisão quando se pretende estabelecer a alternativa de manejo do solo em determinada condição. Estes devem abranger os fatores de crescimento das plantas, serem exeqüíveis com metodologias simplificadas e permitirem a comparação entre diferentes solos ou sistemas de manejo do solo cultivado, a fim de monitorar as práticas de preparo e, procurando aumentar o limite superior e o limite inferior do conteúdo de água no solo onde os fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento de plantas são inexistentes (SILVA, 2003).

Uma boa qualidade física do solo, do ponto de vista agrícola e ambiental, é manifestada pela boa infiltração da água no solo, ausência de escoamento superficial, adequada porosidade de aeração, adequada retenção de água no solo, adequada trabalhabilidade e adequado enraizamento das plantas (DEXTER, 2004). A má qualidade física é contrária ou apresenta todos estes problemas físicos simultaneamente, caracterizando um solo mal estruturado. Nesse sentido, Torres & Saraiva (1998) indicaram que a melhoria das condições físicas do solo tem reflexos positivos na produtividade da cultura da soja.

As plantas necessitam de um sistema radicular que absorva água e nutrientes e de condições físicas adequadas ao crescimento para fixação delas no solo. O crescimento das raízes é freqüentemente reduzido por uma combinação de estresses físicos como a resistência mecânica, a tensão da água e a deficiência de oxigênio no solo (BENGOUGH et al., 2006). Para Letey (1985), o crescimento e o desenvolvimento das plantas estão relacionados diretamente com a aeração, resistência à penetração e disponibilidade de água. Essa relação tem sido estudada a fim de estabelecer valores críticos, os quais resultam em decréscimo na produtividade. A porosidade de aeração mínima para um bom desenvolvimento do sistema radicular foi definida como sendo de 10% (CANNEL, 1977). O valor de resistência mecânica a penetração (RP) limitante, por sua vez, foi atribuída em 2,0 MPa, o qual prejudica o crescimento e desenvolvimento das raízes (TAYLOR, 1966).

O conteúdo de água disponível adequado ao crescimento das plantas está situado entre o conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa) (REICHARDT, 1988); e o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (1,5 MPa) (SAVAGE et al., 1996). Entretanto, tem sido difícil estabelecer relações isoladas desses atributos com a produtividade das plantas, devido à inter-relação entre esses. Assim, esses três atributos foram integrados, em função da densidade do solo (Ds), em um único índice denominado intervalo hídrico ótimo (IHO).

O termo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998) e traduzido do *Least Limiting Water Range* (LLWR), é o conceito de um único parâmetro que incorpora, numa faixa de conteúdo de água, as limitações ao crescimento e desenvolvimento das plantas por aeração, água disponível e resistência do solo à penetração das raízes.

Na prática, o IHO é caracterizado como a faixa de umidade ideal para o crescimento de plantas. Seu limite superior pode ser tanto a capacidade de campo como a porosidade de aeração menor que 10% e, seu limite inferior, tanto o ponto de murcha permanente como a resistência à penetração maior do que 2 MPa. Assim, em solos bem estruturados, com valores moderados de densidade do solo e com qualidade física adequada, o IHO é igual à água disponível (AD), tendo como limite superior a capacidade de campo e limite inferior o ponto de murcha permanente. À medida que o solo sofre degradação física, a umidade em que a aeração se torna deficiente pode substituir a capacidade de campo como limite superior do IHO, e a umidade em que a resistência à penetração limita o crescimento de plantas pode substituir o ponto de murcha permanente como limite inferior. Portanto, o IHO aprimora o tradicional conceito de AD entre capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), adicionando as limitações associadas com a aeração e a resistência do solo à penetração (RP). A destruição da estrutura, o aumento da densidade do solo, da resistência à penetração e a diminuição da macroporosidade diminuem o IHO (SILVA et al., 1994; SILVA, 2003).

O IHO tem sido considerado um parâmetro adequado para avaliação da qualidade física do solo em culturas anuais de solos tropicais. Com a quantificação do IHO, obtém-se o valor de densidade do solo em que o IHO é zero, denominado como densidade crítica (Dsc) do solo. Esse parâmetro, além da facilidade de obtenção, tem grande importância ao crescimento e desenvolvimento das plantas em diferentes manejos de solo.

O objetivo deste estudo foi determinar a relação entre a resistência do solo à penetração e o intervalo hídrico ótimo e diferentes sistemas de preparo e manejo do solo (plantio direto contínuo por 13 anos, escarificado em diferentes épocas e mata nativa) em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental pertencente a Embrapa Trigo, situada no município de Passo Fundo, RS (28°10'00" de latitude sul, 52°22'00" de longitude oeste, e aproximadamente 686m de altitude) (Apêndice A). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo "Cfa" e "Cfb" (clima subtropical úmido com verões quentes ou amenos, respectivamente), com precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais, distribuída ao longo de todos os meses do ano (NIMER, 1989). O solo em estudo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 1999) cuja análise granulométrica é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas de solo amostrados.

Camada m	Areia	Silte	Argila
	-----g kg ⁻¹ -----		
0,00 – 0,06	309,74	254,41	435,85
0,10 – 0,15	307,12	265,13	427,75

O experimento foi implantado no ano de 2001, em um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas. As amostras foram coletadas no dia 16 de dezembro de 2006, em um dos blocos, nos diferentes preparos do solo, com tráfego controlado na área, ou seja, o maquinário utilizado nas atividades agrícolas se desloca sempre no mesmo trajeto. Assim, existem dois níveis de tráfego: ausência e presença das usuais operações de manejo, onde os maquinários agrícolas propagaram suas tensões. As amostras dos tratamentos com tráfego foram coletadas no centro das tensões. As parcelas principais (6 x 12 m) foram distribuídas conforme os sistemas de preparo do solo, possuindo regiões tanto de

alto tráfego como de mínimo tráfego. A coleta nas diferentes camadas foi efetuada com o intuito de se obter grande variação na densidade do solo. Os tratamentos de preparo e manejo do solo foram: (i) sistema plantio direto contínuo por 13 anos (PD); (ii) escarificado seis meses antes da coleta (E6); (iii) escarificado doze meses antes da coleta (E12); (iv) escarificado dezoito meses antes da coleta (E18) e nas subparcelas os níveis de tráfego (sem e com tráfego das usuais operações de manejo) e (v) mata nativa (MN).

Na amostragem, a área estava sendo cultivada com soja. Em cada condição de preparo e manejo, nos dois níveis de tráfego (Apêndice B), foram coletados dez grupos de amostras com estrutura preservada, na entrelinha da soja, (em anéis volumétricos com 0,06 m de diâmetro e 0,03 m de altura), no centro de duas camadas (0,00 a 0,06 e 0,10 a 0,15 m). Os 10 grupos de amostras, sendo 2 amostras de cada tratamento por grupo, foi submetido a uma das seguintes tensões: 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 MPa em mesa de tensão (REINERT; REICHERT, 2006); e 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa em câmaras de pressão descritas em Klute (1986). Todas as camadas foram coletadas com duas repetições. Assim, foi coletado um total de 360 amostras (5 preparos x 2 camadas x 2 níveis de tráfego x 2 repetições x 10 tensões).

As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS. No laboratório, as amostras foram preparadas (toalete) e saturadas por capilaridade, numa bandeja por meio de elevação gradual de uma lâmina de água, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra.

A umidade das amostras foi equilibrada nos diferentes potenciais matriciais e, posteriormente, foi determinada a massa das amostras e a resistência do solo à penetração (RP). Para essa determinação, utilizou-se um penetrômetro eletrônico desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP. Conforme descrito por Tormena et al. (1998), o aparelho é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo; um painel para controle da velocidade e direção de deslocamento; uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste; e uma célula de carga de 20 kg, acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados. Foi adotada a velocidade de penetração constante de 1 mm s^{-1} , cone com diâmetro de base de 6 mm e ângulo de 30° com velocidade e direção de

deslocamento controlados (Apêndice D). Fez-se a determinação de resistência à penetração no centro geométrico de cada amostra.

As medidas de resistência do solo à penetração obtidas nas extremidades da amostra até 0,01 m de profundidade foram descartadas. A frequência de determinação correspondeu à coleta de um valor de resistência à penetração a cada 0,6767 segundos, obtendo-se um total de 266 leituras. Os valores, obtidos em kgf, foram transformados para MPa. A resistência à penetração do solo foi obtida pelo cálculo do valor médio ao longo da camada teste para cada amostra.

Na seqüência, foi feita a secagem das amostras em estufa a 105°C por um período de 24 horas e determinada a massa seca para cálculo da densidade do solo (D_s) e da umidade volumétrica (θ). Os dados de RP foram ajustados em relação à θ e D_s , utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990), adotando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994):

$$RP = a\theta^b D_s^c \quad (1)$$

onde: RP = resistência do solo à penetração (MPa); θ = teor de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); a , b e c = parâmetros de ajuste do modelo.

Extraíu-se o logaritmo natural dos valores de RP, θ e D_s e ajustou-se uma equação linear do tipo:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s \quad (2)$$

A curva de retenção de água no solo foi ajustada utilizando a metodologia descrita por Silva et al. (1994). Os dados de umidade do solo em função da tensão aplicada ao solo foram ajustados pela Equação (3) (van Genuchten, 1980), utilizando-se o software SWRC (*Soil Water Retention Curve*) para a obtenção dos parâmetros empíricos de ajuste α , m , n , e fixando a θ_s no valor correspondente à porosidade total e θ_r como valor da umidade volumétrica à tensão de 1,5 MPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (3)$$

Onde: θ = teor de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r = teor de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s = teor de água em solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ = módulo do potencial mátrico (MPa); α , m e n = parâmetros obtidos no ajuste dos dados ao modelo.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado considerando como limite inferior a quantidade de água retida no solo no potencial mátrico de -1,5 MPa (θ_{PMP}), considerada como a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ou o conteúdo volumétrico de água no solo quando a resistência do solo à penetração foi de 2 MPa (θ_{RP}). Como limite superior foi considerado o conteúdo de água retida no solo no potencial de -0,01 MPa (θ_{CC}), considerada como a umidade volumétrica na capacidade de campo ou o conteúdo volumétrico de água no solo quando a porosidade de aeração é de 10% (θ_{PA}) (Figura 1). Para cada valor de D_s , o IHO foi determinado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior de umidade.

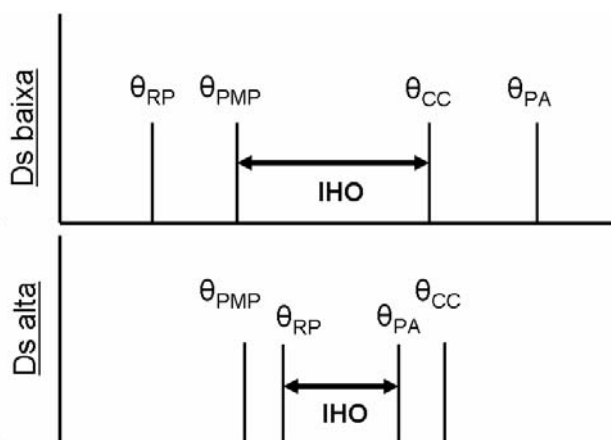


Figura 1 – Esquema representando o efeito da densidade do solo no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) com base na θ_{RP} , θ_{PMP} , θ_{CC} e θ_{PA} .

Os valores de (θ_{CC}) e (θ_{PMP}) foram obtidos nos potenciais mátricos de -0,01 e -1,5 MPa, utilizando a curva de retenção. Os valores de θ_{RP} em que ocorre resistência a penetração de 2,0 MPa foram obtidos por meio do modelo matemático ajustado dos dados de resistência. O valor de θ_{PA} , em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, foi obtido pela expressão:

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) - 0,1 \quad (4)$$

onde: Ds = densidade do solo em Mg m^{-3} ; Dp = densidade de partículas em Mg m^{-3} .
Assumiu-se a densidade de partículas igual a $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$.

O valor de água disponível no solo (AD) foi estimado como a diferença entre a θ_{CC} e θ_{PMP} .

Para obtenção dos parâmetros de estimação do IHO, utilizou-se um algoritmo por meio do programa estatístico desenvolvido por Leão et al. (2005).

3.3 Resultados

As quatro umidades limitantes para cada valor de densidade, isto é, a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), a umidade do solo equivalente a resistência à penetração igual a 2 MPa (θ_{RP}) e a umidade do solo equivalente à porosidade de aeração igual a 10% (θ_{PA}), são mostradas nas Figuras 2, 3, 4, 5, 6, e 7, para o preparo escarificado (nas três diferentes épocas sem e com tráfego), Figuras 8 e 9 para o sistema plantio direto contínuo por 13 anos (sem e com tráfego), Figura 10 para mata nativa e Figuras 11 e 12 para a média das três épocas do preparo escarificado sem e com tráfego, respectivamente.

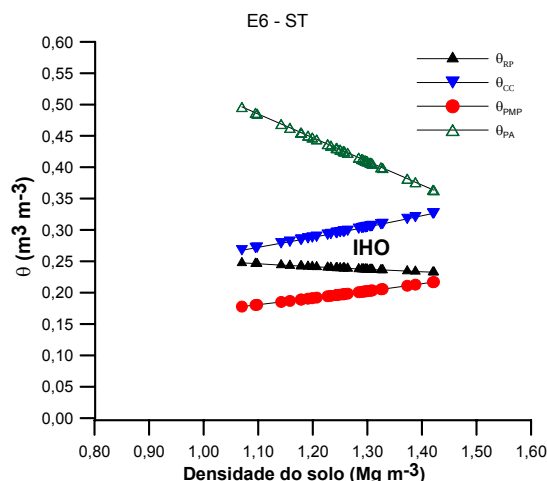


Figura 2 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, sem tráfego (ST).

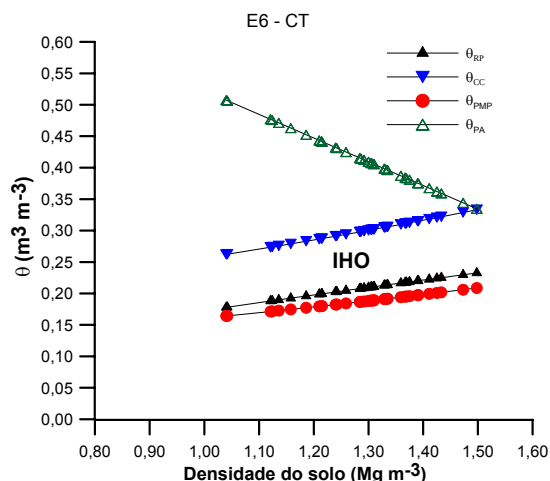


Figura 3 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, com tráfego (CT).

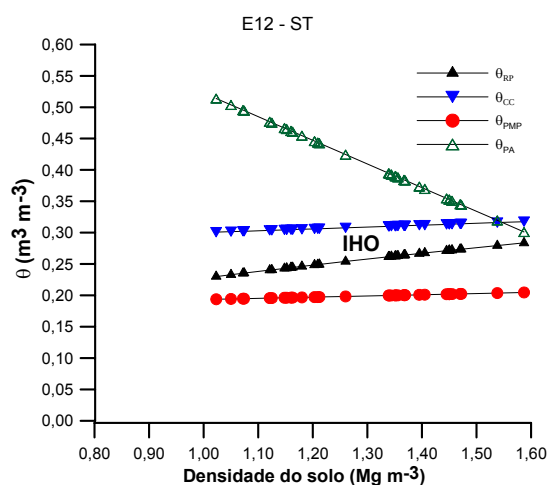


Figura 4 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, sem tráfego (ST).

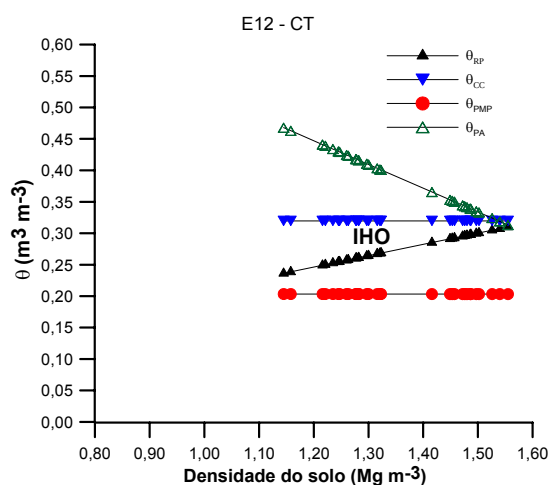


Figura 5 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, com tráfego (CT).

A densidade do solo (D_s) influenciou a θ_{CC} , a θ_{PMP} e a água disponível ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$). A θ_{CC} e θ_{PMP} foram positivamente relacionadas com a D_s no solo escarificado há seis meses, tanto sem quanto com tráfego (Figuras 2 e 3), no solo escarificado há 12 meses sem tráfego (Figura 4) e solo sob mata nativa (Figura 10).

Contrariamente, a θ_{CC} e θ_{PMP} decresceram com o aumento da Ds no solo escarificado há 12 meses com tráfego (Figura 5), no solo escarificado há 18 meses tanto sem quanto com tráfego (Figuras 6 e 7), e no solo sob PD sem e com tráfego (Figuras 8 e 9). A θ_{RP} no solo escarificado há seis meses sem tráfego, apresentou comportamento incomum, uma vez que diminuiu com o incremento da densidade do solo e apresentou-se como limite inferior do IHO em todas as densidades do solo observadas.

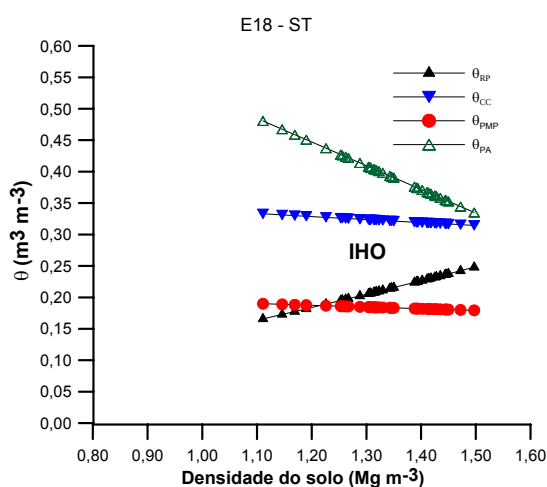


Figura 6 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (Ds) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, sem tráfego (ST).

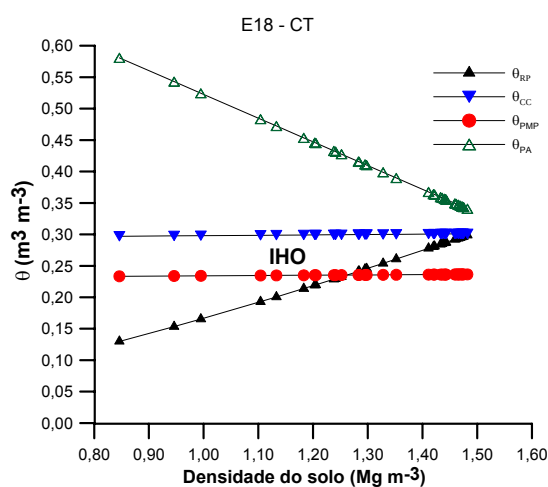


Figura 7 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (Ds) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, com tráfego (CT).

Independente do manejo ou preparo do solo, o aumento da Ds coincidiu com a diminuição da θ_{PA} . Porém, a θ_{PA} não foi o principal fator limitante ao IHO no solo em todos os preparos e sistemas de manejo do solo, uma vez que a θ_{CC} foi o limite superior do IHO no intervalo de densidade do solo observado. No preparo escarificado há 12 meses sem e com tráfego (Figuras 4 e 5), a θ_{PA} substituiu a θ_{CC} como fator limitante quando a Ds foi maior que, aproximadamente, $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$. Por outro lado, a θ_{RP} substituiu a θ_{PMP} como fator limitante para o escarificado há 18 meses sem e com tráfego, quando a Ds foi maior que $1,21$ e $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ respectivamente, e abaixo desse valor o IHO foi definido pela θ_{CC} e θ_{PMP} . A incorporação da aeração do solo e da resistência do solo à penetração na definição

do IHO para o crescimento de plantas resultou num parâmetro mais sensível às alterações da estrutura do solo do que o conceito de água disponível.

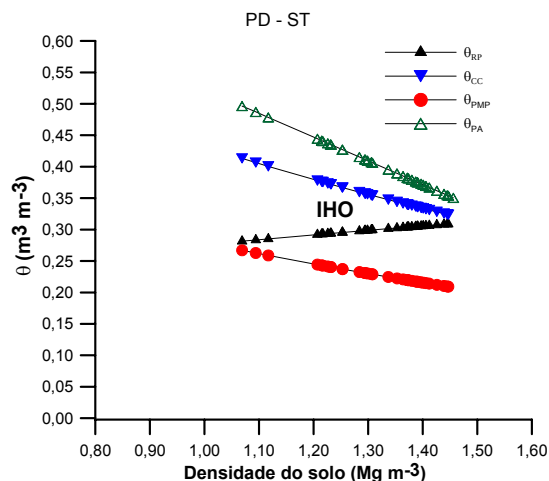


Figura 8 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob plantio direto (PD) por 13 anos, sem tráfego (ST).

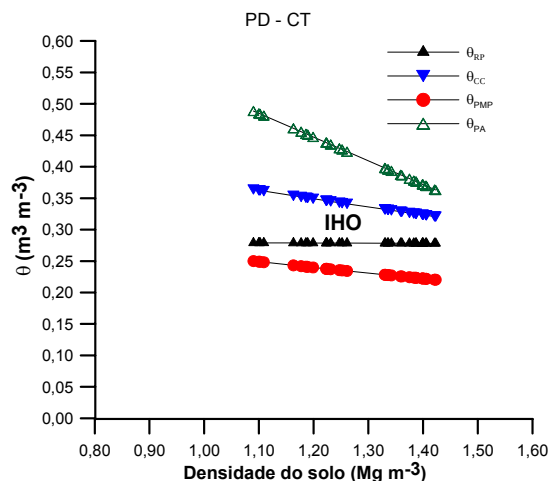


Figura 9 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob plantio direto (PD) por 13 anos, com tráfego (CT).

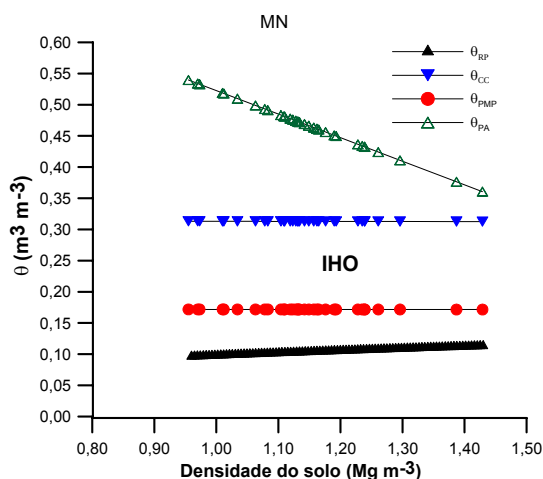


Figura 10 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob mata nativa (MN).

Independente do preparo e do manejo do solo pode-se verificar uma relação negativa do IHO com a D_s . Na maioria dos valores de D_s medidos, o IHO foi definido

pela θ_{CC} e θ_{RP} . As limitações convergiram na Ds de 1,50 a 1,60 Mg m⁻³, quando o IHO foi considerado como sendo zero.

Os modelos do IHO para o preparo escarificado (média das três épocas) estão apresentados nas Figuras 11 e 12 para os níveis sem e com tráfego, respectivamente. A densidade do solo (Ds) afetou a θ_{CC} , a θ_{PMP} e a água disponível ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$). A θ_{CC} e θ_{PMP} foram positivamente relacionadas com a Ds nesse preparo (média das diferentes épocas de escarificação) sem e com tráfego. A θ_{PA} substituiu a θ_{CC} como fator limitante quando a Ds foi maior que 1,52 Mg m⁻³, sem tráfego (Figura 11). Por outro lado, a θ_{RP} substituiu a θ_{PMP} como fator limitante apenas com a presença de tráfego (Figura 12), quando a Ds foi maior que 1,15 Mg m⁻³ e, abaixo desse valor, o IHO foi definido pela θ_{CC} e θ_{PMP} . A resistência à penetração equivalente a 2,0 MPa, no IHO, aumentou com o incremento da densidade do solo e a redução da umidade do solo e apresentou-se como limite inferior do IHO em todas as densidades acima de 1,15 Mg m⁻³, indicando que, mesmo antes de o solo atingir a θ_{PMP} , a planta já poderia apresentar restrições ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular por impedimento mecânico.

O limite superior foi limitado pela capacidade de campo nos dois níveis de tráfego (Figuras 11 e 12). Na presença de tráfego, os limites (θ_{CC} e θ_{RP}) convergiram na Ds de 1,54 Mg m⁻³, considerada como densidade do solo crítica (IHO igual a zero). Com o aumento da compactação do solo (aumento da densidade do solo), a resistência à penetração determinou a redução do IHO. Na ausência de tráfego, o limite inferior foi limitado pela θ_{RP} ao longo das densidades do solo observadas, sem alcançar a densidade do solo crítica.

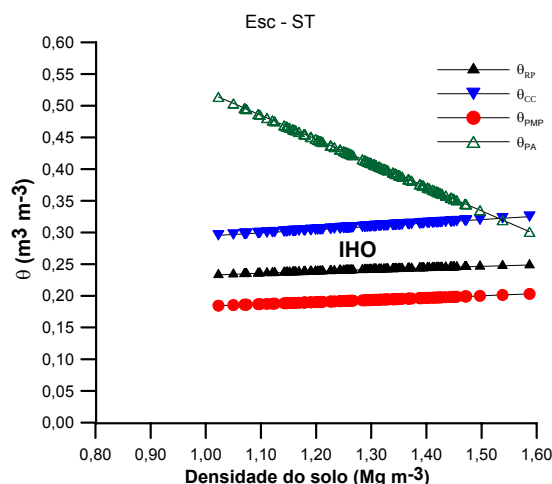


Figura 11 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado (média das três épocas - Esc), sem tráfego (ST).

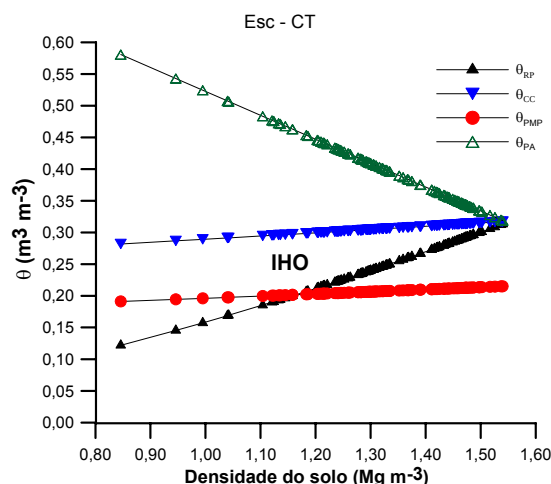


Figura 12 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP), em solo sob preparo escarificado (média das três épocas - Esc), com tráfego (CT).

3.4 Discussão

A principal vantagem da utilização do IHO na avaliação da qualidade física do solo é que ele integra num único parâmetro os efeitos do potencial mátrico, da porosidade de aeração e da resistência à penetração no crescimento das plantas. De maneira geral, os resultados desse estudo estão de acordo com trabalhos apresentados por aqueles autores que defendem o uso do IHO como indicador de qualidade física do solo no crescimento das plantas.

O efeito positivo da densidade do solo sobre a retenção de água nos limites críticos de potenciais de água no solo, θ_{CC} e θ_{PMP} (Figuras 2, 3, 4, 10, 11, e 12), corrobora os valores observados por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999, 2007), Collares et al. (2006) e Leão et al. (2006), que determinaram que o aumento da retenção de água ao longo dos valores de D_s é devido à redução da macroporosidade e à redistribuição dos tamanhos dos poros. Nesse sentido, Silva (2003) também encontrou relação positiva da θ_{CC} e a θ_{PMP} com a D_s em um Latossolo Vermelho Distrófico. Com o aumento da densidade do solo em solos argilosos, há uma redução na macroporosidade em maior proporção do que a

porosidade total, reduzindo o diâmetro de poros maiores, de modo a se tornarem mais eficientes na retenção de água em baixos potenciais.

Em relação ao decréscimo da θ_{CC} e da θ_{PMP} com o aumento da D_s (Figuras 5, 6, 7, 8 e 9), Silva et al. (1994) também encontraram diferenças entre o comportamento dessas relações quando estudaram diferentes tipos de solo. Para um solo siltoso (180 g kg⁻¹ de argila, 520 g kg⁻¹ de silte e 300 g kg⁻¹ de areia), a θ_{CC} e a θ_{PMP} foram negativamente correlacionadas com a D_s , mas foram positivamente correlacionadas para o solo arenoso (60 g kg⁻¹ de argila e 780 g kg⁻¹ de areia). A importância de conhecer a relação entre a θ_{CC} e a D_s consiste na possibilidade de aumentar a quantidade de água armazenada no solo, principalmente em áreas que possuem baixa densidade (SILVA, 2003).

Em todos os casos o IHO foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e limite inferior pela resistência à penetração (θ_{RP}) ($D_s > 1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ na Figura 6, $D_s > 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ na Figura 7 e $D_s > 1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ Figura 12), corroborando com resultados obtidos por Tormena et al. (2007) em estudo de caracterização do IHO em solos tropicais. A porosidade de aeração (θ_{PA}) foi significativamente reduzida com o aumento da densidade do solo, sendo superior a θ_{CC} e não limitante ao crescimento radicular, concordando com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999, 2007), Silva (2003) e Leão et al. (2006).

Quanto à variação negativa do IHO até o valor zero, denominada de densidade do solo crítica (D_{sc}), Beutler et al. (2004a) observaram valores de D_{sc} de 1,55 e 1,63 Mg m⁻³ para a cultura do arroz cultivado em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho. Em condições de campo, Beutler et al. (2004b) verificaram a D_{sc} de 1,63 Mg m⁻³ para a cultura do arroz de sequeiro utilizando o mesmo solo citado acima.

A D_{sc} encontrada nesse estudo é considerada muito alta para o solo em estudo. Em Latossolo Vermelho Distrófico típico, Klein & Camara (2007) verificaram valores de D_{sc} de 1,33 Mg m⁻³ e 1,34 Mg m⁻³ para o escarificado e PD, respectivamente. Os autores destacam que a similaridade nos valores é inerente ao solo e independe do manejo adotado. Reichert et al. (2003) apresentou uma proposta de classificação da densidade crítica em função do teor de argila, onde

solos muito argilosos (> 60% de argila) assumiriam valores entre 1,25 e 1,30 Mg m⁻³. Os resultados obtidos por Klein & Camara (2007) salientam que a densidade do solo crítica depende não somente da textura do solo, mas também de operações de manejo do solo a fim de reduzir a densidade, aumentar os valores de umidade e, conseqüentemente, o IHO, concordando em parte com a proposta apresentada por Reichert et al. (2003). Para Leão et al. (2006), a partir do valor de Dsc a degradação da estrutura ao crescimento radicular é acentuada, prejudicando o crescimento das plantas e reduzindo a produtividade.

O decréscimo da amplitude do IHO a partir das densidades do solo de 1,21 Mg m⁻³, 1,25 Mg m⁻³ e 1,25 Mg m⁻³ nas Figuras 5, 6, 7 e 12, respectivamente, ocorre em função da relação direta da resistência à penetração com a densidade do solo. Assim, como afirmado por Silva (2003), o aumento da Ds causa maior RP e, quando o valor da RP é o valor limitante à produtividade, o decréscimo no conteúdo de água aumenta a RP e expõe as planta as condições cada vez mais adversas ao crescimento. Valores reduzidos do IHO em solos compactados ocasionam redução na produtividade das culturas, uma vez que estão expostas à aeração deficiente e excessiva resistência à penetração. Silva e Kay (1997) concluíram que o crescimento das plantas é menos restrito dentro dos limites do IHO. Para Silva et al. (1994), a freqüência de valores de conteúdo de água fora do IHO depende da sua magnitude e da variabilidade do conteúdo de água do solo em função do clima. Contudo, nem sempre a RP é a única limitante da produtividade das culturas, mas também outros fatores, como: o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; SILVA et al., 2003).

A similaridade na relação negativa do IHO com a densidade do solo nos preparos e manejos do solo, concorda com resultados obtidos em Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999, 2007), Leão et al. (2005), Cavalieri et al. (2006) e Collares et al. (2006). Em sistema plantio direto e sistema convencional, Tormena et al. (1998) verificaram menor IHO no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional. Os resultados obtidos por Klein & Camara (2007) em Latossolo Vermelho Distrófico típico em preparo escarificado e PD apresentou semelhança nos valores de IHO, contudo destacam que a escarificação esporádica em solos sob plantio direto melhora as condições físico-hídricas para as plantas, pois reduz a resistência do solo à penetração. No entanto, as aplicações de cargas excessivas

por usuais operações agrícolas realizadas após a escarificação devem ser evitadas a fim de evitar a compactação adicional do solo e manter a qualidade estrutural do meio (COLLARES et al., 2006).

3.5 Conclusões

O intervalo hídrico ótimo foi mais sensível às variações da estrutura do solo do que à água disponível, refletindo melhor a qualidade física do solo para o crescimento das culturas.

A resistência à penetração foi fortemente influenciada pela densidade do solo determinando o limite inferior do intervalo hídrico ótimo nos diferentes preparos e sistemas de manejo.

Dentre os preparos e sistemas de manejo, o escarificado apresentou maior restrição e limitação físico-hídrica comparado ao plantio direto e mata nativa. O sistema plantio direto com tráfego apresentou maior limitação quanto à resistência à penetração do solo restringindo o intervalo hídrico ótimo.

4 CAPÍTULO II AERAÇÃO DO SOLO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES MANEJOS DO SOLO E NÍVEIS DE TRÁFEGO

RESUMO

O grande interesse no comportamento hídrico dos solos contendo macroporos se deve a grande variação nos atributos físicos do solo. Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a relação entre capacidade de aeração, continuidade de poros e curva característica de água no solo nos diferentes preparos e manejos do solo e níveis de tráfego. A amostragem foi realizada na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Trigo) em Passo Fundo (RS). O solo estudado foi classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico. Foram coletadas 540 amostras de solo, com estrutura preservada, nas condições de preparo e manejo do solo (plantio direto há 13 anos, escarificado em três diferentes épocas e em mata nativa), em dois níveis de tráfego (sem e com), nas camadas 0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m. As amostras de solo foram preparadas, saturadas com água e separadas em grupos de potencial matricial as quais foram submetidas (-0,004; -0,006; -0,008; -0,01; -0,03; -0,05; -0,07; -0,1; -0,5 e -1,5 MPa). Após o equilíbrio em cada pressão, as amostras individuais foram pesadas para determinação das curvas de retenção de água e submetidas à determinação da condutividade do solo ao ar (K_i). Em seguida, as amostras de solo foram colocadas em estufa para secagem e, após, determinação da densidade do solo (D_s). A permeabilidade ao ar (K_a) foi obtida a partir da determinação da condutividade do solo ao ar. Foram determinados também, o espaço aéreo, o índice de continuidade de poros e a porosidade obstruída. A maior permeabilidade do solo ao ar foi observada na camada superficial do solo onde há maior presença de macroporos e em solo com menor potencial matricial. A permeabilidade ao ar foi positivamente relacionada com o espaço aéreo do solo. O tráfego tornou o solo menos permeável ao ar, afetando a continuidade e distribuição de tamanho de poros.

4.1 Introdução

O grande interesse no comportamento hídrico dos solos deve-se a grande variação nos atributos físicos do solo. Uma variação no teor de água estabelece modificações na tensão da água, no teor e difusão de gases, na resistência à penetração, na condutividade hidráulica, na permeabilidade ao ar dentre outras propriedades físicas do solo (CAVALIERI et al., 2006). Assim, um solo ideal é caracterizado por apresentar uma estrutura física funcional e, principalmente, que permita um espaço poroso suficiente e contínuo para o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas (KOPI; DOUGLAS, 1991; SILVA, 2003).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando-se diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo. Dentre eles, estão a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (BEUTLER et al., 2001), a permeabilidade do solo ao ar e a infiltração de água (CASTRO FILHO et al., 1998; CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; VEZZANI, 2001, REICHERT et al., 2003). No entanto, a capacidade de aeração e o fluxo de água no solo são fatores relevantes da condição estrutural do solo quanto ao suprimento de ar e água às raízes das culturas, já que o ar e a água são os ocupantes básicos dos espaços vazios. Assim, a curva de retenção de água no solo, caracterizada pela relação existente entre o teor de água no solo e a energia que retém essa água, é uma propriedade fundamental para descrever o processo dinâmico da água e de solutos no solo, bem como a disponibilidade dessa água às plantas (ABREU et al., 2004).

A distribuição do tamanho de poros do solo não é gradual nem homogênea e, em função disso, caso haja predominância de uma classe de tamanho de poros e este conjunto de poros for drenado, haverá aumentos significativos no espaço aéreo do solo (ϵ_{ar}) e no grau de interligação de todos os poros drenados (PEREIRA; CRUCIANI, 2001). Nesse sentido, o sistema de poros do solo depende não só da distribuição do tamanho de poros, mas também da porosidade total, da geometria e forma do sistema de poros e da continuidade de poros (COREY, 1986, REICHERT et al., 2003), sendo esses descritos pela permeabilidade do solo ao ar.

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é uma propriedade do solo que representa a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar. É considerada como um índice de qualidade estrutural do solo, pois descreve os fatores geométricos dos poros (COREY, 1986). Além disso, é uma medida sensível da compactação do solo entre os atributos físicos testados, como a densidade do solo, a porosidade total, a distribuição do tamanho e continuidade de poros, a estabilidade dos agregados, e a resistência à penetração.

De acordo com Ball & Schjønning (2002), solos com pequena permeabilidade ao ar (como $1 \mu\text{m}^2$) podem ser considerados como impermeáveis; entretanto, a permeabilidade ao ar apresenta forte influência do conteúdo de água no solo, atingindo valores máximos em solo seco e progressivamente diminui com o solo úmido até que chegue a um valor zero, ou próximo à saturação. Apresenta, ainda, relação inversa com a compactação, ou seja, a permeabilidade ao ar sempre é reduzida com o aumento da compactação do solo (BARDEN; PAVLAKIS, 1971).

A permeabilidade ao ar não é apenas importante para a aeração do solo, mas também como um bom indicador da conectividade do sistema de poros, mostrando as transformações em eficiência funcional do sistema de poros com deformação (PETH; HORN, 2006). Além disso, é um método rápido e fácil que pode ser usado de diversas formas para caracterizar a estrutura do solo (IVERSEN, et al., 2001, BALL; SCHJØNNING, 2002).

A permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo ao ar e a água (BEUTLER et al., 2001). No solo, a distribuição e forma de suas partículas, a distribuição do tamanho dos poros, a tortuosidade e a superfície específica influenciam na determinação da permeabilidade do solo ao ar. A viscosidade do fluido também apresenta grande influência na temperatura. Para gases a baixas pressões, por exemplo, a viscosidade aumenta com a temperatura.

O conhecimento do comportamento da permeabilidade ao ar para diferentes tipos de solos é de suma importância, pois qualquer alteração na estrutura do solo afeta diretamente o espaço poroso ocupado pelo ar e pela água, bem como a sua funcionalidade. O PD, comparado a outros tipos de manejos do solo tende a ocasionar um aumento na densidade do solo e, conseqüentemente, aumento na

quantidade de meso e microporos reduzindo a capacidade de armazenamento de água do solo. Por outro lado, a escarificação provoca alteração no arranjo dos poros e, como consequência, na retenção de água e o fluxo de gases (KLEIN; CAMARA, 2007). Ou seja, o revolvimento do solo atua no sentido oposto, ocasionando redução da densidade do solo, aumento da porosidade de aeração e diminuição da capacidade do solo em armazenar água.

Para garantir a difusão do ar no solo e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas, o valor da porosidade de aeração (macroporos com diâmetro maior que $50 \mu\text{m}^2$) não deve ser inferior a 10% do volume total do solo (CANNEL, 1977). O tamanho e o volume dos poros exercem importante papel no armazenamento de água do solo e na porosidade de aeração (ϵ_a), representada pela parte do espaço poroso não ocupado pela água (HILLEL, 1980). A presença de bioporos é extremamente importante quando se estuda o espaço poroso, pois os poros biológicos são responsáveis pelo movimento de ar e de água no solo. A infiltração da água no solo, por exemplo, apresenta a maior amplitude de variação (REICHERT et al., 2003), pois integra vários fatores, como, distribuição do tamanho e continuidade de poros, presença de poros biológicos, cobertura do solo, entre outros. Estes mesmos aspectos são avaliados pela permeabilidade do solo ao ar, que apresenta como vantagem adicional a possibilidade de ser medida em diferentes tensões de água no solo (com diferentes diâmetros de poros drenados).

O objetivo deste estudo foi verificar a relação entre as características físico-hídricas do solo, ou seja, capacidade de aeração, continuidade de poros e curva característica de água no solo em um Latossolo sob plantio direto contínuo por 13 anos, escarificado em diferentes épocas e níveis de tráfego e mata nativa,

4.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental (Apêndice A) pertencente a Embrapa Trigo, situada no município de Passo Fundo, RS ($28^{\circ}10'00''$ de latitude sul, $52^{\circ}22'00''$ de longitude oeste, e aproximadamente 686m de altitude). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo “Cfa” e “Cfb”, clima subtropical úmido, com precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais,

distribuída ao longo de todos os meses do ano (NIMER, 1989). O solo em estudo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, (EMBRAPA, 1999) de textura argilosa (Tabela 2).

Tabela 2 – Composição granulométrica do solo. Valores médios de areia, silte e argila nas três camadas.

Camada	Areia	Silte	Argila
m	-----g kg⁻¹-----		
0,00 – 0,06	309,74	254,41	435,85
0,10 – 0,15	307,12	265,13	427,75
0,20 – 0,25	304,58	262,32	433,10

O experimento foi implantado no ano de 2001, em um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas. As amostras foram coletadas no dia 16 de dezembro de 2006, em um dos blocos, nos diferentes preparos e manejos do solo, com tráfego controlado na área, ou seja, o maquinário utilizado nas atividades agrícolas se desloca sempre no mesmo trajeto. Assim, existem dois níveis de tráfego: ausência e presença das usuais operações de manejo, onde os maquinários agrícolas propagaram suas tensões. As amostras dos tratamentos com tráfego foram coletadas no centro das tensões. As parcelas principais (6 x 12 m) foram distribuídas conforme os sistemas de preparo do solo, possuindo regiões tanto de alto tráfego como de mínimo tráfego. Os tratamentos de preparo e manejo do solo foram: (i) sistema plantio direto contínuo por 13 anos (PD); (ii) escarificado seis meses antes da coleta (E6); (iii) escarificado doze meses antes da coleta (E12); (iv) escarificado dezoito meses antes da coleta (E18) e nas subparcelas os níveis de tráfego (sem e com tráfego das usuais operações de manejo) e (v) mata nativa (MN).

Na amostragem, a área estava sendo cultivada com soja. Em cada condição de preparo e manejo, nos dois níveis de tráfego (Apêndice B), foram coletados dez grupos de amostras com estrutura preservada, na entrelinha da soja, (em anéis volumétricos com 0,06 m de diâmetro e 0,03 m de altura), no centro de duas camadas (0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m). Os 10 grupos de amostras, sendo 2 amostras de cada tratamento por grupo, foram submetidos a uma das seguintes tensões: 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 MPa em mesa de tensão (REINERT; REICHERT, 2006); e 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa em câmaras de pressão descritas em Klute (1986). Todas as camadas foram coletadas com duas repetições.

Assim, foi coletado um total de 540 amostras (5 preparos x 3 camadas x 2 níveis de tráfego x 2 repetições x 10 tensões).

As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS. No laboratório, as amostras foram preparadas (toaleta) e saturadas por capilaridade, numa bandeja por meio de elevação gradual de uma lâmina de água, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra.

Após a coleta, as amostras foram individualmente acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. No laboratório, as amostras foram preparadas (toaleta), saturadas numa bandeja por meio de elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra por capilaridade, durante um período de 48 horas. Em seguida, foram separadas duas amostras de cada condição de preparo e manejo, camada e nível de tráfego, as quais foram equilibradas nas tensões citadas anteriormente.

Após o equilíbrio para cada tensão, as amostras foram submetidas à determinação da condutividade do solo ao ar (K_i) e, em seguida, foram colocadas em estufa para secagem a 105 °C, por 24 horas para determinação da densidade do solo (D_s) obtida pela massa de solo seco e o volume da amostra.

4.2.1 Curvas de Retenção de Água (CRA)

Para obtenção da curva de retenção de água no solo, as amostras foram equilibradas a diferentes potenciais matriciais em mesa de tensão e em placas porosas de Richards. No entanto, foram utilizados diferentes anéis em cada ponto, pois havia necessidade de determinação da resistência do solo à penetração. Essa determinação faz com que a amostra de solo seja perdida já que ocorre perfuração da amostra de solo. Assim, os valores de umidade foram obtidos em base de massa, ou seja, umidade gravimétrica, os quais foram multiplicados pela densidade do solo, obtendo a umidade volumétrica e, assim, reuniram-se em uma mesma curva os pontos de umidade (θ) versus a tensão (ψ), da mesa de tensão, do aparelho de Richards.

Para ajuste das curvas de retenção de água, empregou-se o modelo sugerido por van Genuchten (1980), utilizando-se o programa computacional *SWRC* (*Soil Water Retention Curve*), conforme equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (5)$$

onde: θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ = potencial matricial (kPa); α , m , e n = parâmetros de ajuste do modelo.

4.2.2 Permeabilidade ao ar e espaço aéreo

A permeabilidade ao ar do solo (K_a) foi obtida pela determinação da condutividade ao ar (K_l), medida em um equipamento conforme ilustrado na Figura 13, com um permeâmetro de carga constante.

O princípio da metodologia é baseado na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo-se um gradiente de pressão constante (10 cm). A medição no aparelho é composta pelas seguintes etapas: existe uma diferença de pressão de 1 hPa; o fluxo de ar é então regulado por uma válvula de precisão, o que torna possível a medida do ar que passa pelos fluxímetros, os quais vão de uma escala de $0,1 \text{ L min}^{-1}$ até 10 L min^{-1} ; assim que o ar passa pela amostra faz-se a leitura no respectivo fluxímetro; por meio de um manômetro é medida diretamente a diferença de pressão entre o ambiente e o fluxo de ar do equipamento.

Com a quantidade de ar medida que passa pela amostra, a condutividade ao ar, K_l (cm s^{-1}) é determinada como:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad (6)$$

e a permeabilidade ao ar K_a (μm^2) foi calculada pela condutividade ao ar (K_l), como segue:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (7)$$

onde:

K_l = condutividade ao ar (cm s^{-1}); ρ_l = densidade do ar na hora da medição (kg m^{-3});
 g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); ΔV = quantidade de ar que passa pela amostra no Δt (m^3); l = altura da amostra (m); Δp = pressão do ar que passa pela amostra (10 cm); A = área superficial do anel (m^2); η = viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

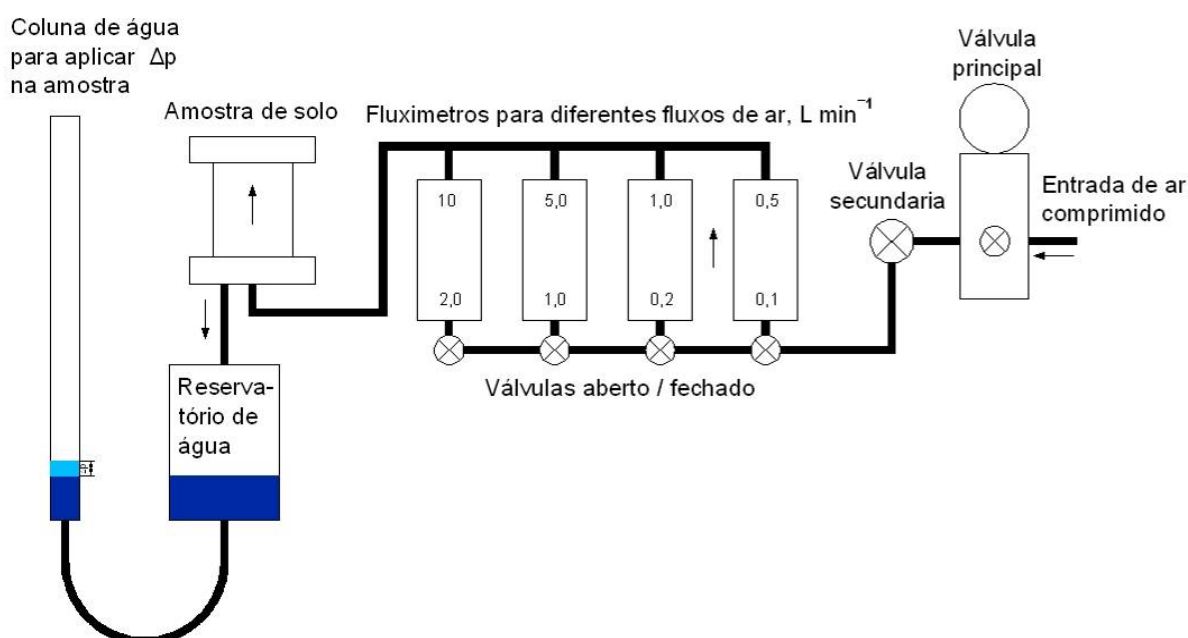


Figura 13 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade ao ar em amostras indeformadas de solo. Fonte: Vossbrink (2005) e modificado por Brandt, 2008 (comunicação pessoal).

O espaço aéreo ou porosidade de aeração (ε_a) foi calculado como a diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água em cada potencial mátrico específico. A porosidade obstruída (ε_b) e o índice de continuidade de poros (N) foram estimados conforme Ball et al. (1988). O índice de continuidade de poros (N) foi obtido a partir da relação entre K_a e ε_a .

$$N = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (8)$$

A K_a e ε_a foram relacionados por um modelo exponencial, também modificado por Ball et al. (1988), como segue

$$\log (K_a) = \log (M) + N \log (\varepsilon_a) \quad (9)$$

onde M e N são parâmetros empíricos.

4.3 Resultados

A relação entre a permeabilidade do solo ao ar e o potencial matricial de água no solo nas camadas estudadas estão apresentadas nas Figuras 16 a 18, para cada manejo do solo e dois níveis de tráfego. Todas as curvas apresentaram comportamento similar, apresentando um incremento da permeabilidade do solo ao ar com o potencial matricial de água do solo.

A permeabilidade do solo ao ar apresentou elevada variabilidade amostral em todos os manejos do solo estudados e em todas as camadas. O maior incremento da K_a ocorreu nos maiores ψ_m , quando ocorre a drenagem dos poros maiores e a macroporosidade do solo favorece a passagem do ar, confirmando a relevância dos macroporos na permeabilidade ao ar. Diminuindo o ψ_m para -33 kPa e, posteriormente, para -100 kPa, a seqüência lógica de esvaziamento de poros que permitiram a passagem do ar e aumento da K_a se manteve, mas com menor variação.

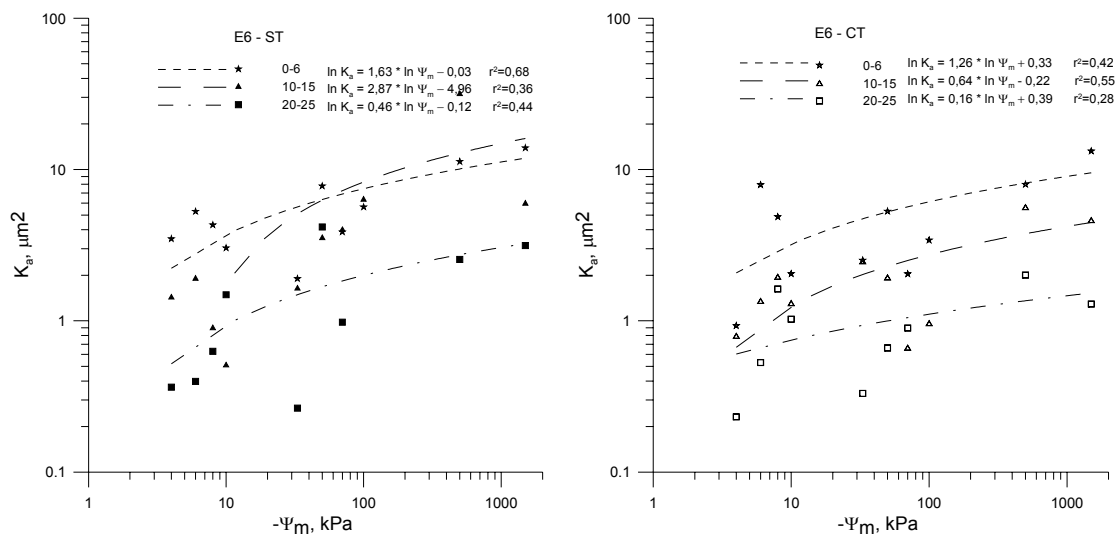


Figura 14 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado seis meses (E6) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).

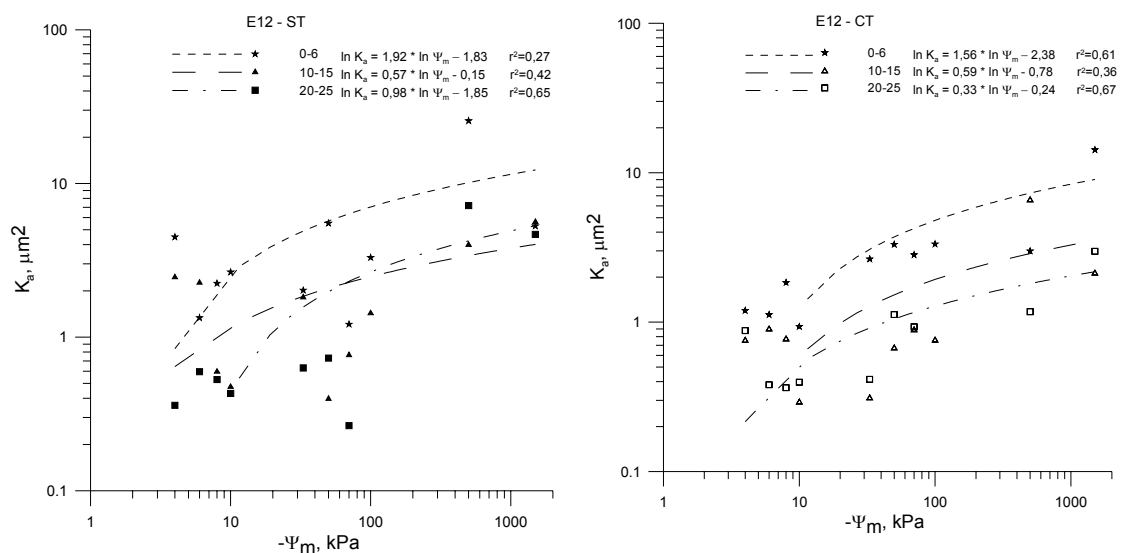


Figura 15 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado 12 meses (E12) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).

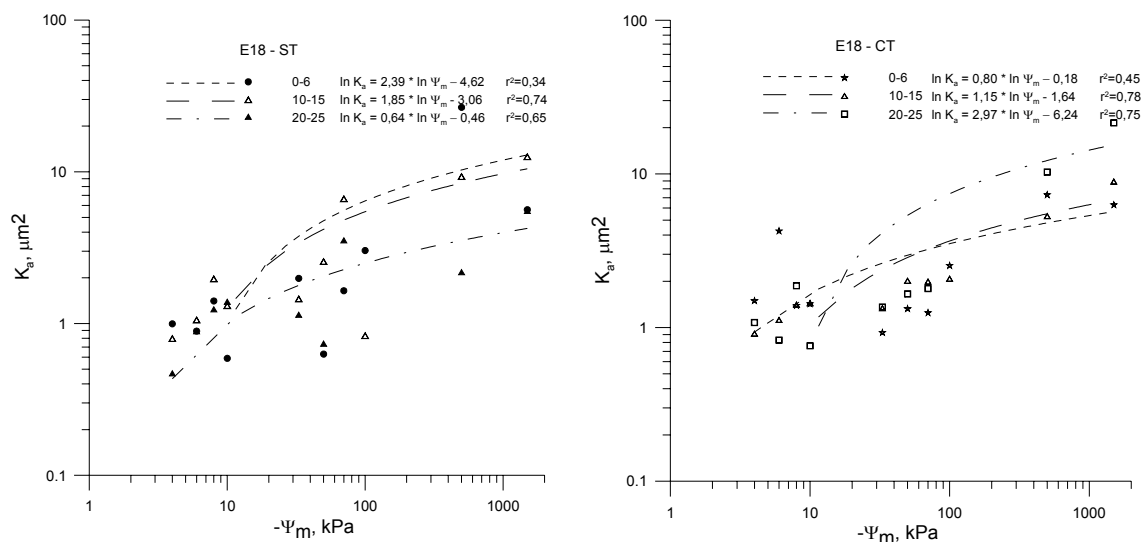


Figura 16 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo sob preparo escarificado 18 meses (E18) antes da coleta, nas posições sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).

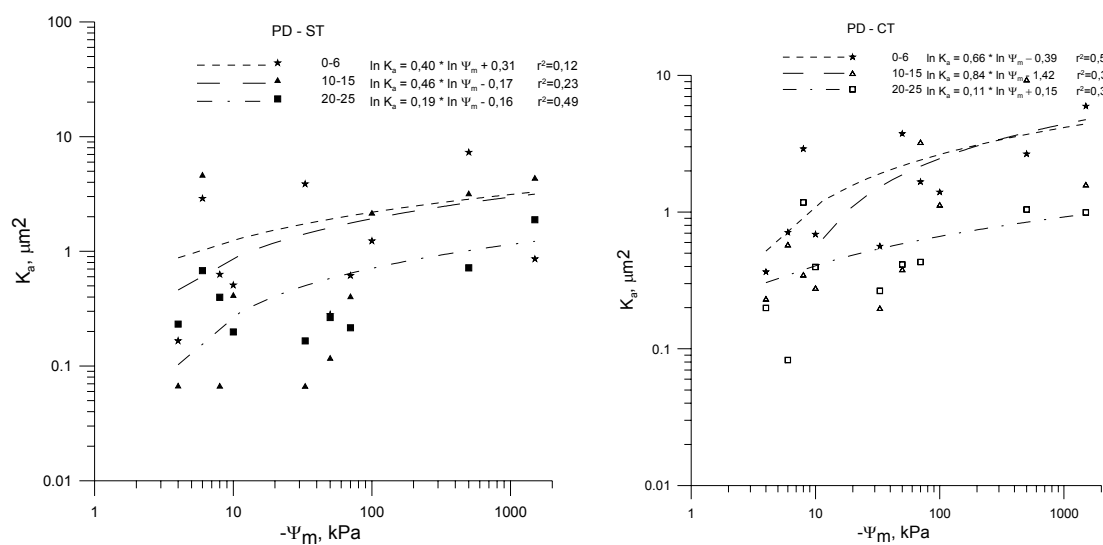


Figura 17 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas do solo sob sistema plantio direto contínuo por 13 anos (PD), sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).

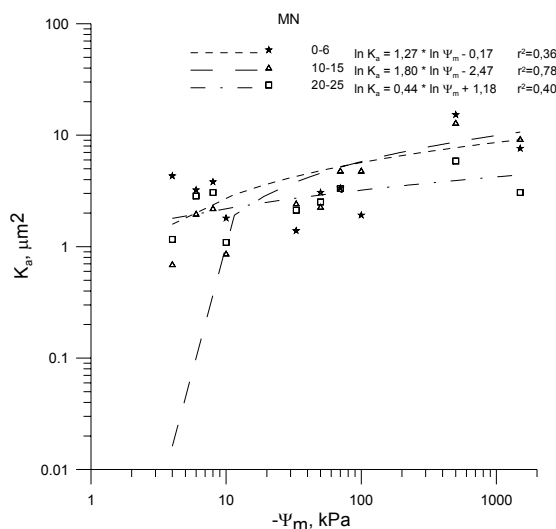


Figura 18 – Relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) e o potencial matricial (Ψ_m), em três camadas sob mata nativa.

Pela curva de retenção de água no solo (Apêndices G e H), pode-se observar similaridade entre os preparos e manejos do solo e profundidades estudados. Em todos os tratamentos e condições, inicialmente houve um decréscimo significativo no conteúdo de água do solo a potenciais maiores que -6 kPa, com o maior teor de água para o solo saturado na camada 0,00 a 0,06 m e a menor na 0,10 a 0,15 m, justificado pelas diferenças na porosidade total entre as camadas.

A permeabilidade do solo ao ar foi relacionada com o espaço aéreo do solo, conforma mostra a Figura 19 para as três camadas (0,00 a 0,06 m; 0,10 a 0,15 m e 0,20 a 0,25 m). De maneira geral, nas três camadas, todos os preparos e manejos do solo apresentaram relação positiva do ε_a com a K_a .

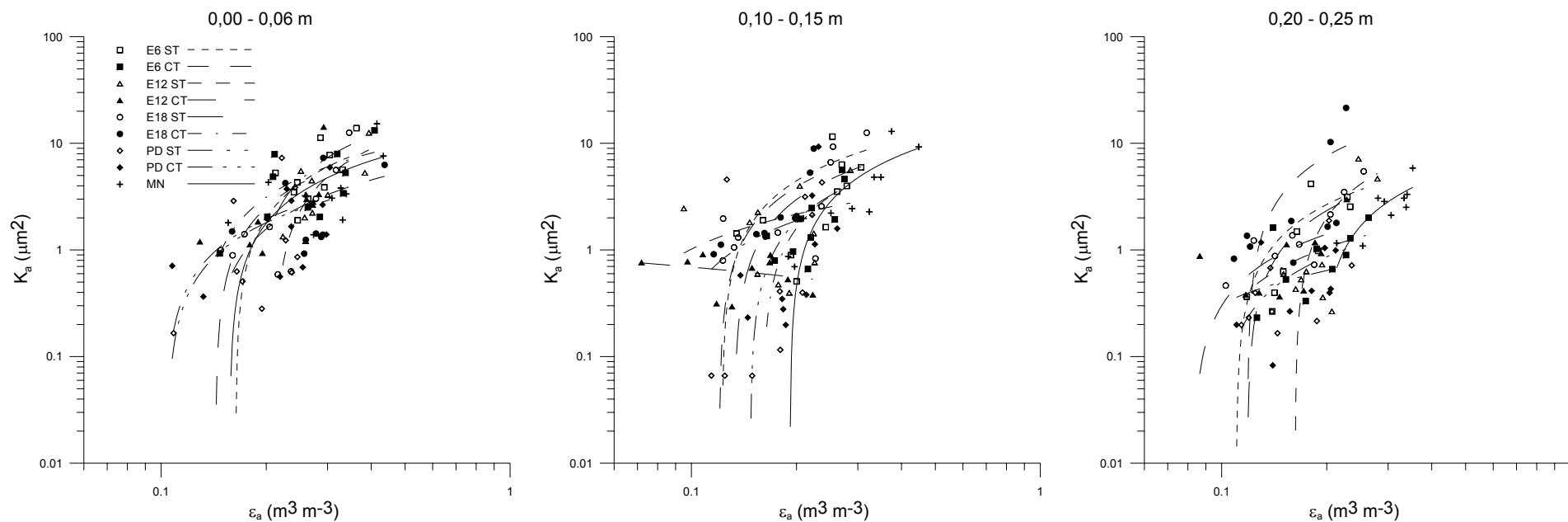


Figura 19 – Relação entre o espaço aéreo ε_a e a permeabilidade do solo ao ar (K_a) para os preparos e manejos estudados (E6, E12, E18, PD e MN), sem e com tráfego, nas três camadas.

E6 = escarificado seis meses antes da coleta de solo; E12 = escarificado 12 meses antes da coleta de solo; E18 = escarificado 18 meses antes da coleta de solo; PD = plantio direto contínuo por 13 anos e MN = mata nativa.
ST = sem tráfego e CT = com tráfego.

Os valores de $\log M$ e N , estimados pela regressão linear, estão mostrados na Tabela 3 para todos os preparos e manejos, sem e com tráfego, nas camadas 0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m. O parâmetro N variou de 0,20 a 15,38.

Pela porosidade obstruída ε_b , não se observa grande variabilidade amostral embora ela esteja relacionada com a permeabilidade do solo ao ar e com a agregação do solo. Mesmo na mata nativa e na camada de 0,00 a 0,06 m dos preparos e manejos, onde a permeabilidade apresentou grande variabilidade espacial, pois é onde se verifica maior presença de macroporos, não houve variabilidade da ε_a .

Tabela 3 – Parâmetros de regressão ($\log M$ e N) e porosidade obstruída ($\varepsilon_b = 10^{(-\log M) / N}$) para todos os manejos estudados (Ei5, Ev5, Ei6, PD e MN), sem e com tráfego (ST e CT) nas três camadas (0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,25 m). Modelo: $\log(k_a) = \log(M) + N \log \varepsilon_a$

Manejo	Tráfego	$\log M$	N	r	ε_b
Camada 0,00 – 0,06 m					
E6	ST	25,89	15,38	0,42	0,02
	CT	14,69	7,19	0,35	0,01
E12	ST	21,76	14,04	0,58	0,03
	CT	14,57	7,50	0,27	0,01
E18	ST	17,99	9,94	0,58	0,02
	CT	8,45	4,27	0,21	0,01
PD	ST	6,64	2,91	0,11	0,01
	CT	6,22	2,75	0,29	0,01
MN	-	13,62	7,36	0,31	0,01
Camada 0,10 – 0,15 m					
E6	ST	14,62	7,24	0,32	0,01
	CT	13,15	7,18	0,56	0,02
E12	ST	4,83	1,66	0,09	0,00
	CT	0,23	0,20	0,08	14,13
E18	ST	19,05	9,07	0,59	0,07
	CT	16,27	7,68	0,48	0,01
PD	ST	5,40	2,18	0,10	0,00
	CT	11,77	6,15	0,20	0,01
MN	-	17,54	10,62	0,62	0,02
Camada 0,20 – 0,25 m					
E6	ST	9,53	4,47	0,53	0,01
	CT	3,04	1,24	0,27	0,00
E12	ST	17,45	9,60	0,60	0,02
	CT	3,99	1,60	0,32	0,00
E18	ST	9,86	4,47	0,64	0,01
	CT	31,03	14,56	0,35	0,01
PD	ST	2,81	1,21	0,32	0,01
	CT	1,40	0,47	0,08	0,00
MN	-	10,47	6,35	0,54	0,02

4.4 Discussão

A permeabilidade do solo ao ar apresentou elevada variabilidade amostral, especialmente na camada superficial de todos os tratamentos, em função da variabilidade de volume de macroporos. Conforme Schønning (2005), a permeabilidade do solo ao ar é exponencialmente relacionada com a macroporosidade. Nas demais camadas (0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25) essa variação pode ser relacionada com a variação da densidade do solo (Apêndices E e F), demonstrando que pequenas variações na densidade do solo contribuíram para variação mensuráveis na permeabilidade do solo ao ar.

A permeabilidade ao ar é fortemente governada pela estrutura do solo (BALL; SMITH, 1991; MOLDRUP et al., 2003). Neste estudo, a variabilidade da K_a , em todos os preparos e manejos do solo estudados e em todas as camadas, é resultante da variação da densidade do solo (Apêndices E e F). Isso ocorreu devido à utilização de distintos anéis para cada tensão equilibrada da curva de retenção de água. Além disso, o baixo número de repetições (quatro) impossibilitou a detecção e descarte dos valores discrepantes nas análises. Possivelmente, os poros observados nas amostras de solo sejam oriundos de raízes decompostas e da atividade de minhocas ou de outros organismos da biota do solo. Assim, esses poros podem ter contribuído para a variação na K_a . No estudo realizado por Dörner (2005), a permeabilidade do solo foi favorecida pelo aumento da atividade biológica, pois possibilitou um fluxo preferencial de ar e água através das galerias produzidas pelos organismos do solo.

Um incremento na retenção de água em condições saturadas dá uma indicação de maior presença de poros. Barden & Pavlakis (1971), Moldrup et al. (2003) e Tuli et al. (2005) relacionaram K_a com o conteúdo de água no solo e descreveram que a K_a diminuiu com o aumento do conteúdo de água no solo e aproximou-se de zero na região saturada. A grande diminuição em K_a é claramente resultado da redução dos poros preenchidos por ar. Ball e Schønning (2002) também relacionaram a permeabilidade ao ar com o conteúdo de água no solo em diferentes teores de argila e verificaram que a K_a alcançou valor máximo em solo seco e diminuiu com o incremento do conteúdo de água no solo devido à obstrução dos poros do solo pela água. A permeabilidade do solo ao ar, para um mesmo

conteúdo de água no solo, apresentou valores mais elevados para o solo mais argiloso (37% de argila).

A compressão do solo também tem grande influência na permeabilidade do solo ao ar. Segundo Schønning et al. (2005), a existência de uma camada densa (pé-de-arado) pode influenciar a permeabilidade ao ar e o movimento de água no perfil do solo. Essa camada pode ser rompida pelo crescimento das raízes no solo ou ainda por canais construídos por minhocas ou, ainda, megaporos do solo. Barden & Pavlakis (1971) estudaram a permeabilidade ao ar em solos compactados e descobriram que os fatores que mais influenciaram a K_a foi a estrutura e o grau de saturação dos inter-grupos de macroporos. Segundo esses autores, existe uma histerese marcante na permeabilidade em relação ao grau de saturação obtida em ciclos de umedecimento e secagem, assim como a conhecida histerese entre os ciclos de dessorção da água.

Após qualquer mobilização do solo, ocorre o processo de reconsolidação resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998), mesmo na ausência de tráfego (SCHÄFER et al. (2001). Assim, no intervalo de tempo entre a escarificação e a amostragem para a determinação da permeabilidade do solo ao ar, devem ter ocorrido reconsolidação do solo e rearranjo do espaço aéreo do mesmo, tornando-o menos condutivo. Além disso, nos preparos escarificados, o uso do escarificador possivelmente tenha rompido os poros contínuos, implicando em mudança na estrutura do solo e diminuindo a K_a .

A influência da porosidade de aeração em solo vulcânico foi estudada por Moldrup et al. (2003), os quais obtiveram uma relação positiva entre esses dois parâmetros. Resultados similares também foram obtidos por Dörner (2005) quando relacionou K_a com ε_a na direção vertical e horizontal. Em ambas as direções, a relação foi positiva, sendo que a direção horizontal apresentou maior relação na camada de 0,10 a 0,15 m.

Os valores de N encontrado no sistema PD foram inferiores aos valores encontrados por Ball et al. (1988). Esses autores afirmam que valores maiores do parâmetro N estão relacionados com o aumento do espaço aéreo e com a presença de canais contínuos de poros. O índice de continuidade de poros (N) reflete no aumento da K_a com o aumento do ε_a ou a diminuição da tortuosidade e área superficial de poros. A variação da porosidade obstruída observada neste trabalho

está relacionada com o espaço aéreo e com a permeabilidade do solo ao ar, proposto por Ball et al. (1988), representando a estrutura do solo (DÖRNER, 2005).

As medidas da estrutura do solo requerem um conhecimento da relação entre a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração. De acordo com Ball & Smith (1991), ambas não são bem relacionadas porque a permeabilidade ao ar é muito sensível aos macroporos e galerias formadas pela atividade biológica.

4.5 Conclusões

A maior permeabilidade do solo ao ar foi observada na camada superficial do solo onde há maior presença de macroporos e em solo com menor potencial matricial.

A permeabilidade ao ar foi positivamente relacionada com o espaço aéreo do solo. O tráfego tornou o solo menos permeável ao ar, afetando a continuidade e distribuição de tamanho de poros.

5 CAPÍTULO III COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES PREPAROS DO SOLO E NÍVEIS DE TRÁFEGO

RESUMO

A compactação do solo causada pela presença de tráfego em condições de umidade inadequada é um fator limitante ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Contudo, ainda não há informações consolidadas para a predição e recuperação da compactação do solo sob diferentes preparos e manejos do solo e o efeito do tráfego no solo. O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito do tráfego e da escarificação em diferentes tempos, no comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. Foram coletas 108 amostras de solo com estrutura preservada, nos preparos e condições de manejo (plantio direto contínuo por 13 anos, escarificado seis meses antes da coleta de solo, escarificado 12 meses antes e escarificado 18 meses antes), em dois níveis de tráfego (sem e com), no centro das camadas de 0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m. Depois de preparadas, saturadas com água e equilibradas, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial em um consolidômetro com aplicação seqüencial e contínua de cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa, com duração de cinco minutos cada, tempo necessário para que a deformação máxima fosse alcançada. As pressões de preconsolidação e os índices de compressão foram obtidos das curvas de compressão do solo. Os maiores valores de pressão de preconsolidação para o preparo do solo escarificado seis meses antes da coleta foram observados em todas as camadas sem tráfego. O plantio direto com tráfego apresentou os maiores valores de pressão de preconsolidação nas duas camadas subsuperficiais. Os solos escarificados há mais tempo, sem tráfego, apresentaram maior susceptibilidade à compactação do solo. O plantio direto não apresentou diferença significativa dos preparos do solo escarificados há mais tempo (12 e 18 meses antes da coleta das amostras), em ambos os níveis de tráfego, quanto ao índice de compressão.

5.1 Introdução

Na atualidade, é grande a preocupação com o aumento da compactação do solo nas áreas agrícolas. A compactação do solo é considerada como fator limitante ao rendimento das culturas nos sistemas agrícolas. Isso se deve, em grande parte, às operações mecanizadas comumente empregadas em lavouras em que foi adotado este sistema, especialmente em solos argilosos. O conhecimento da susceptibilidade do solo à compactação tem importância na adequação de práticas de uso, manejo e tráfego de máquinas sobre o solo, com vistas a minimizar o seu efeito sobre as características do solo (SILVA et al., 2002).

O processo de compressão depende primariamente das propriedades físico-mecânicas dos solos, sendo a umidade, a textura e o teor de carbono orgânico os atributos de maior influência. A compressão dos solos agrícolas, decorrente das operações mecanizadas, afeta os atributos físicos do solo, provocando aumento na densidade e na resistência à penetração, diminuição da porosidade total e da continuidade dos poros. Problemas com a compactação dos solos estão relacionados também com o manejo adotado, ao não revolvimento do solo, à intensidade de tráfego e à massa dos maquinários. Isso tudo permite o acúmulo de pressões produzidas pelo tráfego contínuo de máquinas agrícolas e/ou animais, em dias de elevada umidade do solo, provocando, assim, mudanças significativas em algumas propriedades físicas do solo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; SILVA et al., 2002).

Da mesma forma, a intensidade e profundidade da camada compactada no solo dependem da massa e características dos implementos e dos veículos de tração utilizados no manejo. Todavia, o efeito e outras operações, como semeadura, aplicação de defensivos e colheita mecanizada, intensifica ainda mais o problema da compactação (TORRES et al., 1993).

Os sistemas de manejo do solo afetam os atributos do solo, como o teor de matéria orgânica, estrutura, conteúdo de água e densidade do solo, influenciando no comportamento compressivo do mesmo. A caracterização do processo de compressão contribui para definir ações de manejo que evitem ou minimizem a degradação da qualidade física dos solos. Indicadores relacionados à compressibilidade, obtidos a partir da curva de compressão uniaxial, têm sido

utilizados para estabelecer condições adequadas ao desenvolvimento das plantas (MOSADDEGHI et al., 2003).

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi proposta por Dias Júnior (1994), Kondo & Dias Júnior (1999) e Imhoff et al. (2001) como indicadora da máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional. Tais resultados fornecem importantes informações que podem ser usadas para a prevenção da compactação do solo. A σ_p pode ser obtida por meio da curva de compressão do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios (Figura 20). Isso pode ser feito utilizando vários métodos, sendo os mais usados o método gráfico de Casagrande (1936) e o proposto por Dias Júnior & Pierce (1996).

O índice de compressão (IC) também é um importante indicador, o qual representa a susceptibilidade do solo à compactação (SILVA et al., 2000). O IC é determinado pela inclinação da curva de compressão virgem do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios no segmento da curva reta (Figura 20).

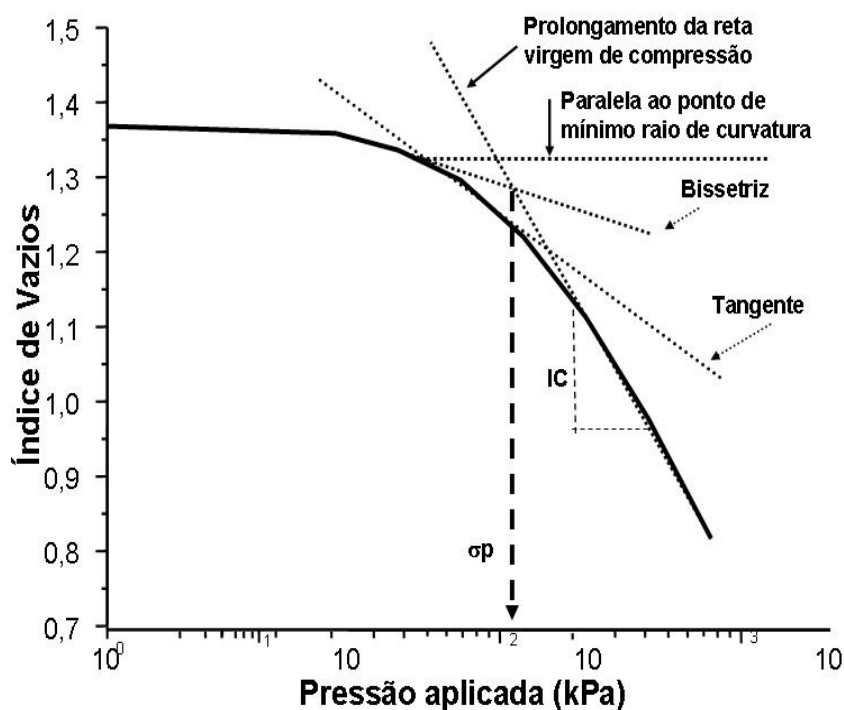


Figura 20 – Esquema para determinação da σ_p e IC.

Estudos têm mostrado que, quando ensaios de compressão uniaxial são realizados em solos que não sofreram pressão prévia ou secagem e umedecimento, a relação entre a pressão aplicada e a densidade do solo será linear, e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não-recuperáveis (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996). Entretanto, quando os ensaios são realizados em solos que já tenham um histórico de manejo, as deformações resultantes poderão ser recuperáveis ou não-recuperáveis (HORN; LEBERT, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996), respectivamente antes e depois de atingir a σ_p .

O conhecimento da suscetibilidade do solo à compactação tem importância na adequação de práticas de uso, manejo e tráfego de máquinas sobre o solo com vistas a minimizar o seu efeito sobre os atributos do solo. Paralelamente, o conhecimento dos valores da capacidade de suporte de carga e da susceptibilidade à compactação, em sistemas mecanizados, pode auxiliar na escolha de máquinas que exerçam menores pressões, reduzindo, assim, o impacto negativo causado à estrutura de solos agrícolas (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999).

Este estudo teve como objetivo analisar o efeito do tráfego no comportamento compressivo de um Latossolo sob plantio direto e diferentes épocas de escarificação.

5.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental pertencente a Embrapa Trigo, situada no município de Passo Fundo, RS (28°10'00" de latitude sul, 52°22'00" de longitude oeste, e aproximadamente 686m de altitude) (Apêndice A). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo "Cfa" e "Cfb" (clima subtropical úmido com verões quentes ou amenos, respectivamente), com precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais, distribuída ao longo de todos os meses do ano (NIMER, 1989). O solo em estudo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 1999) cuja análise granulométrica é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios de areia, silte e argila, nas três camadas de solo amostrados.

Camada	Areia	Silte	Argila
m	-----g kg ⁻¹ -----		
0,00 – 0,06	309,74	254,41	435,85
0,10 – 0,15	307,12	265,13	427,75
0,20 – 0,25	304,58	262,32	433,10

O experimento foi implantado no ano de 2001, em um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas. As amostras foram coletadas no dia 16 de dezembro de 2006, em um dos blocos, nos diferentes preparos do solo, com tráfego controlado na área, ou seja, o maquinário utilizado nas atividades agrícolas se desloca sempre no mesmo trajeto. Assim, existem dois níveis de tráfego: ausência e presença das usuais operações de manejo, onde os maquinários agrícolas propagaram suas tensões. As amostras dos tratamentos com tráfego foram coletadas no centro das tensões. As parcelas principais (6 x 12 m) foram distribuídas conforme os sistemas de preparo do solo, possuindo regiões tanto de alto tráfego como de mínimo tráfego. Os tratamentos de preparo e manejo do solo foram: (i) sistema plantio direto contínuo por 13 anos (PD); (ii) escarificado seis meses antes da coleta (E6); (iii) escarificado doze meses antes da coleta (E12); (iv) escarificado dezoito meses antes da coleta (E18) e nas subparcelas os níveis de tráfego (sem e com tráfego das usuais operações de manejo).

Na amostragem, a área estava sendo cultivada com soja. Para cada condição de preparo e manejo, nos dois níveis de tráfego (Apêndice B), foi aberta uma trincheira, com o auxílio de uma pá de corte para coleta de quatro amostras de solo com estrutura preservada (anéis de 0,06 m de diâmetro e 0,025 m de altura), no centro das camadas 0,00 a 0,06, 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m, totalizando 108 amostras.

As amostras foram individualmente acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS. No laboratório, as amostras foram preparadas (toalete) e saturadas numa bandeja por meio de elevação gradual de uma lâmina de água, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra, durante um período de 48 horas. Em seguida, as amostras foram equilibradas à tensão de 33 kPa em câmara de pressão de Richards, descritas em Klute (1986). Após o equilíbrio, foi realizado o teste de

compressão uniaxial em um consolidômetro modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) com aplicação sequencial e contínua de cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa, seguindo a norma NBR-12007/90 (ABNT, NBR 12007, 1990). Cada carga teve um tempo de aplicação de 5 minutos, tempo necessário para que mais de 99% da deformação máxima seja alcançada (SILVA et al., 2000).

Após o ensaio, as amostras foram colocadas em estufa para a secagem a 105 °C, por 24 horas. Para obtenção da curva de compressão e dos parâmetros de pressão de preconsolidação e índice de compressão, os dados foram obtidos por meio do ajuste manual (método 2 de Casagrande) no software *Compress* (REINERT et al., 2003).

Os resultados foram submetidos à análise da variância pelo teste F, com posterior comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os parâmetros σ_p e IC foram submetidos à análise bifatorial sendo o preparo ou manejo na parcela principal e na subparcela os níveis de tráfego nas três camadas, cada uma como tratamento independente.

5.3 Resultados

Os dois parâmetros da curva de compressão (σ_p e IC) foram analisados estatisticamente quanto às variáveis preparo ou manejo, tráfego e interação manejo x tráfego. Na Tabela 5 consta os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) e, na Tabela 6, os valores de índice de compressão (IC).

A pressão de preconsolidação (σ_p) não apresentou diferença significativa para as variáveis preparo ou manejo, tráfego e interação manejo x tráfego, nas camadas avaliadas, com coeficiente de variação entre 37 a 45% (Apêndice I).

Tabela 5 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) para os preparos e manejos e nas camadas do solo em estudo.

Manejos e nas camadas do solo em estudo:					
Tráfego	Manejos do solo				Média
	E ₅	E _{v5}	E ₆	PD	
0,00 – 0,06 m					
Sem	81,28	75,35	94,30	81,10	86,06
Com	101,07	92,97	83,48	78,95	
0,10 – 0,15 m					
Sem	144,43	169,53	112,05	100,92	123,22
Com	128,85	113,73	98,58	117,70	
0,20 – 0,25 m					
Sem	108,82	168,10	90,50	128,67	121,30
Com	91,13	150,80	79,35	153,03	

E₆ = escarificado seis meses antes da coleta de solo, E₁₂ = escarificado 12 meses antes da coleta de solo; E₁₈ = escarificado 18 meses antes da coleta de solo e PD = plantio direto contínuo por 13 anos.

A camada superficial (0,00 a 0,06 m) apresentou os menores valores de σ_p , talvez associado ao maior conteúdo de matéria orgânica nesta camada. Embora não tenha apresentado diferença significativa, observa-se que, na camada de 0,10 a 0,15 m, considerada a camada com maior impedimento físico em plantio direto, a σ_p do PD foi menor comparada aos preparos E₁₂ e E₁₈ (Tabela 5). Tais valores de pressão de preconsolidação indicam que níveis de pressões aplicadas ao solo maiores do que a pressão de preconsolidação para determinada umidade acarretam compactação adicional do solo.

O índice de compressão (IC) apresentou interação significativa a 5% de probabilidade entre manejo x tráfego para as camadas de 0,00 a 0,06 e 0,10 a 0,15 m e significância para manejo na camada de 0,20 a 0,25 m (Tabela 6).

Para a condição sem tráfego, na primeira camada do preparo E₁₈ e do sistema PD apresentaram os maiores valores de IC (0,58) (Tabela 6). Nessa mesma camada, os níveis de tráfego diferiram significativamente apenas no preparo E₆, apresentando maior valor de IC (0,49) onde houve tráfego. Dessa forma, o IC foi influenciado pelo estado de compactação e, de forma geral, pelo manejo do solo e níveis de tráfego.

Para a segunda camada, onde houve tráfego, o E12 apresentou o maior IC (0,39), diferindo significativamente dos demais preparos e manejos e do nível de tráfego. Na camada de 0,20 a 0,25 m o manejo do solo influenciou significativamente o IC, com menor valor no sistema E18 (0,28). O maior valor de IC foi encontrado no PD (0,38), mostrando a maior susceptibilidade desse solo à compactação.

Tabela 6 – Valores médios de índice compressão (IC) para os preparos e manejos e nas camadas do solo em estudo.

Tráfego	Manejos do solo				Média
	E6	E12	E18	PD	
0,00 – 0,06 m					
Sem	0,27 Bb	0,44 Aab	0,58 Aa	0,58 Aa	0,46
Com	0,49 Aa	0,37 Aa	0,41 Aa	0,51 Aa	
0,10 – 0,15 m					
Sem	0,28 Aa	0,28 Ba	0,32 Aa	0,31 Aa	0,31
Com	0,28 Ab	0,39 Aa	0,30 Ab	0,28 Ab	
0,20 – 0,25 m					
Sem	0,32	0,33	0,28	0,40	0,33
Com	0,29	0,35	0,29	0,39	
Média	0,31 ab	0,34 ab	0,28 b	0,38 a	

E₅ = escarificado no inverno de 2005, E₆ = escarificado no verão de 2005; E₆ = escarificado no inverno de 2006 e PD = plantio direto contínuo por 13 anos.

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.4 Discussão

O elevado valor do coeficiente de variação (entre 37 a 45%) obtido neste estudo indica que a σ_p esteve associada à heterogeneidade do estado físico do solo nas diferentes pontos de amostragem. Suzuki (2005), por exemplo, obteve valores de coeficiente de variação da σ_p entre 16 e 28% em Latossolo Vermelho, enquanto Lima et al. (2006), em Argissolo Vermelho, apresentou valores entre 19 a 35%. O intervalo de variação da σ_p obtida nesse estudo ($75 < \sigma_p < 169$ kPa) concorda com valores obtidos por Suzuki (2005) em lavouras sob plantio direto em diferentes solos do Rio Grande do Sul.

Os maiores valores da σ_p encontrados nos preparos escarificados pode estar atribuído à pressão aplicada pelo maquinário logo após a escarificação. Possivelmente, o revolvimento pode ter modificado a estabilidade estrutural do solo, favorecendo a compactação nesses manejos. Para Hillel (1998), após qualquer mobilização do solo, o processo de reconsolidação é resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem, mesmo na ausência de tráfego (SCHÄFER et al., 2001). Assim, no intervalo de tempo entre a escarificação e a amostragem para a determinação da compactação do solo, devem ter ocorrido reconsolidação do solo, tornando-o mais compactado.

Para Hakånsen et al. (1988) solos preparados via mobilização tem mostrado compactação subsuperficial e, solos não preparados a compactação tem sido mais superficial, ressaltando que em sistema plantio direto o número de operações é reduzido drasticamente e que se processos naturais, que agem no sentido contrário ao da compactação, não forem ativos os efeitos da compactação pode se acumular no tempo. Assim, uma possível explicação para o menor valor de σ_p no sistema PD, na camada de 0,10 a 0,15 m, comparado aos preparos E12 e E18, seria provocada pela escarificação a qual teria modificado a estabilidade estrutural do solo, favorecendo a compactação nesses preparos. Trabalhando com o mesmo Latossolo, Rosa (2007) obteve resultados semelhantes em Latossolo Vermelho e salienta a importância de evitar o tráfego com a carga igual à tensão de reconsolidação em solo revolvido recentemente.

Os maiores valores de índice de compressão (IC) para a condição sem tráfego, na primeira camada do preparo E18 e do sistema PD, sugerem que solo sob esses manejos foi mais suscetível à compactação. A diferença significativa nos níveis de tráfego, nessa mesma camada, apenas no preparo E6, é explicado pelo aumento do espaço poroso ocasionado pela mobilização do solo, aumentando a suscetibilidade à compactação. Para Lima (2004), a menor susceptibilidade do solo a compactação é decorrente do maior atrito entre as partículas de solos, o que dificulta a movimentação destas partículas para posições de maior proximidade ou deformação.

Valores de IC bastante inferiores aos obtidos nesse estudo foram encontrados por Imhoff et al. (2004) no estudo compressivo de uma topossequência em Latossolos com ampla variação no teor de argila. Contudo, Kondo e Dias Júnior (1999) e Silva et al. (2000) também encontraram valores de IC similar aos

encontrados neste estudo, com valores elevados nos Latossolos pelo teor de argila mais elevado. O valor elevado do IC indica que o solo estudado apresenta possivelmente uma elevada susceptibilidade à compactação. Estes resultados sugerem que o efeito do tráfego é relevante na tomada de decisões, como menores pressões a aplicar ao solo a fim de manter sua qualidade estrutural, corroborando com as observações feitas por Larson & Gupta (1980). Alterações significativas ocorrem na estrutura do solo com a aplicação de pressões maiores do que a pressão de preconsolidação, sendo explicada pela agregação causada com o aumento da pressão aplicada, dando ao solo uma estrutura massiva (LARSON; GUPTA, 1980).

As variações no índice de compressão podem ser atribuídas a diferenças no teor de matéria orgânica e tipo de minerais presentes na fração argila (LARSON et al., 1980). De acordo com Hartge (2000), a textura determina o tipo, a forma e a distribuição do tamanho das partículas do solo e, como consequência, o número de contatos entre elas, controlando, assim, a resistência do solo à deformação.

5.5 Conclusões

Os maiores valores de pressão de preconsolidação para o preparo do solo escarificado seis meses antes da coleta foram observados em todas as camadas sem tráfego. O plantio direto com tráfego apresentou os maiores valores de pressão de preconsolidação nas duas camadas subsuperficiais.

Os solos escarificados há mais tempo, sem tráfego, apresentaram maior susceptibilidade à compactação do solo. O plantio direto não apresentou diferença significativa dos preparos do solo escarificados há mais tempo (12 e 18 meses antes da coleta das amostras), em ambos os níveis de tráfego, quanto ao índice de compressão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pressão de preconsolidação não apresentou diferença significativa para os diferentes manejos. Para esse parâmetro é recomendável um maior número de repetições de modo a reduzir a variação dos dados. O monitoramento da estrutura do solo pela pressão de preconsolidação e índice de compressão é uma estratégia para manter a qualidade estrutural do solo e evitar a compactação adicional.

A permeabilidade do solo ao ar, em todos os preparos e manejos do solo estudados e em todas as camadas, apresentou elevada variabilidade amostral. Isso ocorreu devido à utilização de diferentes anéis para cada tensão equilibrada da curva de retenção de água. Além disso, o baixo número de repetições (quatro) impossibilitou a detecção e descarte dos valores discrepantes nas análises.

A suscetibilidade do solo à compactação mostra comportamento diferente para cada tipo de solo e em diferentes níveis de tráfego. Deve-se conhecer a umidade adequada para a realização do preparo ou manejo do solo para evitar perda de produção e degradação do solo. Estes resultados sugerem que o efeito do tráfego é relevante na tomada de decisões, como menores pressões a aplicar ao solo a fim de manter sua a qualidade estrutural.

Para evitar a degradação estrutural do solo, cuidados especiais devem ser implementados em áreas agrícolas. Nesse sentido, atenção especial deve-se ter no momento do tráfego de máquinas agrícolas a fim de contribuir para a manutenção da qualidade física do solo em áreas produtivas.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, v. 39, n. 3, p. 327-339, sept. 1988.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd ed., Madison: Marcel Dekker, 1991, p. 511-549.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**, Part 4, 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002, p. 1141-1158.

BARDEN, L.; PAVLAKIS, G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 22, n. 3, p. 302-318, sept. 1971.

BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, jan. 2006.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, jan./mar. 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 181-192, maio/ago. 2004a.

BEUTLER, A. N. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 575-580, jun. 2004b.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, Michigan, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.

CANNEL, R. Q. Soil aeration and compaction in relation to root growth and management. **Applied Biology**, v. 2, p. 1-86, 1977.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 99-105, jan./abr. 1990.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Harvard University, Cambridge, 1936. v. 3. p. 60-64.

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

CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147. jan./fev. 2006.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11 p. 1663-1674. nov. 2006.

COREY, A. T. Air Permeability. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis – Part I – Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1986, p. 1121-1136.

DALMAGO, G. A. et al. Transpiração do milho cultivado em sistemas de semeadura direta e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UNIFRA/UFSM/SBA, 2003. p. 297-298. v.1.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 227-239. jun. 2004.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (ed). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, p. 03-21, 1994.

DÖRNER, J., **Anisotropie von Bodenstrukturen und Porenfunktionen in Böden und deren Auswirkungen auf Transportprozesse im gesättigten und**

ungesättigten Zustand. 2005. Ph. D. Thesis. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts University, Kiel.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília - DF: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação. 1999. 412 p.

FRIGHETTO, R. T. S; VALARINI, P. J. **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 19-36. (Manual Técnico).

HAKÅNSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HARTGE, K. K. The effect of soil deformation on physical soil properties: a discourse on the common background. In: HORN, R.; AKKER VAN DEN, J. J. H.; ARVIDSSON, J. (ed.). **Subsoil compaction: distribution, processes and consequences.** Advances in GeoeEcology, v. 32, p. 22-31, 2000.

HILLEL, D. **Applications of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

HILLEL, D. **Environmental soil physical.** New York: Academic Press, 1998. 770 p.

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

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 11-18. jan./mar. 2001.

IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos.** 2002. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 68, p. 17-24, jan./feb. 2004.

IVERSEN, B. V. et al. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**. v. 166, n. 2, p. 97-106, feb. 2001.

JENNY, H. **The soil resource: origin and behavior.** New York: Springer Verlag, 1980. 377 p. v. 37.

KARLEN, D. L. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 129-130. aug. 2004.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr. 2007.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed). **Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods**. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

KOPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, v. 7, n. 1, p. 52-56, mar. 1991.

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**, Madison, v. 44, p. 1127-1132, 1980.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P. da; PERFECT, E.; TORMENA C. A. An Algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215. 2005.

LEÃO, T. P. et al. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1-2, p. 279–285, 2006.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 274-286, 1991.

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

LIMA, A. C. R. et al. Functional evaluation of three soil quality indicator sets of three rice management systems. In: LIMA, A. C. R. (ed). **Soil quality assessment in rice production systems**. 2007. PhD thesis, Wageningen University, The Netherlands. p. 40-53.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LIMA, C. L. R. et al. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1765-1772, nov./dez. 2006.

MOLDRUP, P. et al. Air permeability in Undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 1, p. 32-40, 2003.

MOSADDEGHI, M. R. et al., Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 53-64, 2003.

NIMER, E. 1989. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 442 p.

PEREIRA, A. A. A.; CRUCIANI, D. E. Estimativa de variações no coeficiente relativo de difusão dos gases no solo com base na análise da curva de retenção de água. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 245-249, mar./abr. 2001.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrient and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410. 2006.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, set./dez. 1988.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 26, p. 26-48, jul./dez. 2003.

REICHERT, J. M. et al. Agregação de um Planossolo após um ano sistematizado e sob cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 837-844, maio/jun. 2006.

REINERT, D. J.; ROBAINA, A. D.; 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. Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov-dez, 2006.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. Revisão, **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SAVAGE, M. J. et al. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 844-851, 1996.

SCHÄFER, M. J. et al. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 419-430. abr./jun. 2001.

SCHØNNING, P. et al. Pore characteristics and hydraulic properties of a sandy loam supplied for a century with either animal manure or mineral fertilizers. **Soil Use and Management**, v. 21, p. 265 – 275. 2005.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, set./out. 2004.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, nov./dec. 1994.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, 1997.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 239-249, abr./jun. 2000.

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I – estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2002.

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**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 9-15, jan./mar. 2002.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVEIRA, G. M. **O manejo do solo: implementos corretos**. Rio de Janeiro: Globo, 1988. 243 p.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TAYLOR, H. M., ROBERSON, G. M., PARKER JÚNIOR, J. J. Soil Strength-root penetration relations for medium- to coarse -textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

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

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 3-4, p. 223-232, oct. 1999.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr. 2007.

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

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Estudo das causas da compactação do solo e do seu efeito sobre a soja. In: EMBRAPA. **Resultados de pesquisa da Embrapa Soja**. Londrina, Embrapa, 1998. p. 177-181.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, set./out. 2005.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-898, nov. 1980.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2006.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001, 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. 2005. 107 p. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel.

APÊNDICES



Apêndice A – Detalhe da área amostrada pertencente à EMBRAPA Trigo – Passo Fundo/RS.



Apêndice B – Níveis de tráfego na área amostrada: (a) com tráfego e (b) sem tráfego. EMBRAPA Trigo – Passo Fundo/RS.



**Apêndice C – Detalhe dos anéis coletados para CRA.
EMBRAPA Trigo – Passo Fundo/RS.**



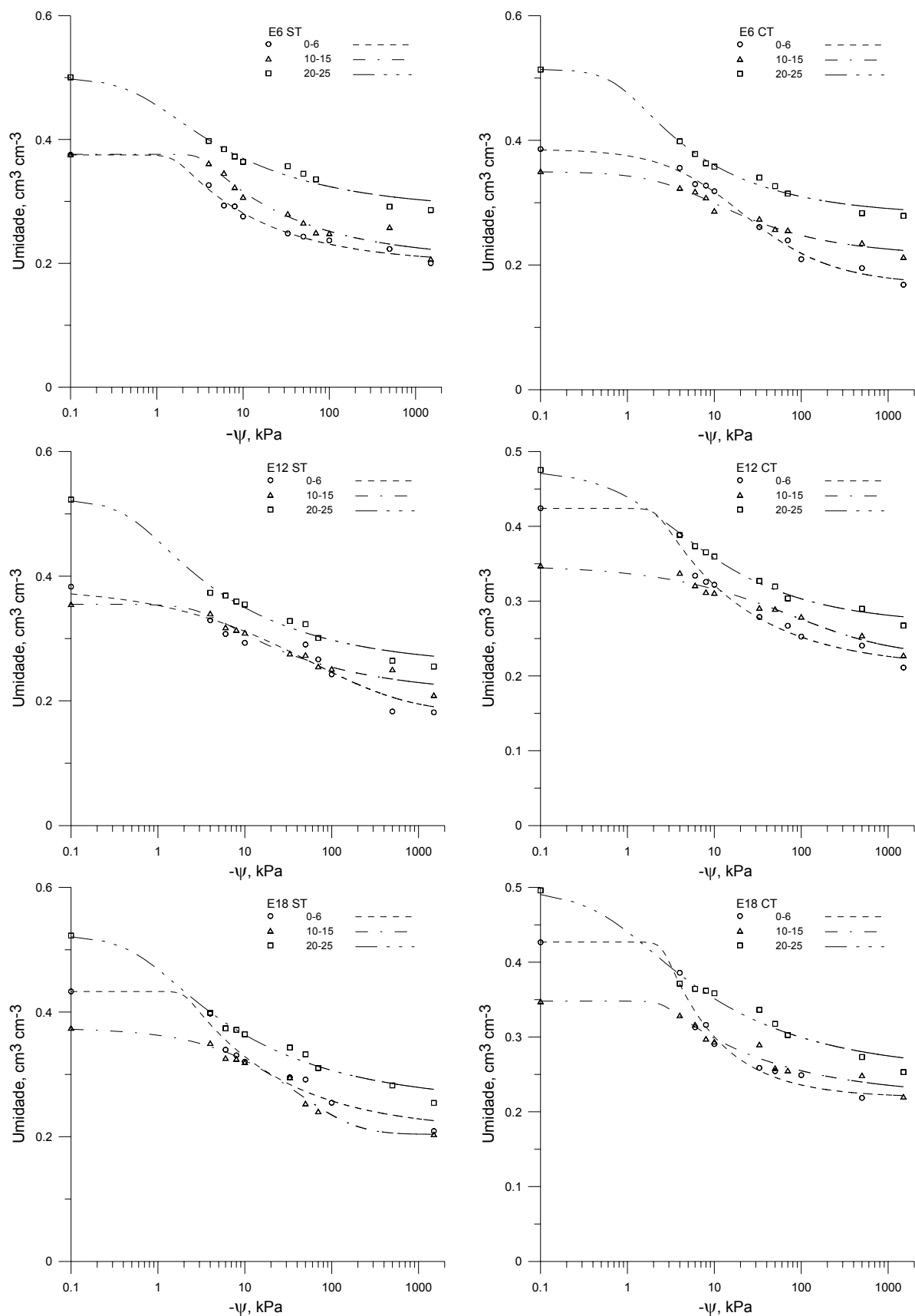
**Apêndice D – Penetrômetro de bancada. Marca Marconi.
Epagri – Campos Novos – SC. Foto:
Veiga (2006).**

ψ (kPa)	DS (g cm^{-3})					θ_v ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
	E6	E12	E18	PD	MN	E6	E12	E18	PD	MN
0,00-0,06 m										
4	1,15	1,06	1,20	1,30	1,11	0,33	0,33	0,40	0,40	0,38
6	1,31	1,24	1,33	1,17	1,09	0,29	0,31	0,34	0,40	0,33
8	1,23	1,14	1,31	1,22	0,96	0,29	0,30	0,33	0,37	0,29
10	1,22	1,17	1,23	1,23	1,43	0,28	0,29	0,32	0,37	0,31
33	1,34	1,20	1,33	1,15	1,15	0,25	0,29	0,30	0,32	0,31
50	1,20	1,21	1,25	1,29	1,07	0,24	0,29	0,29	0,32	0,25
70	1,23	1,26	1,37	1,22	1,04	0,24	0,27	0,28	0,30	0,28
100	1,14	1,21	1,24	1,26	1,09	0,24	0,24	0,26	0,30	0,26
500	1,30	1,12	1,11	1,31	1,01	0,22	0,18	0,24	0,29	0,20
1500	1,16	1,15	1,26	1,36	0,97	0,20	0,18	0,21	0,24	0,20
0,10-0,15 m										
4	1,33	1,50	1,40	1,41	1,22	0,36	0,34	0,35	0,36	0,34
6	1,31	1,40	1,43	1,41	1,23	0,35	0,32	0,33	0,34	0,32
8	1,28	1,41	1,46	1,43	1,16	0,32	0,31	0,33	0,34	0,34
10	1,31	1,36	1,44	1,34	1,32	0,31	0,31	0,32	0,32	0,31
33	1,27	1,53	1,40	1,42	1,17	0,28	0,28	0,30	0,32	0,25
50	1,25	1,42	1,35	1,42	1,15	0,27	0,27	0,25	0,29	0,26
70	1,25	1,38	1,35	1,37	1,11	0,25	0,26	0,24	0,27	0,19
100	1,28	1,39	1,44	1,35	1,18	0,25	0,25	0,23	0,27	0,25
500	1,29	1,44	1,41	1,41	1,12	0,26	0,25	0,21	0,26	0,20
1500	1,29	1,34	1,27	1,40	1,16	0,21	0,21	0,20	0,24	0,12
0,20-0,25 m										
4	1,28	1,14	1,32	1,26	1,15	0,40	0,37	0,40	0,41	0,35
6	1,26	1,27	1,28	1,24	1,03	0,38	0,37	0,37	0,39	0,32
8	1,27	1,25	1,34	1,30	1,11	0,37	0,36	0,37	0,39	0,30
10	1,25	1,28	1,26	1,36	1,19	0,36	0,36	0,36	0,37	0,30
33	1,33	1,32	1,30	1,29	1,12	0,36	0,33	0,34	0,37	0,27
50	1,26	1,28	1,28	1,32	1,08	0,35	0,32	0,33	0,36	0,26
70	1,26	1,30	1,23	1,23	1,09	0,34	0,30	0,31	0,35	0,25
500	1,26	1,30	1,36	1,23	0,00	0,29	0,26	0,28	0,30	0,00
1500	1,28	1,23	1,30	1,33	1,10	0,29	0,26	0,25	0,30	0,23

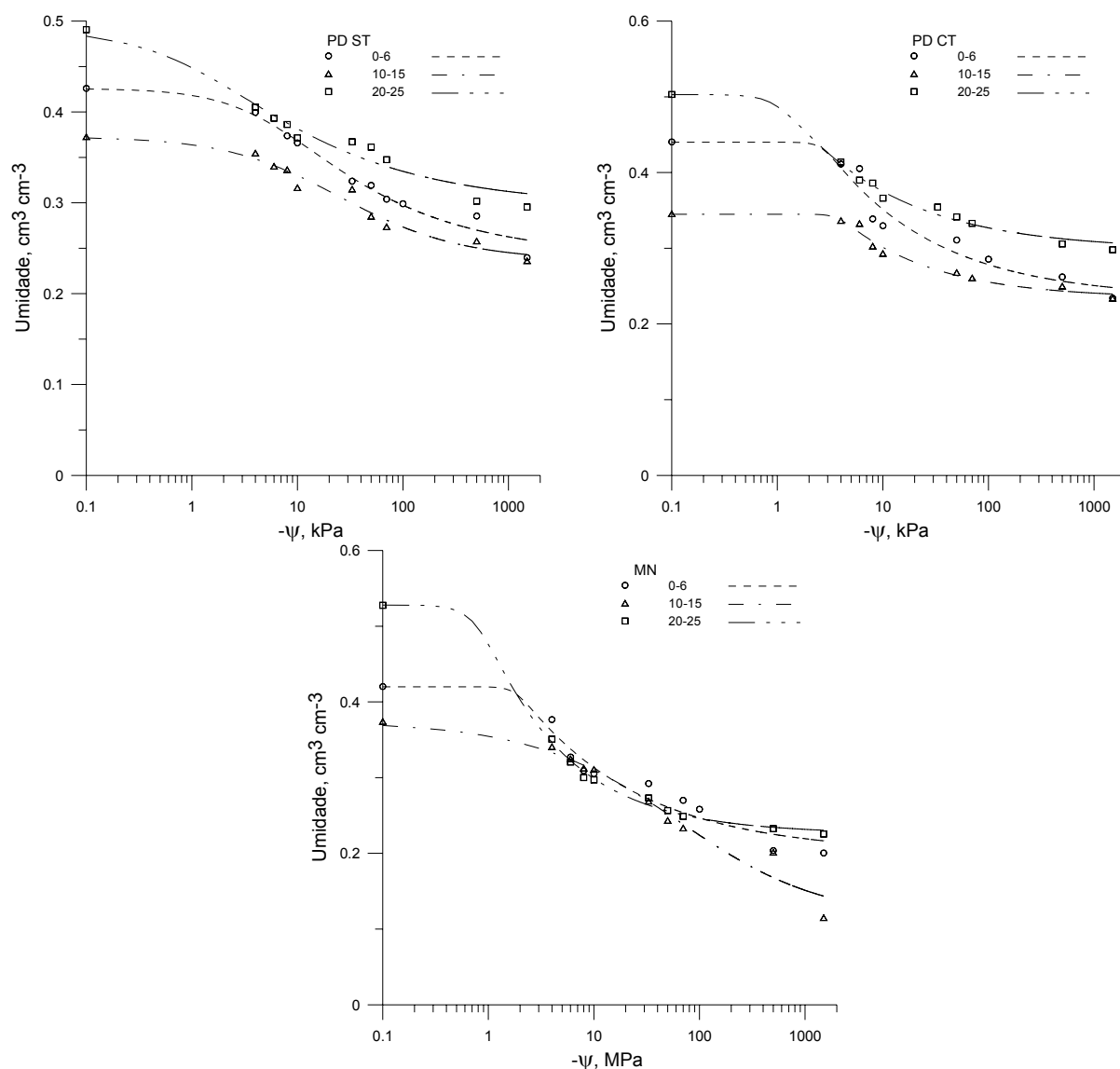
Apêndice E – Densidade do solo (DS) e umidade volumétrica (θ_v) nos diferentes preparos e manejos do solo (E6, E12, E18, PD e MN), sem tráfego nas camadas 0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m.

ψ (kPa)	DS (g cm ⁻³)					θ_v (m ³ m ⁻³)				
	E6	E12	E18	PD	MN	E6	E12	E18	PD	MN
0,00-0,06 m										
4	1,32	1,28	1,20	1,21	1,11	0,36	0,39	0,39	0,41	0,38
6	1,22	1,29	1,22	1,29	1,09	0,33	0,33	0,31	0,41	0,33
8	1,23	1,28	1,04	1,13	0,96	0,33	0,33	0,32	0,34	0,29
10	1,27	1,28	1,14	1,10	1,43	0,32	0,32	0,29	0,33	0,31
33	1,26	1,19	1,28	1,21	1,15	0,26	0,28	0,26	0,32	0,31
50	1,08	1,24	1,21	1,22	1,07	0,25	0,27	0,25	0,31	0,25
70	1,26	1,22	1,30	1,24	1,04	0,24	0,27	0,25	0,30	0,28
100	1,21	1,23	1,29	1,10	1,09	0,21	0,25	0,25	0,29	0,26
500	1,29	1,32	1,30	1,19	1,01	0,20	0,24	0,22	0,26	0,20
1500	1,12	1,32	0,95	1,22	0,97	0,17	0,21	0,21	0,23	0,20
0,10-0,15 m										
4	1,33	1,56	1,47	1,37	1,22	0,32	0,34	0,33	0,34	0,34
6	1,37	1,51	1,49	1,40	1,23	0,32	0,32	0,32	0,33	0,32
8	1,29	1,56	1,45	1,37	1,16	0,31	0,31	0,30	0,30	0,34
10	1,31	1,48	1,44	1,39	1,32	0,29	0,31	0,29	0,29	0,31
33	1,34	1,57	1,45	1,42	1,17	0,27	0,29	0,29	0,28	0,25
50	1,28	1,49	1,49	1,37	1,15	0,26	0,29	0,26	0,27	0,26
70	1,40	1,46	1,45	1,37	1,11	0,26	0,28	0,26	0,26	0,19
100	1,49	1,47	1,45	1,37	1,18	0,24	0,28	0,25	0,26	0,25
500	1,31	1,48	1,41	1,37	1,12	0,24	0,25	0,25	0,25	0,20
1500	1,36	1,46	1,47	1,34	1,16	0,21	0,23	0,22	0,23	0,12
0,20-0,25 m										
4	1,26	1,39	1,35	1,26	1,15	0,40	0,39	0,37	0,41	0,35
6	1,24	1,35	1,40	1,25	1,03	0,38	0,37	0,36	0,39	0,32
8	1,32	1,29	1,27	1,28	1,11	0,36	0,37	0,36	0,39	0,30
10	1,21	1,36	1,27	1,14	1,19	0,36	0,36	0,36	0,37	0,30
33	1,29	1,33	1,45	1,30	1,12	0,34	0,33	0,34	0,35	0,27
50	1,23	1,40	1,28	1,27	1,08	0,33	0,32	0,32	0,34	0,26
70	1,21	1,33	1,28	1,22	1,09	0,32	0,30	0,30	0,33	0,25
500	1,20	1,39	1,38	1,32	0,00	0,28	0,29	0,27	0,31	0,00
1500	1,29	1,34	1,38	1,30	1,10	0,28	0,27	0,25	0,30	0,23

Apêndice F – Densidade do solo (DS) e umidade volumétrica (θ_v) nos diferentes preparos e manejos do solo (E6, E12, E18, PD), com tráfego nas camadas 0,00 a 0,06; 0,10 a 0,15 e 0,20 a 0,25 m.



Apêndice G – Curva de Retenção de Água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten dos preparos escarificado seis meses antes da coleta de solo (E6), escarificado 12 meses antes da coleta (E12) e escarificado 18 meses antes da coleta (E18) sem tráfego (ST) e com tráfego (CT).



Apêndice H – Curva de Retenção de Água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten do sistema plantio direto (PD) sem tráfego (ST) e com tráfego (CT) e da mata nativa (MN).

Variação	σ_p 0,00 – 0,06 m	IC 0,10 – 0,15 m	σ_p 0,10 – 0,15 m	IC 0,20 – 0,25 m	σ_p 0,20 – 0,25 m	IC
Man	ns	**	ns	ns	ns	*
Tráf	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Man*Tráf	ns	**	ns	**	ns	ns
CV (%)	36,7	27,4	41,2	15,3	44,7	21,3

Apêndice I – Quadro da Anova para os parâmetros de pressão de preconconsolidação σ_p e índice compressão (IC) para os quatro manejos e três camadas do solo em estudo.