

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS
DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM PLANTIO
DIRETO ESCARIFICADO SOBRE O RENDIMENTO
DE GRÃOS DE MILHO**

CLAUDIA KLEIN

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Agronomia da Faculdade de
Agronomia e Medicina
Veterinária da UPF, para
obtenção do título de Mestre
em Agronomia – Área de
Concentração em Produção
Vegetal

Passo Fundo, Dezembro de 2011

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS
DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM PLANTIO
DIRETO ESCARIFICADO SOBRE O RENDIMENTO
DE GRÃOS DE MILHO**

CLAUDIA KLEIN

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal

Passo Fundo, Dezembro de 2011



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Vermelho em
plântio direto escarificado sobre o rendimento de grãos de milho”

Elaborada por

CLAUDIA KLEIN

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Área de Produção Vegetal

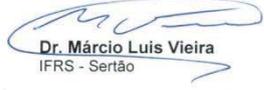
Aprovada em: 21/12/2011
Pela Comissão Examinadora


Dr. Wilson Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador


Dr. Wilson Antonio Klein
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia


Dr. Geraldo Luiz Chavarria Lamas Junior
FAMV/UPF


Dr. Hélio Carlos Rocha
Diretor FAMV


Dr. Márcio Luis Vieira
IFRS - Sertão

CIP – Catalogação na Publicação

K64p Klein, Claudia
Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um latossolo vermelho em plantio direto escarificado sobre o rendimento de grãos de milho / Claudia Klein. – 2011.
119 f. : il. ; 25 cm.

Orientação: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, 2011.

1. Solos - Compactação. 2. Latossolos. 3. Milho - Plantio. 4. Plantio direto. 5. Química do solo. I. Klein, Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU: 631.41

Catálogo: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e saúde e pela proteção em tantas idas e vindas.

A minha mãe, Solange Thomé Klein, exemplo de vida, de amor e dedicação, a mulher mais guerreira que conheço, por todas suas orações, preocupações, pelo carinho e apoio de sempre.

Ao meu pai, Gilmar José Klein, pelo apoio nos estudos, pela compreensão.

A minha amada irmã Raquel, que aos 11 anos assumiu com tamanha responsabilidade e destreza todas as tarefas antes incumbidas a mim, por ser graciosa e bondosa sempre.

Ao meu irmão Lucas, pelo apoio e carinho, torço por ti e espero sinceramente que você seja um respeitável Médico Veterinário!

Ao professor Vilson Antonio Klein, meu orientador, grande mestre, pela confiança, pelo incentivo, fostes um grande amigo, um paizão. Ensinastes-me não somente agronomia, mas sim me preparastes para a vida.

A Universidade de Passo Fundo, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, que possibilitaram a realização do curso de Mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores do Programa de Pós Graduação, por todos os preciosos ensinamentos. E aos funcionários da FAMV pela convivência agradável!

A colega Daniela Batista dos Santos, minha família em Passo Fundo, obrigada pela convivência harmoniosa, pelas conversas, pelas preciosas ajudas na dissertação, por tantas alegrias.

A colega Sandra Aparecida Agne, pelas intermináveis conversas, pelas palavras amigas, aprendi muito com você.

A colega Jucelaine Vanin, por me acolher junto a sua família, inesquecível Vila Maria, foram tantas idas e vindas...

Ao colega Fábio José Busnello, pelas risadas e piadas sem fim, pela disposição de sempre.

Aos colegas de pós graduação, pela agradável convivência, especialmente a Adriane Rebonatto, Cristiane Tibola, Dalberto Graminho, Guilherme Luiz Parize, Greice Mattei e Luciano Leite Navarini por sempre estarem perto, pelos momentos de descontração...

Aos colegas dos laboratórios de Laboratório de Uso e Manejo do Território e de Recursos Naturais e de Química de solo.

Aos meus avós, pela tamanha dedicação, pelas orações, por me escutar durante horas falando da minha pesquisa mesmo entendendo tão pouco, por tanto me alertar para não viajar a noite, para estudar bastante.

A toda minha família; impossível citá-la pela quantidade de pessoas, mas que sempre me incentivaram.

Aos amigos e primos de São Miguel do Oeste, tão amados, obrigada por fazer de cada final de semana inesquecível, por sempre estar perto mesmo longe.

A Suelen Regina Schneider, obrigada por me acolher em Passo Fundo mesmo me conhecendo tão pouco, sou tão feliz amizade

que construímos, descobri em você uma pessoa maravilhosa, e sem falar nas nossas viagens...

A todos, próximos ou distantes que, de alguma forma contribuíram para que esses momentos fossem vividos.

SUMÁRIO

| | | Página |
|------------------------------|---|-------------|
| LISTA DE TABELAS..... | | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | | xi |
| RESUMO..... | | 1 |
| ABSTRACT..... | | 3 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 5 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 7 |
| | 2.1 Qualidade do solo..... | 7 |
| | 2.2 Compactação do solo..... | 8 |
| | 2.2.1 Compactação em plantio direto..... | 9 |
| | 2.3 Densidade relativa..... | 11 |
| | 2.4 Resistência mecânica do solo à penetração..... | 13 |
| | 2.5 Água no solo..... | 14 |
| | 2.6 Intervalo hídrico ótimo..... | 15 |
| | 2.7 Permeabilidade do solo ao ar..... | 16 |
| | 2.8 Qualidade física versus plantas..... | 18 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 19 |
| | 3.1 Local e clima..... | 19 |
| | 3.2 Solo..... | 20 |
| | 3.3 Histórico da área e manejos de solo..... | 21 |
| | 3.4 Delineamento experimental..... | 22 |
| | 3.5 Análises físico-hídrico-mecânicas do solo..... | 22 |
| | 3.6 Variação da umidade no solo..... | 29 |
| | 3.7 Instalação e manejo da cultura da aveia..... | 32 |
| | 3.8 Instalação e manejo da cultura do milho..... | 31 |
| | 3.9 Análise do teor de matéria orgânica no solo..... | 33 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.10 | Análise estatística dos resultados..... | 33 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 34 |
| 4.1 | Propriedades físico-hídricas-mecânicas do solo.. | 34 |
| 4.1.1 | Textura do solo..... | 34 |
| 4.1.2 | Densidade dos sólidos do solo (Dss)..... | 36 |
| 4.1.3 | Densidade do solo (Ds)..... | 37 |
| 4.1.4 | Densidade máxima do solo (DMS) e umidade ótima de compactação (UOC)..... | 39 |
| 4.1.5 | Densidade relativa (DR)..... | 43 |
| 4.1.6 | Porosidade do solo e distribuição do diâmetro dos poros..... | 45 |
| 4.1.7 | Permeabilidade do solo ao ar..... | 48 |
| 4.1.8 | Resistência à penetração (RP)..... | 54 |
| 4.1.9 | Intervalo hídrico ótimo..... | 57 |
| 4.1.10 | Variação da umidade do solo..... | 65 |
| 4.1.11 | Curvas de retenção de água no solo..... | 71 |
| 4.1.12 | Condutividade hidráulica do solo..... | 73 |
| 4.2 | Atributos biométricos e rendimento das culturas..... | 75 |
| 4.2.1 | Aveia Preta..... | 75 |
| 4.2.2 | Milho..... | 77 |
| 4.2.2.1 | Componentes de rendimento do milho..... | 77 |
| 4.2.2.2 | Distribuição de plantas..... | 82 |
| 4.2.2.3 | Rendimento de grãos..... | 86 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 89 |
| | REFERÊNCIAS..... | 90 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | Página |
|--------|---|
| 1 | Valores críticos de densidade relativa..... 12 |
| 2 | Classes de espaçamento entre plantas de milho. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 32 |
| 3 | Classificação dos espaçamentos entre plantas e classes de espaçamento. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011. 32 |
| 4 | Teores de argila, silte, areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF)* em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 35 |
| 5 | Densidade dos sólidos do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 36 |
| 6 | Densidade do solo (Ds) do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 38 |
| 7 | Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e umidade ótima de compactação (UOC) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 40 |
| 8 | Umidade ótima de compactação (UOC), densidade máxima do solo (DMS) e matéria orgânica (MO) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 41 |
| 9 | Densidade relativa do solo do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... 44 |
| 10 | Porosidade total (Pt), macroporos, microporos e criptoporos em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo 47 |

| | | |
|----|--|----|
| | amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | |
| 11 | Permeabilidade do solo ao ar em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 50 |
| 12 | Permeabilidade do solo ao ar para o manejo plantio direto (PD) em função dos pontos de coleta* e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 52 |
| 13 | Permeabilidade do solo ao ar para o manejo plantio direto escarificado (PDE) em função dos pontos de coleta* e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 53 |
| 14 | Resistência do solo à penetração das raízes na capacidade de campo (CC) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 54 |
| 15 | Resistência do solo à penetração das raízes no ponto de murcha permanente (PMP) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 56 |
| 16 | Densidade do solo limitante para a RP 2 MPa, RP 3 MPa, Pa, e IHO=0 para RP 2 MPa e 3 MPa em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 61 |
| 17 | Densidade relativa do solo limitante para a RP 2 MPa, RP 3 MPa, Pa, e IHO=0 para RP 2 MPa e 3 MPa em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 62 |
| 18 | Número de dias* em que a umidade no campo permaneceu fora dos limites do intervalo hídrico ótimo (IHO), em função dos manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE), posição na linha de semeadura e camadas de solo amostradas. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 70 |

| | | |
|----|---|----|
| 19 | Parâmetros do ajuste dos pontos da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genuchten. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 71 |
| 20 | Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 74 |
| 21 | Massa seca, massa verde (período de floração plena) e estatura (40 dias após a semeadura) de plantas de aveia em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 76 |
| 22 | Atributos biométricos do milho: nº espigas/ m^2 , massa da espiga, nº de fileiras, nº de grãos por fileira, massa de grãos, massa do sabugo, nº de grãos por espiga e massa de mil grãos em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 79 |
| 23 | Distribuição (%) e número de ocorrências (O) das classes dos espaçamentos entre plantas de milho em função do manejo e da classe. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 83 |
| 24 | Distribuição (%) e nº de ocorrência (O) das classes de espaçamento (1- normal; 2- falha; 3- duplo; 4- normal+falha; 5- normal+ duplo; 6- falha+duplo) entre plantas de milho em função da linha de semeadura e da classe. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 84 |
| 25 | Rendimento de grãos de milho em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 87 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|--------|
| 1 Precipitação pluvial durante o período do ensaio. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 19 |
| 2 Precipitação pluvial de outubro de 2010 a fevereiro de 2011. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 20 |
| 3 Disposição dos tratamentos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) nos blocos. FAMV/UPF, Passo Fundo. RS, 2011..... | 21 |
| 4 Representação esquemática dos pontos de coleta e das respectivas camadas de solo amostradas para avaliações químicas e físicas. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 23 |
| 5 Dispositivo utilizado na determinação da permeabilidade ao ar. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 26 |
| 6 Representação esquemática dos pontos de coleta e das respectivas camadas de solo amostradas para determinação da umidade do solo. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 30 |
| 7 Densidade máxima do solo ($Mg\ m^{-3}$) em função do teor de matéria orgânica (%). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 42 |
| 8 Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), porosidade de aeração (PA) de $0,1\ cm^3\ cm^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa e 3 MPa, em função do manejo plantio direto (PD). IHO = área hachurada. Linha tracejada = Ds mínima e máxima. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 58 |
| 9 Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), porosidade de aeração (PA) de $0,1\ cm^3\ cm^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa e 3 MPa, em função do manejo plantio direto escarificado (PDE). IHO = área hachurada. Linha tracejada = Ds mínima e máxima. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 60 |
| 10 Variação do intervalo hídrico ótimo no manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) em | 64 |

| | | |
|----|--|----|
| | função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): RP 2 e 3 MPa. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | |
| 11 | Variação da umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) do solo no manejo plantio direto (PD) na linha e entrelinha de semeadura de 07/01/2011 a 18/02 /2011 em função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): resistência à penetração 2 e 3 MPa do intervalo hídrico ótimo (IHO). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 67 |
| 12 | Variação da umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) do solo no manejo plantio direto escarificado (PDE) na linha e entrelinha de semeadura de 07/01/2011 a 18/02 /2011 em função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): resistência à penetração 2 e 3 MPa do intervalo hídrico ótimo (IHO). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 68 |
| 13 | Curvas de retenção de água no solo para os manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) em função das camadas de solo amostradas. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 72 |
| 14 | Massa da espiga em função da massa do sabugo. FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 80 |
| 15 | Massa da espiga em função do diâmetro do colmo. FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011..... | 81 |
| 16 | Ocorrência de massa de espigas de milho em relação aos manejos de solo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF. Passo Fundo (RS), 2011..... | 82 |
| 17 | Ocorrência e massa de espigas de milho em relação às categorias de espaçamento (1-normal; 2-falha; 3-duplo; 4- normal+falha; 5- normal+ duplo; 6-falha+duplo) entre plantas de milho na linha de semeadura. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 85 |
| 18 | Amplitude de variação, média e desvio padrão da massa das espigas dos manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011..... | 86 |

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO EM PLANTIO DIRETO
ESCARIFICADO SOBRE O RENDIMENTO DE GRÃOS DE
MILHO**

CLAUDIA KLEIN¹

RESUMO - O sistema de plantio direto tem se demonstrado um sistema conservacionista por excelência, sendo que o maior entrave do sistema é a compactação oriunda do não revolvimento do solo e pela pressão das máquinas e implementos sobre estas áreas, especialmente por não se considerar a umidade ótima de trabalho. Uma alternativa para estas áreas é a escarificação esporádica do solo que vem se mostrando cada vez mais uma prática eficiente para eliminar ou minimizar o efeito desta compactação, visando, especialmente melhorar a qualidade estrutural do solo para o desenvolvimento das culturas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as alterações nas propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Vermelho distrófico húmico de Passo Fundo (RS), sob sistema de plantio direto a 12 anos, bem como, o efeito da escarificação nas propriedades do solo e no desenvolvimento da aveia e no rendimento de grãos de milho. As variáveis analisadas foram: densidade do solo e dos sólidos, densidade relativa, volume de poros, intervalo hídrico ótimo, retenção de água pelo solo, variação da armazenagem de água na linha e entrelinha de semeadura, condutividade hidráulica saturada do solo e parâmetros biométricos das culturas da aveia preta (massa verde,

¹ Enga Agra Mestranda do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal.

massa seca, altura) e do milho (massa de espiga, grãos, sabugo, diâmetro do colmo) e os espaçamentos entre plantas de milho. Concluiu-se que a escarificação é uma prática eficiente para minimizar a compactação do solo e diminuir a densidade do solo, densidade relativa, aumenta a porosidade total em especial os macroporos, reduz a resistência a penetração, aumenta o volume de água disponível as plantas, e é capaz de proporcionar maiores rendimentos de massa seca no caso da aveia, proporcionando assim maior palhada no sistema, e maior rendimento de grãos de milho.

Palavras chaves: plantio direto escarificado, intervalo hídrico ótimo, distribuição de plantas e rendimento de grãos

**PHYSICAL, HYDRAULIC, AND MECHANICAL
PROPERTIES OF AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE
CHISELED ON CORN YIELD**

ABSTRACT – The no-tillage has proved to be a conservationist system for excellence, being the compaction originated from the unplowed soil and pressure exerted by the machines and machinery on these areas the major obstacle of this system, especially for not considering the optimum moisture content. An alternative for these areas is sporadic soil chiseling that has proven to be increasingly efficient to eliminate or minimize the effect of this compaction, aimed at improving the soil structure quality for crop development. The goal of this study was to evaluate the changes in the physical, hydraulic and mechanical properties of a Dystrophic Red Oxisol humic in Passo Fundo (RS), under no-tillage system for 12 years, as well as, the effect of chiseling in the soil properties and the oat development and corn yield. The following parameters were measured: bulk and particle density, relative density, porosity, least limit water range, soil water retention, variation of water storage in the row and interrow, saturated soil hydraulic conductivity and biometric parameters of black oat (fresh and dry mass, height) and corn (ear, grain and corncob mass, culm diameter) and corn plant density. Concluded that chiseling is an efficient practice to minimize soil compaction and decreases soil bulk density and relative density, increases total soil porosity especially macropores, reduces the resistance to penetration, increases the water available to the plants and can provide higher yields of dry mass in oat, thereby offering more plant residue mulches, and greater corn yield.

Keywords: no-tillage chiseled, least limiting water, plant distribution and yield

1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos continua sendo um grande desafio para a humanidade, neste ano atingimos a marca de sete bilhões de pessoas no planeta terra, e que para que esta produção aconteça dois fatores são primordiais: água e solo (principal meio de cultivo ainda, pois, cultivos do tipo hidroponia e aeroponia vem sendo largamente utilizados para cultivo), é com vistas a esta realidade que os cientistas do solo visam incessantemente o manejo eficiente das áreas agrícolas já cultivadas, onde se busca cada vez mais manejos que proporcionem ótimas condições de desenvolvimento às plantas, sem que novas áreas sejam exploradas.

No Brasil especialmente na região sul na década de 70 surgiu o plantio direto, que tem como objetivo, melhorar as condições estruturais do solo, promover a rotação de culturas, manter sobre o solo resíduos vegetais, diminuindo assim os efeitos da erosão. Porém, alguns problemas relacionados à compactação vêm surgindo devido ao mau uso deste sistema.

A compactação do solo ocorre devido ao não revolvimento do solo, tráfego intenso, maquinaria pesada e ainda práticas agrícolas sem considerar a umidade do solo. A compactação aumenta a densidade do solo, diminui a aeração, impede que as raízes explorem regiões mais profundas do solo, além de diminuir a infiltração de água, diminui a disponibilidade desta para as plantas e torna o solo mais vulnerável a erosão.

É imprescindível que o solo ofereça condições ótimas para que as plantas expressem seu potencial genético, na busca destas

condições é que o uso da escarificação vem sendo proposta nos últimos anos. Os escarificadores (implementos de hastes) mobilizam o solo, não invertendo as camadas, e os estudos apontam que a escarificação esporádica de solo sob plantio direto além de romper as camadas compactadas é capaz de aumentar a aeração, infiltração e retenção de água, favorecer o crescimento das raízes promovendo maior acesso a água e oxigênio, refletindo-se em produtividade.

Partindo da hipótese que a escarificação é uma prática eficiente de descompactação em solos sob plantio direto e melhora as condições físico-hídricas para o desenvolvimento e produtividade das plantas. Para testar esta hipótese o objetivo deste estudo foi avaliar as alterações nas propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico, sob sistema de plantio direto a mais de 10 anos, o efeito da escarificação nas propriedades do solo, na variação da umidade do solo no tempo, bem como, na distribuição de plantas, desenvolvimento e rendimento do milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Qualidade do solo

Quantificar a qualidade do solo não é tarefa fácil. As dificuldades advêm do fato, de que essa qualidade do solo, depende de propriedades intrínsecas, de suas interações com o ecossistema e, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos (COSTA et al., 2006).

O solo deve funcionar como um meio de desenvolvimento e crescimento para as plantas, sem restrições ao sistema radicial e onde o fornecimento de água e nutrientes seja facilitado. A qualidade do solo pode ser mantida ou melhorada com uso de sistemas de manejo sustentáveis que colaboram para a manutenção das produtividades das culturas em longo prazo (VEZZANI & MIELNICZUK, 2009).

A qualidade física do solo esta intimamente relacionada com o seu manejo, que modifica propriedades como a densidade e a distribuição do diâmetro dos poros do solo. Situações de manejo inadequado podem resultar em compactação, o que pode acarretar na diminuição dos espaços porosos entre os agregados e ruptura destes, e diminuição do volume de poros, e aumento da densidade e da resistência do solo à penetração das raízes (DIAS JÚNIOR et al., 2007).

Propriedades como a densidade, a porosidade, a resistência do solo à penetração e a curva de retenção de água do solo têm sido comumente utilizadas para avaliar a qualidade física do solo

pela relativa facilidade de determinação e também pelo baixo custo de obtenção das medidas e por serem propriedades relacionadas diretamente ao crescimento das plantas (MARCHÃO et al., 2007; LIMA et al., 2006). Ainda a resistência à penetração apresenta maior correlação com o crescimento radicial (CARVALHO et al., 2006) e é um indicador mais sensível à compactação do solo (FREDDI et al., 2009), se comparado com a densidade do solo.

2.2 Compactação do solo

A compactação do solo, caracterizada pela redução do espaço poroso, quando este é submetido a uma pressão externa, pode ser considerado um dos principais problemas de áreas intensamente mecanizadas e um dos fatores primordiais de degradação da estrutura do solo (MOSADDEGHI et al., 2007).

A compactação é uma alteração estrutural onde ocorre uma reorganização das partículas e agregados, resultando no aumento da densidade do solo, redução da porosidade total e da macroporosidade do solo, limitando a adsorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, atrasa a emergência das plântulas e compromete o desenvolvimento da planta, podendo resultar em diminuição do rendimento (STONE et al., 2002; MODOLO et al., 2008). Estas alterações na estrutura do solo devido à compactação por pressão dos rodados das máquinas (BOTTA et al., 2008) influenciam o fluxo de gases, de água e de calor, a resistência do solo à penetração, o crescimento radicular e de plântulas e a rendimento das culturas (BOTTA et al., 2006).

O tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas para as operações de manejo, preparo do solo e colheita tem resultado na compactação de solos, sobretudo quando tais operações são realizadas em condições de umidade inadequadas (SEVERIANO et al., 2008), ou seja, fora da condição friável do solo.

A qualidade física do solo e o desenvolvimento e crescimento de plantas estão relacionados à compactação do solo (STRUDLEY et al., 2008), pois o tráfego de máquinas modifica a estrutura do solo, diminuindo a aeração e água disponível com efeitos diretos no rendimento das plantas cultivadas.

2.2.1 Compactação em plantio direto

O sistema de plantio direto (PD) tem por fundamento a ausência, ou o mínimo revolvimento do solo, além da manutenção de restos culturais sob a superfície e a adoção de práticas conservacionistas de manejo, tais como plantio em nível, terraceamento, entre outras. Porém, no PD pode ocorrer compactação superficial do solo, devido ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo (SALIRE et al., 1994; KLEIN & BOLLER, 1995; TAVARES FILHO et al., 2001).

E quando as operações agrícolas, são realizadas sem considerar a umidade do solo, pode ocorrer um aumento da área compactada do solo (PEDROTTI & DIAS JUNIOR, 1996), o que pode reduzir a infiltração e a disponibilidade de água às plantas (SECCO et al., 2004). O aumento da resistência à penetração, redução da porosidade, da continuidade dos poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água também são efeitos advindos da

compactação (KLEIN & LIBARDI, 2002; STRECK et al., 2004) e são refletidos no crescimento e na produtividade das plantas cultivadas (BRADY & WEILL, 2002).

Daniel & Maretti (1990) afirmam que a profundidade máxima do efeito da compactação imposta pelas máquinas e implementos, independentemente do tipo de solo e da massa da maquinaria, relação rodado/solo não excede a 50 cm. Em plantio direto esta compactação é superficial (DE MARIA et al., 1999) geralmente nos primeiros 20 cm do solo, isto deve-se ao não revolvimento do solo, ao efeito cumulativo do tráfego de máquinas e do mecanismo dos sulcadores nas semeadoras.

A escarificação esporádica do solo pode ser adotada para reduzir a compactação em plantio direto e, pois atua até 25 cm de profundidade, rompendo a camada compactada, e conseqüentemente, diminuindo a densidade e principalmente a resistência mecânica à penetração do solo (INOUE et al., 2002).

A eficiência da escarificação em romper as camadas compactadas de forma imediata, melhorar as propriedades físicas do solo e aumentar a produtividade das culturas (SECCO et al., 2009; KLEIN et al., 2011a) tem sido inferida por diversos trabalhos de pesquisa. Esses trabalhos demonstram que a escarificação diminui a resistência à penetração das raízes (VEIGA et al., 2007; COLET et al., 2009), a densidade do solo (TAVARES FILHO et al., 2006; KLEIN & CAMARA, 2007), a densidade relativa (KLEIN et al., 2008), aumentando a porosidade total (SILVA JUNIOR et al., 2010) condutividade hidráulica do solo e a infiltração (CAMARA & KLEIN, 2005). A distribuição dos poros também é alterada. Em geral há um

aumento de macroporos (KLEIN et al., 2008) e diminuição os poros de menores diâmetros (SECCO & REINERT, 1997), proporcionando maiores valores de retenção de água (CASTRO et al., 2010).

2.3 Densidade Relativa

A densidade relativa do solo (DR) consiste na relação entre a densidade do solo no campo e a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor (CARTER, 1990). Vários autores têm mostrado a utilidade desse indicador na caracterização da compactação e resposta das culturas em diferentes tipos de solo (HAKANSSON, 1990; SILVA et al., 1997; BEUTLER et al., 2005b).

A DR é um indicador adequado para determinar a qualidade física do solo, onde os valores ótimos ou restritivos ao desenvolvimento das plantas dependerão da espécie e das condições climáticas em questão (TORRES & SARAIVA, 1999; KLEIN, 2006).

Conforme Klein (2008) o ensaio de Proctor foi desenvolvido em razão das necessidades da engenharia civil, especificamente na mecânica de solos, sendo recente sua utilização para fins de estudo na dinâmica dos solos agrícolas. As grandes vantagens da utilização desta metodologia são o baixo custo dos equipamentos e a praticidade e rapidez da sua realização.

Beutler et al. (2005b) observaram que a DR do solo ótima, para rendimento da soja (*Glycine max* L.), em casa de vegetação, foi de 0,84 e 0,75 respectivamente, em solo argiloso (0,52 kg kg⁻¹ de argila) do que para solo de textura média (0,27 kg kg⁻¹ de argila).

Enquanto que em nível de campo, em solo de textura média sob sistema de plantio direto, a DR ótima encontrada foi de 0,80.

Marcolin (2009) apresentou valores críticos para a DR, conforme exposto na Tabela 1, que podem servir de referência para identificar a qualidade física de solos agrícolas.

Tabela 1 - Valores críticos de densidade relativa.

| Valor | Nível de compactação | Observações | Fontes |
|-------------|----------------------|--|---|
| < 0,80 | Solto | O crescimento das plantas é prejudicado pelo menor volume de água disponível e excesso de porosidade de aeração. | Beutler et al. (2005a) |
| 0,80 a 0,90 | Não compactado | Faixa considerada não restritiva ao crescimento das plantas. | Lipiec et al. (1991), Klein (2006), Reinert et al. (2008) |
| 0,90 a 0,95 | Compactado | Restrições com deformações na morfologia das raízes. | Marcolin, (2009) |
| > 0,95 | Muito compactado | Deformações significativas do sistema radicial, engrossamento e desvios no crescimento vertical, concentração na camada superficial. | Marcolin, (2009) |

Fonte: Adaptado de Marcolin, 2009.

2.4 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência à penetração (RP) das raízes tem sido frequentemente utilizada para avaliar a qualidade física do solo por ser sensível ao manejo e ter relações diretas com o crescimento radicular (FREDDI et al., 2007) e com a produtividade das plantas (BENGOUGH et al., 2001; BEUTLER et al., 2006).

A RP do solo também pode limitar a produção vegetal, o que ocorre quando a diminuição do crescimento das raízes é de tal magnitude que a água durante cultivo se reduz em relação ao nível ótimo (CARDOSO, 2007), ou seja, fica com umidade inferior a faixa entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

A RP é bastante variável (espacial e temporal), sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente da umidade do solo (MIRANDA, 2006), textura, mineralogia, matéria orgânica e principalmente da densidade do solo. A RP e a densidade são utilizadas para definir níveis a partir dos quais o solo está compactado e requer medidas corretivas. Esta propriedade pode ser usada como referência para monitorar a compactação do solo (KLEIN, 2008).

A maioria dos trabalhos já realizados adotam a seguinte classificação de RP, a) extremamente baixa: $RP < 0,01$ MPa; b) muito baixa: $0,01 \leq RP < 0,1$ MPa; c) baixa: $0,1 \leq RP < 1,0$ MPa; d) moderada: $1,0 \leq RP < 2,0$ MPa; e) alta: $2,0 \leq RP \leq 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 \leq RP < 8,0$ MPa; e g) extremamente alta: $RP > 8,0$ MPa proposta por Arshad et al. (1996).

Na literatura os valores de RP considerados restritivos ao desenvolvimento da cultura do milho divergem muito, são encontrados valores entre 1,10 a 4,70 MPa (VEEN & BOONE, 1990; ROSOLEM et al., 1999; TAVARES FILHO et al., 2001; FOLONI et al., 2003).

2.5 Água no solo

O entendimento e a quantificação da dinâmica da água no solo devem orientar a definição de estratégias de manejo do solo e da água. O conteúdo de água no solo define a aeração, a temperatura e a resistência do solo, que são afetados indiretamente pela densidade do solo e distribuição do diâmetro de poros (KUNZ et al., 2007).

O potencial em que a água se encontra no solo, exerce influência sobre as condições físicas para o crescimento das plantas (LETEY, 1985), e a curva de retenção de água no solo tem sido utilizada para descrever a dinâmica da água no solo (DEXTER & BIRD, 2001). Esta curva representa graficamente a relação entre a energia de retenção da água nos poros (potencial mátrico) e o conteúdo de água correspondente a cada tensão (BEUTLER et al., 2002).

Segundo Tormena et al. (1999) o solo constitui um reservatório ao qual se repõe, periodicamente a água retirada pela cultura, respeitando-se um valor limite inferior para a disponibilidade de água. O conceito de água disponível (AD) entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) é amplamente utilizado.

2.6 Intervalo Hídrico Ótimo

Buscando analisar os vários fatores que afetam o desenvolvimento das plantas Letey (1985) propôs o “Least Limiting Water Range”, que no Brasil foi denominado de intervalo hídrico ótimo (IHO) por Tormena et al. (1998).

O IHO, como qualquer outro indicador de qualidade física do solo deve satisfazer alguns critérios, como ser sensível às variações do manejo, quesito este que este indicador contempla (BEUTLER et al., 2009).

O IHO é determinado pela diferença entre o limite superior e inferior de disponibilidade de água no solo: o limite superior é o menor valor do teor de água dentre a capacidade de campo (CC) e aquele em que a porosidade de aeração é de 10 % da porosidade total, enquanto o limite inferior é considerado o maior valor do teor de água correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP) ou a umidade em que a resistência do solo à penetração (RP) atinge valores limitantes ao crescimento de plantas. O IHO aprimora o tradicional conceito de água disponível entre CC e PMP, adicionando as limitações associadas com a aeração e a resistência do solo à penetração. Nos solos em que os sistemas de manejo propiciam melhoria da qualidade estrutural, o IHO é igual a água disponível, entre a CC e o PMP (-1,5 MPa) (CAVALIERI et al., 2006).

Segundo Lapen et al. (2004) em solos compactados a aeração torna-se deficiente em elevados conteúdos de água, e a RP poderá restringir o desenvolvimento das plantas com o secamento do

solo, reduzindo então o conteúdo de água potencialmente disponível às plantas.

Conforme estudos de Tormena et al. (2007) a RP é a propriedade física diretamente ligada ao crescimento das plantas e reduz mais frequentemente o IHO.

Quando ocorre uma diminuição na amplitude do IHO, ou seja, a faixa de umidade ótima fica mais estreita, é um indicativo que as culturas podem sofrer um estresse hídrico com maior facilidade, em tal condição de estrutura do solo sofrerão restrições ao desenvolvimento das plantas (SILVA & KAY, 1996).

O IHO vem ganhando notoriedade, por avaliar num único parâmetro atributos físicos relacionados à qualidade do solo, sendo o indicador que melhor correlaciona-se com o crescimento e desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 2007).

2.7 Permeabilidade do solo ao ar (K_a)

Para o conhecimento mais aprofundado da permeabilidade do solo (K_a), dos processos de infiltração e redistribuição, da capacidade de retenção, e da extensão na qual a zona radicial é suprida com ar, a diferenciação da porosidade total, de acordo com o diâmetro dos poros do solo, é essencial (RIBEIRO et al., 2007).

A K_a vem sendo utilizada nos últimos anos com o intuito de avaliar a qualidade dos solos cultivados, demonstrando sensibilidade em detectar alterações na estrutura (ROSEBERG & MCCOY, 1992; KLEIN et al., 2011b). A qualidade e a quantidade do ar no solo são fatores primordiais ao crescimento radicial e aos

processos biogeoquímicos que controlam os ciclos dos nutrientes. Desta forma, a adequada troca de gases entre ambiente radicial e a atmosfera afeta o crescimento das plantas (SILVA et al., 2009).

A permeabilidade ao ar é inversamente relacionada com o conteúdo de água do solo, de modo que, quanto menor a proporção de poros preenchidos com ar, menor é a permeabilidade do solo ao ar (SILVA et al., 2009).

A K_a é um atributo físico sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo do solo e é capaz de fornecer uma descrição significativa do estado de compactação do solo (PHILLIPS & KIRKHAN, 1962).

Em áreas com PD, onde não ocorre o revolvimento do solo e a existência de bioporos torna a porosidade mais eficiente no transporte líquido e gasoso em relação ao plantio convencional, devido a manutenção da continuidade dos poros, a qual é quebrada em áreas com plantio convencional (OSUNBITAN et al., 2005; HUBERT et al., 2007).

Klein et al. (2010a) demonstram que a K_a tem relação direta com a umidade volumétrica e com a RP, pois, quanto maior a umidade ou quanto mais adensamento do solo menor é o espaço em que o ar circula, portanto menores valores de permeabilidade. O contrário também é verdadeiro, quanto maior o volume de poros livres de água maior será a permeabilidade.

2.8 Qualidade física versus plantas

Todos os anos é comum observar-se que os produtores investem quantias consideráveis em adubação, porém muitos destes esquecem de verificar um item de suma importância, a qualidade física do solo. Uma vez que o solo tem problemas físicos, como por exemplo, de compactação, ocorrerá um comprometimento do sistema radicular com consequências na absorção de água e nutrientes, sendo que todo o investimento em adubação poderá então não ser utilizado, cabe ressaltar ainda que se a precipitação durante a safra em questão for bem distribuída este fato perde sua relevância, concordando com Araujo (2008).

Segundo Kopi & Douglas (1991) a estrutura ideal do solo é aquela que possibilita uma grande área de contato raiz-solo, além de suficiente espaço poroso para o movimento de água e gases e pouca resistência do solo à penetração das raízes, daí a importância de práticas que minimizem a compactação, mas que mantêm a premissa de conservação do solo proposta no plantio direto.

Neste contexto a utilização de práticas conservacionistas de manejo do solo têm recebido grande ênfase, basicamente no que se refere à manutenção e à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos cultivados e suas implicações sobre o rendimento das culturas (ARGENTON et al., 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e clima

O experimento foi instalado no Campo Experimental da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo (FAMV - UPF), no município de Passo Fundo - RS, com altitude média de 700 m e clima subtropical chuvoso, segundo Köppen.

A menor precipitação durante o experimento (da escarificação à colheita do milho foi de 49 mm e ocorreu no mês de agosto e a maior precipitação foi no mês de setembro e foi 140 mm (Figura 1), sendo a precipitação total de 1.338 mm.

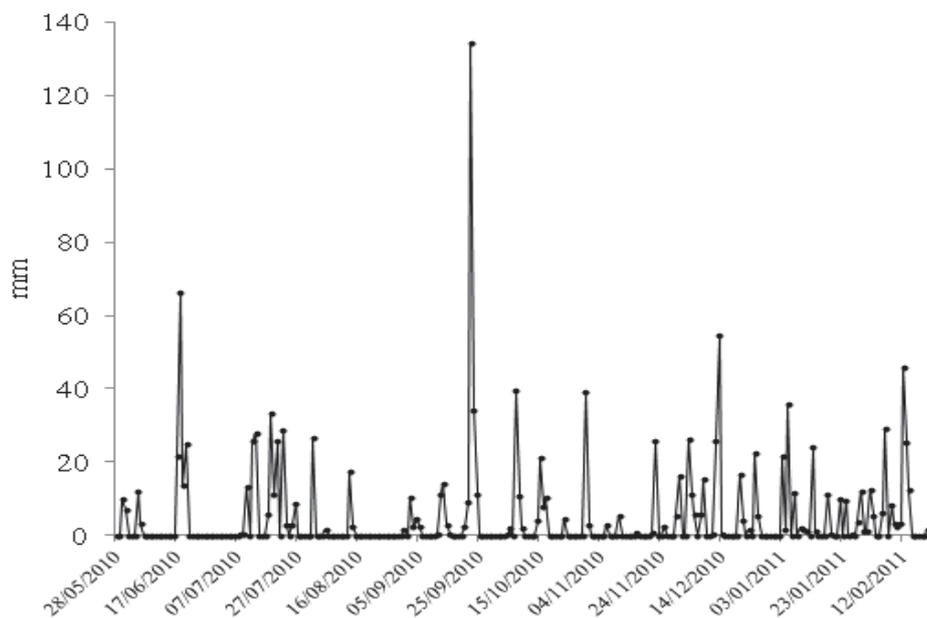


Figura 1 – Precipitação pluvial durante o período do ensaio.
FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

A precipitação durante a condução do experimento com a cultura do milho foi 714 mm, com uma média diária de 4,9 mm, conforme Figura 2, salientando-se que não ocorreram períodos de deficiência hídrica.

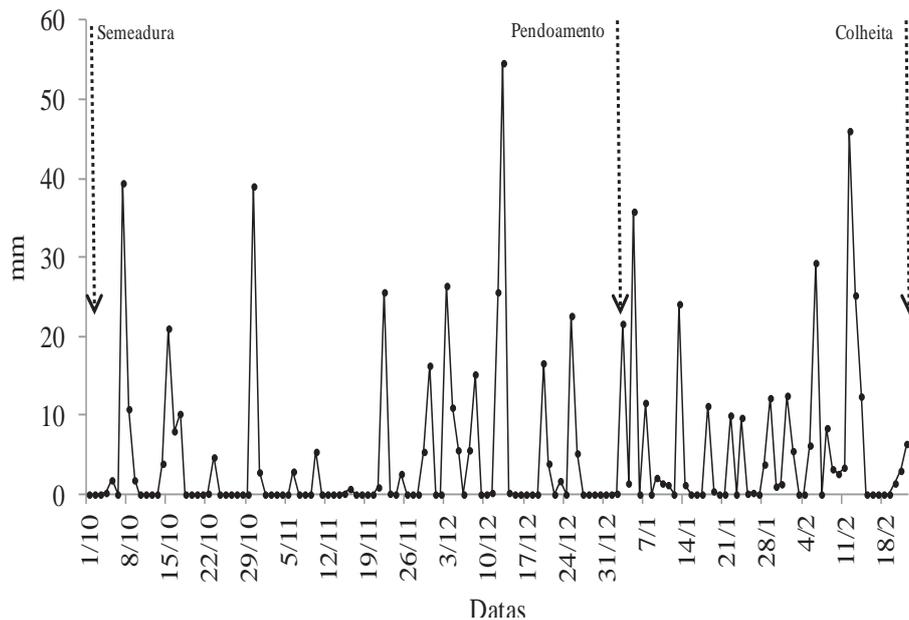


Figura 2 - Precipitação pluvial de outubro de 2010 a fevereiro de 2011. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

3.2 Solo

O solo da área experimental pertence a unidade de mapeamento Passo Fundo, classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico (STRECK et al., 2008), relevo ondulado e substrato basalto, com composição média de 0,49 kg kg⁻¹ de argila, 0,13 kg kg⁻¹ de silte e 0,38 kg kg⁻¹ de areia, classificado como solo tipo 3 no

zoneamento de risco climático, descrito na Instrução Normativa 02/2008 (BRASIL, 2008).

3.3 Histórico da área e manejos de solo

Este solo vinha sendo conduzido sob plantio direto desde o ano de 1999, com rotação de culturas no verão de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) e no inverno aveia preta (*Avena strigosa* Scherb.), trigo (*Triticum aestivum* L.) e cevada (*Hordeum vulgare* L.). O relevo do local apresenta declividade média de 2%. A área da quadra onde foi implantado o experimento foi de 5600 m², cada bloco tinha 1400 m² e cada parcela com 700 m², os tratamentos estavam dispostos conforme Figura 3.

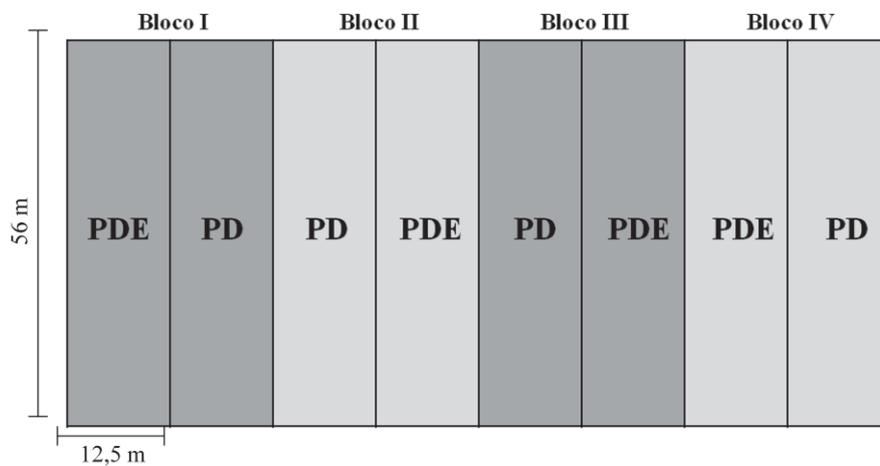


Figura 3 – Disposição dos tratamentos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) nos blocos. FAMV/UPF, Passo Fundo. RS, 2011

A escarificação foi realizada em 14 de maio de 2010, após a colheita da cultura da soja, utilizando-se um escarificador modelo Jumbo-Matic, equipado com cinco hastes de formato parabólico, espaçadas em 350 mm, ponteira com largura de 18,7 mm na extremidade e 78,2 mm no meio, discos de corte com diâmetro de 432 mm e rolo destorroador/nivelador composto por um rolo com barras transversais/helicoidais, a uma profundidade média de trabalho de 25 cm regulada pelas rodas limitadoras de profundidade. A área foi escarificada devido dados preliminares levantados que apresentaram densidade relativa próxima a crítica.

3.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições para cada tratamento. O arranjo experimental foi em parcelas sub subdivididas, alocando na parcela principal os manejos de solo, PD (desde 1999) e PDE, nas subparcelas os pontos amostrais (sete pontos) e nas sub subparcelas as camadas de solo amostradas, sendo que quando a interação entre as três variáveis não foi significativa, as tabelas apresentadas foram somente das variáveis significativas.

3.5 Análises físico-hídrico-mecânicas do solo

As amostras com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm, com o auxílio de um amostrador do tipo “Uhland”,

utilizando cilindros de aço inoxidável com cinco centímetros de diâmetro e cinco cm de altura. Uma coleta foi feita na linha e seis na entrelinha, distanciadas a 15, 30 e 45 cm da planta de milho (Figura 4), com estas amostras foi determinada a densidade do solo, retenção de água e resistência mecânica do solo à penetração, e a permeabilidade das amostras ao ar. Também retirou-se amostras com estrutura não preservada para a determinação da densidade de sólidos, granulometria e análise química.

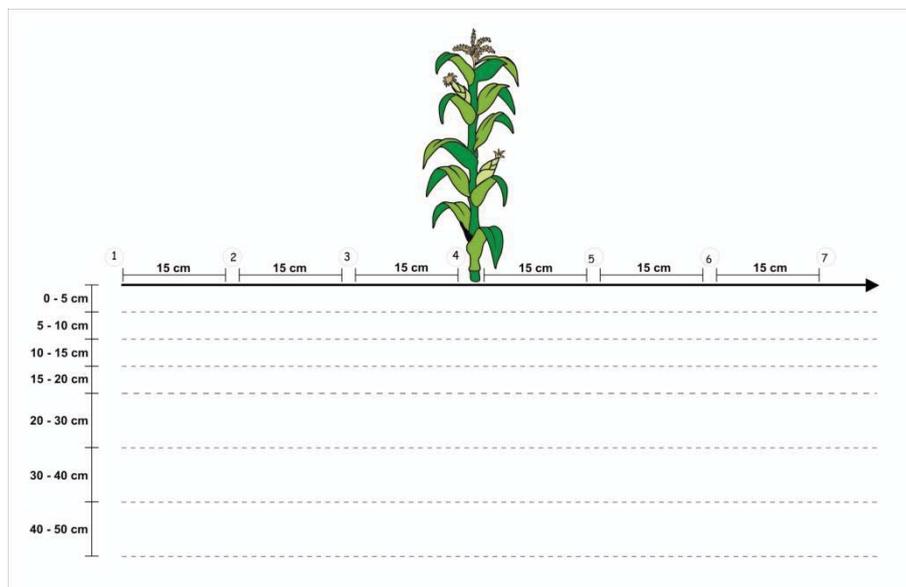


Figura 4 – Representação esquemática dos pontos de coleta e das respectivas camadas de solo amostradas para avaliações químicas e físicas. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011

A determinação da densidade dos sólidos e da densidade do solo foi realizada conforme a metodologia descrita pela Embrapa (1997).

A análise granulométrica foi obtida pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986; EMBRAPA, 1997) e a separação da fração areia foi feita por lavagem e peneiramento em peneira com malha de 0,053 mm. Depois de secas em estufa a ± 105 °C até massa constante, efetuou-se a separação das frações areia, através de peneiramento em muito grossa (> 1 mm), grossa (0,5 – 1,0 mm), média (0,25 – 0,5 mm), fina (0,105 – 0,25 mm) e muito fina ($< 0,105$ mm).

Para a determinação da densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação foi utilizado o ensaio de Proctor, na qual a amostra é compactada em um cilindro metálico de aproximadamente 1000 cm^3 , em três camadas, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30,5 cm, semelhante ao que é preconizado por Nogueira (1998) e correspondendo a uma energia de 560 kPa. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em sete ou oito umidades, com intervalos de 1,5% de umidade gravimétrica. Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo cilíndrico para determinação da umidade.

Com base nos valores de umidade e densidade do solo correspondentes, gerou-se uma equação polinomial de segundo grau, considerando-se a equação como $y=ax^2+bx+c$, os valores de densidade máxima e a umidade ótima de compactação, podem ser obtidos pelas equações 1 e 2 (KLEIN, 2008).

$$D_{\text{máx}} = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

$$U_{\text{g ótima}} = \frac{b}{-2a} \quad (2)$$

Onde:

a, b, c = parâmetros empíricos da equação de regressão

Para determinação da densidade relativa (KLEIN, 2006), foram utilizados os dados de densidade máxima do solo para todas as camadas de solo amostradas, já determinados anteriormente através do teste de Proctor normal com 560 kPa de energia, (NOGUEIRA, 1995) a DR foi calculada a partir da Equação (3):

$$DR = \frac{\text{densidade do solo}}{\text{densidade máxima do solo}} \quad 3$$

A porosidade foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade dos sólidos (EMBRAPA, 1997).

A classificação dos poros: macroporos, microporos e criptoporos foi feita aplicando tensões crescentes em funis de placa porosa. Os macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) serão determinados na tensão de 6 kPa (EMBRAPA, 1997), os criptoporos a partir de 1500 kPa (KLEIN, 1998), foram estimados pela equação de Klein et al. (2010b) considerando o teor de argila do solo, e os microporos (poros com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm) foi obtido pela diferença entre as tensões de 6 e 1500 kPa.

Foi determinada a permeabilidade ao ar das amostras de solo com estrutura preservada (Figura 5) utilizando o software desenvolvido por Silveira et al. (2011), por metodologia descrita por Silva et al. (2009) e sistema de acoplamento de amostras descrito por Klein et al., (2011b).



Figura 5 - Dispositivo utilizado na determinação da permeabilidade ao ar. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011

Para determinação da retenção de água as amostras foram devidamente preparadas e saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água em bandejas, e posteriormente foram colocadas nas tensões de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 100 e 300 kPa, para determinação da curva de retenção da água no solo. Para as tensões até 14 kPa utilizou-se funis de placas porosas (Funis de Haynes) e para as tensões superiores foram utilizadas painéis de pressão com placas porosas (Câmaras de Richards). As amostras foram submetidas às tensões até que era atingido o equilíbrio, ou seja, quando o fluxo de água cessasse.

A tensão a 1500 kPa foi estimada pelo teor de argila do solo, através da fórmula $PMP (g g^{-1}) = 0,0003 * \text{argila}(g.kg^{-1}) + 0,0118$, proposta por Klein et al. (2010b).

A umidade do solo em função do potencial mátrico foi ajustada pela equação (Equação 4) de Van Genuchten (1980), utilizando-se o software SWRC (DOURADO NETO et al., 1990) para a obtenção dos parâmetros empíricos de ajuste α , m , n , e fixando o θ_s no valor correspondente à porosidade total e θ_r como valor da umidade volumétrica a tensão de 1500 kPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 - (\alpha\Psi_m)^n]^m} \quad (4)$$

Onde: θ = Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_s = Umidade do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_r = Umidade do solo à tensão de 1500 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Ψ_m = Potencial mátrico da água no solo (kPa)

α , m , n = Parâmetros empíricos da equação.

Após atingir o equilíbrio hídrico em cada potencial as amostras foram pesadas, e no potencial de 300 kPa foi determinada a resistência mecânica do solo à penetração (RP), determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de $0,1667 \text{ mm s}^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 200 N, e haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° , receptor e interface acoplado a um microcomputador para coleta dos dados através de um software próprio do equipamento. No centro geométrico de cada amostra foi determinada a RP onde foram obtidos em torno de 250 valores e utilizados cerca de 200 valores centrais. Os valores de RP foram

ajustados a um modelo não-linear (Equação 5) proposto por Busscher (1990), que ajusta a RP em relação à densidade e umidade do solo.

$$RP = a * \theta^b * D_s^c \quad (5)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos

D_s = Densidade do solo

θ = Umidade volumétrica (m³ m⁻³)

Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufas a ± 105 °C por 24 h, para determinação da densidade do solo e umidade no solo (Θ).

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), calculou-se a porosidade de aeração (PA) mínima de 0,10 m³ m⁻³ (GRABLE & SIEMER, 1968; SOJKA, 1992), o ponto de murcha permanente (PMP) de 1500 kPa (RICHARDS & WEAVER, 1944), a capacidade de campo (CC) de 6 kPa (HAISE et al., 1955; VIEIRA, 2006) e a resistência a penetração (RP) de 2 MPa (TAYLOR et al., 1966) e 3 MPa.

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório foram utilizadas amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros volumétricos com volume de aproximadamente 268 cm³, coletadas nas camadas de 0-7,5 cm, 3-10,5 cm, 6-13,5 cm, 9-16,5 cm, 12-19,5 cm, 15-22,5 cm, um ano após a realização da escarificação. Essas amostras foram saturadas gradualmente em laboratório, e colocadas em um permeâmetro de carga constante (YOUNGS, 1991), coletou-se o volume de água

percolado em um determinado tempo até que este volume estabilizou-se, calculou-se a condutividade através da equação 6, que representa a equação simplificada de Darcy.

$$K_o = \frac{Q * L}{A * H * t} \quad (6)$$

Onde:

K_o = condutividade hidráulica

Q = volume percolado

L = altura da amostra

H = altura da amostra + coluna de água

A = área do cilindro

t = tempo

3.6 Variação da umidade no solo

Do pendoamento à colheita do milho (07/01/2011 a 18/02/2011) realizou-se o monitoramento da variação da umidade no solo, coletando-se a cada dois dias amostras deformadas com trado de rosca, para determinação da umidade do solo, nos pontos representados na Figura 6. Coletaram-se amostras nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm, as amostras foram acondicionadas em potes plásticos vedados e levadas imediatamente para pesagem em laboratório. Foram secas em estufa a ± 105 °C até massa constante, transcorrido esse período determinava-se a massa seca das amostras para cálculo da umidade.

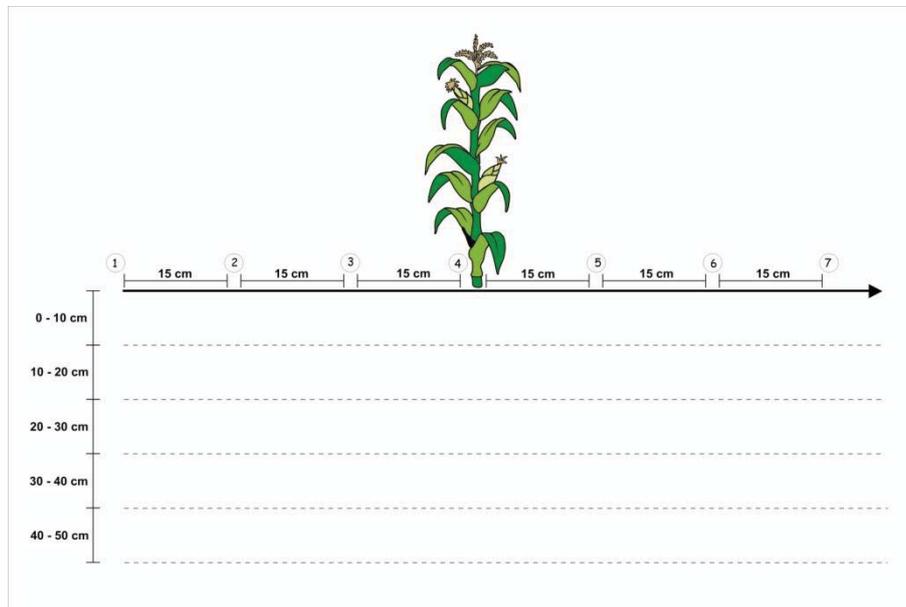


Figura 6 – Representação esquemática dos pontos de coleta e das respectivas camadas de solo amostradas para determinação da umidade do solo. FAMV/UPF, Passo Fundo, RS, 2011

3.7 Instalação e manejo da cultura da aveia

Depois de realizada a escarificação, semeou-se aveia preta (*Avena strigosa* Scherb.) em 28 de maio 2010, com a finalidade de realizar cobertura de solo. Foi realizada uma aplicação de ureia em cobertura em 07 de julho de 2010, seguindo recomendações do manual de adubação e calagem para os estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004).

Foi determinada a estatura das plantas de aveia em 07 de julho de 2010, 40 dias após a semeadura e foram sorteadas aleatoriamente 20 plantas por tratamento em cada parcela para

determinação desta variável. As coletas para determinação da massa seca e massa verde foram feitas no período de floração plena (08 de setembro de 2010), constando de uma amostra de 0,25 m² por tratamento em cada parcela, realizada aleatoriamente, as amostras foram posteriormente secas em estufa a ± 65 °C até massa constante.

3.8 Instalação e manejo da cultura do milho

A semeadura do milho (*Zea mays* L.) híbrido P1630H[®], com tratamento de sementes com inseticidas a base de Tiametoxam (2,1 g.i.a/kg) e Fipronil (0,15 g.i.a/kg) foi realizada no dia 01 de outubro de 2010, utilizando-se uma semeadora adubadora de plantio direto modelo PDM Plus 700, marca Metasa, espaçamento de 0,9 m entre linhas, população final de seis plantas por metro na linha de semeadura, adubação na base de 0,35 Mg ha⁻¹ kg da fórmula 5-20-20, a umidade no momento da semeadura foi de 0,21 kg.kg⁻¹ realizou-se também duas aplicações de nitrogênio em cobertura quando as plantas apresentavam três e seis folhas, conforme recomendação do manual (CQFS- RS/SC, 2004). Realizou-se também em 28 de outubro de 2010 uma aplicação de Atrazina e Simazine, 2500 g i.a./ha a fim de eliminar as plantas infestantes.

A colheita foi realizada em 22 de fevereiro de 2011, colhendo-se de forma individual as espigas dos seis metros centrais das linhas, mediu-se o diâmetro de colmo, logo acima do primeiro nó dessas plantas, e ainda foi medida a distância entre as plantas. Calculou-se a média e o desvio padrão dos espaçamentos entre as

plantas de cada linha, assim gerou-se três classes principais denominadas conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classes de espaçamento entre plantas de milho. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Classe | Espaçamento |
|--------|-----------------------------------|
| Normal | Média \pm desvio padrão |
| Falha | Maior que a média + desvio padrão |
| Duplo | Menor que a média – desvio padrão |

E considerando-se o espaçamento antes e depois da planta geraram-se seis classes (Tabela 3), desconsiderou-se a primeira e última planta de cada linha.

Tabela 3 – Classificação dos espaçamentos entre plantas e classes de espaçamento. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Espaçamento 1 | Espaçamento 2 | Classe |
|---------------|---------------|--------|
| Normal | Normal | 1 |
| Falha | Falha | 2 |
| Duplo | Duplo | 3 |
| Normal | Falha | 4 |
| Falha | Normal | 4 |
| Normal | Duplo | 5 |
| Duplo | Normal | 5 |
| Falha | Duplo | 6 |
| Duplo | Falha | 6 |

As espigas foram colhidas manualmente e colocadas em sacos de papel identificando-se a linha, posição na linha e o manejo adotado. Foram coletadas 1115 espigas, sendo 559 unidades do PD e 556 unidades do PDE, estas foram pesadas com a umidade de colheita, contabilizou-se o número de linhas, o número de grãos por linha. Depois as espigas foram debulhadas e os grãos peneirados para eliminação das impurezas, determinou-se a massa de grãos e a massa do sabugo (ráquis). A massa de mil grãos foi avaliada pela contagem manual de 100 grãos escolhidos aleatoriamente (2 repetições), pesados e secos em estufa a ± 105 °C e a umidade foi corrigida para 13% (base úmida).

3.9 Análise do teor de matéria orgânica

A análise do teor de matéria orgânica do solo foi realizada 12 meses após a escarificação, na resteva da cultura do milho, e foi realizada por camadas (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm), e foram encaminhadas ao laboratório de rotina da FAMV/UPF, processadas seguindo procedimento padrão de análises para os estados do RS e SC, conforme metodologia proposta por Tedesco (1995).

3.10 Análise estatística dos resultados

Os dados foram submetidos à análise de variância e os dados significativos foram comparados através do teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo

4.1.1 Textura do solo

A análise granulométrica foi realizada com fins de caracterização do local (Tabela 4), pois após a realização da escarificação, poderia ocorrer uma inversão das camadas do solo, alterando essa distribuição, o que não aconteceu neste estudo.

Analisando os resultados, observa-se que o solo não apresenta grande amplitude de variação em relação especialmente aos teores de argila, silte e areia, porém a fração argila aumenta em profundidade. Destaca-se ainda que em ambos os manejos a predominância das frações de areia média e areia fina.

A textura do solo é a propriedade física que menos sofre alteração no decorrer do tempo e tem grande influência no manejo da irrigação, pois está relacionada com a capacidade de retenção de umidade (KIMATURA et al., 2007), infiltração, permeabilidade às raízes e aeração (VIEIRA et al., 1988), solos argilosos como neste caso, tendem a reter mais água nos poros e também na condição de murcha permanente.

Tabela 4 – Teores de argila, silte, areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF)* em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Camada (cm) | Argila | Silte | AT | Areia | | | | |
|--------|-------------|--------|-------|-----|-------|------|-------|-------|------|
| | | | | | AMG | AG | AM | AF | AMF |
| | 0-5 | 430 | 150 | 420 | 1,03 | 2,92 | 40,27 | 49,37 | 6,41 |
| | 5-10 | 450 | 140 | 410 | 0,87 | 2,81 | 44,41 | 44,64 | 7,27 |
| | 10-15 | 470 | 140 | 390 | 1,91 | 2,41 | 37,23 | 51,64 | 6,81 |
| PD | 15-20 | 470 | 140 | 390 | 1,71 | 2,20 | 37,61 | 51,56 | 6,92 |
| | 20-30 | 500 | 140 | 360 | 1,77 | 3,28 | 33,56 | 55,21 | 6,18 |
| | 30-40 | 540 | 120 | 340 | 1,51 | 3,19 | 23,53 | 62,09 | 9,68 |
| | 40-50 | 590 | 120 | 290 | 1,08 | 1,71 | 33,30 | 58,76 | 5,15 |
| Média | | 492 | 135 | 371 | 1,41 | 3,10 | 35,70 | 53,32 | 6,92 |
| | 0-5 | 440 | 130 | 430 | 4,14 | 7,59 | 35,69 | 45,72 | 6,86 |
| | 5-10 | 440 | 130 | 430 | 1,39 | 4,06 | 31,34 | 54,23 | 8,98 |
| | 10-15 | 450 | 120 | 430 | 1,12 | 2,57 | 45,38 | 43,95 | 6,98 |
| PDE | 15-20 | 450 | 130 | 420 | 1,03 | 4,05 | 47,33 | 41,64 | 5,95 |
| | 20-30 | 450 | 130 | 420 | 1,21 | 3,54 | 46,23 | 42,60 | 6,42 |
| | 30-40 | 490 | 130 | 390 | 1,61 | 1,96 | 45,66 | 45,58 | 5,19 |
| | 40-50 | 540 | 110 | 350 | 1,06 | 2,05 | 36,18 | 52,47 | 8,24 |
| Média | | 480 | 125 | 407 | 1,65 | 3,69 | 41,11 | 46,60 | 6,95 |

* Média de duas repetições.

4.1.2 Densidade dos sólidos do solo (Dss)

Os valores de Dss (Tabela 5) não apresentaram diferença entre os tratamentos, por se tratar de uma característica inerente a formação do solo. Os menores valores de Dss encontrados na camada de 0-5 cm justificam se pelo maior aporte de matéria orgânica (MO), acima de 3% nesta camada (Tabela 8), especialmente no manejo PD. Os solos com alto teor de matéria orgânica têm Dss menor que $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$, devido à baixa densidade dos materiais orgânicos (FAGUERIA & STONE, 2006), pois segundo Kiehl (1979) o valor de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ que se refere a média de densidade dos principais constituintes do solo (quartzo, feldspatos, silicatos), logo um solo com alto teor de MO apresentará menor Dss.

Tabela 5 – Densidade dos sólidos do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|----------------|--------------|--------------------|---|-------------|--------------------|----|-------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | | Mg m^{-3} | | | Mg m^{-3} | | |
| 0-5 | B | 2,64 | b | A | 2,74 | a | 2,69 |
| 5-10 | A | 2,75 | a | A | 2,76 | a | 2,76 |
| 10-15 | A | 2,74 | a | A | 2,74 | a | 2,74 |
| 15-20 | A | 2,77 | a | B | 2,69 | ab | 2,73 |
| 20-30 | A | 2,71 | b | A | 2,76 | a | 2,74 |
| 30-40 | A | 2,77 | a | B | 2,72 | b | 2,74 |
| 40-50 | A | 2,75 | a | B | 2,73 | a | 2,74 |
| Média | | 2,73 | | | 2,73 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 1,41 | | | Camada=1,13 | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

No manejo PD os menores valores de Dss foram obtidos nas camadas de 0-5 cm e 20-30 cm, as demais camadas apresentaram valores superiores. No PDE o menor valor de Dss foi obtido na camada de 30-40 cm.

4.1.3 Densidade do solo (Ds)

Os maiores valores de Ds em função do manejo do solo e a camada de solo amostrada (Tabela 6), foram obtidos no PD, e os menores no PDE, resultados semelhantes aos obtidos por Klein & Camara (2007) e Klein et al. (2008). Maiores valores de Ds no PD podem ser decorrentes da ausência de revolvimento do solo, ocasionando maior compactação, ou quantidade de resíduos culturais ainda não suficientes para aumentar os estoques de matéria orgânica que possibilitem, gradativamente, a diminuição da densidade (OLIVEIRA et al., 2004; ASSIS & LANÇAS, 2005).

No PDE as camadas 5-10 cm e 10-15 cm apresentaram valores menores de Ds em relação ao PD. Os menores valores de Ds para ambos os manejos foram encontrados na camada de 40-50 cm. As camadas de 0-5 cm, 20-30 cm e 40-50 cm não apresentaram diferença estatística entre os manejos.

Tabela 6– Densidade do solo (Ds) do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|-------------|--------------------|------|----|--------------|------|-----|-------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | Mg m ⁻³ | | | | | | |
| 0-5 | A | 1,21 | cd | A | 1,19 | cd | 1,20 |
| 5-10 | A | 1,33 | ab | B | 1,22 | cd | 1,27 |
| 10-15 | A | 1,34 | ab | B | 1,26 | abc | 1,30 |
| 15-20 | A | 1,31 | ab | A | 1,30 | ab | 1,30 |
| 20-30 | A | 1,35 | a | A | 1,32 | a | 1,33 |
| 30-40 | A | 1,27 | bc | A | 1,23 | bcd | 1,25 |
| 40-50 | A | 1,18 | d | A | 1,17 | d | 1,18 |
| Média | | 1,28 | | | 1,24 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 8,68 | | | Camada= 4,86 | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tormena et al. (2007) em Latossolo Vermelho distroférico também obtiveram menores valores de densidade em PDE quando compararam este com PD com rotação de culturas e PD com sucessão. Azevedo et al. (2007) obtiveram Ds menor em PD em solo do Maranhão quando compararam PD, PDE e plantio convencional (PC) especialmente na camada de 0-5 cm, o que não ocorreu neste estudo.

Os valores de densidade encontrados nos diferentes preparos de solo independente da camada de solo estão abaixo dos valores considerados limitantes, conforme a classificação de Reichert et al. (2007), que são >1,39 Mg m⁻³ para solos de textura argilosa.

Os maiores valores de D_s foram encontrados na camada de 25 cm, justificando a presença de um possível resquício de “pé de arado” (CAMARGO, 1983), da época em que esse solo foi arado em muitas ocasiões de preparo do solo, Marcolin (2006) também já havia percebido este fenômeno. A escarificação não foi eficiente para romper esta camada de maior densidade, pois o escarificador não trabalhou na profundidade efetiva de 25 cm, já que abaixo desta camada as densidades são menores demonstrando que o efeito da pressão da maquinaria não atingiu estas.

4.1.4 Densidade máxima do solo (DMS) e umidade ótima de compactação (UOC)

Os valores de densidade máxima do solo foram obtidos por meio de ensaio de proctor normal, as equações obtidas por camada de solo e seus coeficientes de determinação (r^2) estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e umidade ótima de compactação (UOC) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Camada (cm) | Equação | r ² |
|--------|-------------|--|----------------|
| PD | 0-5 | DMS = -33,348Ug ² +15,671 Ug -0,366 | 0,951 |
| | 5-10 | DMS = -29,636Ug ² +13,780 Ug -0,053 | 0,998 |
| | 10-15 | DMS = -19,676Ug ² +8,132 Ug +0,709 | 0,965 |
| | 15-20 | DMS = -40,619Ug ² +17,225 Ug-0,254 | 0,915 |
| | 20-30 | DMS = -50,851Ug ² +22,337 Ug-0,862 | 0,937 |
| | 30-40 | DMS = -58,910Ug ² +26,185 Ug -1,329 | 0,960 |
| | 40-50 | DMS = -52,801 Ug ² +25,685 Ug-1,577 | 0,941 |
| PDE | 0-5 | DMS = -32,665Ug ² +16,257 Ug-0,553 | 0,946 |
| | 5-10 | DMS = -31,515Ug ² +14,482 Ug -0,133 | 0,936 |
| | 10-15 | DMS = -72,701Ug ² +34,247 Ug -2,476 | 0,922 |
| | 15-20 | DMS = -48,327Ug ² +21,174 Ug -0,740 | 0,962 |
| | 20-30 | DMS = -12,216Ug ² +5,332 Ug +0,990 | 0,999 |
| | 30-40 | DMS = -51,183Ug ² +24,887 Ug -1,477 | 0,955 |
| | 40-50 | DMS = -25,146Ug ² +13,000 Ug -0,195 | 0,943 |

O maior valor de densidade máxima do solo (1,59 g cm⁻³) para PD foi obtido na camada 20-30 cm e o menor na camada de 0-5 cm (1,47 g cm⁻³). Já no PDE o maior valor de DMS foi obtido na camada de 15-20 cm (1,58 g cm⁻³) e o menor valor também na camada de 0-5 cm (Tabela 8).

Tabela 8 – Umidade ótima de compactação (UOC), densidade máxima do solo (DMS) e matéria orgânica (MO) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Camada (cm) | UOC (kg kg ⁻¹) | DMS (g cm ⁻³) | MO* (%) |
|--------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------|
| PD | 0-5 | 0,23 | 1,47 | 3,20 |
| | 5-10 | 0,23 | 1,55 | 2,40 |
| | 10-15 | 0,21 | 1,55 | 2,20 |
| | 15-20 | 0,21 | 1,51 | 2,20 |
| | 20-30 | 0,22 | 1,59 | 1,95 |
| | 30-40 | 0,22 | 1,58 | 1,90 |
| | 40-50 | 0,24 | 1,55 | 1,75 |
| | Média | | 0,22 | 1,54 |
| PDE | 0-5 | 0,25 | 1,47 | 3,00 |
| | 5-10 | 0,24 | 1,56 | 2,20 |
| | 10-15 | 0,23 | 1,53 | 2,30 |
| | 15-20 | 0,22 | 1,58 | 2,05 |
| | 20-30 | 0,22 | 1,57 | 2,60 |
| | 30-40 | 0,24 | 1,55 | 2,20 |
| | 40-50 | 0,25 | 1,48 | 2,05 |
| | Média | | 0,24 | 1,53 |

*Médias de 2 repetições.

Os menores valores de DMS na primeira camada de solo são justificados pelo maior aporte de MO (Tabela 8). Mentges et al. (2007), encontram menores valores de DMS em PD, segundo eles isso deve-se efeito da MO em dissipar parte da energia aplicada, e ainda pela menor densidade da MO (Figura 7).

O maior aporte de MO foi constatado na primeira camada em ambos os manejos, diminuindo em profundidade como já era esperado. O teor de MO é considerado baixo, em PD 2,5 % e PDE 2,39 % na média. Torres et al. (1999), a escarificação preserva grande parte dos resíduos na superfície do solo, com pequeno impacto nos teores de matéria orgânica.

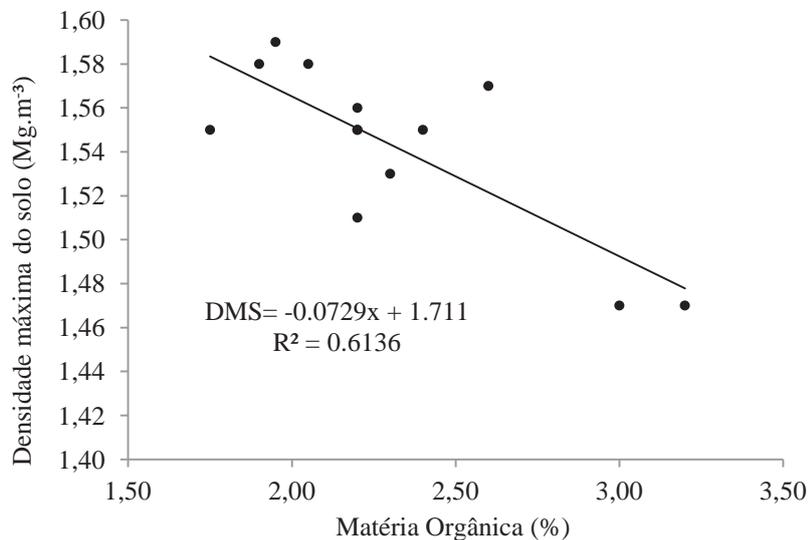


Figura 7 – Densidade máxima do solo (Mg m^{-3}) em função do teor de matéria orgânica (%). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

Na média a DMS foi maior no PD $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ em PDE. Quanto aos valores de UOC, estes foram maiores no PDE ($0,24 \text{ kg kg}^{-1}$) do que no PD ($0,22 \text{ kg kg}^{-1}$).

Durigon et al. (2007) comparando os sistemas de PD e PDE em Latossolo Vermelho Distrófico Típico encontraram DMS semelhante entre profundidades (2,5 cm a 27,5 cm) e os manejos, ficando em torno de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$, já a umidade ótima de compactação foi de $0,22 \text{ kg kg}^{-1}$, resultados estes bem próximos aos encontrados neste estudo, que foram na média $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$ de UOC e $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ de DMS, reforçando a ideia de que a metodologia da densidade máxima obtida pelo ensaio de proctor é de boa repetibilidade.

Figueiredo et al. (2000) estudando um Latossolo Roxo diferentes sob sistemas de preparo do solo (PD, PDE e PC) em diferentes épocas de amostragem, concluíram que a DMS não varia com o tempo e que a UOC deste solo era de $0,29 \text{ kg kg}^{-1}$, as operações motomecanizadas deveriam ser executadas quando a umidade fosse menor do que esta.

4.1.5 Densidade relativa (DR)

A DR média foi maior no PD do que no PDE (Tabela 6). O maior valor de DR no PDE na camada de 20-30 cm justifica-se pela maior D_s , já que a densidade máxima do solo foi semelhante em ambos os manejos e camadas de solo (Tabela 9). Os valores obtidos de DR não são considerados impeditivos ao desenvolvimento das culturas, conforme Reinert et al. (2008) valores de DR de 0,80 a 0,90 não são indicativos de solos compactados e valores de $DR < 0,80$ é considerado um indicativo de solo solto, com excesso de porosidade de aeração (BEUTLER et al., 2005a) o que ocorreu nas camadas de 30-40 cm e 40-50 cm.

A DR na camada superficial e na camada de 30-40 cm foi estatisticamente igual entre os manejos de solo. A menor DR no PD foi obtida na camada de 40-50 cm.

Tabela 9 – Densidade relativa do solo do solo em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada do solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|----------------|--------|--------------|----|-----|------|--------------|-------|
| | PD | | | PDE | | | |
| 0-5 | A | 0,82 | ab | A | 0,81 | ab | 0,82 |
| 5-10 | A | 0,86 | a | B | 0,78 | b | 0,82 |
| 10-15 | A | 0,86 | a | B | 0,82 | ab | 0,84 |
| 15-20 | A | 0,86 | a | B | 0,82 | ab | 0,84 |
| 20-30 | A | 0,85 | ab | A | 0,84 | a | 0,84 |
| 30-40 | A | 0,80 | ab | A | 0,79 | ab | 0,79 |
| 40-50 | A | 0,76 | c | A | 0,79 | ab | 0,77 |
| Média | | 0,83 | | | 0,81 | | |
| C.V. (%) | | Manejo= 8,68 | | | | Camada= 4,88 | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Beutler et al. (2005b) afirmam que a DR ótima para rendimento da soja em casa de vegetação em solo argiloso é de 0,84 e para solos de textura média. Já Klein (2006) concluiu que em Latossolo Roxo argilosos a DR ótima para o desenvolvimento das plantas é de 0,72.

Ressalta-se que a escarificação mobilizou o solo até aproximadamente 20 cm de profundidade, pois abaixo desta profundidade os valores de DR não apresentaram diferenças estatísticas.

4.1.6 Porosidade do solo e distribuição do diâmetro dos poros

O volume de poros totais, macroporos, microporos e criptoporos estão apresentados na Tabela 10.

A porosidade total (Pt), foi maior no PDE do que no PD, devido ao revolvimento do solo. Os maiores valores de poros totais foram obtidos na camada de 40-50 cm e os menores nas camadas de 10 cm até 30 cm. Nas três primeiras camadas e na camada de 20-30 cm a porosidade total foi menor em PD do que em PDE.

A compactação do solo pode acarretar um decréscimo na porosidade total, refletindo principalmente na redução do volume de macroporos e aumentando a microporosidade (SILVA et al., 2006).

O volume de macroporos teve diferença estatística entre os manejos de solo, demonstrando que após um ano da realização da escarificação, os poros ainda não voltaram à forma estrutural inicial, apresentando-se assim maior volume deste. Na média dos manejos o menor volume de macroporos foi encontrado na camada de 25 cm.

O volume de macroporos variou de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valores estes considerados adequados ao desenvolvimento das plantas, em termos de aeração das raízes, cujo limite é considerado $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REYNOLDS et al., 2002) conforme os mesmos autores o revolvimento do solo promove um aumento temporário dos macroporos, e este revolvimento em casos de áreas compactadas é uma garantia de aeração ao sistema radicular.

A redução da macroporosidade nas áreas cultivadas por vários anos, provavelmente, está relacionada com o tipo de manejo

adotado (MATIAS et al., 2009), para Carter & Kunelius (1986) a macroporosidade é um índice bastante útil na avaliação das modificações estruturais ocasionadas pelo manejo de solo.

O volume de microporos foi maior no PDE, e a maior concentração dos poros de água disponível para ambos os manejos foi na camada de 0-5 cm. Nas camadas de 0-5 e 5-10 cm e na camada de 20-30 cm os microporos foram menores em PD do que em PDE, nas demais camadas este volume foi estatisticamente igual para os manejos.

A lâmina de água armazenada no microporos no manejo PD até a profundidade de 50 cm foi 73,00 mm no PDE esta lâmina foi de 78,50 mm. Esta diferença no volume de microporos resulta numa lamina de água superior do PDE de 5,5 mm. Isso significa 1,46 mm de água por centímetro de solo no PD e no PDE 1,57 mm H₂O/cm solo.

O volume de criptoporos foi maior no PD, ou seja, um maior volume de água fica retido nestes poros e não ficam disponíveis as plantas. Em PDE os menores volumes de criptoporos foram encontrados nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm de profundidade. Já em PD o menor volume de criptoporos foi na primeira camada de solo.

Tabela 10 – Porosidade total (Pt), macroporos, microporos e criptoporos em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | PD | | | PDE | | | Médias |
|-------------------------|--------------------------------|------|-----|---------------|------|-----|---------|
| | m ³ m ⁻³ | | | | | | |
| Porosidade Total | | | | | | | |
| 0-5 | B | 0,53 | b | A | 0,56 | ab | 0,55 |
| 5-10 | B | 0,51 | bcd | A | 0,55 | ab | 0,53 |
| 10-15 | B | 0,51 | cd | A | 0,54 | bcd | 0,52 |
| 15-20 | A | 0,52 | bc | A | 0,51 | d | 0,52 |
| 20-30 | B | 0,50 | d | A | 0,52 | cd | 0,51 |
| 30-40 | A | 0,54 | b | A | 0,54 | abc | 0,54 |
| 40-50 | A | 0,57 | a | A | 0,56 | a | 0,56 |
| Média | | 0,52 | | | 0,54 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 7,49 | | | Camada= 4,19 | | | |
| Macroporos | | | | | | | |
| 0-5 | | 0,16 | | | 0,17 | | 0,17 ab |
| 5-10 | | 0,18 | | | 0,20 | | 0,19 a |
| 10-15 | | 0,15 | | | 0,20 | | 0,17 ab |
| 15-20 | | 0,18 | | | 0,17 | | 0,17 ab |
| 20-30 | | 0,14 | | | 0,16 | | 0,15 b |
| 30-40 | | 0,17 | | | 0,18 | | 0,18 a |
| 40-50 | | 0,19 | | | 0,20 | | 0,19 a |
| Média | B | 0,17 | | A | 0,18 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 26,47 | | | Camada= 20,18 | | | |
| Microporos * | | | | | | | |
| 0-5 | B | 0,19 | a | A | 0,21 | a | 0,20 |
| 5-10 | B | 0,13 | c | A | 0,17 | b | 0,15 |
| 10-15 | A | 0,14 | bc | A | 0,15 | c | 0,14 |
| 15-20 | A | 0,14 | bc | A | 0,14 | c | 0,14 |
| 20-30 | B | 0,13 | c | A | 0,15 | bc | 0,14 |
| 30-40 | A | 0,15 | bc | A | 0,15 | c | 0,15 |
| 40-50 | A | 0,15 | b | A | 0,15 | c | 0,15 |
| Média | | 0,15 | | | 0,16 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 18,31 | | | Camada= 11,11 | | | |
| Criptoporos * | | | | | | | |
| 0-5 | A | 0,17 | c | A | 0,17 | e | 0,17 |
| 5-10 | A | 0,20 | b | B | 0,18 | de | 0,19 |
| 10-15 | A | 0,20 | ab | B | 0,18 | cd | 0,19 |
| 15-20 | A | 0,20 | b | A | 0,19 | ab | 0,20 |
| 20-30 | A | 0,21 | a | B | 0,20 | ab | 0,21 |
| 30-40 | A | 0,21 | a | B | 0,20 | ab | 0,20 |
| 40-50 | A | 0,21 | a | A | 0,21 | a | 0,21 |
| Média | | 0,20 | | | 0,19 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 8,61 | | | Camada= 4,77 | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. * Significativo a 1% de probabilidade de erro.

A menor quantidade de criptoporos foi nos primeiros dez centímetros de profundidade, ou seja, este espaço é ocupado por outros tipos de poros. O volume de criptoporos aumentou em profundidade, quanto mais profundo o perfil do solo maior é a quantidade de água retida nestes poros, ou seja, maior a quantidade de água não disponível as plantas.

O aumento da retenção de água no manejo PDE na tensão de 1500 kPa foi maior, indicando que a modificação no espaço poroso pela compactação pode ter beneficiado a formação de poros capilares menores, onde a água é retida com mais energia (SILVA et al., 2006).

Mesmo neste solo, em que não foram obtidos indicadores graves de compactação, a escarificação do solo melhorou as propriedades físico-hídricas do solo estudado.

4.1.7 Permeabilidade do solo ao ar

Para os valores de permeabilidade do solo ao ar (Tabela 11) não ocorreu diferença estatística quanto ao manejo adotado. Schaffrath et al. (2008) relatam que no PD devido a ação de processos biológicos ser mais predominante o espaço poroso tende a ser vasto, ocasionando uma grande variabilidade de poros desde que não haja compactação, e como a escarificação somente mobiliza o solo e não o desestrutura, e após um ano o espaço poroso tende a reorganizar-se justifica-se não haver diferença entre os manejos.

A maior permeabilidade no PDE foi obtida nas duas primeiras camadas de solo, já no PD a permeabilidade não apresentou diferença estatística até a camada de 30-40 cm. Para ambos os

manejos observa-se um decréscimo da permeabilidade conforme a profundidade aumenta. Em média até a camada de 30 cm a permeabilidade foi o dobro em PDE do que em PD.

Os valores de C.V. altos justificam-se pela avaliação tratar-se do espaço poroso do solo, e qualquer alteração nas amostras (choques no transporte e processamento, ciclos de umedecimento-secagem) podem alterar a determinação, sendo ainda que estas amostras podem apresentar bioporos, espaços vazios devido ao apodrecimento de raízes, poros interligados e entre outros fatores que aumentam significativamente o coeficiente de variação (Tabelas 11, 12, 13). Para Silva et al. (2009) a permeabilidade é dependente do conteúdo de água e da densidade, pois influenciam diretamente a geometria e continuidade do sistema poroso do solo, a diminuição da umidade do solo aumenta a passagem de ar pela amostra e a conectividade dos poros pode afetar também de forma significativa esta variável.

Tabela 11 - Permeabilidade do solo ao ar em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|-------------|-----------------|----------------|----|-----|----------------|----|--------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | μm^2 | | | | | | |
| 0-5 | B | 316,85 | a | A | 686,77 | a | 501,81 |
| 5-10 | A | 201,54 | ab | A | 481,04 | ab | 341,29 |
| 10-15 | A | 162,40 | ab | A | 325,91 | bc | 244,15 |
| 15-20 | A | 160,78 | ab | A | 360,53 | bc | 260,66 |
| 20-30 | A | 78,32 | ab | A | 140,56 | cd | 109,44 |
| 30-40 | A | 65,51 | ab | A | 40,93 | d | 53,22 |
| 40-50 | A | 40,02 | b | A | 39,46 | d | 39,74 |
| Média | | 146,85 | | | 296,46 | | |
| C.V. (%) | | Manejo= 348,23 | | | Camada= 104,97 | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade de erro.

Os pontos de amostragem no manejo PD (Tabela 12), não apresentaram diferenças estatísticas em relação à permeabilidade. No ponto 4 a permeabilidade foi maior na camada de 0-5 cm, 3,84 vezes maior em relação a camada de 5-10 cm, porém não diferindo estatisticamente das demais camadas até 15-20 cm. Na média a camada de 0-5 cm apresentou maior permeabilidade, porém não diferiu estatisticamente das camadas de 0-5 cm a 15-20 cm.

Com relação aos pontos de amostragem, na camada de 0-5 cm, em média obteve-se maiores valores de permeabilidade em superfície para ambos os manejos de solo, observa-se um decréscimo da permeabilidade em profundidade, com reduções acentuadas a partir da camada de 30 cm, justificada pela maior D_s e maior DR . Segundo

Lima et al. (2005) o aumento da densidade do solo provocado pela compactação causa na estrutura do solo, afeta o tamanho, a distribuição, a continuidade, o volume e a geometria dos poros, reduzindo a permeabilidade em dado conteúdo de água (SILVA et al., 2009).

No manejo PDE (Tabela 13) na média a permeabilidade foi maior no ponto 4, porém não diferindo estatisticamente do ponto 5. Na média a permeabilidade foi maior na camada de 0-5 cm, porém não diferindo da camada de 5-10 cm, e os menos valores de permeabilidade foram obtidos nas 2 últimas camadas amostradas.

O ponto 4 no PDE também apresentou maior permeabilidade na camada de 0-5 cm sendo esta 2,82 vezes maior que a permeabilidade da segunda camada, porém sem diferença estatística.

Observa-se em ambos os manejos que o ponto 4 (linha de semeadura), na camada de 0-5 cm o maior valor de permeabilidade do solo, isso justifica-se pelo revolvimento do solo no momento da semeadura ocasionada pelo sulcador da semeadora, que opera até 12 cm do solo.

Tabela 12 – Permeabilidade do solo ao ar para o manejo plantio direto (PD) em função dos pontos de coleta* e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Pontos de coleta | | | | | | | Média |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0-5 | 259,81 ^{ns} | 401,33 ^{ns} | 283,48 ^{ns} | 570,28 a | 88,97 ^{ns} | 210,39 ^{ns} | 403,73 ^{ns} | 316,85 a |
| 5-10 | 58,86 | 96,33 | 47,68 | 148,48 ab | 308,67 | 128,03 | 622,78 | 201,54 ab |
| 10-15 | 198,57 | 51,23 | 74,35 | 122,72 ab | 338,94 | 295,29 | 55,70 | 162,40 ab |
| 15-20 | 257,25 | 148,02 | 28,88 | 379,84 ab | 111,35 | 167,95 | 32,20 | 160,79 ab |
| 20-30 | 33,19 | 166,30 | 32,51 | 67,01 b | 33,78 | 81,26 | 134,23 | 78,33 b |
| 30-40 | 15,70 | 143,50 | 29,12 | 56,85 b | 87,94 | 34,31 | 94,20 | 65,52 b |
| 40-50 | 41,44 | 2,80 | 49,04 | 64,05 b | 47,55 | 20,74 | 54,51 | 40,02 b |
| Média | A 123,55 | A 144,22 | A 77,87 | A 201,32 | A 144,89 | A 144,22 | A 199,62 | |
| C.V. (%) | Ponto= 111,27 | Camada= 99,40 | | | | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra minúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade de erro. ^{ns}: não significativo; * Ponto 4 refere-se a linha de semeadura, os demais estão distanciados em 15 cm um dos outros para a direita e esquerda da linha de semeadura.

Tabela 13 – Permeabilidade do solo ao ar para o manejo plantio direto escarificado (PDE) em função dos pontos de coleta* e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Pontos de coleta | | | | | | | Média | |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| 0-5 | 275,93 ^{ns} | 838,78 ^{ns} | 464,13 ^{ns} | 2046,55 a | 447,86 ^{ns} | 298,82 ^{ns} | 435,31 ^{ns} | 686,77 a | |
| 5-10 | 406,92 | 377,05 | 501,66 | 724,19 b | 347,64 | 584,50 | 425,35 | 481,04 ab | |
| 10-15 | 176,28 | 331,30 | 225,83 | 436,13 b | 476,98 | 340,35 | 294,54 | 325,91 abc | |
| 15-20 | 350,00 | 199,31 | 278,17 | 363,02 b | 801,07 | 67,32 | 464,83 | 360,53 abc | |
| 20-30 | 54,33 | 42,76 | 189,34 | 284,31 b | 167,15 | 182,80 | 63,26 | 140,56 bc | |
| 30-40 | 72,06 | 31,10 | 15,38 | 18,16 b | 41,00 | 25,40 | 83,42 | 40,93 c | |
| 40-50 | 17,42 | 66,54 | 40,09 | 28,47 b | 52,45 | 33,68 | 37,55 | 39,46 c | |
| Média | B 193,27 | B 269,55 | B 244,94 | A 557,26 | AB 333,45 | B 218,98 | B 257,75 | | |
| C.V. (%) | Ponto= 56,66 | | Camada= 112,91 | | | | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra minúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade de erro. ^{ns}: não significativo. * Ponto 4 refere-se a linha de semeadura, os demais estão distanciados em 15 cm um dos outros para a direita e esquerda da linha de semeadura.

4.1.8 Resistência à penetração (RP)

Reynolds et al. (2002) afirmam que somente valores acima de 2 MPa são considerados impeditivos ao crescimento das plantas, neste caso, nenhuma das camadas está próxima ao valor crítico (2 MPa), portanto os valores de RP na capacidade de campo (Tabela 14) não são considerados impeditivos em nenhuma das camadas. Mesmo assim, os maiores valores de RP foram obtidos no manejo PD, especialmente nos 10 primeiros centímetros do solo e no PDE este fenômeno repetiu-se.

Tabela 14 – Resistência do solo à penetração das raízes na capacidade de campo (CC) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|----------------|---------------|------|----|---------------|------|-----|-------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | | MPa | | | MPa | | |
| 0-5 | A | 1,10 | a | A | 0,83 | ab | 0,97 |
| 5-10 | A | 1,00 | a | A | 0,96 | a | 0,98 |
| 10-15 | A | 0,92 | ab | A | 0,71 | abc | 0,82 |
| 15-20 | A | 0,86 | ab | B | 0,48 | c | 0,67 |
| 20-30 | A | 0,85 | ab | B | 0,58 | c | 0,72 |
| 30-40 | A | 0,75 | b | A | 0,64 | bc | 0,69 |
| 40-50 | A | 0,96 | ab | B | 0,59 | bc | 0,77 |
| Média | | 0,92 | | | 0,68 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 95,33 | | | Camada= 27,55 | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os valores de RP considerados impeditivos variam muito entre os autores, Sene et al. (1985) consideram para solos arenosos

valores entre 6 a 7 MPa, Souza & Alvez (2003) sugeriram para plantio direto valores acima de 5 MPa impeditivos. Porém, Tormena & Roloff (1996) citam valores de 2 MPa, daí a importância de correlacionar-se valores de RP com produtividade.

Os valores de RP na umidade do PMP estão apresentados na Tabela 15, maiores valores de RP foram obtidos no manejo PD em relação ao PDE. Somente nas camadas de 5-10 cm e 30-40 cm os valores de RP foram estatisticamente iguais entre os manejos, sendo que nas demais camadas a RP foi maior em PD.

No PD os valores de RP foram estatisticamente iguais em todas as camadas amostradas, já no PDE a maior RP foi obtida na camada de 5-10 cm, e os menores valores nas camadas de 15-20 cm, 20-30 cm e 40-50 cm.

Tabela 15 – Resistência do solo à penetração das raízes no ponto de murcha permanente (PMP) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|----------------|---------------|------|---|---------------|------|----|-------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | MPa | | | | | | |
| 0-5 | A | 4,68 | a | B | 3,75 | ab | 4,22 |
| 5-10 | A | 4,34 | a | A | 4,11 | a | 4,22 |
| 10-15 | A | 4,14 | a | B | 3,20 | bc | 3,67 |
| 15-20 | A | 3,89 | a | B | 2,50 | c | 3,19 |
| 20-30 | A | 4,10 | a | B | 2,93 | c | 3,52 |
| 30-40 | A | 3,95 | a | A | 3,14 | bc | 3,55 |
| 40-50 | A | 4,42 | a | B | 2,92 | c | 3,68 |
| Média | | 4,22 | | | 3,22 | | |
| C.V. (%) | Manejo= 73,23 | | | Camada= 18,96 | | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Salienta-se que a capacidade de uma planta em transpor a RP depende da espessura da raiz e da sua habilidade em sintetizar substâncias mucilaginosas na coifa, que atuarão como lubrificantes facilitando o crescimento (BENGOUGH et al., 2006), desta maneira o valor de 2 MPa (REYNOLDS et al., 2002) pode não ser impeditivo ao desenvolvimento das plantas, neste caso em específico, a precipitação regular durante o experimento e os bons rendimentos obtidos, demonstram que a RP não afetou o desenvolvimento das culturas.

Valores de RP mais elevados nas camadas subsuperficiais especialmente no manejo PD, provavelmente pelo elevado número de vezes em que as máquinas agrícolas trafegam durante as safras, por

este motivo, a pressão exercida verticalmente pelos pneus ocasionam compactação em subsuperfície (IAIA, 2006).

Wutke et al. (2000) indicam que o efeito da escarificação atua na redução da densidade do solo e da resistência à penetração, ocorrendo ao inverso quando utilizado o plantio direto, ocasionando o aumento destes valores, pois a mobilização do solo é parcial, ou seja, somente na linha de semeadura.

4.1.9 Intervalo hídrico ótimo

Pela Figura 8, que representa o intervalo hídrico ótimo para o manejo plantio direto, pode-se observar que a D_s influenciou negativamente no IHO, pois quanto maior a D_s menor foi o IHO.

O intervalo de umidade na menor densidade do solo no campo ($1,17 \text{ Mg m}^{-3}$) para o manejo PD foi de $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e na maior densidade (linha tracejada) foi de $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

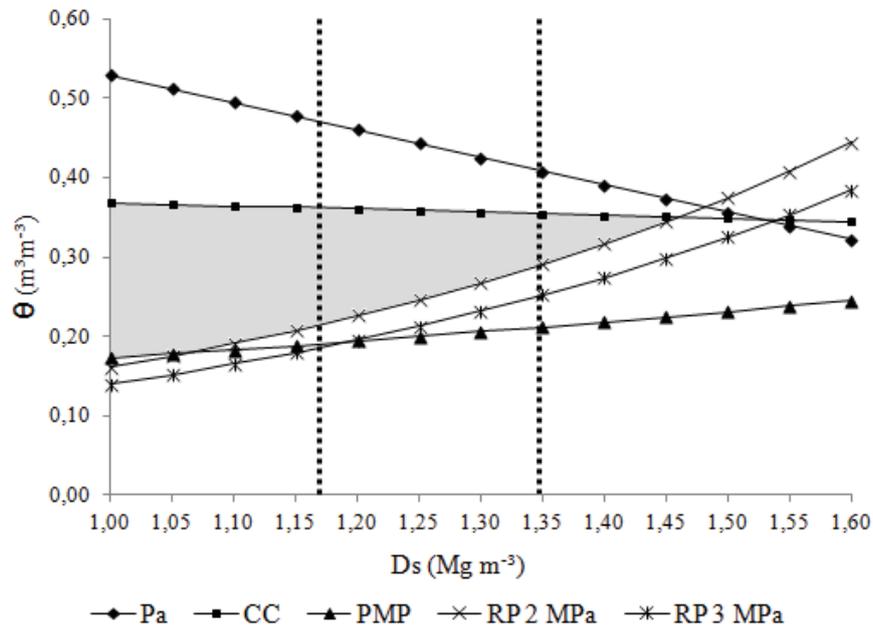


Figura 8 – Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), porosidade de aeração (PA) de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa e 3 MPa, em função do manejo plantio direto (PD). IHO = área hachurada. Linha tracejada = Ds mínima e máxima. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

O IHO passou a ser limitado pela resistência à penetração na densidade de $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$, isto é, a umidade na qual RP 2 MPa transpõe a umidade do PMP. A umidade de RP 3 MPa transpõe o PMP na Ds de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$. O limite superior foi governado pela umidade na CC, concordando com Tormena et al. (1999), que afirma ainda que na maior parte das amostras analisadas, a RP é fator limitante ao crescimento das plantas dentro da faixa de valores de água disponível.

Na Figura 9 estão apresentados os valores de umidades correspondentes ao intervalo hídrico ótimo para o manejo de solo plantio direto escarificado (PDE).

Com o aumento da Ds ocorreu um decréscimo do volume da Pa e um aumento da umidade volumétrica da RP para o IHO em ambos os manejos. O IHO do PD observa-se um decréscimo da umidade da CC conforme a Ds aumenta, isto pode ser justificado pelo arranjo dos poros no solo (Tabela 9).

No IHO do PDE na qual a umidade na RP 2 MPa substitui o PMP na Ds de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ e a RP 3 MPa substitui o PMP na Ds de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, densidades estas maiores que as obtidas no PMP.

O intervalo de umidade no manejo PDE na menor densidade no campo ($1,17 \text{ Mg m}^{-3}$) foi de $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e na maior densidade do solo ($1,32 \text{ Mg m}^{-3}$) foi de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

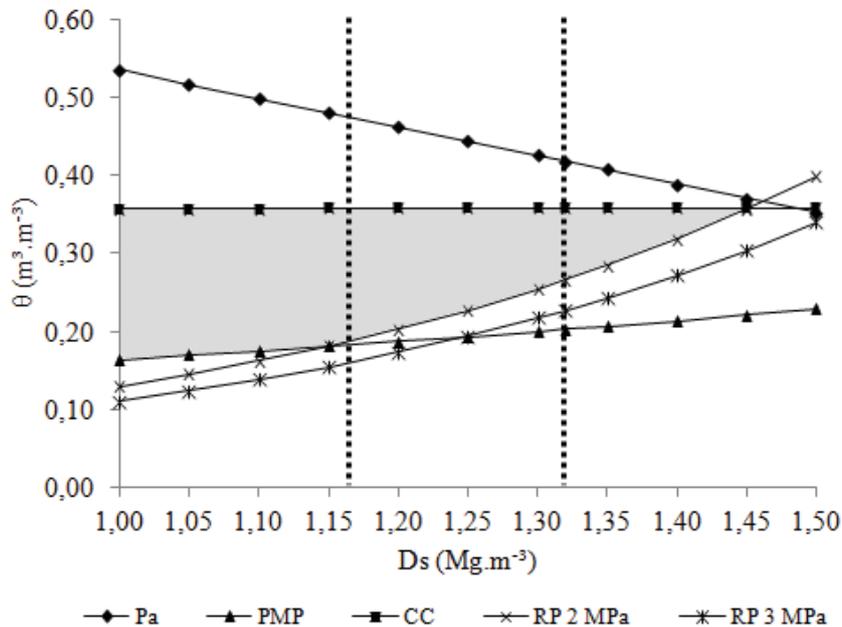


Figura 9 – Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de 6 kPa (CC), porosidade de aeração (PA) de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2,0 MPa e 3 MPa, em função do manejo plantio direto escarificado (PDE). IHO = área hachurada. Linha tracejada = Ds mínima e máxima. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

Extrapolando os dados, obtém-se a densidade crítica (D_{sc}), definida por Silva et. al (1997) como aquela em que o IHO é igual a zero, ou seja o limite inferior cruza o limite superior, neste caso para a RP 2MPa a D_{sc} é $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$, e para a RP 3MPa também esta D_{sc} é de $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$, acima destas densidades ocorrem condições altamente restritivas ao desenvolvimento das culturas

(Tabela 16). O IHO foi igual a zero quando a densidade relativa era de 0,95 e 1,00 para ambos os manejos com RP 2 MPa e 3 MPa respectivamente (Tabela 17).

Tabela 16 – Densidade do solo limitante para a RP 2 MPa, RP 3 MPa, Pa, e IHO=0 para RP 2 MPa e 3 MPa em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | RP 2 | RP | Pa | IHO=0 | IHO=0 |
|--------------------------|------|-------|------|----------|----------|
| | MPa | 3 MPa | | RP 2 MPa | RP 3 MPa |
| Ds (Mg m ⁻³) | | | | | |
| PD | 1,05 | 1,20 | 1,52 | 1,46 | 1,54 |
| PDE | 1,15 | 1,25 | 1,47 | 1,46 | 1,53 |

A Dsc para a RP de 2 MPa e 3 MPa é de 1,46 Mg m⁻³, ou seja a DR limitante é de 0,95 (Tabela 17). A Pa não foi limitante neste caso, somente em densidade maiores ela poderia exercer influência sobre o IHO.

Os valores de Dsc foram relativamente próximos pois trata-se de uma propriedade inerente ao solo relacionada a textura e a Dss, Klein e Câmara (2007) também relatam similaridade nos valores de Dsc e atribuem esta característica ao solo independentemente do manejo que seja adotado.

Correlacionando-se os valores de DR obtidos no IHO (Tabela 17) com os valores propostos por Marcolin (2009) apresentados na Tabela 1 temos a seguinte situação: quando DR foi limitante na RP de 2 MPa os valores de DR foram baixos, condição

esta considerada como “solo solto”, ademais esta condição também foi obtida para RP 3 MPa no manejo PD, no manejo PDE o valor de DR 0,82 não é considerado impeditivo ao crescimento das plantas. Para a condição de Pa e quando o IHO igualou-se a zero na RP de 3 MPa os valores de DR indicam condições severamente restritivas as plantas, com implicações diretamente no desenvolvimento do sistema radicular. Também quando o IHO = 0 na RP 2 MPa os valores de DR 0,95 indicam que o solo já estaria na condição considerada compactada.

Tabela 17 – Densidade relativa do solo limitante para a RP 2 MPa, RP 3 MPa, Pa, e IHO=0 para RP 2 MPa e 3 MPa em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | RP 2 | RP | Pa | IHO=0 | IHO=0 |
|--------|------|-------|------|----------|----------|
| | MPa | 3 MPa | | RP 2 MPa | RP 3 MPa |
| | DR | | | | |
| PD | 0,68 | 0,78 | 0,99 | 0,95 | 1,00 |
| PDE | 0,75 | 0,82 | 0,96 | 0,95 | 1,00 |

Na Figura 10 está exposta a variação do IHO em profundidade, pode-se observar o menor IHO no manejo PD em relação ao PDE. Observa-se uma diminuição no IHO nas camadas de 10-15 cm e 20-30 cm no PD e na camada de 20-30 cm no PDE. No PDE observa-se pouca variação no LS (CC) em profundidade. A

maior amplitude do IHO para ambos os manejos foi obtida nas camadas de 0-5 cm e 40-50 cm.

Analisando-se a amplitude do IHO do LI a LS, para a RP 3 MPa, esta amplitude foi igual nos dois manejos de solo adotados nas camadas de 30-40 cm e de 40-50 cm, sendo de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente, para todas as demais camadas a amplitude do IHO foi maior no manejo PDE.

A menor amplitude do IHO no manejo PD foi obtida nas camadas de 10-15 cm e 20-30 cm, sendo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a menor no PDE foi obtida na camada de 20-30 cm sendo de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

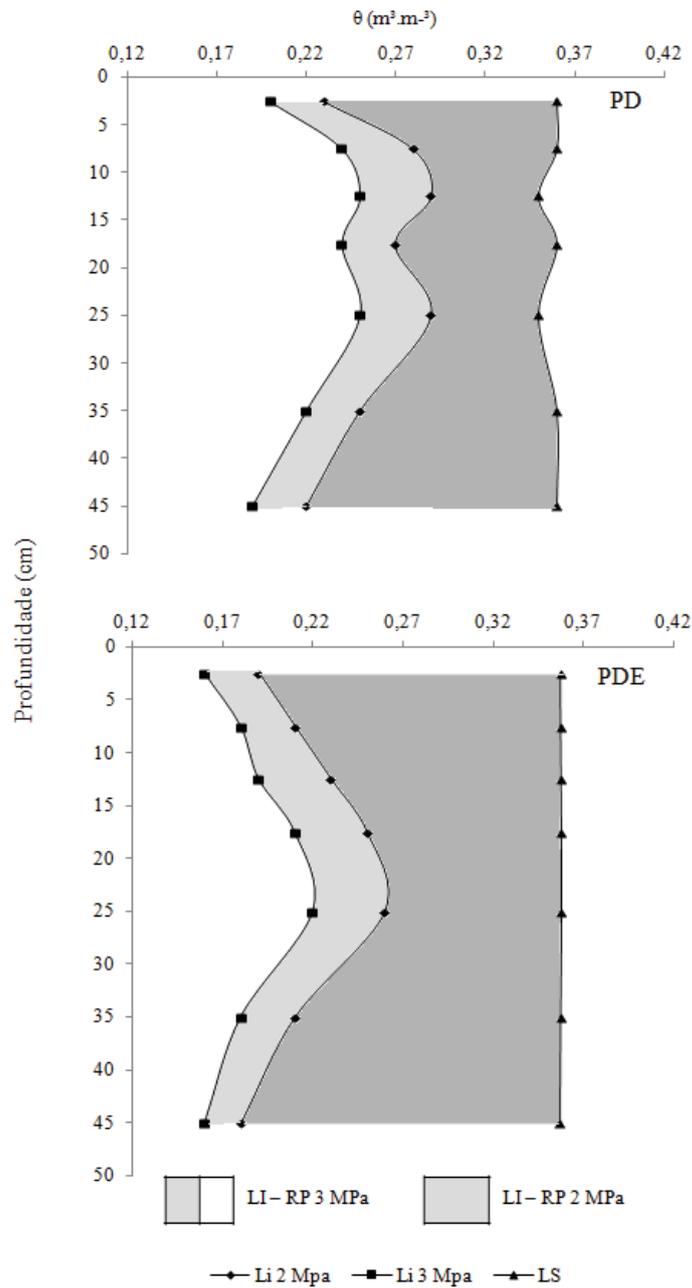


Figura 10- Variação do intervalo hídrico ótimo no manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) em função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): RP 2 e 3 MPa. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

4.1.10 Variação da umidade do solo

A determinação da umidade do solo em relação aos limites do IHO foi realizada de 07/01/2011 a 22/01/2011, os resultados obtidos foram relacionados com o limite superior (LS) do IHO (CC) e com os limites inferiores (RP 2 MPa e 3 MPa) e estão apresentados nas Figuras 11 e 12.

No PD não ocorreram limitações quanto ao limite superior para nenhuma das camadas amostradas, indicando que não houve deficiência de aeração neste solo.

Quando se utiliza o limite inferior (LI) de RP 3 MPa a amplitude da faixa ótima de umidade aumenta, diminuindo por consequência os períodos de limites críticos, quando o LI utilizado é de RP 2 MPa esta faixa fica mais estreita aumentando assim as limitações ao crescimento e desenvolvimento das plantas, como pode ser observado nas figuras apresentadas.

No PDE nas camadas de 30-40 cm e 40-50 cm nenhuma limitação ocorreu, a umidade manteve-se durante todo o período de amostragem dentro da faixa ótima de umidade. Já a camada de 20-30 cm permaneceu a maior parte do período dentro da umidade ótima se considerarmos o LI de RP 3 MPa, quando RP 2 MPa a restrição aumenta bastante nesta camada.

Se considerarmos o LI de RP 3 MPa as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm também tiveram poucos períodos críticos de umidade, ao compararmos com PD estes períodos aumentam significativamente no PD.

Em média a linha de semeadura tende a tolerar mais períodos críticos do que a entrelinha, pois graficamente a linha de semeadura permaneceu por mais dias dentro da faixa de umidade ótima, uma das possíveis explicações é que devido o maior e rápido sombreamento na linha de semeadura menor é a proporção de água perdida através da evaporação no solo.

Ao consideramos somente o LI RP 3 MPa podemos perceber claramente que o PDE manteve-se com umidade ótima ao desenvolvimento por um período maior que o PD. Demonstrando-se assim mais uma vez a vantagem da escarificação esporádica em solos sob plantio direto.

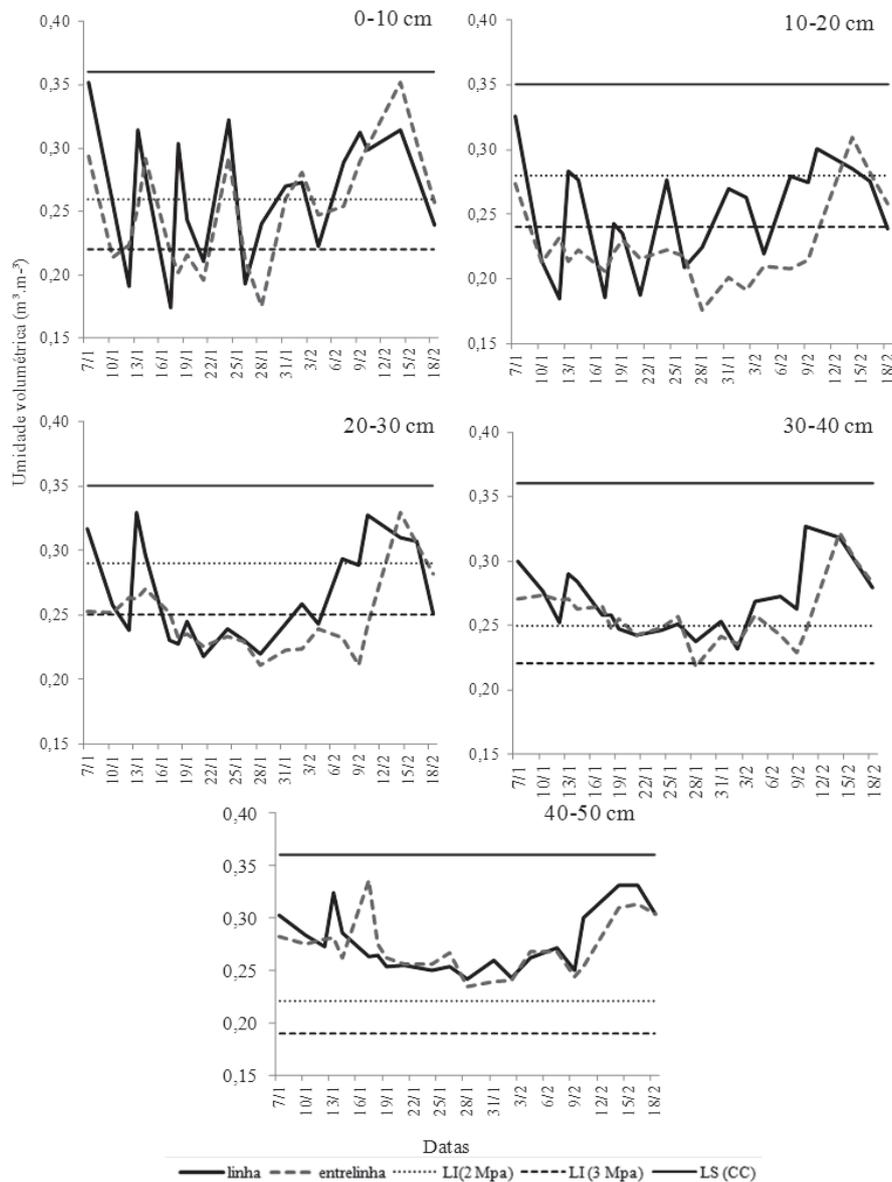


Figura 11 – Variação da umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$) do solo no manejo plantio direto (PD) na linha e entrelinha de semeadura de 07/01/2011 a 18/02 /2011 em função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): resistência à penetração 2 e 3 MPa do intervalo hídrico ótimo (IHO). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

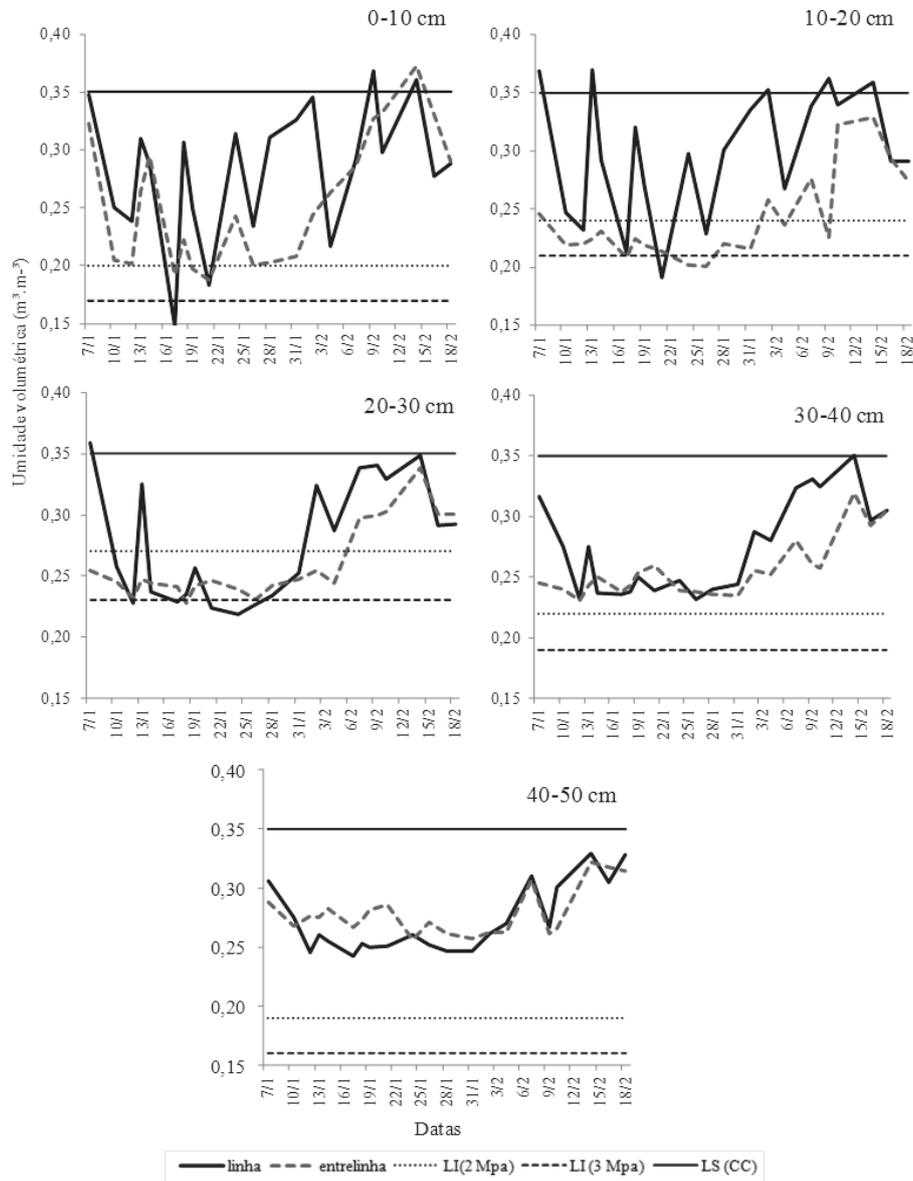


Figura 12 – Variação da umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do solo no manejo plantio direto escarificado (PDE) na linha e entrelinha de semeadura de 07/01/2011 a 18/02/2011 em função da camada de solo amostrada, limite superior (LS): capacidade de campo, limite inferior (LI): resistência à penetração 2 e 3 MPa do intervalo hídrico ótimo (IHO). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

A Tabela 18, demonstra os dias em que a umidade do solo ficou fora do intervalo hídrico ótimo para o desenvolvimento das plantas (IHO). Considerando-se todas as camadas no manejo PD a linha de semeadura sofreu por 17 dias algum tipo de restrição, enquanto no PDE foram 10 dias, discordando do estudo realizado por Silva & Kay (1997) que afirmam que a entrelinha sofre menos variações dentro IHO, ou seja, ficaria menos dias fora do intervalo ótimo.

Na entrelinha de semeadura essas diferenças entre os manejos são mais discrepantes, a umidade no PD ficou 31 dias fora da faixa ótima, enquanto no PDE este valor caiu para apenas três dias.

As camadas que mais tiveram restrições em ambos os manejos foram de 10-20 cm e 20-30 cm, estas permaneceram por mais dias fora da faixa ótima, porém no PDE o número de dias foi inferior ao PD. As camadas de 30-40 cm e 40-50 cm permaneceram dentro do IHO durante o período de amostragem.

Tabela 18 – Número de dias* em que a umidade no campo permaneceu fora dos limites do intervalo hídrico ótimo (IHO), em função dos manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE), posição na linha de semeadura e camadas de solo amostradas. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Posição | Camada (cm) | | | | |
|--------|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 |
| | | n° de dias | | | | |
| PD | Linha | 7 | 17 | 16 | 0 | 0 |
| | Entrelinha | 9 | 31 | 23 | 0 | 0 |
| PDE | Linha | 4 | 10 | 8 | 0 | 0 |
| | Entrelinha | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 |

*Dados obtidos com base em 44 dias de coletas.

Esta diferença entre os dois manejos mais uma vez destaca a importância da escarificação esporádica nos solos, pois devido a melhor infiltração e redistribuição de água nos poros a umidade do solo permaneceu por mais dias dentro da faixa ideal, o que culmina num bom desenvolvimento das plantas e em maiores rendimentos. Silva & Kay (1996) demonstraram que a taxa de crescimento aéreo e o rendimento de grãos de milho decaem quanto maior o tempo que a umidade fica fora dos limites do IHO, corroborando com os dados obtidos neste estudo.

As condições de desenvolvimento das plantas dentro dos limites do IHO são ótimas (SILVA et al., 1997), por isso quanto mais estreito o IHO, maior é a dificuldade de se fazer o manejo da água

objetivando ótimas produções, mesmo existindo irrigação (JAWAYARDANE & CHAN, 1994).

4.1.11 Curvas de retenção de água no solo

Os parâmetros empíricos de ajuste da umidade volumétrica do solo ao potencial mátrico das amostras utilizando a equação de Van Genuchten estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros do ajuste dos pontos da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genuchten. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Prof (cm) | α (1/kPa) | m | n | θ_r (m ³ m ⁻³) | θ_s (m ³ m ⁻³) |
|-----------------------------|---------------------|--------|---------|---|---|
| Plantio direto | | | | | |
| 0-5 | 0,1191 | 0,3066 | 0,9832 | 0,17 | 0,54 |
| 5-10 | 0,5606 | 0,1906 | 1,2354 | 0,19 | 0,52 |
| 10-15 | 0,6071 | 0,0356 | 6,1866 | 0,20 | 0,51 |
| 15-20 | 0,7798 | 0,0352 | 6,1358 | 0,20 | 0,53 |
| 20-30 | 0,9957 | 0,0170 | 10,5619 | 0,21 | 0,50 |
| 30-40 | 0,9297 | 0,0217 | 9,7872 | 0,22 | 0,54 |
| 40-50 | 0,3345 | 0,1769 | 1,1348 | 0,21 | 0,57 |
| Plantio direto escarificado | | | | | |
| 0-5 | 0,0775 | 0,3779 | 0,8965 | 0,18 | 0,56 |
| 5-10 | 0,4783 | 0,0856 | 2,8618 | 0,18 | 0,56 |
| 10-15 | 0,7096 | 0,0264 | 9,1310 | 0,19 | 0,54 |
| 15-20 | 0,0002 | 3,5000 | 0,3701 | 0,20 | 0,51 |
| 20-30 | 0,1976 | 0,4179 | 0,6129 | 0,20 | 0,52 |
| 30-40 | 1,1025 | 0,0166 | 12,1032 | 0,20 | 0,55 |
| 40-50 | 1,1261 | 0,0267 | 7,9689 | 0,21 | 0,57 |

As curvas de retenção de água no solo estão apresentadas na Figura 13 conforme o manejo de solo adotado e a camada de solo amostrada.

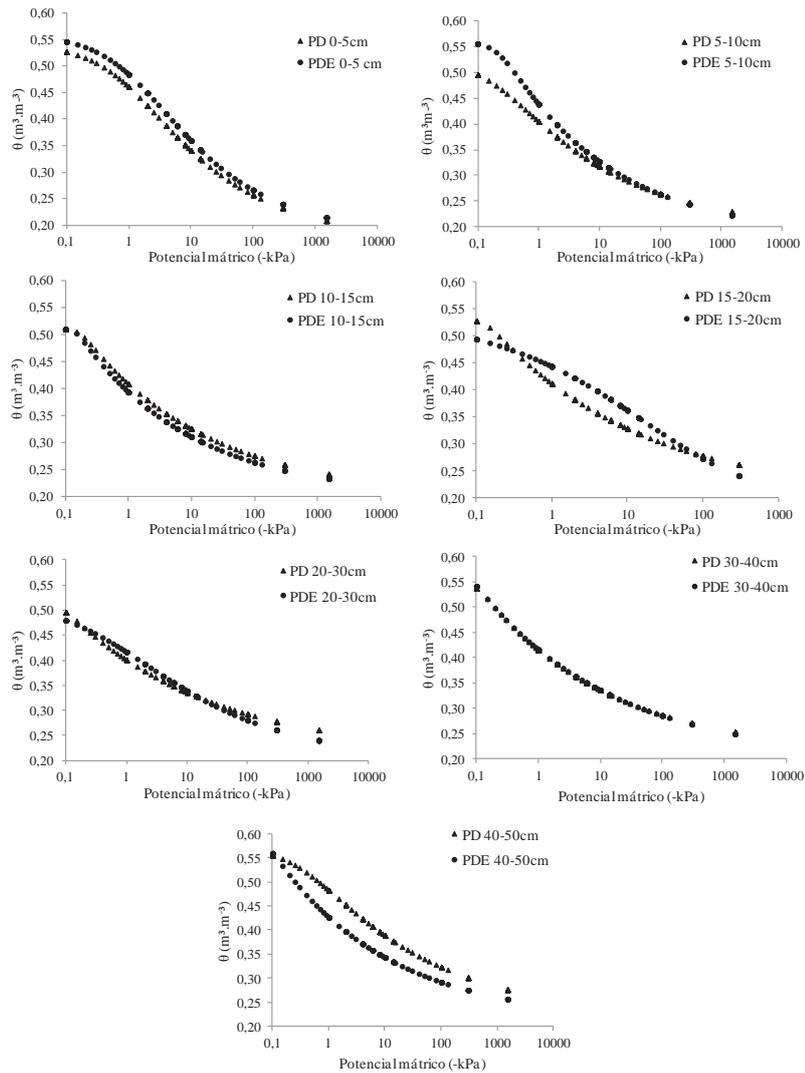


Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo para os manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) em função das camadas de solo amostradas. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

Constata-se que o manejo de solo alterou o traçado das curvas, exceto para as camadas de 20-30 cm e 30-40 cm onde ambos os manejos permaneceram com valores de umidade muito próximos.

Na camada 40-50 cm a retenção de água foi maior do PD do que no PDE, ou seja, o volume de água mantido nos poros foi maior nos diferentes potenciais. Abreu et al. (2004) comparando os manejos PD, PDE, cultivo mínimo e solo descoberto sem preparo em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico obtiveram curvas de retenção de água com comportamento similar, a não ser na camada de 40-50 cm onde houve tendência em maior teor de água no solo para o solo saturado no tratamento PDE e a menor com cultivo mínimo considerando as diferenças na porosidade total entre os tratamentos.

4.1.12 Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica do solo saturado um ano após a escarificação (Tabela 20), apresentou maiores valores no manejo PDE, em relação ao PD, na camada de 3-10,5 cm e 6-13,5 cm os valores foram cerca de 20 vezes maior no PDE em relação ao PD. Camara & Klein (2005) também encontraram diferenças na condutividade 12 meses após a escarificação onde o PDE apresentou maior condutividade em comparação com o PD. Castro et al. (2010) comparando plantio convencional, PD e PDE observaram pouca variação na condutividade até 30 cm.

Tabela 20 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE) e da camada de solo amostrada. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Camada (cm) | Manejo | | | | | | Média |
|----------------|--------|--------------------|---|-----|--------------------|----|--------|
| | PD | | | PDE | | | |
| | | mm h^{-1} | | | mm h^{-1} | | |
| 0-7,5 | B | 129,60 | A | A | 1143,20 | a | 636,40 |
| 3-10,5 | B | 26,20 | A | A | 723,60 | ab | 374,90 |
| 6-13,5 | A | 18,10 | A | A | 368,20 | bc | 193,20 |
| 9-16,5 | A | 5,10 | A | A | 49,50 | c | 27,30 |
| 12-19,5 | A | 45,50 | A | A | 230,30 | bc | 137,90 |
| 15-22,5 | A | 133,70 | A | A | 94,30 | c | 114,00 |
| Média | | 59,70 | | | 434,90 | | |
| C.V. (%) | | Manejo= 28,90 | | | Camada= 93,40 | | |

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Segundo Marsili et al. (1998) a redução da condutividade hidráulica em PD deve estar relacionada à reorganização do sistema poroso, ou seja, da distribuição do diâmetro, continuidade vertical dos poros, justificada pelos maiores valores de Ds e menor volume de macroporos encontrados neste manejo de solo.

Os resultados obtidos demonstram que a escarificação é capaz de melhorar a geometria porosa do solo, aumentando o volume de macroporos, poros estes responsáveis pela condução de água na condição saturada, o que se justifica pelo maior volume de poros totais encontrados neste manejo, apesar dos macroporos, responsáveis pela condução de água em solo saturado não terem diferença estatística o maior volume foi encontrado em PDE.

No manejo PD não houve diferença estatística na condutividade hidráulica entre as camadas. A condutividade hidráulica do solo é uma grandeza que varia muito, devido as variações espaciais na camada do solo (BARRETO, 2001).

Importante destacar que a camada de menor condutividade hidráulica do solo, que irá governar o fluxo vertical da água no solo o que irá afetar diretamente a infiltração da água na superfície do solo. Então no PDE a infiltração máxima será de 50 mm h^{-1} enquanto que no PD será de 5 mm h^{-1} . Dependendo do tipo de solo, um pequeno aumento na D_s , causado pela compactação, pode diminuir a taxa de infiltração em até 80% (OLIVEIRA et al., 1998).

4.2 Atributos biométricos e rendimento das culturas

4.2.1 Aveia Preta

Dos resultados de massa seca, massa verde e altura das plantas de aveia preta (Tabela 21), constata-se a maior massa seca no manejo de solo PDE sendo que neste obteve-se aproximadamente 872 kg a mais de massa seca de aveia em relação ao PD, o que pode resultar em maior cobertura do solo. Esta maior massa verde sobre do solo é importante, pois é capaz de diminuir os efeitos da erosão, amenizando o impacto da gota da chuva e também podendo minimizar a incidência de plantas daninhas na cultura posterior. Fernandes et al. (2007) não obtiveram diferença na massa seca da aveia em diferentes sistemas de preparo do solo.

Tabela 21 - Massa seca, massa verde (período de floração plena) e estatura (40 dias após a semeadura) de plantas de aveia em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Massa seca | Massa verde | Estatura |
|-------------|---------------------|-------------|----------|
| | Mg ha ⁻¹ | | cm |
| PDE | 4.919 a | 28.805 a | 24 a |
| PD | 4.047 b | 23.274 b | 17 b |
| Média geral | 4.483 | 26.040 | 20,50 |
| C.V. (%) | 10,00 | 12,90 | 13,50 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A massa verde comportou-se da mesma maneira sendo esta 5531 kg superior. Fernandes et al. (2007) estudando diferentes sistemas de preparo do solo (semeadura direta, PDE e PC) para a cultura de aveia-preta, também instalada com o objetivo de produzir cobertura vegetal, obtiveram no PDE e PC maior produção de biomassa verde em comparação a semeadura direta.

Para a variável altura de plantas o manejo PDE também apresentou maior altura de plantas, comprovando assim as melhores condições físico-hídrico-mecânicas, proporcionadas ao sistema radicial das plantas de aveia pela ação do escarificador, tais como menor densidade do solo, menor densidade relativa, maior volume de macroporos, menor RP e maior intervalo hídrico ótimo. Essa maior produção de massa de aveia é muito importante pois é justamente isto

que se deseja em áreas sob plantio direto, sem a adição de fertilizantes, pois a palha age contra a radiação solar reduzindo a evaporação e assim mantendo a água no solo, diminui o impacto da gota da chuva diminuindo assim a erosão hídrica, atua no controle de plantas daninhas.

4.2.2 Milho

4.2.2.1 Componentes de rendimento do milho

O manejo PDE apresentou melhores indicadores biométricos do milho que o PD (Tabela 22), no PDE a massa da espiga (sabugo + grãos) foi 18,12 g maior, valor este justificado pelo maior número de grãos por espiga (1 grão), a massa de grãos (13% de umidade) também é maior neste manejo (17,32 g). A massa de grãos é um dos componentes determinantes do rendimento de grãos de milho (LOPES et al., 2007), e a elevação do rendimento de grãos é atribuída às mudanças nas práticas culturais, ao melhoramento genético, às alterações climáticas e à interação entre esses três fatores (TOLLENAAR & WU, 1999). Neste caso, por se tratar de um mesmo híbrido e a precipitação ser bem distribuída e homogênea em ambos os manejos reforça-se a idéia que a prática de escarificação é capaz de proporcionar de maneira indireta incremento no rendimento de grãos.

O número de grãos por espiga (extrapolação do nº de grãos por fileira x nº de fileiras) também foi maior no PDE (41 grãos). Já o sabugo (ráquis) apresentou uma diferença de massa em relação ao PD de 1,49 g. O número de fileiras e o número de espigas/planta não

apresentaram diferenças estatísticas, pois este parâmetro trata-se de uma característica própria do híbrido, bem como o nº de plantas/m² indicando assim uma distribuição de sementes uniforme em ambos os manejos.

Custódio et al. (2000) afirmam que a massa da espiga com sabugo é influenciado pelo sistema de cultivo, independentemente do cultivar de milho utilizado, e ao comparar PD, PC e sistema barreirão, obtiveram em PD maiores massas de espigas.

Esses resultados revelam que a escarificação interfere positivamente sobre alguns componentes de produção e, conseqüentemente, sobre o rendimento de grãos.

Tabela 22 – Atributos biométricos do milho: nº espigas/m², massa da espiga, nº de fileiras, nº de grãos por fileira, massa de grãos, massa do sabugo, nº de grãos por espiga e massa de mil grãos em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011

| | |
|---|----------|
| nº espigas/m ² ^{ns} | |
| PD | 5,81 |
| PDE | 5,80 |
| CV (%) | 5,44 |
| Massa da espiga (g) | |
| PD | 217,75 b |
| PDE | 235,87 a |
| CV (%) | 23,77 |
| nº de fileiras ^{ns} | |
| PD | 18,88 |
| PDE | 18,15 |
| C.V. (%) | 14,71 |
| nº de grãos por linha * | |
| PD | 34,90 b |
| PDE | 36,69 a |
| C.V. (%) | 18,22 |
| Massa de grãos por espiga (g) * | |
| PD | 197,31 b |
| PDE | 214,63 a |
| C.V. (%) | 24,05 |
| Massa do sabugo (g) | |
| PD | 17,30 b |
| PDE | 18,79 a |
| C.V. (%) | 4,15 |
| nº grãos por espiga * | |
| PD | 632,58 b |
| PDE | 674,06 a |
| CV (%) | 21,12 |
| Massa de 1000 grãos (g) * | |
| PD | 397,84 b |
| PDE | 405,74 a |
| C.V. (%) | 12,51 |

^{ns}: não significativo; : Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste t a 5% de probabilidade de erro; : Médias seguidas pelas mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste t a 1% de probabilidade de erro.

Conforme Figura 14 a massa do sabugo explica em 84% a massa da espiga, portanto quanto maior o sabugo maior foi a massa de grãos, especialmente para este híbrido que tem finalidade de produção de grãos, quando híbridos para produção de silagem esta relação decai.

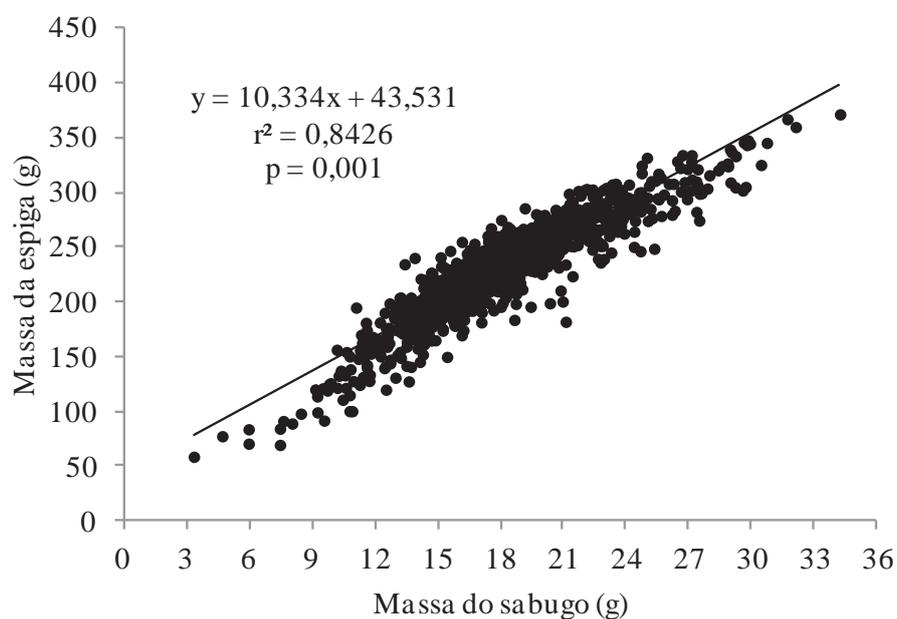


Figura 14 – Massa da espiga em função da massa do sabugo. FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011

Já o diâmetro do colmo justificou em 50% a massa das espigas, portanto plantas com diâmetro de colmo maiores, mais bem estruturadas, tendem a ter espigas maiores (Figura 15). O colmo contém uma grande reserva de fotoassimilados que podem ser translocados para os grãos (CRUZ et al., 1996).

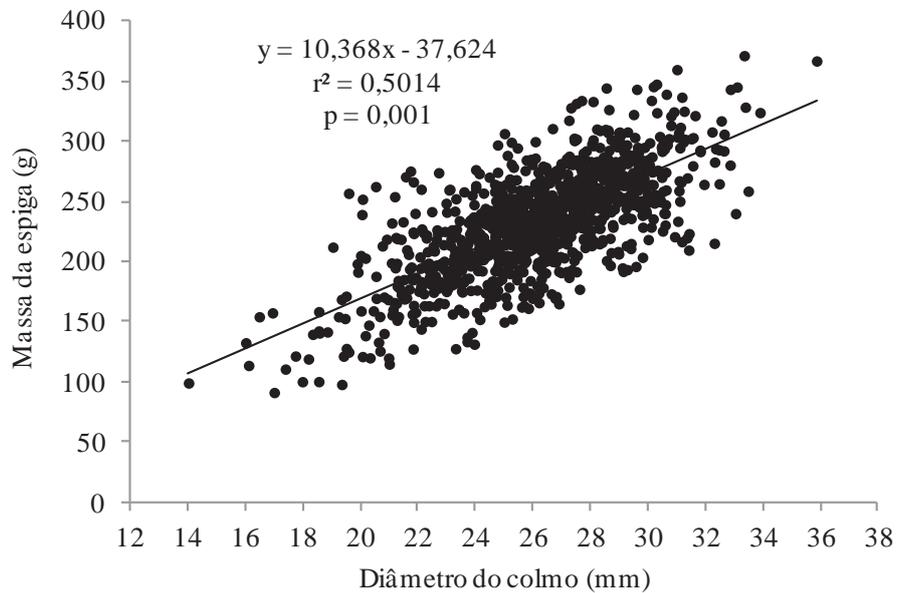


Figura 15 – Massa da espiga em função do diâmetro do colmo.
FAMV-UPF, Passo Fundo, RS, 2011

No PD a maior frequência de espigas ocorreu nas massas de 150-200 g, seguida da massa de 200-250 g (Figura 16), no PDE a predominância foi de espigas com massa entre 200-250 g seguida pela massa de 150-200 g, o que demonstra que o manejo PDE as plantas tiveram condições mais favoráveis de desenvolvimento o que proporcionou maior massa de espigas.

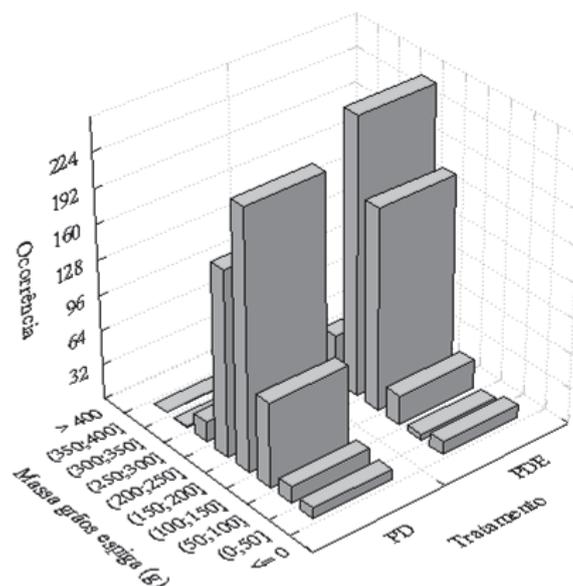


Figura 16 – Ocorrência de massa de espigas de milho em relação aos manejos de solo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF. Passo Fundo (RS), 2011

4.2.3.4 Distribuição de plantas

Na média não ocorreu diferença estatística entre os espaçamentos das plantas de milho. A maior porcentagem de espaçamentos foi do tipo normal (Classe 1), cerca de 56,73% das plantas, seguido por 21,47% com espaçamento tipo 4 (normal + falha) em um dos lados da planta. Somente 0,67 % das plantas apresentaram espaçamento duplo em ambos os lados da plantas (Categoria 2), conforme dados apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Distribuição (%) e número de ocorrências (O) das classes dos espaçamentos entre plantas de milho em função do manejo e da classe. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Classes | Manejo | | | | Média | |
|----------|--------------|-------|---------------|-------|-------|---|
| | PD | | PDE | | | |
| | % | O | % | O | | |
| 1 | 54,59 | (281) | 58,51 | (298) | 56,73 | A |
| 2 | 1,56 | (7) | 0,60 | (3) | 1,08 | C |
| 3 | 0,19 | (1) | 1,16 | (6) | 0,67 | C |
| 4 | 23,40 | (120) | 19,54 | (99) | 21,47 | B |
| 5 | 16,42 | (84) | 16,30 | (82) | 16,36 | B |
| 6 | 6,60 | (34) | 7,02 | (36) | 6,81 | C |
| Média | 17,19 | | 17,19 | | | |
| C.V. (%) | Manejo= 0,42 | | Classe= 17,19 | | | |

Médias pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Não se verificou diferença entre os espaçamentos das plantas de milho quanto a linha da semeadora-adubadora (Tabela 24), indicando um funcionamento similar da semeadora-adubadora independentemente do sentido de semeadura. Neste caso também verificou maior percentual de plantas com espaçamento classe 1, 56,73% de frequência, seguido pelas categorias 4 (normal + falha) e 5 (duplo + falha).

Figura 24 – Distribuição (%) e nº de ocorrência (O) das classes de espaçamento (1-normal; 2-falha; 3-duplo; 4-normal+falha; 5- normal+ duplo; 6- falha+duplo) entre plantas de milho em função da linha de semeadura e da classe. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Classes | Linha | | | | Média | |
|----------|--------------|-------|---------------|-------|-------|---|
| | 1 | | 2 | | | |
| | % | O | % | O | | |
| 1 | 57,17 | (275) | 58,28 | (304) | 56,73 | A |
| 2 | 1,37 | (4) | 0,78 | (6) | 1,08 | C |
| 3 | 0,20 | (2) | 1,15 | (5) | 0,68 | C |
| 4 | 19,84 | (123) | 23,10 | (96) | 21,47 | B |
| 5 | 18,09 | (88) | 14,64 | (78) | 16,36 | B |
| 6 | 6,48 | (34) | 7,14 | (36) | 6,81 | C |
| Média | 17,18 | | 17,19 | | | |
| C.V. (%) | Manejo= 0,42 | | Classe= 17,19 | | | |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A massa das espigas de milho em relação à ocorrência dentro das categorias de espaçamentos (Figura 17), pode-se observar uma predominância na ocorrência de espigas com massa de 150-200 g e 200-250g em todas as categorias, especialmente na categoria 1 (normal).

A adequada distribuição de plantas é uma das práticas culturais mais importantes para determinar o rendimento de grãos no milho, pois o estande afeta a arquitetura das plantas, altera o crescimento e o desenvolvimento, e influencia na produção e partição de fotoassimilados (ALMEIDA & SANGOI, 1996). Os resultados obtidos não concordam com esta afirmação, pois a categoria 2 onde a planta apresenta um maior espaçamento em ambos os lados

apresentou valores de massa de espiga médios, e a categoria 3 na qual o espaçamento é reduzido e a competição é dita maior, a massa das espigas ficou na média de 150-200 g, com uma menor ocorrência de espigas com massa menor que 50 g, porém espigas pequenas foram obtidas em todas as categorias de espaçamento, exceto na categoria 2. Rizzardi et al. (1994) e Rizzardi & Pires (1996), também constataram que o rendimento de grãos não é influenciado pela alteração na distribuição de plantas na linha de semeadura. Logo, fatores como nutrientes e precipitação também são muito importantes no rendimento final.

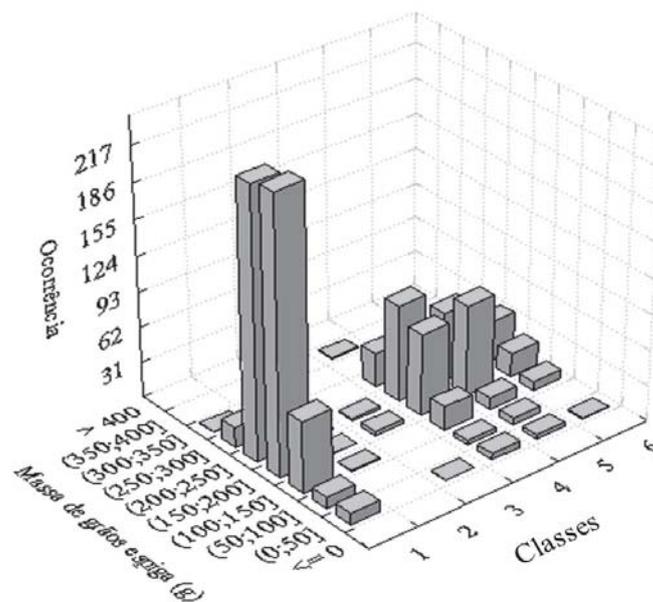


Figura 17 – Ocorrência e massa de espigas de milho em relação às categorias de espaçamento (1-normal; 2-falha; 3-duplo; 4- normal+falha; 5- normal+ duplo; 6- falha+duplo) entre plantas de milho na linha de semeadura. FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

4.2.3.5 Rendimento de grãos

O maior rendimento de grãos no PDE é justificado, pois este manejo apresentou na média espigas maiores que o PD, conforme apresentado na Figura 18, proporcionado pelas melhores condições físico-hídricas.

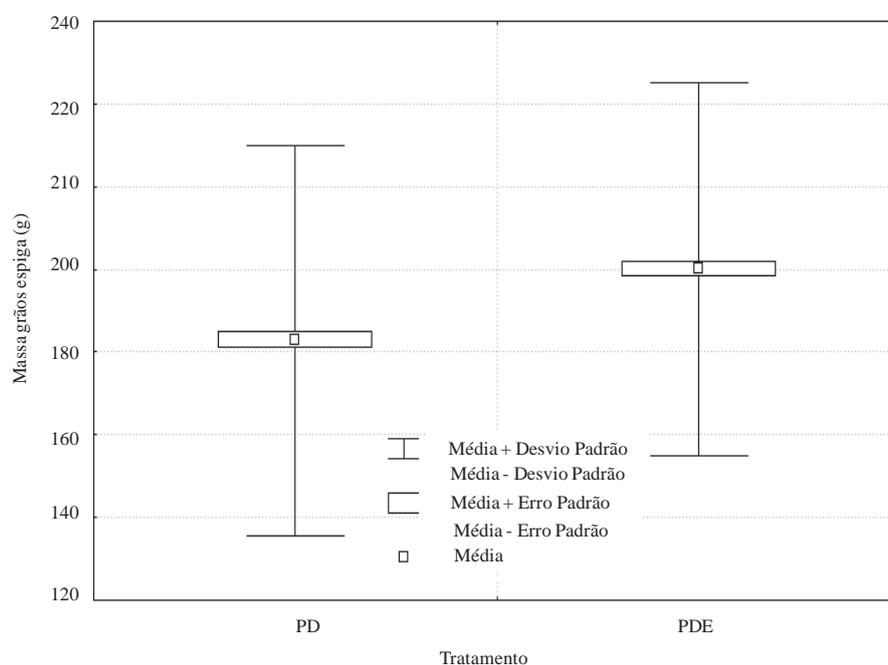


Figura 18 – Amplitude de variação, média e desvio padrão da massa das espigas dos manejos plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

O rendimento de grãos de milho (Tabela 25) foi maior no PDE, 1,05 em relação ao PD, ou seja, $0,609 \text{ Mg ha}^{-1}$ a mais de grãos no PDE (10 sc ha^{-1}). Isso se deve as melhores condições físico-

hídricas do solo para o desenvolvimento radicial proporcionada pelo manejo de solo, e também pela boa distribuição da precipitação durante toda a safra (714 mm), Bergamaschi et al. (2001), ressaltam que com 67 mil plantas por hectare, um híbrido precoce de milho necessita de uma média de 650 mm de água em todo o ciclo, condição esta que foi suprida nesta safra especialmente nos períodos críticos (do pendoamento ao enchimento de grãos), conforme pode-se observar na Figura 2.

Tabela 25 – Rendimento de grãos de milho em função do manejo plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE). FAMV/UPF, Passo Fundo (RS), 2011

| Manejo | Rendimento |
|-------------|---------------------|
| | Mg ha ⁻¹ |
| PDE | 12,421 a |
| PD | 11,811 b |
| Média geral | 12,116 |
| C.V. (%) | 6,81 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste “t”.

Secco et al. (2009) obtiveram maior produtividade de milho no manejo escarificado em relação a três níveis de compactação do solo (baixo, médio, alto).

Já Klein et al. (2008) avaliando rendimento de trigo em PDE, obtiveram 0,682 Mg ha⁻¹ de grãos de trigo em relação ao PD, comprovando o efeito positivo da escarificação do solo sobre o desenvolvimento e o rendimento da cultura do trigo.

A massa de grãos da maior espiga foi de 367,07 gramas, se extrapolarmos esta massa para uma população uniforme de 66666 plantas ha^{-1} (população original do experimento) o rendimento poderia alcançar a massa de 24,47 Mg ha^{-1} , ou seja, 407,8 sc ha^{-1} , em torno de 12,05 Mg ha^{-1} a mais que o maior rendimento obtido neste estudo, o que demonstra que este híbrido tem potencial genético para atingir altas produtividades.

5 CONCLUSÕES

a) A escarificação altera as propriedades físico-hídricas do solo, pois diminui a densidade do solo e a densidade relativa, aumenta a porosidade total em especial os macroporos.

b) A resistência a penetração das raízes é menor no plantio direto escarificado em relação ao plantio direto tanto na capacidade de campo como no ponto de murcha permanente.

c) O intervalo hídrico ótimo é maior no plantio direto escarificado.

d) O solo na linha de semeadura tolera mais a variação de umidade em relação à entrelinha permanecendo por mais tempo dentro da faixa de umidade ótimo.

e) A condutividade hidráulica é maior no plantio direto escarificado.

f) Devido às melhores condições físico-hídrico-mecânicas o solo escarificado proporcionou maior massa verde e massa seca na cultura da aveia preta.

g) A cultura do milho obteve maiores rendimentos de grãos no plantio direto escarificado.

h) O espaçamento entre plantas na linha de semeadura não é fator primordial para o rendimento, sendo que tanto espaçamentos reduzidos, como espaçamentos mais afastados apresentaram massa de espigas semelhantes.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, M. L. de; SANGOI, L. Aumento da densidade de plantas de milho para regiões de curta estação estival de crescimento. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 179- 183, 1996.

ARAÚJO, M.A. *Influência das propriedades físicas do solo sobre a nutrição de plantas*. Divulgação técnica Manah, nº 177, 2008.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 29, p. 425-435, 2005.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, *Soil Science Society of America*, p.123-141, 1996.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 29. p. 515-522, 2005.

AZEVEDO, D. M. P. de. LEITE, L. F. C.; NETO, M. L.T; DANTAS, J. S. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo e distribuição do sistema radicular da soja sob diferentes sistemas de preparo no cerrado maranhense. *Revista Ciência Agronômica*, v. 38, n.1, p.32-40, 2007.

BARRETO, A. N. Condutividade hidráulica saturada. *Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental*. v. 5, nº 1, Campina Grande, 2001.

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E, eds. *Soil environmental analysis: physical methods*. 2.ed. New York: Marcel Decher, p.377-403, 2001.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, v. 57, p. 437-447, 2006.

BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L.M.G.; BERGONCI, J.I.; ARAGONÉS, R.; SANTOS, A.O.; FRANÇA, S.; LANGENSIEPEN, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. *Revista Argentina de Agrometeorologia*, v.1, p.23-27, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a Haplustox from Brazil. *Brazilian Archiver of Biology and Technology*, v. 48, n. 6, p. 863 – 871, 2005a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 6, p.843-849, 2005b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.26, p.829-834, 2002.

BEUTLER, A.; CENTURION, J.; MENGATTO, L.; ALVES, J.; WAGNER, G. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do

solo e produtividade de milho em Argissolo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 31, p. 359-364, 2009.

BOTTA, G. F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; TOLON BECERRA, A.; ROSSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, v.101, p.44-51, 2008.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research*, v.86, p.9-14, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R.R. *The nature and properties of soils*. 14 ed. New Jersey, Pearson Education, 2002, 960 p.

BRASIL. Instrução normativa nº 2, de 09 de outubro de 2008. Estabelece critérios para descrições das características específicas dos diferentes tipos de solos, atualmente utilizadas no Zoneamento Agrícola de Risco Climático. *Diário Oficial da União*, Brasília, Republicada no DOU nº 197, de 10/10/2008, Seção 1, pág. 71, D.O.U., 10/10/2008 - Seção 1, REP., 13/10/2008.

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

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 789-796, 2005.

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

CARDOSO, V. M. F. *Capacidade de suporte de carga como indicador da qualidade estrutural de solos agrícolas em áreas irrigadas*. 167 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

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

CARTER, M. R.; KUNELIUS, H. T.; Comparison of tillage and direct drilling for Italian ryegrass on the properties of a fine Sandy loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 66, n.02, p. 197-207, 1986.

CARVALHO, G. L.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p. 765-771, 2006.

CASTRO, O. M. de; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob diferentes sistemas de manejo. *Bragantia*, Campinas, v.69, n.2, p.433-443, 2010.

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

COLET, M. J.; SVERZUT, C. B.; WEIRICH NETO, P. H. SOUZA, Z. M. de. Alterações em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 33, n. 2, p. 361-368, 2009.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. *Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 10 ed. Porto Alegre: NRS/SBCS, 2004, 400 p.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; DE SOUSA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.41, n.7, p. 1185-1191, 2006.

CRUZ, J. C.; MONTEIRO, J. A.; SANTANA, D. P.; GARCIA, J. C.; BAHIA, F. G. F. T. de C.; SANS, L. M. A.; PEREIRA FILHO, I. A.

Recomendações técnicas para o cultivo do milho, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, DF, 1996.

CUSTÓDIO, D. P.; PASQUALETTO, A.; OLIVEIRA, I. P. Comportamento de cultivares de milho (*Zea mays*) e sistemas de cultivo. *Revista Ciência Agrotécnicas*, p. 24 -32, 2000.

DANIEL, L. A.; MARETTI, H. J. Avaliação de camada de solo compactada e análise de crescimento de plantas. In: SILVEIRA, G. M. (coord). Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola, 4., Jundiaí, 1990. *Anais*. Campinas. Fundação Cargil, p. 22-23, 1990.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p.703-709, 1999.

DEXTER, A.R.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.57, p.203–212, 2001.

DIAS JÚNIOR, M. S.; FONSECA, S.; ARAUJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.42, p.257-264, 2007.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. *Engenharia Rural*, v.1, p.92-102, 1990.

DURIGON, F. F.; KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; FÁVERO, F.; SIGNOR, F. F. Rendimento de Trigo e Propriedades Físicas de um Latossolo Vermelho sob Diferentes Sistemas de Manejo. In. XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DO SOLO. *Resumos Expandidos*. Gramado – RS. 2007, CD-ROM.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

FAGUERIA, N. K.; STONE, L. F. Qualidade do solo e meio ambiente. *Documentos* . Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 197, 35p., 2006.

FERNANDES, F. C. S.; ALVES, M. C.; SILVA, M. M. da. Produtividade de culturas e atributos físicos de um Latossolo afetados pelo sistema de manejo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.6, n.3 , p. 297-308, 2007.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, nº. 3, p. 487-493, 2000.

FOLONI, J. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.8, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 627-636, 2007.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II – Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p 805-818, 2009.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, p.383-411,1986.

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*. v. 32, 180-186 p., 1968.

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

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.

HUBERT, F.; HALLAIRE, V.; CANER, L.; HEDDADJ, D. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma*, v. 142, p. 226-236, 2007.

IAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência mecânica do solo cultivado em cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.2, p.523-530, 2006.

INOUE, T. T.; ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; ESTEVES, N.; MIGNOSO, V.; LEITE, J. C. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférico após 13 anos de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

JAYAYARDANE, N.S.; CHAN, K.Y.; The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils – A review. *Australian Journal of Soil Science*, Melbourne, v.32, p.13-44, 1994.

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

KIMATURA, A. E.; CARVALHO, M. de P.; LIMA, C. G. da R. Relação entre a variabilidade das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 361-369, 2007.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A.; BARBOZA, E. A.; COSTA, L. O.; MADALOSSO, T. Escarificação de solo sob plantio direto e seu

efeito nas culturas da aveia e do milho. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. *Anais*. Uberlândia, 2011a. CD-ROM.

KLEIN, V. A.; KLEIN, C. ; MADALOSSO, T. ; COSTA, L. O. ; BARBOZA, E. A. Dispositivo para acoplar amostras de solo com estrutura preservada em permeâmetro de carga decrescente. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, *Anais*, Uberlândia, 2011b. CD-ROM.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 5, p. 26 – 32, 2006.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídricas-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Piracicaba, 1998. 150 p. Tese (doutorado), USP – ESALQ, 1998.

KLEIN, V. A. *Física do solo*. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212 p.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. *Ciência Rural*, v. 25, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; KLEIN, C. ; MADALOSSO, T. ; COSTA, L. O. ; BARBOZA, E. A. Determinação da permeabilidade do solo ar em pressão decrescente. In: VIII Reunião Sul Brasileira de ciência do solo, *Anais*, Santa Maria, 2010a.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010b.

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*, v.31. p. 221-227, 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e

manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo e rendimento de Trigo em plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, v. 38, n.2, p.265-371, mar-abr, 2008.

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

KUNZ, M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KUNZ, M. Determinação das propriedades físicas e hídricas do solo em diferentes sistemas de manejo do milho. In. XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DO SOLO. *Resumos Expandidos*. Gramado – RS. 2007, CD-ROM.

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

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

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; ROMERO, R. R. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 29, p. 677-684, 2005.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência a penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 217-223, 2006.

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

LOPES, S. J.; STORCK, A. D. L. L.; DAMO, H. P.; BRUM, B.; SANTOS, V. J. Relações de causa e efeito em espigas de milho relacionadas aos tipos de híbridos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.6, p.1536-1542, 2007.

MARCHÃO, R. L.; JUNIOR, J. D. G. S.; SILVA, E. M. da; SÁ, M.A.C.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Parâmetro “S” e Intervalo Hídrico Ótimo em Latossolo Vermelho sob Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária no Cerrado. In. XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DO SOLO. *Resumos Expandidos*. Gramado – RS. 2007, CD-ROM.

MARCOLIN, C. D. *Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolos argilosos sob plantio direto*. Passo Fundo, 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado), UPF, 2006.

MARCOLIN, C. D. *Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto*. Tese (Doutorado). Passo Fundo, 2009.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber and metal-tracked tractors. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.49, n.2, p.185-199, 1998.

MATIAS, S. S. R.; BORBA, J. A.; TICELLI, M.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetidos a diferentes usos. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 40, n.3, p. 3331-3338, 2009.

MENTGUES, I. M.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; Densidade máxima pelo ensaio de Proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão uniaxial. In. XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DO SOLO. *Resumos Expandidos*. Gramado – RS. 2007, CD-ROM.

MIRANDA, E. E. V. *Modelagens e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar*. 2006. 109 f. Tese

(Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFERM G. C. E.; SILVEIRA, J. C. M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema de plantio direto, *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, MG, v. 32, n.4, p. 1259-1265, 2008.

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; LERINK, P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structure soils. *Journal of Terramechanics*, v.44, n.1, p.53-63, 2007.

NOGUEIRA, J.B. *Mecânica dos solos – Ensaio em laboratório*. EESC-USP, São Carlos – SP. 1998, 248 p.

OLIVEIRA, C. V.; BAHIA, V. G.; PAULA, M. B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 191, n.1, p.46-48, 1998.

OLIVEIRA, M. S.; DIAS JÚNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, n.2. p.327-336, 2004.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil & Tillage Research*, v. 82, p.57-64, 2005.

PEDROTTI, A.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. *Agropecuária Catarinense*, Florianópolis, v.9, n.4, p.50-2, 1996.

PHILLIPS, R. E.; KIRKHAN, D. Soil compaction in the field and corn growth. *Agronomy Journal*, v. 54, p. 29-34, 1962.

REICHERT, J. M. SILVA, L. S. REINERT, D. J. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, SBCS, v.5, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADE, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v. 32, p. 1805 – 1816, 2008.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v.110, p.131-146, 2002.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p. 1167-1175, 2007.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Science*. v. 56, p. 331-339 , 1944.

RIZZARDI, M. A.; BOLLER, W.; DALLOGLIO, R. Distribuição de plantas de milho, na linha de semeadura, e seus efeitos nos componentes de rendimento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.29, n.8, p. 1231-1236,1994.

RIZZARDI, M. A.; PIRES, J. L. Resposta de cultivares de milho à distribuição de plantas na linha, com e sem controle de plantas daninhas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.26, n.1, p.13-17, 1996.

ROSEBERG, R.J.; MCCOY E. L. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. *Soil Science Society American Journal*, v. 56, p. 1264-1267, 1992.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Campinas, v. 34, n.5, p. 821-828, 1999.

SALIRE, E. V.; HAMMEL, J. E.; HARDCASTLE, J. H.. Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil Tillage Reserch*, v. 31, p. 235-248, 1994.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ANDRADE GONÇALVES, A. C. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1369-1377, 2008.

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

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:797-804, 2004.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural*. v.39, n.1, p.58-64, 2009.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yiels response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.49, p.422-427, 1985.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. de S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, p.1419-1427, 2008.

SILVA A.P; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth to least limiting water range of soils. *Plant and Soil*, v. 184, p. 323-329, 1997.

SILVA JUNIOR, C. A.; CARVALGO, L. A.; MEURER, I.; LIBARDI, P. L.; SILVA, M. A. C.; OLIVEIRA, E. C. A. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes métodos de preparo para o plantio da cana-de-açúcar. *Revista Agrarian*. Dourados, v.3, n.8, p.111-118, 2010.

SILVA, A. P. da; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 33, p. 1535-1545, 2009.

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

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.44, n.1-2, p.81-93, 1997.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.4, p.842-847, 2006.

SILVEIRA, L. R.; BRITO, A. S.; MORA, J. C. A.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. Sistema automático de aquisição de dados para equipamento de medida de permeabilidade intrínseca do solo ao ar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Solo, v. 35, p. 429-436, 2011.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Science*, v.154, p.269-280, 1992.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.1, p.18-23, 2003.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p. 207-212, 2002.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J. REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*. v. 34, p. 755-760, 2004.

STRECK, E. V.; KAMPF, N. DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2^a Ed. Porto Alegre, EMATER, RS, 2008. 222p.

STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research*, v.99, p.4-48, 2008.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea Mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, n.3, p.725-730, 2001.

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

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

TEDESCO, M.J. *Análise de solo, plantas e outros minerais*. UFRGS: Depto. de Solos. Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 1995. 174p.

TOLLENAAR, M., WU, J. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Science*, v.39, p.1597-1604, 1999.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, n.2, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.3, n.3, p.286-292, 1999.

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

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. *Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja*. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p.(Circular Técnica, 23)

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; PICCININ, J. L.; FARIAS, J. R. B.; GALERANI, P. R.; GAZZIERO, D. L. P. Avaliação de sistemas de preparo do solo, rotação de culturas e semeadura da soja. In: *Resultados de pesquisa Embrapa Soja*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Londrina, p.171-177, 1998.

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

VEEN, B. W.; BOONE, F. R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.16, n.1/2, p.219-226, 1990.

VEIGA, M. HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of na Oxisol from southern Brasil, as affected by long-tern tillage systems, *Soil Tillage Research* , Amsterdam, v.92, n.1-2, p.104-113, 2007.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, n.4, p.743-755, 2009.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; VIEIRA, M. N. S. *Solos: propriedade, classificação e manejo*. Brasília, MEC/ ABEAS, 1988. 154p.

VIEIRA, M. L. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. Passo Fundo, 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado), UPF, 2006.

YOUNGS, E.G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed). *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker. cap. 4, p. 161-207. 1991.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, n. 3, p. 621-633, 2000.