

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

**RELAÇÕES FÍSICO – HÍDRICAS  
DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Maurício Kunz**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**RELAÇÕES FÍSICO – HÍDRICAS  
DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO**

**Por**

**Maurício Kunz**

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. Dalvan José Reinert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**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

**RELAÇÕES FÍSICO – HÍDRICAS  
DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO**

elaborada por  
**Maurício Kunz**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**Dalvan José Reinert, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

**Flávio Luis Foletto Eitz, PhD. (UFSM)**

**Vanderlei Rodrigues Da Silva, Dr. (UFSM/FW)**

Santa Maria, 19 de novembro de 2010.

*Dedico este trabalho aos meus pais  
Valério Kunz e Marlise Borghardt Kunz  
pela motivação e apoio aos estudos, e em especial  
a minha namorada Rúbia Daniela Tiemann  
em repassar o verdadeiro amor a pessoa que ama!*

*“EU AMO MINHA FAMÍLIA E MINHA NAMORADA”*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, professor Dalvan José Reinert, pela amizade, orientação e ensinamentos.

Ao professor José Miguel Reichert, pela troca de conhecimentos durante todo este período, orientação e amizade.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFSM, pela oportunidade.

Aos meus pais Valério Kunz e Marlise Borghardt Kunz, ao meu irmão Marcelo Kunz e minha namorada Rúbia Daniela Tiemann, pelo seu amor, dedicação, apoio moral e incentivo nas horas em que mais necessitei.

A Deus, pela sabedoria, saúde e amor e por tudo de bom que aconteceu e está acontecendo em minha vida.

Aos colegas da física do solo: Braguinha, Espeto, Mentges, Dinha, Eduardo, Alan, Formiga, Luciano, Neiva, Paulo, Kaiser, Miriam, Charlotte, Eracilda, Juliana, Suzana, Pedro, Tiago, Jonhsom, Davi, Mayra, Leonir, Júlio, Simone, pela amizade, apoio e os momentos de descontração e trabalho de laboratório ao longo deste período em que trabalhamos juntos.

Ao amigo e funcionário do Laboratório de Física do Solo, Flávio Fontinelli.

Agradeço aos meus familiares, em especial a minha avó materna Arnilda.

Aos meus amigos(as) da localidade de Arroio Grande – Ibirubá.

Aos amigos de graduação.

Ao grupo PÉOOOOO, pela forte amizade o meu muito obrigado.

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

A todos, meu MUITO OBRIGADO!

## RESUMO

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

### RELAÇÕES FÍSICO – HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO

AUTOR: MAURÍCIO KUNZ  
ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT  
Local e data da defesa: Santa Maria, 19 de Novembro de 2010.

A compactação do solo é um processo inerente ao sistema de plantio direto e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade. Entretanto, esse sistema possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Com o intuito objetivou-se avaliar indicadores físico – hídricos de qualidade de um Latossolo Vermelho cultivado por longo prazo sob o sistema de plantio direto. Os objetivos específicos foram determinar a densidade do solo crítica em que a resistência mecânica à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento de plantas, através da metodologia do intervalo hídrico ótimo; avaliar a relação da permeabilidade ao ar com a macroporosidade, a porosidade total e a densidade do solo em diferentes tensões de água; determinar a relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade, porosidade total e a densidade do solo. O solo foi coletado em uma lavoura comercial, no município de Ibirubá (RS). O clima da região enquadra-se na classificação de Köppen, zonas “Cfa” e “Cfb” (clima subtropical úmido com verões quentes ou amenos). O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico. A área destinada à coleta das amostras vinha sendo cultivada sob plantio direto desde 1998, com soja na primavera/verão, aveia + azevém e/ou trigo no outono/inverno. Foi realizado determinações de intervalo hídrico ótimo, granulometria, densidade, porosidade total, macro, condutividade hidráulica em solo saturado e permeabilidade ao ar do solo (submetidas a diferentes tensões de água no solo: 1, 6 33 e 100 kPa). As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com o auxílio de anéis metálicos (0,03m de altura e 0,055m de diâmetro interno), nas camadas 0,02 a 0,07m e 0,12 a 0,18m e em vários pontos da lavoura com o intuito de se obter grande variação na densidade do solo. Os resultados indicaram que 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. A maior condutividade do solo ao ar foi observada nos menores potenciais matriciais e na camada superficial do solo, onde há maior presença de macroporos. Também, houve redução em profundidade. A condutividade do solo ao ar e a condutividade hidráulica do solo saturado apresentaram correlação positiva com a macroporosidade e com a porosidade total e negativa com a densidade do solo nas tensões de água no solo.

**Palavras chave:** intervalo hídrico ótimo, permeabilidade ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado.

## **ABSTRACT**

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

### **HYDRO-PHYSICAL RELATIONS OF AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE**

AUTHOR: MAURÍCIO KUNZ

ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT

Place and date of the defense: Santa Maria, November 19, 2010.

Soil compaction is a process inherent in the no-tillage system and therefore, it will be always observed with varying intensity degrees. However, this system has features which can be maximized in order to reduce the compression process and its consequences. The objective of this study was evaluate soil hydro-physical properties as indicators of quality in an Oxisol, long time cultivated under no-tillage system. The specific objectives were determine the critical bulk density in which the soil resistance penetration and air porosity are restrictive to development of plants, using the methodology of least limiting water range (LLWR); evaluate the relationship between permeability air with macroporosity, total porosity and bulk density in different water tensions; determine the relationship between the saturated soil hydraulic conductivity and macroporosity, total porosity and bulk density. The soil was collected in a farmer located in Ibirubá (RS). The climate falls under the classification of Köppen in zones "Cfa" and "Cfb" (humid subtropical climate with hot summers or mild). The soil is classified as Oxisol. The area dedicated to collecting of samples has been cultivated under no-tillage since 1998 with soybeans, in the spring / summer, oats and rye or wheat in the fall / winter. Determinations of LLWR, texture, bulk density, total porosity, macroporosity, saturated hydraulic conductivity and air permeability of soil (under different soil water tensions: 1, 6 33 and 100 kPa) was carried out. Soil samples with preserved structure were collected with metal cylinders (0.03 m height and 0.055 m internal diameter) at depths of 0.02 to 0.07 m and 0.12 to 0.18 m, at various points of the area in order to obtain a large variation in bulk density. The results indicated that the increase of bulk density influence the reduction of LLWR which is associated with effects of soil penetration resistance and aeration porosity. The lower the matric potential, the higher was the observations of soil air conductivity, especially on the superficial soil layer, where the frequency of macropores is bigger and its decrease by the increase in soil depth. The soil air conductivity and saturated soil hydraulic conductivity were highly correlated with macroporosity and total porosity and negatively with the bulk density in different soil water tensions.

**Key-words:** least limiting water range, air permeability, saturated soil hydraulic conductivity.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 – Localização do município de Ibirubá no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Ibirubá (Rio Grande do Sul) (2009).....24
- FIGURA 2 – Imagem da área de coleta. Fonte: (a) Imagem do Google Earth (Acesso em 18/08/2009) e (b) arquivo pessoal.....25
- FIGURA 3 – Algumas das etapas da coleta das amostras com estrutura preservada na profundidade de 0,02 a 0,07m (a, b) e 0,12 a 0,18m (c, d) e alterada (e).....26
- FIGURA 4 – Permeâmetro de carga constante. Libardi (2000). Física do Solo/UFSM/RS. Foto: Kunz, 2009.....28
- FIGURA 5 – Equipamento utilizado para medida de condutividade ao ar em amostras indeformadas de solo. Fonte: Vossbrink (2005) e modificado por Brandt, 2008.....30
- FIGURA 6 – Penetrômetro de bancada. Marca Marconi. Física do Solo/UFSM/RS. Foto: Kunz, 2009.....31
- FIGURA 7 – Variação do teor de água no solo com a densidade do solo para os níveis críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{ar}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ), resistência mecânica à penetração ( $\theta_{rp}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{1,5}$ ) para o Latossolo Vermelho distrófico nas duas camadas avaliadas de 0,02 a 0,07m (a) e 0,12 a 0,18m (b).. .....33
- FIGURA 8 – Variação do intervalo hídrico ótimo para as duas camadas de 0,02 a 0,07m (a) e 0,12 a 0,18m (b) em função da densidade do solo. ....35
- FIGURA 9 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade do solo ao ar; da porosidade total com a condutividade do solo ao ar e da condutividade do solo ao ar com a densidade do solo em diferentes tensões de água no solo na camada de 0,02 a 0,07m de profundidade .....36



FIGURA 10 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade do solo ao ar; da porosidade total com a condutividade do solo ao ar e da condutividade do solo ao ar com a densidade do solo em diferentes tensões de água no solo na camada de 0,12 a 0,18m de profundidade .....37

FIGURA 11 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo (a, d); da porosidade total com a condutividade hidráulica do solo (b, e) e da condutividade hidráulica do solo com a densidade do solo (c, f), na camada de 0,02 a 0,07m e na camada de 0,12 a 0,18m .....40

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Teores de argila, areia e silte para o Latossolo Vermelho distrófico típico.....	27
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 HIPÓTESES</b> .....	<b>14</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1 Plantio direto</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2 Qualidade físico-hídrica do solo</b> .....	<b>18</b>
<b>4.3 Intervalo Hídrico ótimo (IHO)</b> .....	<b>19</b>
<b>4.4 Condutividade Hidráulica constante</b> .....	<b>21</b>
<b>4.5 Permeabilidade ao ar</b> .....	<b>22</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1 Solo e Clima</b> .....	<b>24</b>
<b>5.2 Coleta das amostras</b> .....	<b>25</b>
<b>5.3 Determinações</b> .....	<b>26</b>
5.3.1 Análise granulométrica.....	26
5.3.2 Densidade e Porosidade .....	27
5.3.3 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado.....	27
5.3.4 Permeabilidade ao ar .....	29
5.3.5 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) .....	30
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>33</b>
<b>6.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)</b> .....	<b>33</b>
<b>6.2 Relações da condutividade do solo ao ar (Kl) com as propriedades físicas do solo em diferentes tensões de água no solo</b> .....	<b>35</b>
<b>6.3 Relações da condutividade hidráulica do solo saturado (K<math>\theta</math>s) com as propriedades físicas do solo</b> .....	<b>39</b>
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>43</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em qualidade do solo, busca-se um ambiente favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas para, conseqüentemente, alcançar elevadas produtividades. Concomitantemente, espera-se que esse ambiente favorável às plantas seja estável, como em suas condições naturais.

No final dos anos 70, com o desenvolvimento do sistema plantio direto (SPD) foi possível obter uma produção integrada com a qualidade de recursos hídricos e de solo em áreas anteriormente degradadas. Com uma nova filosofia de semeadura, que preconiza o não revolvimento do solo, o acúmulo da cobertura vegetal e a utilização de plantas que possuem capacidade de ciclagem de nutrientes (adubos verdes), o SPD se tornou o sistema utilizado pela maioria dos produtores de grãos de sequeiro do Brasil, ocupando uma área de 32 milhões de hectares, representando 70% das lavouras de grãos.

Uma das melhorias esperadas no plantio direto é a formação de uma rede estável de macroporos, originários da atividade de macro e meso organismos do solo e da ação do sistema radicular das culturas, o que aumenta a infiltração e o armazenamento de água no solo, reduz a erosão, mantém e proporciona um pequeno aumento da matéria orgânica, o que reflete em menor flutuação da produtividade ao longo dos anos. Porém, dependendo das condições de implantação e manejo do plantio direto, verificou-se em muitas lavouras de solos argilosos um aumento do estado de compactação, com aumento de densidade do solo e da resistência mecânica à penetração das raízes e redução da macroporosidade. Esse aumento do estado de compactação originou-se do acúmulo de pressões provocadas pelas rodas das máquinas agrícolas ou pelo pisoteio animal, pois, como não há revolvimento do solo, as pressões vão acumulando-se no solo e aumentando o estado de compactação. Esse processo é agravado pela umidade do solo, a qual, geralmente, é maior no plantio direto. Em pesquisas realizadas na região do planalto do Rio Grande do Sul (RS), Amado et al.(2005) concluíram que a compactação é um dos fatores mais limitantes nas lavouras conduzidas no SPD nesta região.

A compactação do solo é um processo inerente ao SPD e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade. Entretanto, esse sistema possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Dentre essas, destaca-se o estudo das propriedades físicas e hídricas do solo no SPD.

Dentre as propriedades físicas do solo, o intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador físico que incorpora os efeitos do conteúdo de água sobre as variações do potencial mátrico, aeração e resistência à penetração. Tais particularidades tornam o intervalo hídrico ótimo uma variável útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável do solo, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (Tormena et al., 1998).

O suprimento de oxigênio ao sistema radicular é muito importante e reflete a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar. Como o ar e a água ocupam o mesmo espaço no solo, quando o volume de um aumenta, ocorre decréscimo no volume do outro. Portanto, a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) tem relação direta com a retenção de água. Seu valor é máximo quando o solo está seco, e diminui progressivamente com o umedecimento, atingindo valor zero quando o solo está saturado.

Apesar da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ) ser uma propriedade de grande variabilidade amostral, dificultando a diferenciação entre manejos, ela tem sido usada para caracterizar a qualidade estrutural do solo, sendo analisada juntamente com outras propriedades físico-hídricas. Essa propriedade representa o volume de um fluido que passa por um corpo sólido em um determinado tempo (LIBARDI, 2000). No caso do sistema solo, o fluido é a solução – tratada aqui simplesmente como água do solo – e o corpo sólido são as partículas minerais e orgânicas. Portanto, uma vez alterada a distribuição e o arranjo dos poros do solo, as propriedades de condutividade hidráulica também variam (BAGARELLO, 1997).

A forte associação entre a macroporosidade e a  $K_s$  faz com que pequenas mudanças no valor daquela alterem consideravelmente os valores dessa, tendo em vista que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (REICHERT et al., 2007). Segundo Mesquita & Moraes (2004), a geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água são fatores

determinantes da  $K_s$ , o que caracteriza sua maior dependência da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais que alteram a estrutura do solo influenciam diretamente na  $K_s$ , mais até do que nos processos de gênese e formação da estrutura desses solos.

Muitas lacunas ainda existem em relação aos valores críticos para o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como valores a serem considerados para avaliação da qualidade do solo e do meio ambiente. Diante disso, mostra-se necessária a pesquisa buscando o melhoramento das condições para a produção de grãos em SPD. Para isso são necessários estudos sobre efeitos da compactação sobre os atributos físico-hídricas do solo.

## **2 HIPÓTESES**

1. Alterações nas propriedades físico-hídricas promovidas pela compactação em um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado sob sistema de semeadura direta reduzem a qualidade físico-hídrica deste solo.

2. O intervalo hídrico ótimo, a condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade ao ar são eficientes para a verificação do estado de compactação do solo em lavoura sob plantio direto.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste estudo foi avaliar indicadores físico – hídricos de qualidade de um Latossolo Vermelho cultivado por longo prazo sob o sistema de plantio direto.

### **3.1.2 Objetivos específicos**

Determinar a densidade do solo crítica em que a resistência mecânica à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento de plantas, através da metodologia do intervalo hídrico ótimo.

Avaliar a relação da permeabilidade ao ar com a macroporosidade, a porosidade total e a densidade do solo em diferentes tensões de água.

Determinar a relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade, porosidade total e a densidade do solo.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Plantio direto

O sistema plantio direto (SPD) consiste na semeadura diretamente em solo coberto por palha, com o mínimo revolvimento da camada superficial. Embora esse sistema tenha surgido a fim de reduzir os processos erosivos, 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.

Um dos preceitos desse sistema de plantio refere-se ao não revolvimento do solo, porém com o passar do tempo essas áreas podem apresentar algumas restrições para o desenvolvimento adequado das plantas. A intensa mecanização na agricultura tem ocasionado compactação do solo. Um solo pode ser quimicamente bom, mas ocorrendo a compactação as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado. Mesmo plantas com potencial genético para o desenvolvimento de raízes, quando não encontram condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento tal como aeração, umidade e temperatura, as raízes não tem capacidade para desenvolver todo o seu potencial (Leite,2001).

A expansão do sistema plantio direto no Brasil retardou o avanço da degradação das áreas agrícolas, provocada principalmente pela erosão, que causou históricas perdas de solos, com conseqüentes custos ambientais e econômicos, cuja dimensão pode ser apenas estimada, a exemplo do trabalho de Bertol et al. (2007). No entanto, o uso intenso e continuado de máquinas associado a condições inadequadas de umidade, tem provocado a compactação do solo (RADFORD et al., 2001; COLLARES, 2005), que pode ser cumulativa, visto que o solo não é mais mobilizado nos cultivos sucessivos (STRECK, 2003). Devido a isso, a compactação tem sido considerada uma das principais causas de degradação dos solos agrícolas

em sistemas sem mobilização, e sua avaliação tem sido feita por meio de diversos indicadores de qualidade estrutural e de capacidade de suporte de carga (IMHOFF, 2002). Segundo SILVA (2003), a compactação dos solos agrícolas tem aumentado nos últimos anos e vem se tornando um fator limitante ao aumento da produtividade e à sustentabilidade do sistema plantio direto.

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).

As altas densidades do solo em sistemas de plantio direto devem-se ao menor revolvimento mecânico, associado aos tráfegos de máquinas. Isto implica na coalescência dos agregados e, portanto, em um solo com densidade mais elevada. Assim a bioporosidade do solo sob plantio direto, analisada com rotação de culturas planejadas, resultante da formação de canais contínuos ao longo do perfil, possibilita o crescimento radicular em solo mais adensado (TORMENA et al., 2004).

De acordo com Assis & Lanças (2003) o plantio direto é uma prática conservacionista especialmente adequada para as condições de ambiente de regiões tropicais, onde se faz necessário manter o solo protegido da ação do sol e da chuva, caracterizando-se pela sua eficiência no controle de perdas de solo e água e na redução dos custos operacionais, principalmente pela eliminação de operações de preparo do solo, tais como a aração e a gradagem, sendo que a sua adoção tem viabilizado a implantação de sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, tornando-se a base da sustentabilidade. Neste contexto, o emprego efetivo do sistema plantio direto, em função de suas prerrogativas básicas, mostra-se muito mais importante e eficiente para as regiões tropicais e subtropicais exploradas com agricultura (FANCELLI & FAVARIN, 1989). Com a crescente utilização do sistema plantio direto, os atributos físico-hídricos do solo têm sido modificados, necessitando de pesquisas com períodos de duração mais longos para que dessa forma possa-se estudar os fenômenos ligados à sua estrutura. Alguns atributos do solo são amplamente comentados, tais como a densidade do solo que mostra uma tendência de aumento

nos primeiros anos de cultivo e, com o passar dos anos, apresenta uma tendência de diminuição da densidade.

## **4.2 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 reduções de produtividade, de 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.

#### **4.3 Intervalo Hídrico ótimo (IHO)**

O conceito de “Least Limiting Water Range” (LLWR) foi proposto por LETEY (1985) e desenvolvido por SILVA & KAY (1994) como indicador da qualidade estrutural do solo para o crescimento das raízes, visto que integra, num único parâmetro, os três fatores importantes associados ao desenvolvimento das plantas: aeração, umidade e resistência mecânica à penetração das raízes. Pesquisas têm mostrado que o LLWR, traduzido como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (TORMENA et al., 1998), é alterado pelo grau de compactação do solo (SILVA & KAY, 1997; BETZ et al., 1998; IMHOFF et al., 2001; TORMENA et al., 2007).

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes. Num solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das

plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Desta forma, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações (ARAÚJO et al., 2004).

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).

Esse índice pode ser considerado um “semáforo” da qualidade estrutural do solo. As condições de umidade ideais, para o desenvolvimento e crescimento das plantas, ocorrem entre os limites superior e inferior do IHO. As condições são limitantes quando ficam acima ou abaixo dos limites do IHO, e críticas ao crescimento das plantas quando a densidade do solo estiver acima da densidade onde o IHO é nulo (Silva & Kay, 1996, 1997; Collares et al., 2006). A densidade crítica (IHO é nulo) obtida por meio do IHO e auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo.

A densidade crítica é variável em função do nível de compactação e da textura do solo (Wu et al. 2003; Reichert et al., 2007, 2009). Solos com alta densidade atingem altos níveis de resistência à penetração com menor variação de umidade, reduzindo o crescimento radicular das plantas (Goodman & Ennos, 1999). Além disso, as plantas, quando encontram condições adequadas de crescimento no início do seu ciclo vegetativo, tendem a manter o sistema radicular superficialmente.

No entanto, a partir do momento que ocorrem períodos de estiagem, o acesso à água é limitado, pois o solo seco e compactado oferece alta resistência à penetração das raízes (Clark et al., 2003), não permitindo o aproveitamento adequado da água armazenada nas camadas mais profundas do solo ou abaixo da camada de maior resistência. Quando a umidade do solo fica fora dos limites do IHO durante o seu ciclo vegetativo, ocorre menor crescimento radicular e da parte aérea (Silva & Kay, 1996; Collares et al., 2006), com possível redução na produtividade das culturas.

Por sua vez, solos bem estruturados, com densidade abaixo da crítica e com macroporosidade acima de 10 %, apresentam menor efeito sobre o crescimento radicular, mesmo que a resistência do solo à penetração esteja acima de 2 Mpa (Collares et al., 2006), pois os poros representam os caminhos preferenciais ao crescimento das raízes (Stirzaker et al., 1996; Rasse & Smucker, 1998), permitindo que as camadas mais profundas do solo sejam ocupadas na busca de água e nutrientes. Dessa forma, nem sempre se observa resposta das plantas quando o solo mantém resistência de 2 MPa por determinado período (Silva, 2003).

#### **4.4 Condutividade Hidráulica do solo saturado**

O conhecimento da condutividade hidráulica do solo é essencial para qualquer estudo que envolva o movimento de água no solo, podendo ser determinada por vários métodos à campo ou em laboratório. Em ambas as determinações, a variabilidade encontrada entre as repetições pode apresentar uma grande amplitude, sendo esta uma limitação na obtenção deste parâmetro. A condutividade hidráulica saturada é uma determinação fácil, prática e rápida quando analisada em laboratório.

A condutividade hidráulica expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso, que varia de solo para solo e até no mesmo solo, dependendo, portanto, das propriedades do meio e do fluido (LIBARDI, 2000). Podem-se citar como propriedades mais importantes do solo a forma de suas partículas, a superfície específica, a porosidade, a estrutura e a compactação, ou seja, todas as propriedades que refletem a geometria porosa do solo.

O aumento do nível de compactação do solo acarreta aumento dos microporos e principalmente diminuição dos macroporos, determinando redução na condutividade hidráulica saturada, o que deve estar relacionado à diminuição dos

macroporos. Solos compactados caracterizam-se por apresentar uma diminuição do espaço poroso, com implicações sobre a movimentação de água e de gases no seu interior e na resistência que oferecem ao crescimento das raízes das plantas. Em geral, observa-se uma redução da taxa de infiltração de água no solo e uma diminuição na quantidade de água disponível às plantas. Além disso, em períodos de chuvas intensas pode haver dificuldades nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, em períodos secos, acarretando em dificuldades na penetração de raízes (BRAIDA, 2004).

#### **4.5 Permeabilidade ao ar**

A permeabilidade do solo caracteriza a habilidade em permitir o fluxo de gases em resposta a gradientes de pressão e depende diretamente do número, continuidade, tortuosidade e do quadrado do diâmetro dos poros de aeração. É, portanto, sensível à presença de macroporos contínuos e reduz o crescimento radicular das plantas. A composição do ar do solo também é modificada pela compactação devido ao impedimento do transporte de gases no solo, o que gera um desequilíbrio entre os gases da respiração do solo e da atmosfera livre.

A ênfase dada à estrutura do solo como fator de produção agrícola deve-se, em grande parte, ao fato de serem o ar e a água os ocupantes básicos dos espaços vazios. A sustentabilidade agrícola dos solos, prioritariamente, também está relacionada com a preservação do estado de aeração e hidratação dos sistemas radiculares.

Para um adequado crescimento, as plantas necessitam de uma estrutura que possibilite uma área de contato entre as raízes e o solo, que assegure a obtenção de água e nutrientes e um suficiente espaço poroso para o fornecimento adequado de oxigênio (LIMA, 2004).

O arranjo das partículas minerais juntamente com a matéria orgânica forma a estrutura básica que denominamos de estrutura do solo. Esta estrutura irá definir a porosidade do solo em questão, podendo ser dividida em microporos, poros formados no interior dos agregados, e macroporos, poros formados por agregados diferentes (BAVER, 1972). Os microporos do solo são os poros responsáveis pela retenção de água, ou seja, aquela água que será retirada pelas plantas durante o

período de estiagens, enquanto os macroporos após a rápida drenagem são os poros responsáveis pela aeração do solo (HILLEL, 1998).

Na natureza, nem tudo é sistemático, e a variação da permeabilidade dos solos é muito grande, pois é um fator dependente da estrutura e, conseqüentemente da porosidade do solo, que muitas vezes não segue a mesma tendência. Em um mesmo solo nos diferentes horizontes, pode ocorrer uma variação drástica na porosidade e afetar a distribuição de ar e água disponíveis para a cultura. Baseado neste aspecto, Streck (2007) afirma que mais importante que a porosidade é a continuidade de poros, pois poros obstruídos não contribuem para a realização da troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

Os fluídos “gêmeos” (água e ar) que, juntos, ocupam o espaço aéreo, variam suas frações de volume: com o aumento de um há o decréscimo do outro. Devido a essa dependência, o volume de ar e/ou permeabilidade de um solo devem ser sempre analisadas em paralelo a valores específicos de umidade.



## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Solo e clima:

O solo em estudo está localizado em uma lavoura agrícola comercial de propriedade do senhor Valério Kunz, no município de Ibirubá (RS). O local de estudo está situado na região fisiográfica do Planalto Médio do estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 28°38'26" de latitude sul, 53°03'08" de longitude oeste e aproximadamente 420 m de altitude na região norte do estado (Figura 1, 2).

A gleba (2,7há) destinada à coleta das amostras vinha sendo cultivada sob plantio direto desde 1998, com soja na primavera/verão, aveia + azevém e/ou trigo no outono/inverno.



FIGURA 1 – Localização do município de Ibirubá no estado do Rio Grande do Sul.  
Fonte: Ibirubá (Rio Grande do Sul) (2009).

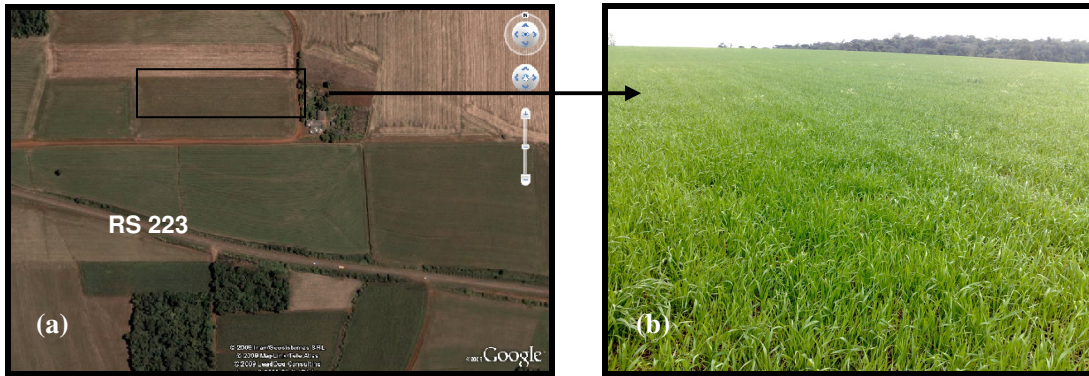


FIGURA 2 – Imagem da área de coleta. Fonte: (a) Imagem do Google Earth (Acesso em 18/08/2009) e (b) arquivo pessoal.

O clima da região enquadra-se na classificação de Köppen, zonas “Cfa” e “Cfb” (clima subtropical úmido com verões quentes ou amenos). O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 1999).

## 5.2 Coleta das amostras

Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada (Figura 3a, b, c, d) e deformada (Figura 3e) nas camadas 0,02 a 0,07m e 0,12 a 0,18m. As coletas foram realizadas nos meses de Julho (primeira camada) e outubro (segunda camada). As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com o auxílio de anéis metálicos (0,03m de altura e 0,055m de diâmetro interno). Foi coletado um total de 320 amostras (40 repetições x 4 tensões x 2 profundidades).

A coleta nas diferentes camadas e em vários pontos da lavoura foi efetuada com o intuito de se obter grande variação na densidade do solo.

As amostras de solo com estrutura deformada (0,5 kg) foram coletadas no mesmo local das amostras coletadas com anéis.

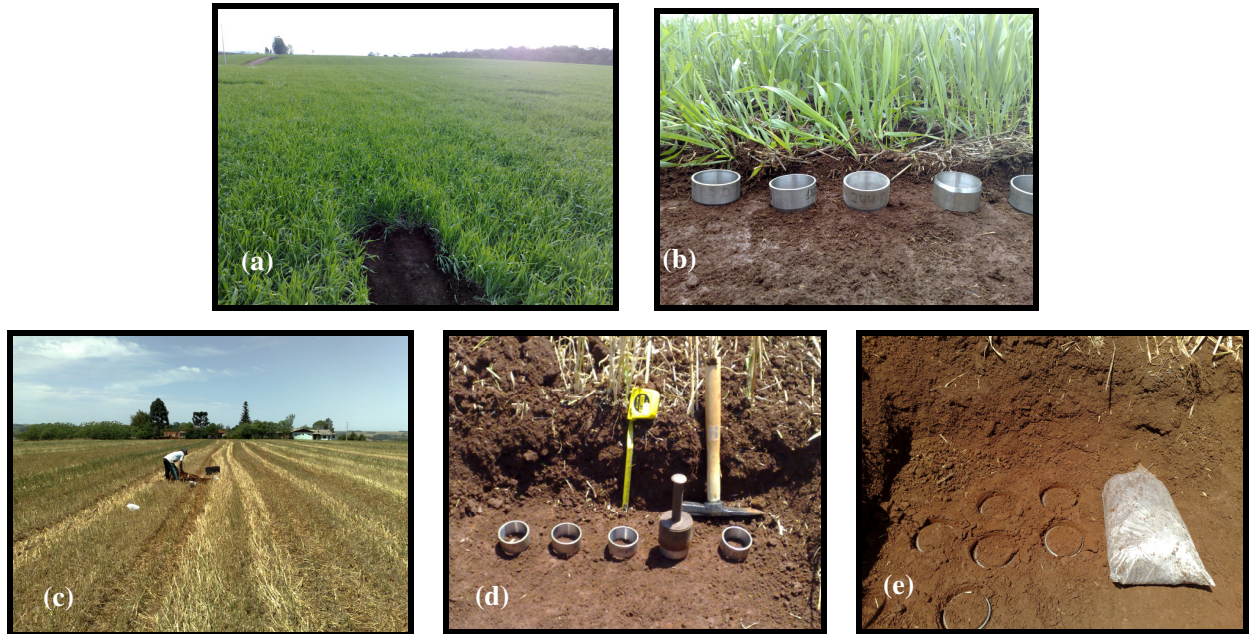


FIGURA 3 – Algumas das etapas da coleta das amostras com estrutura preservada na profundidade de 0,02 a 0,07m (a, b) e 0,12 a 0,18m (c, d) e deformada (e).

### 5.3 Determinações

#### 5.3.1 Análise granulométrica

No laboratório, as amostras foram colocadas em caixas de madeira para secar ao ar. Após secas, as amostras foram destorroadas e peneiradas em peneiras com malha de 2,0 mm (TFSA). Com a TFSA foi determinada a granulometria.

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

TABELA 1 – Granulometria e densidade de partículas (Dp) do Latossolo Vermelho Distrófico típico.

Camada (m)	Argila	Areia			Silte	Dp g cm <sup>-3</sup>
		Fina	Grossa	Total		
0,02 – 0,07	401	81	241	322	277	2,69
0,12 – 0,18	513	194	58	252	234	2,71

### 5.3.2 Densidade e porosidade

A densidade do solo foi determinada utilizando amostras de solo indeformadas coletadas em cilindros volumétricos, seguindo metodologia descrita por Embrapa (1997). A porosidade total foi calculada pela relação:

$$PT = 1 - \frac{ds}{dp}$$

Onde:

$PT$  = porosidade total em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $ds$  = densidade do solo em g cm<sup>-3</sup> e  $dp$  = densidade de partículas do solo em g cm<sup>-3</sup>.

A densidade de partículas foi calculada pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006). A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e microporosidade.

$$Mac = PT - Mic$$

### 5.3.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

As amostras de solo com estrutura preservada foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria-RS.

Em laboratório, as amostras foram preparadas (toailete) retirando-se cuidadosamente o excesso de solo da face superior e inferior dos anéis e realizar a limpeza externa, retirando solo aderido na extremidade do cilindro. Para evitar

perdas de solo durante o processo de saturação e manuseio das amostras, vedou-se a parte inferior com tecido permeável à água. Em seguida as amostras foram saturadas por capilaridade durante 48 horas e posteriormente submetidas ao teste de condutividade hidráulica constante (Figura 4), mediante a aplicação de uma carga hidráulica constante de 2 cm de coluna d'água, utilizando-se um Permeômetro de carga constante, conforme descrito por Libardi (2005). Este consiste na colocação de um cilindro adicional na parte superior do cilindro da amostra, preso com uma fita adesiva a este, a qual deve ser suprida com uma carga hidráulica constante, e na parte inferior da amostra, uma proveta para coletar a água que percola na amostra durante um período de 5 minutos (4 repetições).

Obtida pela seguinte equação:

$$K_s = \left( \frac{q * l}{A * h * t} \right)$$

em que:

$K_s$  = condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm h}^{-1}$ );

$q$  = volume de água percolado pela amostra ( $\text{cm}^3$ );

$l$  = altura da amostra (cm);

$A$  = área da amostra de solo ( $\text{cm}^2$ );

$h$  = lâmina de água aplicada (cm);

$t$  = tempo de mediação (horas).

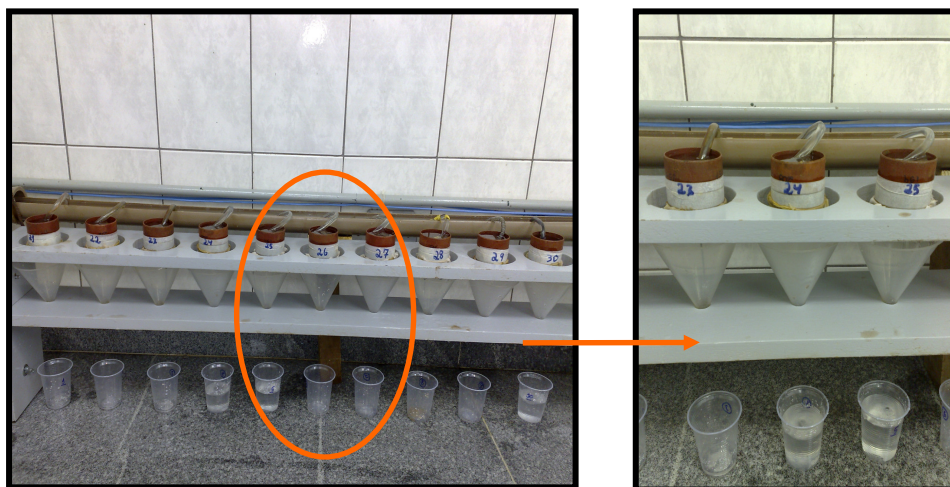


FIGURA 4 – Permeômetro de carga constante. Libardi (2000). Física do Solo/UFSM/RS. Foto: Kunz, 2009.

### 5.3.4 Permeabilidade ao ar

Posteriormente a condutividade hidráulica saturada, as amostras foram re-saturadas novamente por capilaridade durante 24 horas e submetidas a diferentes tensões de água no solo: 1; 6 e 33 kPa em mesa de tensão (REINERT; REICHERT, 2006); e 100 kPa em câmaras de pressão descritas em Klute (1986).

Após equilibradas em cada tensão, as amostras foram submetidas à determinação permeabilidade ao ar do solo ( $K_a$ ). A ( $K_a$ ) foi obtida pela determinação da condutividade ao ar ( $K_l$ ), medida em um equipamento conforme ilustrado na Figura 5, 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 (10cm). 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  $10 \text{ L min}^{-1}$ . Assim que o ar passa pela amostra faz-se a leitura no respectivo fluxímetro e por meio de um manômetro é medida diretamente a diferença de pressão entre o ambiente e o fluxo de ar do equipamento.

A  $K_l$  é calculada a partir da quantidade de ar que passa numa determinada amostra, através da equação:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A}$$

A partir do valor de ( $K_l$ ) pode-se calcular a permeabilidade ao ar ( $K_a \text{ } \mu\text{m}^2$ ), como:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g}$$

onde:

$K_l$  = condutividade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ );

$\rho_l$  = densidade do ar na hora da medição ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );

$\Delta V$  = quantidade de ar que passa pela amostra no  $\Delta t$  ( $\text{m}^3$ );

$l$  = altura da amostra (m);

$\Delta p$  = pressão do ar que passa pela amostra (10 cm);

$A$  = área superficial do anel ( $m^2$ );

$\eta$  = viscosidade do ar ( $g\ s^{-1}\ cm^{-1}$ )

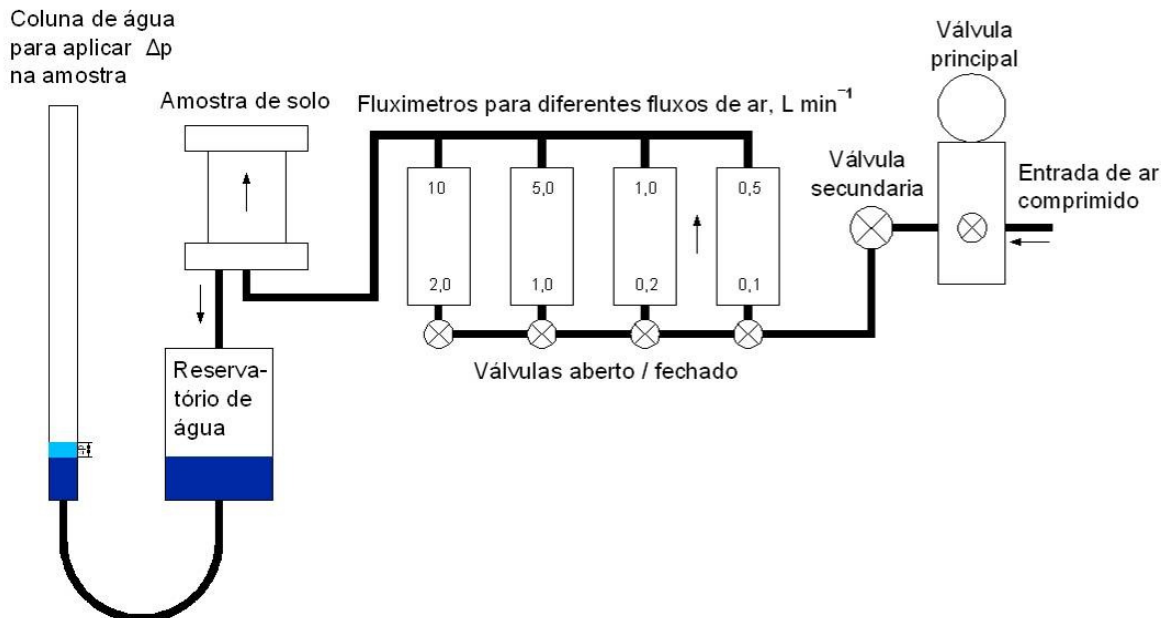


FIGURA 5 – Equipamento utilizado para medição de condutividade ao ar em amostras indeformadas de solo. Fonte: Vossbrink (2005) e modificado por Brandt, 2008.

### 5.3.5 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Após a permeabilidade ao ar, em cada amostra foi determinada a resistência do solo à penetração, por meio de um penetrômetro eletrônico (Figura 6), com velocidade constante de penetração de  $60\ mm\ min^{-1}$ , e cone com diâmetro de base de 4 mm e ângulo de  $30^\circ$ . Esse penetrômetro é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados (Tormena et al., 1998).



FIGURA 6 – Penetrômetro de bancada. Marca Marconi. Física do Solo/UFSM/RS.  
Foto: Kunz, 2009.

Realizavam-se três determinações de resistência à penetração em cada amostra, eliminando-se os quatro valores iniciais e dois finais. A frequência de leitura de resistência à penetração correspondeu à coleta de um valor a cada 1 segundo, obtendo-se o total de 20 leituras por amostra, das quais se utilizou um valor médio. Os valores, obtidos em kgf, foram transformados para MPa. Determinada a resistência do solo à penetração, as amostras foram secas em estufa a 105°C, por 24 horas, para a determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico e umidade volumétrica ( $\theta$ ).

Os dados de RP foram ajustados em relação à  $\theta$  e  $D_s$ , utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990), adotando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994):

$$RP = a\theta^b D_s^c$$

onde:

$RP$  = resistência do solo à penetração (MPa);  $\theta$  = teor de água ( $m^3 m^{-3}$ );

$D_s$  = densidade do solo ( $g cm^{-3}$ );  $a$ ,  $b$  e  $c$  = parâmetros de ajuste do modelo.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado considerando como limite inferior a quantidade de água retida no solo no potencial matricial de -1,5 Mpa ( $\theta_{PMP}$ ), 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 3 MPa ( $\theta_{RP}$ ) (Lipiec & Hakanson, 2000). Como limite superior foi considerado o conteúdo de água retida no solo no potencial de -0,01 MPa ( $\theta_{CC}$ ), 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% ( $\theta_{PA}$ ) obtida pela expressão:

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) - 0,1$$

Onde:  $D_s$  = densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $D_p$  = densidade de partículas em  $\text{g cm}^{-3}$ .

Para cada valor de  $D_s$ , o IHO foi determinado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior de umidade.

Para obtenção dos parâmetros de estimação do IHO, utilizou-se o PROC NLIN do SAS.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O IHO é um índice que integra os efeitos do status da umidade do solo equivalente à porosidade de aeração igual a 10% ( $\theta_{PA}$ ), a umidade do solo equivalente a resistência à penetração de raízes igual a 3 MPa ( $\theta_{RP}$ ), a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), isto é, proporcionado pelo solo ao crescimento de plantas em função de uma única variável; a densidade. As quais, são mostrados na Figura 7.

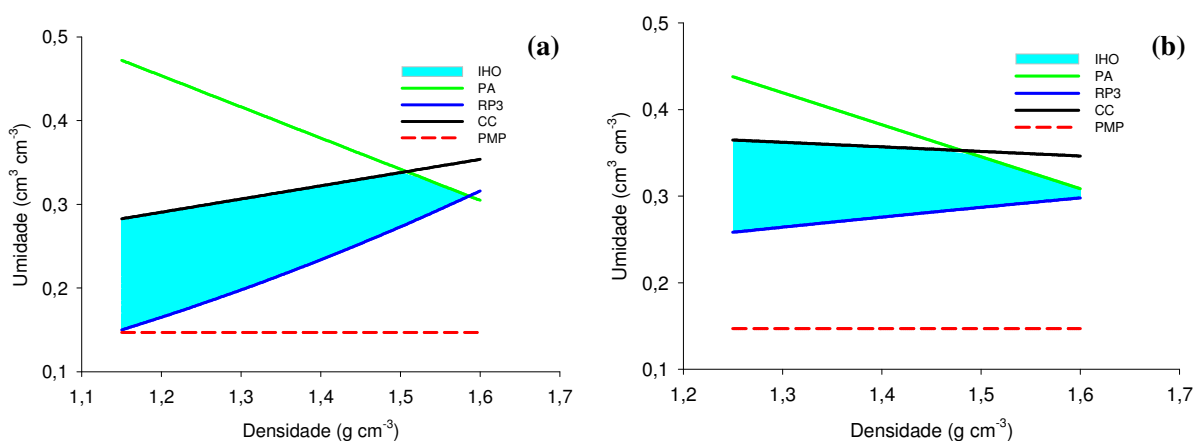


FIGURA 7 – Variação do teor de água no solo com a densidade do solo para os níveis críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{ar}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ), resistência mecânica à penetração ( $\theta_{rp}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{1,5}$ ) para o Latossolo Vermelho distrófico nas duas camadas avaliadas de 0,02 a 0,07m (a) e 0,12 a 0,18m (b).

Na profundidade de 0,02 a 0,07m (Figura 7a), a  $\theta_{CC}$  foi positivamente relacionado com a  $D_s$ . O limite superior do IHO foi o conteúdo de água do solo na capacidade de campo nas densidades menores que  $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ , acima deste valor a  $\theta_{PA}$  substitui a  $\theta_{CC}$ , similarmente ao observado por Tormena et al. (1999).

A resistência a penetração equivalente a 3,0 MPa, no IHO, aumentou com o incremento da densidade do solo e apresentou-se como limite inferior do IHO em todas as densidades acima de  $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ , indicando que, abaixo desta densidade,

a planta já pode apresentar restrições ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular por impedimento mecânico. Por sua vez, com o aumento da  $D_s$  ocorre decréscimo da  $\theta_{PA}$ , indicando a necessidade de maior drenagem do solo para adequada difusão de gases, em virtude da redução dos poros de maior diâmetro. Esses valores são similares aos obtidos por outros pesquisadores na determinação do IHO (Silva et al., 1994, Tormena et al., 1998, 1999, Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004).

O limite inferior foi limitado pela  $\theta_{RP}$  ao longo das densidades do solo observadas, até se tornar nulo, na densidade de  $1,59 \text{ g cm}^{-3}$ , implicando em altos riscos na produtividade das culturas agrícolas exigentes em aeração do solo e suscetíveis à resistência do solo à penetração.

Na camada de 0,12 a 0,18m de profundidade (Figura 7b), a  $\theta_{CC}$  foi negativamente relacionada com a  $D_s$ . A  $\theta_{PA}$  substituiu a  $\theta_{CC}$  como fator limitante quando a  $D_s$  foi maior que  $1,48 \text{ g cm}^{-3}$ . O limite inferior foi a  $\theta_{RP}$  de 3 MPa. Nessa condição crítica de RP, a  $D_s$  quando o IHO é zero, esse valor é um pouco superior a  $1,61 \text{ g cm}^{-3}$ .

Os valores de  $\theta_{RP}$  aumentaram com a  $D_s$ , justificando pelo fato de que para manter a  $RP = 3,0 \text{ MPa}$  é necessário aumentar o teor de água no solo, a fim de compensar a maior fricção entre as partículas resultante do aumento da  $D_s$ . Por sua vez, com o aumento da  $D_s$  ocorre decréscimo de  $\theta_{PA}$ , indicando a necessidade de maior drenagem do solo para adequada difusão de gases, em virtude da redução dos poros de maior diâmetro. Esses resultados são similares aos obtidos por outros pesquisadores na determinação do IHO (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998, 1999; Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004).

A  $\theta_{PA}$  foi superior a  $\theta_{PMP}$ , em toda a extensão de valores de  $D_s$ , a exemplo dos resultados de Imhoff et al. (2001) e Benjamim et al. (2003).

Nas duas camadas (FIGURA 8), a variação do IHO manteve relação negativa com a  $D_s$ , a exemplo do observado em Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999), Leão et al. (2005) e Cavalieri et al. (2006).

Devido à curva de  $\theta_{RP}$  ser o limite inferior do IHO já nas menores  $D_s$ , o declínio do IHO foi de forma quase linear com a  $D_s$ . O IHO apresenta um pequeno incremento até a  $D_s$  de  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$  e, a partir desta  $D_s$ , o IHO reduziu até o valor de zero.

O valor máximo do IHO foi de  $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no menor valor de  $D_s$ , igual ao valor do IHO de  $1,15 \text{ g cm}^{-3}$  na camada avaliada de 0,02 a 0,07m. O maior valor do IHO de  $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na camada de 0,12 a 0,18m, com  $D_s$  de  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ .

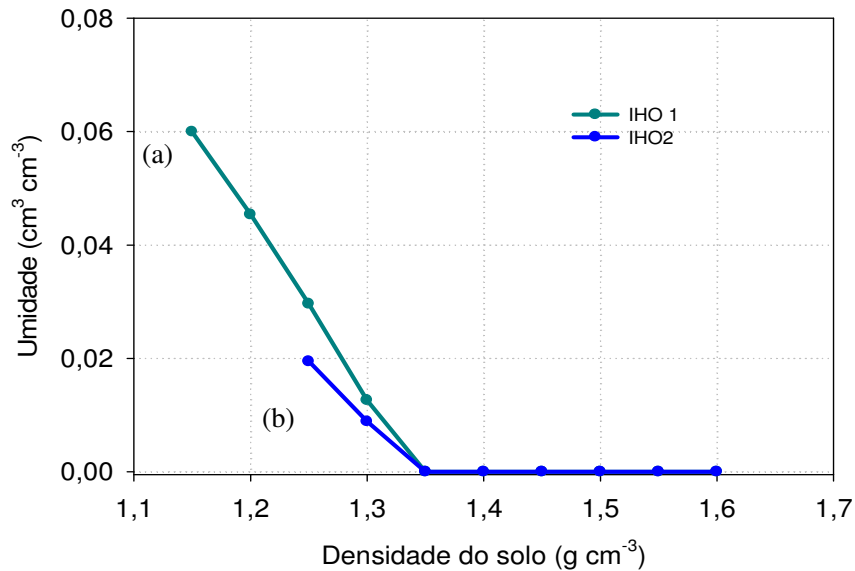


FIGURA 8 – Variação do intervalo hídrico ótimo para as duas camadas de 0,02 a 0,07m (a) e 0,12 a 0,18m (b) em função da densidade do solo.

## 6.2 Relações da condutividade do solo ao ar ( $K_i$ ), com as propriedades físicas do solo em diferentes tensões de água no solo.

A condutividade do solo ao ar, além de ser dependente da porosidade e do teor de água que o solo se encontra, também é dependente da continuidade de poros, pois poros não contínuos não possuem a capacidade de realizar a troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

A relação da condutividade do solo ao ar com a macroporosidade, porosidade total e a densidade do solo, em amostras equilibradas nas diferentes tensões de água no solo, nas camadas de 0,02 a 0,07m e 0,12 a 0,18m estão representados no (Figura 9 e 10). Verificou-se que a condutividade do solo ao ar possui uma relação direta com a macroporosidade e a porosidade do solo e é inversamente proporcional a densidade do solo nas tensões de água no solo avaliadas.

Na primeira camada, o solo apresentou maior macroporosidade e maior porosidade total, porém, para uma porosidade mínima de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , a

$K_a$  é de  $8,29 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo necessário que a Porosidade total esteja acima de  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 1a, 1b) e a  $D_s$  abaixo de  $1,50 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $1 \text{ kPa}$ ,  $1,49 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $6 \text{ kPa}$ ,  $1,51 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $33 \text{ kPa}$  e  $1,56 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $100 \text{ kPa}$  (Figura 1c, 1d, 1e, 1f).

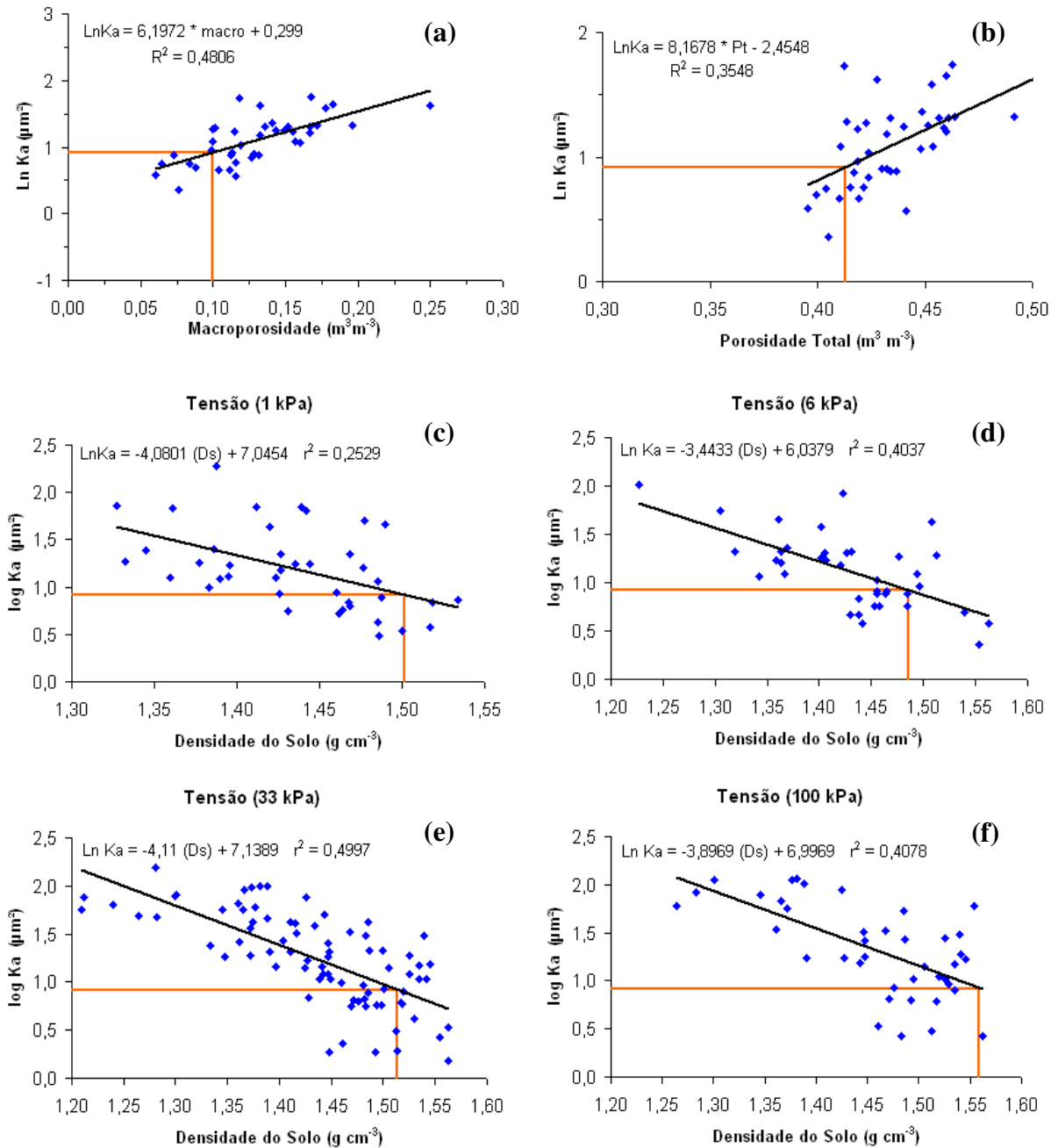


FIGURA 9 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade do solo ao ar (a); da porosidade total com a condutividade do solo ao ar (b) e da condutividade do solo ao ar com a densidade do solo em diferentes tensões de água no solo na camada de 0,02 a 0,07m de profundidade (c, d, e, f).

Na segunda camada, o solo apresentou menor macroporosidade e menor porosidade total. Porém, para uma porosidade mínima de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , a  $K_a$  é de  $11,92 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo necessário que a porosidade total esteja acima de  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Anexo 2a, 2b) e a  $D_s$  abaixo de  $D_s 0,62 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $1 \text{ kPa}$ ,  $1,38 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $6 \text{ kPa}$ ,  $1,33 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $33 \text{ kPa}$  e  $1,47 \text{ g cm}^{-3}$  na tensão de  $100 \text{ kPa}$  (Anexo 2c, 2d, 2e, 2f).

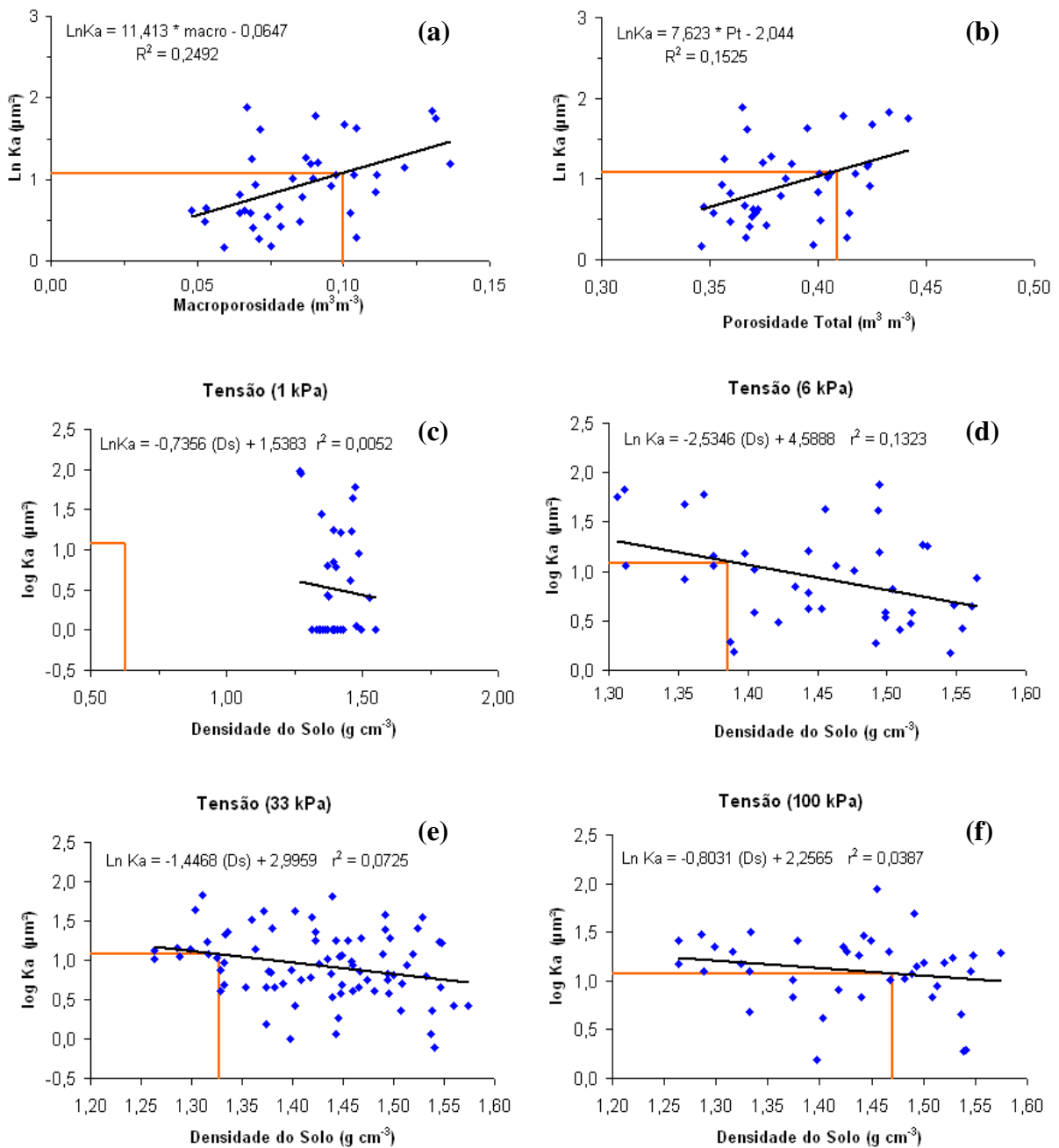


FIGURA 10 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade do solo ao ar (a); da porosidade total com a condutividade do solo ao ar (b) e da condutividade do

solo ao ar com a densidade do solo em diferentes tensões de água no solo na camada de 0,12 a 0,18m de profundidade (c, d, e, f).

A camada superficial seguiu a mesma tendência da profundidade de 0,12 a 0,17m, sendo que com o aumento da tensão ocorre um aumento na densidade do solo crítica. Ao aplicar uma tensão superior, os microporos começam a drenar, o teor de água no solo e a condutividade ao ar vão diminuindo, acarretando assim no aumento da densidade do solo crítica.

Os valores de densidade do solo crítica foram similares aos limites considerados críticos para o desenvolvimento de plantas, conforme apresentado por Reichert et al. (2007, 2009). Esses autores propuseram valores críticos de densidade do solo em função do teor de argila. Para os solos deste estudo, que possuem valor médio de  $401 \text{ g kg}^{-1}$  de argila na camada de 0,02 a 0,07m, o valor de densidade crítica seria em torno de  $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$  e para a camada de 0,12 a 0,18m com  $513 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, a densidade crítica seria em torno de 1,3 a  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ . Portanto, para as camadas desse estudo, as densidades do solo crítica estão próximas do limite considerado restritivo ao crescimento radicular das plantas.

A variação dos valores de  $K_a$  foi reduzindo, com a diminuição dos  $\psi_m$  e com o aumento da densidade do solo pois, na medida que o  $\psi_m$  reduz, aumenta o volume de poros vazios. Este incremento no valor de  $K_a$  ocorre devido à drenagem da água dos poros maiores (macroporos), favorecendo a passagem do ar pela amostra.

Num solo submetido à compactação, pode ocorrer pulverização de agregados secos, compressão ou deformação de agregados úmidos ou simples aproximação, o mais perto possível, de suas partículas. Seja qual for o mecanismo, a compactação promove uma diminuição na porosidade livre de água, com conseqüente decréscimo em sua condutividade.

Quanto mais próximas da saturação com água, menos ar passou pela amostra (FIGURA 10c). Vários autores relatam que a permeabilidade ao ar é dominada pela geometria e pelo grau de saturação dos macroporos (BARDEN & PAVLAKIS, 1971. Ball e Schønning (2002), estudando a relação entre a  $K_a$  e o conteúdo de água para os diferentes teores de argila, concluíram que o solo quando seco apresenta uma alta  $K_a$  e quando a água ocupa o espaço poroso essa obstrução de poros prejudica  $K_a$ .

Estudando sistemas de manejo em Latossolo Vermelho, Fontanela (2008) observou que áreas sem controle do tráfego apresentaram alterações na continuidade e distribuição de tamanho de poros em relação a áreas com controle de tráfego, com redução da permeabilidade ao ar. A associação entre  $K_a$  e macroporosidade foi verificada por Corcini (2008). Esse autor constatou o incremento de  $K_a$  foi maior quando a tensão da água nas amostras variou de 1 a 6 kPa.

### **6.3 Relações da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{\theta s}$ ) com as propriedades físicas do solo.**

Na camada superficial se obteve um valor médio de ( $K_{\theta s}$ ) de  $168,38 \text{ mm h}^{-1}$ , fato devido ao efeito da palhada na superfície do solo, da atividade biológica, raízes, matéria orgânica, estrutura e pequeno revolvimento pelos discos ou sulcadores na semeadora, que diminuem os efeitos da compactação. No plantio direto, estes efeitos já são percebidos principalmente até aos 0,07m, sendo que na profundidade de 0,12 a 0,18m este valor médio reduziu em 4,7 vezes em comparação à camada superficial.

Reichert et al. (2007) propõem a obtenção de um valor crítico de condutividade hidráulica do solo saturado. Em uma delas, a partir de uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor considerado crítico para o crescimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Baver, 1949; Gupta & Allmaras, 1987) e a outra considerando um grau de compactação de 85%. Os autores obtiveram uma condutividade de  $13,8 \text{ mm h}^{-1}$  a partir da macroporosidade e de  $27,5 \text{ mm h}^{-1}$  pelo grau de compactação.

Na camada de 0,02 a 0,07m de profundidade apresentaram-se maiores valores de macroporosidade, com valores superiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 3a). Com a equação  $\log K_{\theta s} = 13,734 \text{ macro} + 0,0357$  há possibilidade de estimar a condutividade hidráulica crítica do solo saturado, considerando uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . O valor da condutividade hidráulica correspondente a essa macroporosidade é de  $25,65 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo esse o valor crítico considerando uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Para isto, é necessário que a  $D_s$  esteja abaixo de  $1,473 \text{ g cm}^{-3}$  e a  $P_t$  acima de  $0,414 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 3b e 3c).



Embora na 2ª camada encontraram-se valores abaixo da macroporosidade considerada crítica (Figura 4d), a condutividade hidráulica do solo saturado crítica através da equação  $\log K\theta_s = 21,109 \text{ macro} - 1,2663$  considerando uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , foi de  $6,99 \text{ mm h}^{-1}$ . Para isto, é necessário que a  $D_s$  esteja abaixo de  $1,339 \text{ g cm}^{-3}$  e a  $P_t$  acima de  $0,418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 4e e 4f).

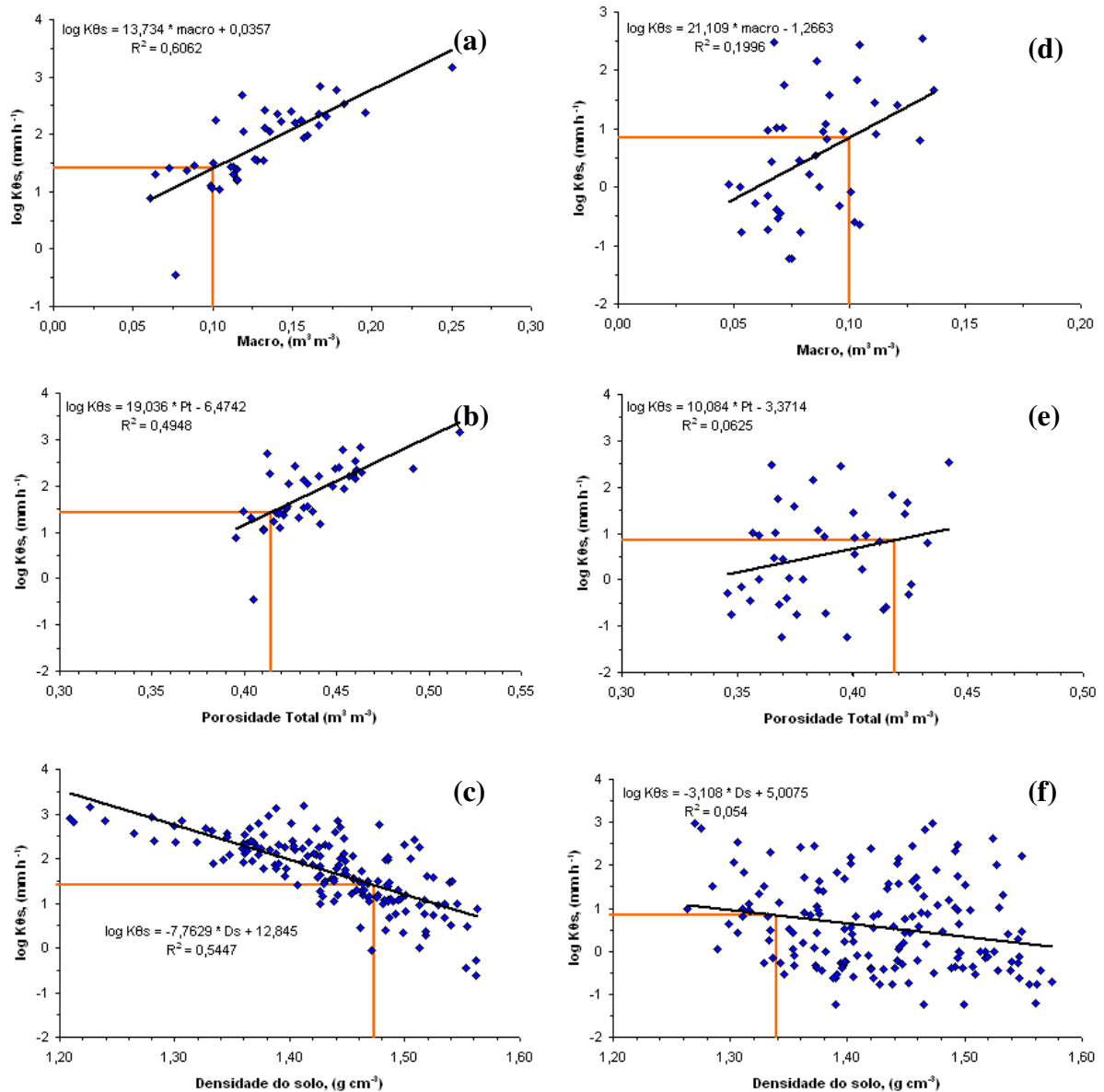


FIGURA 11 – Relações entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo (a, d); da porosidade total com a condutividade hidráulica do solo (b, e) e da condutividade hidráulica do solo com a densidade do solo (c, f), na camada de 0,02 a 0,07m e na camada de 0,12 a 0,18m.

Na primeira camada, o valor crítico de condutividade hidráulica foi superior, enquanto na segunda camada este valor foi inferior ao valor obtido por Reichert et

al. (2007). Realizando a média destes dois valores, a condutividade crítica encontra-se próximo.

De acordo com Reichert et al. (2007), a densidade e a porosidade do solo são parâmetros relacionados com alterações no volume de solo; portanto, altamente relacionados com a compactação do solo. Segundo os autores, a densidade apresenta relação inversa com a porosidade.

A condutividade hidráulica foi influenciada pela densidade do solo e pela macroporosidade. Reichert et al. (2007) dizem que em área agrícola, pecuária ou florestal, o processo com que a compactação afeta as propriedades hidráulicas do solo é o mesmo, podendo diferir apenas na intensidade com que essas alterações ocorrem.

Mesquita & Moraes (2004) afirmam que o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos, esperando-se correlação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade. Com a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (Boone & Veen, 1994). Beutler et al. (2003) também observaram que o aumento da compactação reduziu a condutividade hidráulica do solo saturado e com alto coeficiente de correlação negativo para a densidade do solo e positivo para a porosidade total e macroporosidade em um Latossolo Vermelho Distrófico ( $271 \text{ g kg}^{-1}$  argila).

## 7 CONCLUSÕES

O valor de densidade crítica baseada no IHO é de  $1,59 \text{ g cm}^{-3}$  na profundidade de 0,02 a 0,07m e de  $1,61 \text{ g cm}^{-3}$  na camada de 0,12 a 0,18m de profundidade.

A variação do IHO foi dependente da variação da densidade do solo.

A maior condutividade do solo ao ar foi observada nos menores potenciais matriciais e na camada superficial do solo.

A condutividade do solo ao ar e a condutividade hidráulica do solo saturado apresentaram correlação positiva com a macroporosidade e com a porosidade total e negativa com a densidade do solo nas tensões de água no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADO, T.J.C. et al. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n.89: p. 34-42, 2005.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.) **Methods of soil analysis**, Part 4, 5 ed. Madison: ASA & Soil Science Society of America, 2002, p. 1141-1158.
- BAGARELLO, V. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 169-180, oct., 1997.
- 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.
- BAVER, L. D.; GARDNER W. H.; GARDNER, W. R. **Física de suelos**. México: Union Tipografica Editorial Hispano-Americana, 1972. 529p.
- BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Science**, v.68, p.1- 13, 1949.
- BERTOL, I. et al. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n.1, p.133-142, jan./fev., 2007.
- BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a webster soil. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.62, n.62, p.1384-93, 1998.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, v.8, p.242-249, 2003.
- BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.
- BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004, 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.3, p.519-524, 1990.

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.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R. & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? **Plant Soil**, 255:93-104, 2003.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

CORCINI, A. L. M. **Variação temporal da estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai**. 2008. 107f. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

DEXTER, A. R. Soil physical quality – Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, jun., 2004.

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.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Brasília - DF: EMBRAPA. 1997. 212p.

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

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

FONTANELA, E. **Qualidade físico-hídrica de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

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).

GOODMAN, A.M. & ENNOS, A.R. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize. *Ann. Bot.*, 83:293-302, 1999.

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

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr., 2006.

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

HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Till. Res.**, 53:71-85, 2000.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

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

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

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

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

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C. A. Na algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agron. J.**, 97: 1210-1215, 2005.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.415-423, 2004.

LEITE, G.H.M.N. **Aplicação de calcário em sistema plantio direto, desenvolvimento do sistema radicular e rendimento de grãos de milho (*Zea mays L.*)**.2001.100f. Dissertação (Mestrado)-, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. Ed. Piracicaba, 2000. 509 p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

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

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

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, mai./jun., 2004.

RADFORD, B. J. et al. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61. n. 3-4, p. 157-166; sep., 2001.

RASSE, D.P. & SMUCKER, A.J.M. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. **Plant Soil**, 204:203-213, 1998.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar., 2009a.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade de solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, jul./dez., 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar., 2009b.

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

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

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.61, p.877-83, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.58, p.1.775-81, 1994.

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

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B. & WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, 185:151-162, 1996.

STRECK, C. A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do sul do Brasil**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; KAISER, D. R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. 1 CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; KAISER, D. R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. 1 CD-ROM.



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.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, M.J. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.211-19, 2007.

TORMENA, C.; 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**, v. 52, p. 223-232, 1999.

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. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, nov./dez., 2004.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1961.

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

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; MCCULLOUGH – SANDEN, B. & MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, 114: 401 – 414, 2003.