

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

**ESTRUTURA E ÁGUA EM ARGISSOLO SOB
DISTINTOS PREPAROS NA CULTURA DO MILHO**

TESE DE DOUTORADO

Douglas Rodrigo Kaiser

Santa Maria, RS, Brasil

2010

ESTRUTURA E ÁGUA EM ARGISSOLO SOB DISTINTOS PREPAROS NA CULTURA DO MILHO

Douglas Rodrigo Kaiser

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

Orientador: Prof. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2010

K13e Kaiser, Douglas Rodrigo
Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho / por Douglas Rodrigo Kaiser. – 2010.
150 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert
Coorientador: José Miguel Reichert
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2010

1. Agronomia 2. Disponibilidade de água 3. Resistência do solo
4. Crescimento radicular 5. Compactação do solo 6. Plantio direto
I. Reinert, Dalvan José II. Reichert, José Miguel III. Título.

CDU 631.4

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha B. Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Douglas Rodrigo Kaiser. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Fone (0xx) 55 96074140

End. Eletr: douglasrodrigokaiser@gmail.com.br

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

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova
a Tese de Doutorado**

**ESTRUTURA E ÁGUA EM ARGISSOLO SOB DISTINTOS PREPAROS
NA CULTURA DO MILHO**

elaborada por
Douglas Rodrigo Kaiser

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dalvan José Reinert, PhD.
(Presidente/Orientador)

José Miguel Reichert, PhD. (UFSM)
(Co-orientador)

Flávio Luiz Foletto Eltz, PhD. (UFSM)

Deonir Secco, Dr. (UNIOESTE)

Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)

Santa Maria, 15 de outubro de 2010.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos, que possibilitaram a realização do curso de doutorado.

Aos professores, Dalvan José Reinert e José Miguel Reichert, pela orientação, dedicação, ensinamentos e amizade ao longo dos meus 10 anos como estudante e colaborador do grupo da física do solo.

Ao professor Jackson Adriano Albuquerque, pela ajuda e colaboração durante a sua estadia junto ao grupo de pesquisa da Física do Solo da UFSM.

Ao Professor Jean Paolo Gomes Minella, pela colaboração nas discussões do trabalho.

Aos demais professores do departamento de solos, pelos ensinamentos e incentivo durante a graduação e pós-graduação.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Flávio Fontinelli, que sempre nos ajudaram nos trabalhos de campo e laboratório

Agradeço, de maneira especial, aos bolsistas de iniciação científica e colegas da pós-graduação: Miriam Fernanda Rodrigues, André de Oliveira, Mayra de Souza Dettmer, Tiago Ivan Pereira, Eracilda Fontanela, Maurício Kunz, Cláudia Alessandra Peixoto de Barros, Alencar Xavier, Alan Ebano de Oliveira, Luciano Jacomet, Fabiano Braga, Leandro Dalbianco, Neiva Somavilla Gelain, Leonir Teresinha Uhde, Paulo Gubiani, Juliana Prevedello, Marcelo Mentges, Davi Vieira e Marcelo Kunz. A vocês meu muito obrigado, pois cada número apresentado nesta tese também é fruto de seu trabalho e dedicação.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo, pela amizade, incentivo e pelos momentos de descontração.

Aos demais colegas do programa de pós-graduação em Ciência do Solo, pelo apoio, incentivo e auxílios prestados.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos, e ao CNPq por parte do auxílio financeiro.

A minha família, mesmo estando distante, pelo apoio, carinho e incentivo.

A todos, meu MUITO OBRIGADO!!!!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

ESTRUTURA E ÁGUA EM ARGISSOLO SOB DISTINTOS PREPAROS NA CULTURA DO MILHO

AUTOR: DOUGLAS RODRIGO KAISER
ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 15 de outubro de 2010.

A retenção e a disponibilidade de água no solo são controladas pela sua estrutura e a sua variação temporal está associada às condições meteorológicas e à necessidade das culturas. A água também controla a aeração e a resistência do solo à penetração, que são fatores diretamente ligados ao crescimento do sistema radicular. O objetivo geral desse estudo foi avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e níveis de compactação sobre as suas propriedades físicas e definir as condições que possam favorecer a retenção, o armazenamento e a disponibilidade de água às plantas, mantendo a aeração e a resistência do solo favorável ao crescimento radicular. Para atender estes objetivos instalou-se um experimento na área experimental do Departamento de Solos da UFSM. A área utilizada estava sob pouso e, a partir de 2002, foi incorporada ao sistema produtivo, sob sistema de plantio direto. Os tratamentos estudados foram: plantio direto (PD); plantio direto com compactação adicional (PDc); escarificação profunda (Sub); escarificação superficial (Esc) e preparo convencional (PC). O delineamento foi em blocos ao acaso com quatro repetições. Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,15; 0,15 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 e 0,40 a 0,50 m, para determinar a densidade (D_s), distribuição de poros, permeabilidade ao ar (K_a), condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e a curva de retenção de água. Nestas mesmas camadas, a umidade do solo (U_v) foi monitorada continuamente até a camada de 0,30 m, utilizando-se um TDR automatizado. Nas demais camadas as leituras foram feitas semanalmente com um TDR manual. A resistência do solo à penetração (R_p) foi determinada em seis pontos transversalmente às linhas de semeadura, sob oito condições de umidade do solo. Na cultura do milho avaliou-se a emergência, a massa seca, a distribuição radicular na maturação fisiológica e a produtividade. O PDc apresentou maior D_s e menor porosidade total (P_t) e macroporos (Mac) até 0,40 m de profundidade. A Esc, Sub e o PC reduziram a D_s e aumentaram a P_t . A K_{sat} e a K_f tiveram pouca influência dos tratamentos, mas apresentaram correlação positiva com P_t e Mac e negativa com D_s . O principal benefício da mobilização do solo é a redução da sua resistência à penetração e a melhoria na aeração do solo, o que permite um melhor crescimento das raízes. O plantio direto não armazenou maior quantidade de água para as plantas em relação ao preparo convencional e a escarificação. A compactação do solo aumentou a retenção de água na camada mais adensada, mas reduziu a capacidade da planta explorar o solo, por dificultar o crescimento radicular e reduzir a aeração do solo. O solo compactado atingiu em menos tempo e manteve por mais tempo valores de resistência à penetração e de permeabilidade ao ar, considerados restritivos. A produção de massa seca e de grãos do milho não foi afetada pelos manejos e níveis de compactação, mesmo que alguns fatores de crescimento da planta estivessem fora da faixa adequada indicada pelo intervalo hídrico ótimo.

Palavras chave: disponibilidade de água, aeração do solo, resistência do solo, crescimento radicular, compactação, plantio direto.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

SOIL STRUCTURE AND WATER IN AN ALFISOL UNDER DIFFERENT TILLAGES FOR CORN CROP

AUTHOR: DOUGLAS RODRIGO KAISER
ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT
Place and date: Santa Maria, October 15, 2010.

The retention and availability of water in the soil are controlled by soil structure and its temporal variation is associated with the weather and the crops needs. Water also controls the aeration and soil penetration resistance, factors that are directly linked to root growth. The overall objective of this study was to evaluate the effect of management systems and soil compaction levels on soil physical properties to define the conditions that favor the retention, storage and availability of water to plants while maintaining aeration and soil resistance favorable to root growth. To meet these goals an experiment was set up in the experimental station of the Soils Department-UFSM. The area was under fallow and in 2002 year it was incorporated into the crop production under no-tillage. The treatments were: no-tillage (NT) no-tillage with compaction (NTC), subsoiling (Sub), chiseling (ESC) and conventional tillage (CT). The design was a randomized block design with four replications. Undisturbed soil samples were collected in the soil layers 0.0 to 0.05, 0.05 to 0.10 0.10 0,15; 0.15 to 0.20; 0.20 to 0.30, 0.30 to 0.40 and 0.40 to 0.50 m to determine the bulk density (BD), pore distribution, air permeability (K_a), saturated hydraulic conductivity (K_s) and the water retention curve. For the same layers, soil moisture (UV) was monitored continuously down to the layer of 0.30 m, using an automated TDR. In the other layers readings were taken weekly with a manual TDR. The penetration resistance (R_p) was determined at six points across the plant rows, under eight conditions of soil moisture. The maize parameters evaluated were the emergency, dry mass, root distribution at physiological maturity and yield. The NTC had a higher BD and lower total porosity (Pt) and macropores (Mac) down to 0.40 m depth. The ESC, Sub and the CT reduced the BD and increased Pt. The K_{sat} and KI had little influence of the treatments, but showed positive correlation with Pt and negatively with Mac and D_s . The main benefit of tillage is the reduction of its resistance to penetration and improved soil aeration which allows for better root growth. No-tillage did not store more water for plants in relation to conventional tillage, subsoiling and chiseling. Soil compaction increased the water retention in densest layer, but reduced the plant's ability to exploit the soil, by inhibiting root growth and reduce soil aeration. The compacted soil reached in less time and kept for longer time restrictive values of soil penetration resistance and air permeability. The dry matter production and grain yield of maize was not affected by managements and compaction levels, although some plant growth factors were outside the appropriate range indicated by the least limiting water range.

Key words: water availability, soil aeration, soil strength, root growth, soil compaction, no-tillage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores físicos de crescimento ao longo do ciclo das culturas.....	34
Figura 2 - Croqui do experimento com a definição dos blocos dentro da malha de pontos estabelecidos. As parcelas possuem dimensões de 10 x 10 m.....	39
Figura 3 - Aplicação dos tratamentos: a) plantio direto com compactação adicional (PDC); b) plantio direto; c) escarificação superficial ate 0,15 m e escarificação profunda ate 0,30 m e d) preparo convencional do solo.....	40
Figura 4 - Medida da área de contato entre o solo e o pneu.....	40
Figura 5 - Área e contato dos pneus com o solo.....	41
Figura 6 - Sistema automático de monitoramento da umidade do solo e da precipitação. 1: pluviômetro automático, 2: Datalogger, 3: Memória, 4: TDR-100, 5: Multiplexador, 6: Bateria e 7: teclado programador.....	44
Figura 7 -TDR – Trase utilizado para fazer as leituras manuais.....	44
Figura 8 - Esquema da instalação das sondas no perfil do solo e da sonda utilizada.....	46
Figura 9 - Localização dos pontos (linhas pontilhadas) onde foram realizadas as medidas de resistência do solo à penetração com o uso de um penetrômetro digital.....	47
Figura 10 - Permeâmetro para a medida do fluxo de ar em amostras de solo (Adaptado de Horn et al., 2004).....	48
Figura 11 - Permeâmetro de carga variável utilizado para a medida do fluxo de água nas amostras de solo.....	51
Figura 12 - Procedimento utilizado para avaliar a distribuição radicular da cultura do milho. A: parede vertical do perfil exposta; B: exposição das raízes e quadro com a malha de fios e C: desenho da distribuição radicular observada no perfil.....	52
Figura 13 - Curvas de retenção de água no solo. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial ; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional, nas camadas avaliadas..	61
Figura 14 - Regressões entre a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) com a macroporosidade (a), com a porosidade total do solo (b) e com a densidade do solo (c).....	64

Figura 15 - Precipitação pluvial ao longo do ciclo do milho no período de novembro de 2008 a abril de 2009..... 68

Figura 16 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 69

Figura 17 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 70

Figura 18 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 71

Figura 19 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 72

Figura 20 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,30 a 0,40 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 73

Figura 21 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,40 a 0,50 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 73

Figura 22 - Umidade volumétrica do solo nas camadas de 0,50 a 0,60 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 74

Figura 23 - Água disponível na camada de 0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 77

Figura 24 - Água disponível na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 78

Figura 25 - Água disponível na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 79

Figura 26 - Água disponível na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 80

Figura 27 - Água disponível na camada de 0,30 a 0,40 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo..... 81

Figura 28 - Água disponível na camada de 0,40 a 0,50 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	81
Figura 29 - Água disponível na camada de 0,50 a 0,60 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	82
Figura 30 - Regressões entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) na tensão de 6 kPa com a macroporosidade (a), densidade do solo (b).....	87
Figura 31 - Espaço aéreo do solo na camada de 0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	89
Figura 32 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	90
Figura 33 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	91
Figura 34 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.....	92
Figura 35 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0 a 0,05 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	94
Figura 36 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,05 a 0,10 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	95

Figura 37 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,10 a 0,20 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	95
Figura 38 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,20 a 0,30 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	96
Figura 39 - Resistência do solo á penetração e umidade volumétrica do solo no perfil explorado pelas raízes. * Significativo a 5% pelo teste de Tukey, ns: não significativo.....	99
Figura 40 - Resistência do solo à penetração observada. RP: resistência do solo à penetração (MPa), Ds: densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) e θ : umidade volumétrica do solo (m^3m^{-3}).....	101
Figura 41 - Resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo de Buscher em função da variação da umidade e da densidade do solo. RP: resistência do solo à penetração (MPa), Ds: densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) e θ : umidade volumétrica do solo (m^3m^{-3}).....	101
Figura 42 - Resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo linear, em função da variação da umidade e da densidade do solo. RP: resistência do solo à penetração (MPa), Ds: densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) e θ : umidade volumétrica do solo (m^3m^{-3}).....	102
Figura 43 - Relação gráfica 1:1 entre à resistência do solo a penetração medida no campo e a estimada com o modelo matemático linear (a) e o modelo não linear de Busher (b).....	102
Figura 44 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho no plantio direto (PD).....	104
Figura 45 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho no plantio direto compactado (PDC).....	105
Figura 46 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área escarificada (ESC).....	105
Figura 47 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área subsolada (SUB).....	106
Figura 48 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área com preparo convencional (PC).....	106

Figura 49 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes no dia da aplicação dos tratamentos. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e d) PC.....	108
Figura 50 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 34 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.....	109
Figura 51 - Distribuição espacial da resistência á penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 44 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.....	110
Figura 52 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 58 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.....	111
Figura 53 - Intervalo hídrico ótimo (IHO) para o Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico (COLLARES et al., 2006).....	112
Figura 54 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) no perfil do solo explorado pelas raízes do milho. Limite superior: umidade do solo na capacidade de campo; Limite inferior: umidade do solo onde a resistência do solo à penetração é 2 MPa.....	115
Figura 55 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,05 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	117
Figura 56 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,05 a 0,10 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	118
Figura 57 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,10 a 0,20 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	119
Figura 58 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,20 a 0,30 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.....	120
Figura 59 - Distribuição do sistema radicular do milho no solo sob plantio direto. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.....	122

Figura 60 - Distribuição do sistema radicular do milho no plantio direto compactado. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.....	122
Figura 61 - Distribuição do sistema radicular do milho no solo com escarificação superficial (ESC). BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.....	123
Figura 62 - Distribuição do sistema radicular do milho no solo com escarificação profunda (SUB0. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.....	124
Figura 63 - Distribuição do sistema radicular do milho no preparo convencional. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica do perfil do Argissolo da área utilizada para experimento.....	37
Tabela 2 - Parâmetros químicos do solo nos quatro blocos do experimento.....	38
Tabela 3- Umidade gravimétrica do solo na área experimental no dia da compactação do solo, no dia do preparo do solo e no dia da semeadura do milho.....	42
Tabela 4 - Densidade do solo em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação. Média das duas épocas de coleta.....	54
Tabela 5 - Porosidade total e macroporosidade em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação.....	57
Tabela 6 - Diâmetro de poros em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação.....	58
Tabela 7 - Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível (mm) obtida através da curva de retenção de água para os sistemas de manejo estudados.....	61
Tabela 8 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) nos sistemas de manejo e camadas estudadas.....	62
Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a condutividade hidráulica do solo saturado com a densidade e classes de tamanho de poros.....	63
Tabela 10 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) em diferentes tensões de água nos sistemas de manejo e camadas do solo.....	83
Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a permeabilidade do solo ao ar com a densidade e classes de tamanho de poros, espaço aéreo e condutividade hidráulica do solo.....	85
Tabela 12 - Índice de continuidade de poros em diferentes sistemas de manejo e camadas do solo.....	86
Tabela 13 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a resistência do solo à penetração (RP) e a densidade (DS) e umidade volumétrica do solo (UV).....	98

Tabela 14 - Modelos matemáticos para a estimativa da resistência do solo à penetração.....	103
Tabela 15 - Umidade volumétrica do solo onde a resistência do solo à penetração atinge o valor de 2 MPa.....	113
Tabela 16 - Emergência das plantas de milho em Argissolo sob diferentes sistemas de preparo e manejo.....	126
Tabela 17 - Produtividade, massa seca e peso de 1000 grãos de milho em Argissolo sob diferentes sistemas de preparo e manejo.....	127
Tabela 18 - Produtividade, massa seca e peso de 1000 grãos de milho em cada bloco do experimento.....	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Hipóteses.....	21
1.2 Objetivos.....	22
1.2.1 Objetivo geral.....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Dinâmica da água no solo.....	23
2.2 Resistência do solo à penetração e crescimento radicular de plantas.....	27
2.3 Aeração e permeabilidade do solo ao ar.....	31
2.4 Integração dos fatores físicos de crescimento das plantas.....	34
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Local e solo.....	37
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	38
3.3 Cultura e tratos culturais.....	42
3.4 Avaliações físico-hídricas e metodologia empregada.....	42
3.4.1 Densidade, distribuição de poros e curva de retenção de água.....	42
3.4.2 Umidade e armazenamento de água no solo.....	43
3.4.3 Resistência do solo à penetração.....	46
3.4.4 Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade do solo ao ar.....	48
3.4.5 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	50
3.5 Avaliações nas plantas.....	52
3.6 Análise estatística.....	53

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 Densidade e distribuição do tamanho de poros do solo.....	54
4.2 Curva de retenção e disponibilidade de água no solo.....	59
4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	62
4.4 Precipitação pluvial.....	65
4.5 Retenção e dinâmica da água no solo em condições de campo.....	66
4.6 Permeabilidade do solo ao ar.....	82
4.7 Resistência do solo à penetração.....	97
4.8 Integração dos fatores físicos de crescimento das plantas através do IHO.....	112
4.9 Distribuição do sistema radicular.....	121
4.10 Emergência e produtividade da cultura.....	126
5 CONCLUSÕES.....	129
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água no solo é um fator fundamental ao desenvolvimento e à produtividade das culturas agrícolas. Nas áreas não irrigadas a quantidade de água disponível no solo, para as plantas, depende, diretamente, da capacidade do solo em reter e disponibilizar a água e de uma distribuição adequada das precipitações ao longo do ciclo da cultura. Nos últimos anos, o Rio Grande do Sul tem sido afetado pelas estiagens, o que tem acarretado problemas na produção agrícola, trazendo consequências negativas aos agricultores e demais setores da cadeia produtiva. Nesses anos, o suprimento de água nos períodos de estiagens só é suficiente nas áreas irrigadas, que são pouco representativas perante a área agrícola do Estado. Dessa forma, para essas situações, a estrutura do solo é o componente manipulável no sistema, e suas características podem afetar a entrada da água no solo e a sua disponibilidade.

Os sistemas de manejo, o tráfego de máquinas agrícolas e o pisoteio animal alteram as características estruturais do solo e podem comprometer a entrada e o armazenamento da água no solo (HANZA; ANDERSON, 2005; DREWRY et al., 2008). Solos bem estruturados são favoráveis ao ambiente e às plantas, pois reduzem as perdas por escoamento e aumentam a disponibilidade de água para as culturas. A presença de palha na superfície pode reduzir o aquecimento do solo, as perdas de água por evaporação (BESCANS et al., 2006) e ainda serve de mecanismo de dissipação das cargas externas aplicadas ao solo (BRAIDA et al., 2006). O revolvimento do solo favorece o aquecimento da camada superficial (SILVA et al., 2006) e aumenta as perdas de água por evaporação. Por outro lado, a quebra da continuidade dos poros pelo revolvimento, pode reduzir a difusão do vapor de água do solo para a atmosfera. Essas alterações ocorrem em função do manejo de solo, mas não é conhecido o efeito contínuo dessas alterações no comportamento hídrico durante todo ciclo de uma cultura.

O tráfego intenso de máquinas agrícolas e o pisoteio animal sob condições de alta umidade do solo estão entre os principais fatores que reorganizam a estrutura e reduzem o tamanho e a continuidade dos poros. Com isso, a entrada da água no sistema via infiltração e a sua redistribuição no perfil são comprometidas. A compactação do solo também pode reduzir as trocas gasosas no solo, a

disponibilidade de oxigênio e aumenta a concentração de gás carbônico, o que prejudica o metabolismo do sistema radicular das plantas (DREW, 1980; BORU et al., 2003). A água do solo também é o veículo de difusão e transporte dos nutrientes para as raízes das plantas e, portanto, a sua disponibilidade e fluxo também afetam a nutrição das plantas (FORSYTHE, 1996).

As práticas de cultivo podem amenizar o déficit hídrico e devem ser avaliadas em função da região e classe de solo e seus efeitos nas propriedades físicas do solo e produtividade das culturas. A classe dos Argissolos é bastante representativa no Rio Grande do Sul (STRECK et al., 2002) e tem importante papel nos sistemas de produção dessa região. Nas últimas décadas, muitas áreas, que antes eram mantidas sob pastagem nativa, passaram a ser incorporadas ao sistema de produção agrícola, principalmente com culturas anuais. Esses solos apresentam horizonte superficial com textura franca ou arenosa e o horizonte subsuperficial argiloso (Bt). Essas características pedogenéticas conferem um comportamento hídrico diferenciado e, normalmente, os horizontes superficiais possuem uma melhor permeabilidade, sendo esta reduzida em subsuperfície, favorecendo o fluxo lateral da água. Além disso, por ser uma camada arenosa, a capacidade de armazenamento de água é limitada e, em condições de estiagem, a água retida no horizonte argiloso (Bt) dificilmente ascende para a superfície, devido às características do sistema poroso (FIORIN et al., 1997). Outro fator que afeta o acesso da planta à água armazenada no horizonte argiloso (Bt) é a restrição ao crescimento radicular nesse horizonte (ALBUQUERQUE; REINERT, 1997), principalmente devido à aeração deficiente.

Estudos anteriores, nesse tipo de solo, revelaram que a camada compactada se encontra próximo aos 10 cm de profundidade (STRECK et al., 2004; COLLARES et al., 2006) quando o solo é manejado sob plantio direto. O revolvimento do solo reduz o estado de compactação (SILVA, 2003), mas a duração do seu efeito sobre as propriedades físico-hídricas ao longo do tempo é desconhecida. Em virtude disso, as plantas têm seu desenvolvimento radicular restringido, principalmente em períodos secos, limitando a sua capacidade de acesso à água e nutrientes. Os estudos desenvolvidos anteriormente avaliaram características físico-hídricas desses solos a partir de amostras indeformadas. Esse tipo de estudo fornece indicadores da qualidade do solo (COSTA et al., 2006), mas não revelam o comportamento dinâmico da água ao longo do tempo, sendo uma determinação necessária para

melhor compreender o efeito do manejo e da compactação do solo sobre a retenção de água e das propriedades dependentes do conteúdo de água no solo, como a aeração e a resistência do solo.

Dentre as culturas anuais, o milho é uma alternativa promissora para a região Sul do RS, pois a sua semeadura já pode ser realizada no início do mês de agosto e, dessa forma, o período de desenvolvimento das culturas ocorre antes do início do período mais susceptível à estiagem, que acontece a partir de novembro. Além disso, se os sistemas de manejo adotados aumentarem o armazenamento de água é possível implantar uma segunda cultura.

Atualmente, com a disponibilidade de equipamentos modernos, como o TDR (time domain reflectometer) e de tensiômetros equipados com transdutores de pressão, é possível avaliar no espaço e no tempo o conteúdo e o movimento da água no solo. Com essas técnicas, pode-se estudar a dinâmica da água em várias camadas do perfil e em curtos espaços de tempo, mantendo-se a estrutura do solo. Isso é um elemento fundamental para avaliar, em condições de campo, os efeitos das propriedades físicas sobre a retenção e disponibilidade de água.

A viabilização de sistemas de manejo adequados e a diversificação de culturas agrícolas tornam-se alternativas promissoras para geração de renda e amenizar as flutuações na produção de grãos dessa região. Contudo, estudos aprofundados e contínuos são necessários para definir o real efeito de determinado sistema de manejo e das diferentes culturas, sobre a dinâmica da água, de forma a gerar informações que permitam a implantação de sistemas de produção agrícolas sustentáveis e menos impactantes sobre o ambiente, sem comprometer a produtividade.

1.1 Hipóteses

- 1) Altos níveis de compactação do solo em plantio direto reduzem a quantidade e a continuidade dos poros do mesmo e compromete o fluxo de ar e água no solo, limitando a sua aeração.
- 2) O plantio direto aumenta a retenção e a disponibilidade de água às plantas no solo.
- 3) A compactação do solo aumenta a retenção, mas reduz a disponibilidade de água às plantas.
- 4) A compactação oferece maior resistência ao crescimento radicular das plantas e reduz o acesso das plantas à água armazenada abaixo da camada de maior impedimento.
- 5) A escarificação e o preparo convencional reduzem os níveis de compactação do solo e favorecem o seu ambiente físico ao crescimento radicular, aumentando o acesso e a água nas camadas mais profundas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e níveis de compactação sobre as propriedades físicas do solo e definir as condições de manejo que possam favorecer a retenção, o armazenamento e a disponibilidade de água às plantas, mantendo a aeração e a resistência do solo favorável ao crescimento radicular.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar o armazenamento e a disponibilidade de água para a cultura do milho em um Argissolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação.
- 2) Avaliar a distribuição do sistema poroso do solo, a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade do solo ao ar.
- 3) Avaliar a umidade e resistência do solo à penetração ao longo do ciclo das culturas.
- 4) Definir condições de manejo do solo que melhoram a entrada, reduzem as perdas e aumentam a disponibilidade de água.
- 5) Avaliar a duração do efeito dos sistemas de manejo e níveis de compactação do solo sobre as propriedades físico-hídricas ao longo do tempo.
- 6) Determinar qual condição de manejo do solo oferece menores restrições hídricas e mecânicas ao crescimento radicular ao longo de todo o ciclo da cultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica da água no solo

A dinâmica da água no ambiente é controlada por fatores climáticos e edáficos. O solo é o reservatório natural de água para as plantas e, por ser um sistema aberto, ocorrem perdas de água para a atmosfera e para os horizontes mais profundos, abaixo do sistema radicular das culturas agrícolas, o que torna, muitas vezes, difícil estabelecer limites críticos de disponibilidade, considerando apenas avaliações pontuais e parâmetros físicos isolados (JONG VAN LIER, 2000).

A rede de poros representa o sistema circulatório do solo e é responsável pelas trocas gasosas, transmissão e armazenamento da água, o que garante o crescimento e desenvolvimento das plantas nos ecossistemas. A capacidade de o solo reter e disponibilizar a água são dependentes de suas características pedogenéticas, como a textura, mineralogia e profundidade efetiva do sistema radicular e, também, da quantidade e geometria do sistema poroso. Desses fatores todos, apenas a estrutura do solo é o componente manipulável do sistema, e que deve favorecer a entrada e o armazenamento de água para as plantas.

O crescimento das plantas ocorre numa sequência de etapas geneticamente determinadas, por meio de uma série de reações bioquímicas e fisiológicas, que são condicionadas por fatores ambientais, sendo o solo responsável pelo fornecimento de água, nutrientes e oxigênio para as raízes (TAIZ; ZEIGER, 2004). A deficiência de alguns desses fatores em determinada fase do ciclo das plantas vai prejudicar as fases seguintes do desenvolvimento, acarretando a queda da produtividade da cultura.

A variabilidade na distribuição das precipitações tem sido responsável pela ocorrência de deficiência hídrica e pela queda nas safras agrícolas no Rio Grande do Sul (CUNHA, 1999). Desde 2005, o zoneamento realizado pelo Ministério da Agricultura (MAPA) (BRASIL, 2008) vem indicando a necessidade de restringir plantio em parte do território gaúcho para amenizar o risco de perdas por razões climáticas, principalmente algumas regiões da metade sul do RS, ocupadas por solos arenosos. A partir de 2006, foram excluídos para o plantio de soja e mantidos para a cultura do feijão os solos tipo 1. Esses solos têm teor de argila maior que

10% e menor ou igual a 15%, com profundidade igual ou superior a 50 cm, ou teor de argila entre 15 e 35% e com menos de 70% de areia, que apresentam diferença de textura ao longo dos primeiros 50 cm da camada de solo e com profundidade igual ou superior a 50 cm. Os Argissolos e Neossolos representam a maior parte dos solos que se incluem na classe 1 e se concentram na metade sul do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973).

O zoneamento apresentado pelo MAPA considera apenas fatores climáticos e a textura do solo. No entanto, a capacidade do solo em reter e disponibilizar a água para as plantas depende da quantidade, tamanho e continuidade dos poros (PORTELA et al., 2001), da granulometria (VAZ et al., 2005), da composição mineralógica do solo (RAWLS et al., 1991) e da espessura do horizonte explorado pelo sistema radicular das plantas (FIORIN et al., 1997). A composição granulométrica e mineralógica e a espessura dos horizontes são características pedogenéticas próprias de cada solo, não sendo possível a sua alteração durante o ciclo das culturas. Os sistemas de manejo com revolvimento intenso aumentam as perdas por erosão (SCHÄFER et al., 2001), reduzindo a espessura do horizonte A e a sua capacidade de armazenamento de água (ALBUQUERQUE et al., 1996), particularmente em solos com textura arenosa na sua camada superficial.

Na agricultura a compactação e a erosão do solo são os principais processos de degradação da qualidade física do solo, acarretando a redução da produtividade das culturas agrícolas e contaminação do ambiente (WARRICK, 2002). As propriedades dinâmicas do solo estão ligadas espacialmente a sua estrutura e temporalmente às condições meteorológicas. A estrutura do solo é representada pelo arranjo das partículas minerais e orgânicas em agregados e pela rede de poros do solo (HILLEL, 1998), sendo esta alterada pelo uso agrícola do solo.

Nas últimas décadas, a modernização da agricultura tem levado ao uso intensivo de máquinas agrícolas de grande porte e uma maior intensidade do uso das terras (CHAMEN et al., 2003). A valorização das culturas anuais para produção de grãos destinados à alimentação e à produção de bioenergia tem motivado à busca de novas fronteiras agrícolas. Nesse período, solos que antes eram destinados a pastagens para produção de gado passaram a ser utilizados intensamente para produção de grãos e espécies florestais, levando a uma mudança no uso do solo, que muitas vezes não foi acompanhada pelas pesquisas e práticas de manejo recomendadas. O surgimento de novas doenças tem estimulado à

aplicação frequente de defensivos e, dessa forma, aumenta-se a frequência de tráfego das máquinas sobre o solo.

A compactação do solo pelas máquinas ocorre pela pressão exercida pelos pneus e implementos sobre o solo e pela vibração que ocorre durante o deslocamento (HORN et al., 1995). Essas forças associadas promovem o rearranjo da microestrutura do solo, de forma a promover a compressão dos agregados menos resistentes e a aproximação das partículas, o que reduz o tamanho e a continuidade dos poros. O nível e a profundidade da compactação aumentam com a frequência do tráfego (LANDEFELD et al., 2004), enquanto a recuperação natural da estrutura de solos compactados ocorre gradualmente ao longo do tempo (McHUGH et al., 2009). O tráfego das máquinas restabelece o nível de compactação se não for respeitada a condição de umidade do solo adequada para a entrada de máquinas.

O efeito da compactação sobre as plantas é dependente da umidade do solo, pois essa altera a resistência, o espaço aéreo e temperatura do solo, que são os fatores de crescimento das plantas (LETEY, 1985). Em anos em que a precipitação é acima do normal ou frequente nos períodos de semeadura e colheita, o processo de compactação do solo é favorecido. Por outro lado, em anos secos, ou durante curtas estiagens, o efeito da compactação sobre a resistência do solo e sobre o crescimento das raízes das plantas é intensificado (REICHERT et al., 2007), mas a resposta da planta e o nível de dano vão depender da fase do ciclo, da magnitude e do tempo em que as restrições ocorrem (COLLARES et al., 2006).

O revolvimento parcial do solo, através de escarificação ou subsolagem, tem sido a alternativa mais frequente na busca do rompimento das camadas compactadas. Essa prática, de forma esporádica, tem sido recomendada por alguns pesquisadores (TORMENA et al., 2002; CAMARA; KLEIN, 2005; ROSA et al., 2008), por aumentar a porosidade e a rugosidade superficial, favorecendo a infiltração da água no solo (VIEIRA; KLEIN, 2007). Por outro lado, a escarificação biológica do solo com o uso de plantas de cobertura com raízes pivotantes tem se mostrado uma alternativa promissora para criar poros contínuos no solo (ABREU et al., 2004; NICOLOSO et al., 2008), mas o seu efeito não é significativo em solos com elevado grau de compactação (REINERT et al., 2008). Em plantio direto, a ciclagem de raízes é responsável pela formação de bioporos no solo (WILLIAMS; WEIL, 2004),

no entanto, com a pressão exercida pelas máquinas os bioporos são deformados (BLAKWELL et al., 1990) e perdem sua funcionalidade.

A cobertura do solo, com resíduos culturais, reduz a taxa de evaporação e contribui para conservar a água no solo (YUAN et al., 2009). A adição anual de cobertura ao solo e a sua manutenção, ao longo do tempo, também melhoram a estruturação do solo com aumento significativo na porosidade e na capacidade de armazenamento de água (NAGAYA, L; LAL, 2008). O revolvimento do solo aumenta a quantidade de poros, mas desconecta-os (LAMANDE et al., 2003), o que pode comprometer a sua eficiência para o fluxo de água e ar. Por outro lado, a quebra da continuidade dos poros na superfície do solo pode reduzir as perdas de água por evaporação. A compactação do solo destrói os macroporos (ALAOUI; GOETZ, 2008) e reduz a sortividade de água nos agregados do solo (LIPIEC et al., 2009), o que também interfere na disponibilidade de água às plantas.

Nas plantas a deficiência hídrica paralisa a biossíntese, a divisão e expansão celular (HSIAO, 1973) e induz o fechamento estomático (PAIVA et al., 2005), interferindo na taxa fotossintética e no crescimento da planta (WARREN, 2008). A disponibilidade de água mantém o turgor celular, que representa a força motora de alongação das células nos meristemas de crescimento aéreo e radicular (WALTER et al., 2009). O potencial com que a água fica retida no solo define a sua disponibilidade, sendo considerada a água retida a $-0,1$ MPa como a capacidade de campo e a $-1,5$ MPa o ponto de murcha permanente. No entanto, o efeito sobre o crescimento das plantas pode ocorrer com potenciais próximos a $-1,0$ MPa, principalmente a paralisação da divisão e expansão celular (TAIZ; ZIEGER, 2004). O período de estresse hídrico pode ser ampliado ou reduzido pela condição estruturais do solo. Considerando que o limite inferior de disponibilidade hídrica é condicionado por característica pedogenéticas do solo e o limite superior pela qualidade da sua estrutura, o sistema de manejo adotado e o grau de sua compactação podem interferir na entrada e na disponibilidade de água no solo (CARLESSO, 1995).

A redução da produtividade das culturas em plantio direto compactado está ligada à disponibilidade de água às plantas, mas as camadas compactadas não afetam a produção quando não ocorrer deficiência hídrica durante o ciclo da cultura (CARDOSO et al., 2006; REICHERT et al., 2009). Com o plantio direto, ocorre o aumento da matéria orgânica do solo, o que melhora a agregação e a resistência do solo à compactação (BRAIDA et al., 2006). Solos com maior teor de matéria

orgânica também apresentam maior capacidade de reter água, principalmente em solos arenosos e siltosos, devido ao seu efeito sobre a estrutura do solo e pela sua maior área superficial específica (RAWLS et al., 2003), o que é algo favorável, por melhorar a disponibilidade de água às plantas .

Para manter a absorção de água e nutrientes em condições de déficit hídrico, novas raízes devem ser emitidas continuamente, ocupando novas camadas de solo, o que determina mecanismos de adaptação em nível celular e nos tecidos (FRENSCH, 1997). Além disso, o excesso de água no solo pode prejudicar as trocas gasosas e o metabolismo celular das raízes, interferindo no crescimento da planta (DREW, 1997), principalmente em solos com baixa quantidade e continuidade de macroporos.

Como foi visto, vários fatores ligados ao manejo podem afetar a dinâmica da água no solo e o seu monitoramento contínuo, no espaço e no tempo, em condições de campo pode trazer melhores informações sobre a disponibilidade de água às plantas e os efeitos da variação do conteúdo de água sobre a resistência e aeração do solo.

2.2 Resistência do solo à penetração e crescimento radicular de plantas

O sistema radicular das plantas é responsável pela fixação das mesmas, pela absorção da água e dos nutrientes do solo e por uma complexa inter-relação com os microrganismos da rizosfera (MCCULLY, 1999; BAIS et al., 2006). A arquitetura do sistema radicular das plantas é definida por características genéticas, mas o seu crescimento e a distribuição no perfil do solo é determinado pelas condições químicas e físicas do solo (SMUCKER, 1993; GOODMAN; ENNOS, 1999). Em condições de estresse físico do solo, por alta resistência ou deficiência de água, as raízes emitem sinais bioquímicos que são transportados à parte aérea da planta, paralisando o crescimento (AIKEN; SMUCKER, 1996). Um sistema radicular vigoroso e bem distribuído no perfil garante o acesso à água e aos nutrientes armazenados nas camadas mais profundas do solo (MONTAGU et al., 2001). Essa é uma característica desejável por reduzir o efeito das estiagens sobre o desenvolvimento das plantas (DAVIES; ZHANG, 1991). Plantas com sistemas

radicular superficiais estão mais sujeitas à deficiência hídrica, mesmo em curtos períodos de estiagens.

O crescimento das raízes ocorre pela divisão celular nos meristemas e expansão na zona de alongamento e a força motora da expansão é o turgor celular (BENGHOUGH; MULLINS, 1991; CLARK et al., 2003; WALTER et al., 2008). Em condições de deficiência hídrica, as raízes para manter o crescimento tendem a ajustar a pressão mínima exigida nas células em expansão e ocorre o transporte de solutos para a região de alongamento celular na raiz (BURGESS; BLEBI, 2006; FRENSCH, 1997). Para o adequado desenvolvimento das raízes o solo deve fornecer nutrientes, oxigênio, água e ter baixa resistência ao crescimento das raízes (FELDMAN, 1984). Solos com maior nível de degradação física, pela compactação, atingem valores restritivos de resistência à penetração com menor variação no conteúdo de água (BLAINSKI et al., 2008; GUBIANI, 2008), e o sistema radicular das plantas se concentra nas camadas superficiais do solo (COLLARES et al., 2006.; REICHERT et al., 2009).

O aumento da resistência do solo ao crescimento de raízes pode ocorrer com a compactação do mesmo ou pelo seu secamento. Em condições de baixa umidade ocorre um incremento da resistência à penetração, sendo maior quanto mais elevado for o grau de compactação do solo. Em solos bem estruturados, mesmo com alta resistência, pode não ocorrer a restrição ao crescimento das raízes, pois estas podem crescer nos poros do solo, principalmente bioporos formados pela decomposição das raízes de culturas antecessoras (WILLIAMS ; WEIL, 2004) ou em galerias de organismos. Outros fatores que afetam o efeito da resistência do solo sobre o crescimento radicular é a fase do ciclo de desenvolvimento em que a restrição ocorre e a duração dessa restrição (BENGHOUGH et al., 2006).

Os bioporos e macroporos são caminhos de crescimento das raízes, o que permite atingir maiores profundidades. No entanto, é fundamental que as raízes colonizem a matriz do solo também, principalmente as raízes secundárias e os pêlos radiculares, permitindo a absorção de água dos microporos. O crescimento radicular em camadas mais profundas também é importante para o enriquecimento dessas camadas em matéria orgânica, reduzindo os riscos de emissão de CO₂ para a atmosfera.

A resistência à penetração como indicador de qualidade física do solo, deve ser usada conjuntamente com a densidade e umidade do solo, pois de forma

isolada, a sua correlação com o desenvolvimento radicular e produtividade das culturas pode ser baixa. As medidas pontuais de resistência do solo indicam a condição momentânea do mesmo e podem não indicar efeito restritivo sobre as plantas em crescimento. A resposta das plantas vai depender do tempo em que a restrição permanece no solo e da fase do ciclo da planta em que os altos valores de resistência do solo ocorrem.

Ao encontrarem uma camada de impedimento ao seu crescimento, as raízes usam alguns mecanismos, como por exemplo, a exsudação de substâncias lubrificantes na coifa, para reduzir a coesão e o atrito entre as partículas do solo (BENGHOUGH; KIRBY, 1999; LIJIMA et al., 2003). Quando a resistência for maior que a força de crescimento da raiz, ocorre a modulação da divisão e alongação celular das células dos meristemas, fazendo com que as células passam a se alongar no sentido horizontal, na tentativa de mudar a direção de crescimento da raiz e desviar a região restritiva (HETTIARATCHI, 1990). Essa condição leva à formação de um sistema radicular tortuoso, indicando que em alguns períodos a resistência esteve alta levando a alteração da rota de crescimento.

A taxa de crescimento do sistema radicular depende da resistência oferecida pelo solo ao seu crescimento. É na coifa das raízes que se encontram os meristemas onde ocorre a divisão e a expansão celular. A força de crescimento tem a mesma magnitude que a resistência oferecida pelo solo, que é oposta ao crescimento radicular. A turgescência celular só ocorre em condições de adequada disponibilidade de água no solo e, dessa forma, a água é um importante fator que determina a taxa de crescimento das raízes (BENGHOUGH et al., 1997).

O crescimento radicular e a sua distribuição no solo só ocorrem quando a pressão radicular é maior que a resistência oferecida pelo solo (BENGHOUGH et al., 1997). As forças contrárias ao crescimento das raízes são representadas pela coesão e atrito das partículas do solo e, a magnitude dessas forças é dependente do tipo de solo e são controladas pelo seu teor de água, e juntas determinam a resistência do solo à penetração de raízes (LOWERY; MORRISON, 2002). Durante o ciclo das culturas agrícolas, ocorrem os processos de umedecimento e secagem do solo, de forma que exista variação no armazenamento de água disponível e na resistência oferecida ao crescimento radicular.

A taxa de crescimento das raízes é crescente na fase vegetativa das plantas e atinge seu auge durante a floração. A força motora gerada pelas raízes das

plantas varia de 0,6 a 1,2 MPa, não apresentando grandes diferenças entre as espécies vegetais (CLARK; BARRACLOUGH, 1999). A diferença entre espécies quanto a sua habilidade em crescer e se desenvolver em solos com alta resistência está mais envolvida no diâmetro das raízes, na expansibilidade celular, na capacidade de modular a parede celular e na capacidade da planta produzir e liberar substâncias mucilaginosas na coifa (CLARCK et al., 2003). Dessa forma, algumas espécies, por possuírem raízes mais finas e maior capacidade de modular a parede celular, alteram a sua direção de crescimento no solo, buscando as zonas de menor resistência, que normalmente são os poros do solo e locais com maior conteúdo de água. Em trabalhos de Rasse & Smucker (1998), verificou-se que até 30% das raízes do milho cresceram nos bioporos deixados pela cultura anterior (alfafa). Dessa forma, após o sistema radicular exercer sua função biológica de absorção de água e nutrientes para a planta em crescimento, ao completar seu ciclo vital passa a exercer uma importante função física no solo. Outras espécies, por possuírem raízes mais grossas e menor capacidade de modular a sua parede celular, mantêm a direção de crescimento e possuem uma maior taxa de crescimento em condições adequadas de umidade e resistência do solo. Associado a isso, ainda estão às substâncias mucilaginosas que atuam como lubrificantes na coifa, facilitando a sua penetração no solo (LIJIMA et al., 2003).

A medida direta da resistência do solo oferecida às raízes é difícil de ser avaliada no campo, sendo esta, então, correlacionada com a medida obtida com penetrômetros (BENGHOUGH; MULLINS, 1991). As características geométricas do penetrômetro e as condições de solo afetam a ruptura do solo pela compressão e cisalhamento. A compressão do solo ocorre em duas regiões: a compressão com ruptura plástica na volta da sonda e uma compressão elástica ao lado da sonda, sendo a resistência representada por uma pressão necessária para expandir a cavidade e uma fricção determinada pela forma do cone e pelo solo.

Os fatores do penetrômetro que afetam a resistência a penetração são: o ângulo do cone, o diâmetro, rugosidade e a taxa de penetração (BENGHOUGH; MULLINS, 1991). A resistência à penetração é resultante de duas forças principais: a força para deformar o solo pela ação do cone e a força de fricção entre o solo e o metal. Quando o diâmetro da área basal do cone é largo, em solos bem estruturados a variabilidade da resistência é menor sendo uma função da resistência entre os agregados. Quando o diâmetro basal do cone é pequeno em relação à estrutura

dominante, a variabilidade da resistência será maior devido a baixa resistência oferecida pelas rachaduras e poros entre os agregados e, dessa forma, a resistência passa a ser uma função da resistência intra agregados (LOWERY; MORRISON, 2002).

A resistência à penetração é variável ao longo do tempo, acompanhando os ciclos de umedecimento e secagem do solo. A magnitude da resistência e o tempo que ela permanece alta dependerão do nível de compactação do solo e do teor de água do solo. As medidas e avaliações contínuas durante o ciclo das culturas podem fornecer informações mais precisas sobre o efeito das condições físicas do solo sobre a sua resistência e seu efeito sobre as plantas. As medidas pontuais, apenas indicam se a resistência do solo é alta ou baixa, naquele momento, podendo não afetar as plantas, e levar a interpretações precipitadas sobre o real efeito da resistência do solo.

Os limites de resistência à penetração podem não ser os mesmos para solos argilosos e arenosos. Os solos argilosos, por serem mais porosos, podem facilitar o crescimento das raízes, mesmo em condições de alta resistência. Os solos arenosos, por serem menos porosos e oferecerem maior atrito entre partículas, com menor variação de umidade, podem restringir o crescimento das raízes. Dessa forma, o monitoramento contínuo da resistência do solo a penetração permite avaliar a amplitude dos valores de resistência e o tempo que eles permanecem em cada camada e condições de manejo do solo, permitindo uma melhor interpretação do real efeito desse parâmetro sobre o crescimento das raízes das plantas.

2.3 Aeração e permeabilidade do solo ao ar

O sistema poroso do solo é responsável pelas trocas gasosas entre a atmosfera do solo e a atmosfera externa (BALL; SMITH, 1991), infiltração e retenção da água no solo (MEEK et al., 1992) e é o caminho preferencial para o crescimento das raízes (WILLIAMS; WEIL, 2004). O bom funcionamento desse sistema garante a atividade biológica do solo e a interação entre o sistema radicular e a rizosfera. O efeito da deficiência no transporte de gases sobre o metabolismo do solo e nas plantas é dependente do tempo de duração dessas restrições (DREW; LINCH,

1980). Para as plantas, o primeiro efeito de uma aeração deficiente no solo é a deficiência de oxigênio para respiração das raízes, o que leva à paralisação na absorção de nutrientes e do crescimento da planta (SOJKA, 1992), podendo ocorrer a morte da planta se a deficiência for prolongada (DREW, 1997).

A aeração deficiente do solo também aumenta a incidência de doenças radiculares (COOK; PAMPENDICK, 1972) e condiciona o metabolismo microbiano anaeróbico que leva à síntese de substâncias fitotóxicas as raízes (DREW; LINCH, 1980; ALLMARAS et al., 1988) e aumentam os riscos de emissão de gases nocivos a qualidade do ar, como o gás carbônico, óxido nitroso e metano (QUASTEL, 1965; HALL; MATSON, 1996) e que aumentam o efeito estufa (MANCINELLI, 1995; SHARON et al., 1996).

Para que a respiração radicular e o metabolismo microbiano aeróbico sejam mantidos em níveis adequados, é necessário que ocorram trocas gasosas entre o ar do solo e atmosfera externa, permitindo a renovação do ar do solo e o aumento da concentração de oxigênio (SCANLON et al., 2002). No solo, o movimento dos gases é governado pela difusão e, em menor escala, pelo fluxo de massa (HILLEL, 1998). No processo de difusão, o movimento dos gases ocorre devido ao gradiente de concentração de um determinado gás em pontos diferentes do solo e ocorre, predominantemente, em pequenas distâncias. O fluxo de massa é um processo em que ocorre o movimento de toda a massa de ar, independentemente de sua concentração, devido a um gradiente de pressão, sendo este afetado pela temperatura, pressão atmosférica e pelo vento, principalmente na superfície do solo (BALL; SMITH, 1991). Ambos os processos ocorrem nos poros do solo e, para que a aeração ocorra de forma eficiente, é necessário existirem poros ocupados com ar e conectados entre si e com a superfície do solo (SCANLON et al., 2002).

Os poros do solo podem ser formados por atividade biológica e pelos ciclos de umedecimento e secagem. A bioturbação do solo pela atividade biológica é responsável pela formação de poros grandes e contínuos que interferem em processos dinâmicos do solo (GABET et al., 2003), como o fluxo de ar e água. Os poros estruturais, considerados rígidos, têm sua geometria alterada por pressões mecânicas, enquanto os poros não rígidos encontrados em solos com minerais expansivos são alterados por ciclos de umedecimento e secagem do solo (PENG et al., 2009). Os macroporos são os principais responsáveis pelo fluxo de água e ar no solo (LOGDSDON et al., 1990; CULLUM, 2009).

A compactação do solo reduz a continuidade, obstrui e fragmenta os poros, comprometendo a sua funcionalidade (JEGOU et al., 2002; LANDEFELD et al., 2004). Por outro lado, o revolvimento do solo destrói a rede de poros estruturais e bioporos do solo, principalmente os macroporos contínuos (MEEK et al., 1992; LAMANDE et al., 2003) e aumenta a taxa de liberação de gás carbônico do solo por favorecer o acesso dos microrganismos à matéria orgânica que estava protegida no interior dos agregados.

A presença de porosidade de aeração ou espaço aéreo no solo é fundamental para ocorrer as trocas gasosas. Dessa forma, a aeração do solo depende da quantidade, tamanho e continuidade dos poros e do conteúdo volumétrico de água. A porosidade de aeração é reduzida linearmente com a aplicação de pressão de 50 a 400 kPa, sendo maiores os danos sobre os bioporos, com pressões acima de 200 kPa (BLACKWELL et al., 1990). Períodos em que o solo permanece com alto conteúdo de água comprometem as trocas gasosas, pois a difusão dos gases é bastante lenta na água (BALL; SMITH, 1991).

A medida direta da difusão e das trocas gasosas no solo é difícil, por exigir equipamentos sofisticados e pela grande influência da temperatura, taxa de respiração do solo, umidade do solo e gradiente de pressão, o que gera uma grande variabilidade nesse parâmetro (BALL; SMITH, 1991). No entanto, o fluxo de ar e a permeabilidade de ar no solo representam uma medida indireta da aeração e difusão de gases no solo, pois a concentração de oxigênio no solo está diretamente ligada à porosidade de aeração e à continuidade dos poros do solo (BALL et al., 1988; LAPEN et al., 2004). O crescimento das plantas é reduzido quando a taxa de difusão de gases no solo é drasticamente reduzida, sendo isso possível quando a porosidade de aeração ficar abaixo de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ por longo tempo (GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al, 2008). A medida do fluxo de ar no solo e a determinação da permeabilidade ao ar e da condutividade hidráulica saturada têm se mostrado alternativas promissoras para avaliação da funcionalidade do seu sistema poroso, podendo ser usado no diagnóstico da qualidade física do solo.

2.4 Integração dos fatores físicos de crescimento das plantas

Para ser considerado fisicamente adequado ao crescimento das plantas, o solo deverá fornecer água, permitir as trocas gasosas e proporcionar um adequado crescimento e distribuição do sistema radicular da planta, de forma a ter acesso a um maior volume de solo e permitir a fixação da planta (LETEY, 1985). A resposta da planta vai depender da interação desses fatores entre si, que são controlados pela água no solo (SILVA et al., 2009). Além disso, o efeito de cada fator vai depender da fase do ciclo da planta em que a restrição vai ocorrer (Figura 1).

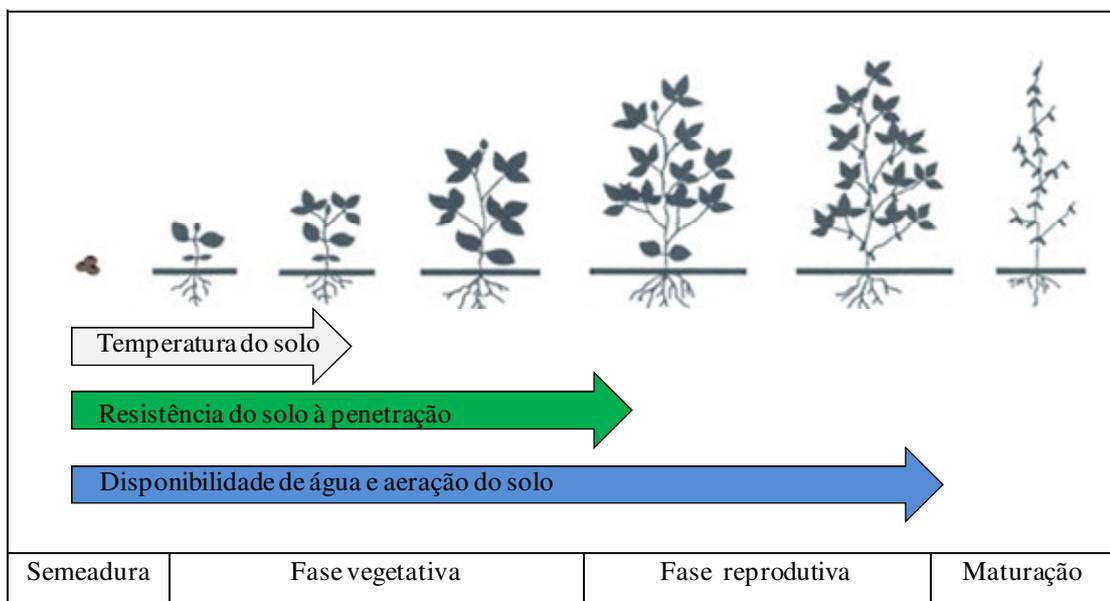


Figura 1- Fatores físicos de crescimento ao longo do ciclo das culturas.

A temperatura do solo tem um efeito maior na fase inicial do ciclo da planta, principalmente na germinação e emergência. A disponibilidade de água no solo e a aeração são essenciais desde a emergência até a maturação fisiológica da planta, enquanto a resistência do solo à penetração de raízes tem um efeito maior até a fase reprodutiva. No entanto, o sistema radicular das plantas é estimulado a crescer quando submetido à deficiência hídrica no início do ciclo, enquanto que em condições de adequada disponibilidade de água, a tendência que o sistema radicular

fique mais superficial, o que pode reduzir o acesso da planta à água se houver algum período de estiagem na fase final do ciclo da cultura.

Em condições de campo, esses fatores ocorrem de forma associada e são dependentes das condições físicas do solo e meteorológicas predominantes, o que gera uma grande variação espacial e temporal desses fatores, sendo eles responsáveis pela eficiência do desenvolvimento das plantas cultivadas (LETEY, 1985).

A busca de indicadores físicos que pudessem integrar esses fatores, levou a criação do conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (SILVA et al., 1994), que determina uma faixa de umidade, para cada valor de densidade do solo, onde existem condições físicas adequadas ao desenvolvimento das plantas (SILVA; KAY, 1996,1997). Dessa forma, pode-se associar a densidade do solo aos fatores físicos de crescimento das plantas. No entanto, muitos estudos envolvendo a utilização do IHO na avaliação da qualidade física do solo não envolvem diretamente plantas (TORMENA et al., 1999; ZOU et al., 2000; LEÃO et al., 2004; ARAÚJO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006; TORMENA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2009), o que não permite estabelecer se aquelas condições físicas verificadas realmente podem comprometer o crescimento da espécie cultivada.

Por outro lado, os estudos que integram o IHO com avaliações diretas em plantas, muitas vezes não encontram resposta da planta, mesmo que o solo apresente densidade fora da faixa considerada adequada (KLEIN; CAMARA, 2007). Essa falta de resposta das plantas, possivelmente, está ligada aos limites de resistência à penetração e de espaço aéreo utilizados para definir os limites críticos do IHO (KAISER et al., 2008) e também da variabilidade espacial e temporal que esses fatores físicos de crescimento assumem ao longo do ciclo das culturas, em virtude da variabilidade espacial da estrutura do solo ao longo do perfil (BEUTLER et al., 2004; COLLARES et al., 2006; BEUTLER et al., 2007), das condições meteorológicas e das necessidades fisiológicas diferenciadas das espécies vegetais nas diferentes etapas do seu ciclo de crescimento.

Portanto, as medidas pontuais da densidade do solo e dos fatores físicos de crescimento das plantas a ela associados (conteúdo de água, resistência e aeração do solo) podem não ser eficientes na definição de qualidade física do solo para o crescimento de plantas. Ao mesmo tempo, é muito difícil avaliar todos os fatores físicos que interferem no crescimento das plantas. Para contornar essa situação, o

monitoramento contínuo da umidade do solo, da resistência à penetração e do espaço aéreo do solo, em condições de campo, pode ajudar na compreensão da resposta da planta sob diferentes condições física do solo e, assim, melhor definir os limites associados ao intervalo hídrico ótimo, o que vem sendo apontado como uma lacuna a ser preenchida pela pesquisa para melhorar a eficiência desse índice de qualidade física do solo (SILVA et al., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e solo

Para a realização deste estudo, implantou-se um experimento na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, município de Santa Maria, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, latitude 29°41'sul, longitude de 53°48' oeste e altitude de 95 metros. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, ou seja, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961). O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) e Typic Hapludalf (Soil Taxonomy). Esse Argissolo apresenta horizonte E o horizonte Bt inicia aos 0,80 m de profundidade. Os horizontes superficiais (Ap e A) são homogêneos e apresentam, em média, 610 g kg⁻¹ de areia; 300 g kg⁻¹ de silte e 120 g kg⁻¹ de argila. O horizonte Bt possui 360 g kg⁻¹ de argila; 210 g kg⁻¹ de silte e 430 g kg⁻¹ de areia (Tabela 1). Pelo zoneamento agrícola do MAPA, esse solo se encaixa na classe 1, não sendo recomendado para o cultivo de soja.

Tabela 1- Composição granulométrica do perfil do Argissolo da área utilizada para o experimento.

Horizonte	Camada m	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Classe textural
Ap	0,00-0,10	639	258	103	Franco arenosa
	0,10 -0,20	635	257	108	Franco arenosa
A1	0,20-0,30	614	273	113	Franco arenosa
	0,30-0,40	607	279	113	Franco arenosa
	0,40-0,50	610	287	103	Franco arenosa
E	0,50 -0,90	618	286	96	Franco arenosa
Bt	90 +	392	273	335	Franco argilosa

A área utilizada para o experimento permaneceu em pousio por aproximadamente 15 anos e, a partir do ano de 2004, passou a ser utilizada para produção de aveia no inverno e soja no verão. Essas culturas sempre foram implantadas sob sistema de semeadura direta e, quando se iniciou o experimento, a área já estava completando 4 anos de cultivo sob semeadura direta.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso com quatro repetições. Para definir o delineamento experimental e a distribuição dos blocos, foi feita uma malha de pontos na área experimental, espaçados em 10 m. A partir dessa malha, coletaram-se amostras de solo nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, para realizar o diagnóstico da fertilidade do solo e determinar a granulometria do solo. Dentro de cada quadrado (10 x 10 m) da malha, foram coletadas 5 subamostras, que juntas representaram a amostra daquele local. Na tabela 2 encontram-se os parâmetros químicos do solo.

Tabela 2 - Parâmetros químicos do solo nos quatro blocos do experimento.

BL*	Camada (m)	pH água	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efetiva	CTC pH 7,0	P	K	Saturação		SMP	MO (%)
											Al	Bases		
						Cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³					
1	0-10	5,5	2,5	1,2	0,0	3,6	4,0	7,6	33,1	100	0,8	52,5	6,2	1,8
	10-20	5,1	1,2	0,6	0,6	4,3	2,5	6,3	5,5	65	23,8	31,0	6,0	1,1
	20-30	5,1	1,2	0,6	0,8	4,2	2,7	6,1	2,3	48	30,5	33,3	6,1	1,0
2	0-10	5,6	2,7	1,4	0,0	2,5	4,3	6,8	11,0	65	0,0	62,5	6,5	1,9
	10-20	5,0	1,1	0,6	0,7	4,1	2,5	5,8	2,1	44	29,8	31,5	6,1	1,1
	20-30	5,0	1,0	0,6	0,8	4,3	2,5	6,0	1,3	34	32,0	31,0	6,1	1,1
3	0-10	5,5	2,3	1,2	0,1	2,7	3,8	6,4	6,1	77	1,8	57,5	6,5	1,7
	10-20	5,1	1,0	0,6	0,8	3,6	2,5	5,3	2,1	48	33,0	31,5	6,2	1,0
	20-30	4,9	1,0	0,6	1,1	4,3	2,8	6,1	0,9	41	38,3	29,0	6,0	1,1
4	0-10	5,3	1,8	1,1	0,2	3,5	3,2	6,5	6,7	78	6,3	47,3	6,3	1,6
	10-20	4,7	0,4	0,2	1,5	6,2	2,3	7,0	5,8	53	66,3	12,3	5,8	0,9
	20-30	4,7	0,5	0,2	1,7	4,6	2,5	5,4	1,1	48	68,8	15,3	6,0	1,0

*BL: bloco

Os blocos foram alocados em áreas com fertilidade e acidez semelhantes (Figura 2). O bloco 4 foi que apresentou os menores níveis de fertilidade e maior acidez, principalmente pela alta saturação de alumínio a partir dos 0,10 m de profundidade (Tabela 2).

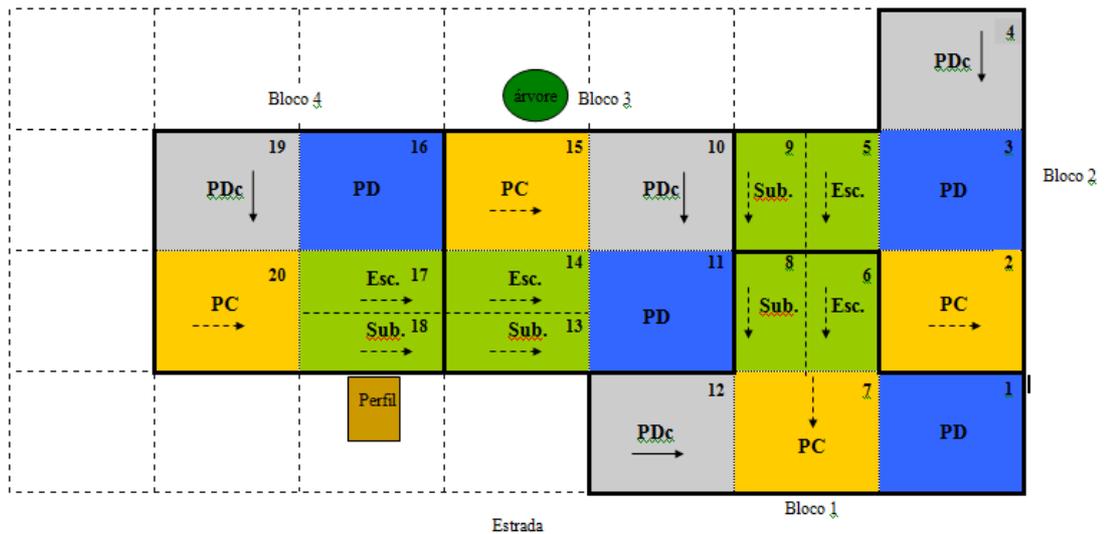


Figura 2 - Croqui do experimento com a definição dos blocos dentro da malha de pontos estabelecidos. As parcelas possuem dimensões de 10 x 10 m.

Os tratamentos aplicados foram: sistema plantio direto por 4 anos (PD), plantio direto com compactação adicional (PDC), escarificação profunda (SUB), escarificação superficial (ESC) e preparo convencional (PC). Esses sistemas e níveis de compactação impostos representam as principais formas de manejo existentes nos solos arenosos do Rio Grande do Sul, refletindo a realidade encontrada no campo.

No momento da aplicação dos tratamentos na área estava implantada a cultura de aveia e azevém, totalizando uma massa seca de $4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$. A massa foi avaliada coletando-se a vegetação em 1 m^2 dentro de cada parcela e após secagem em estufa, efetuou-se a pesagem da massa seca.

A compactação do solo sob plantio direto (PDC) foi induzida pelo tráfego de quatro passadas paralelas e sobrepostas de uma pá carregadeira (CASE W18) com $8,5 \text{ Mg}$ de massa, no dia 24/10/2007 (Figura 3). Os pneus da carregadeira são da marca Pirelli (Nylon – 12 lonas, 14.00 – 24 [65]) com pressão de inflação de 40 libras

e uma área de contato média entre o solo e o pneu de 1428 cm², apresentando uma pressão sobre o solo de 146 kPa. Esse cálculo foi realizado pela divisão da massa total da máquina pela área média de contato solo/pneu, assumindo-se que a distribuição de carga da máquina vazia é semelhante nos quatro pneus (50% em cada eixo). Para medir a área de contato do pneu com o solo, colocaram-se tiras de papel pardo sobre o solo e posicionaram-se os rodados sobre esse papel. Após isso, pintaram-se as laterais do pneu e do papel, permanecendo livre no papel apenas a região que estava diretamente em contato com o pneu (Figura 4).



Figura 3 - Aplicação dos tratamentos: a) plantio direto com compactação adicional (PDC); b) plantio direto; c) escarificação superficial até 0,15 m e escarificação profunda até 0,30 m e d) preparo convencional do solo.



Figura 4 - Medida da área de contato entre o solo e o pneu.

Os papéis pintados foram fotografados, com uma escala de referência e o cálculo da área foi executado com o Software AreaMed (GUBIANI et al., 2009), conforme representado na figura 5.

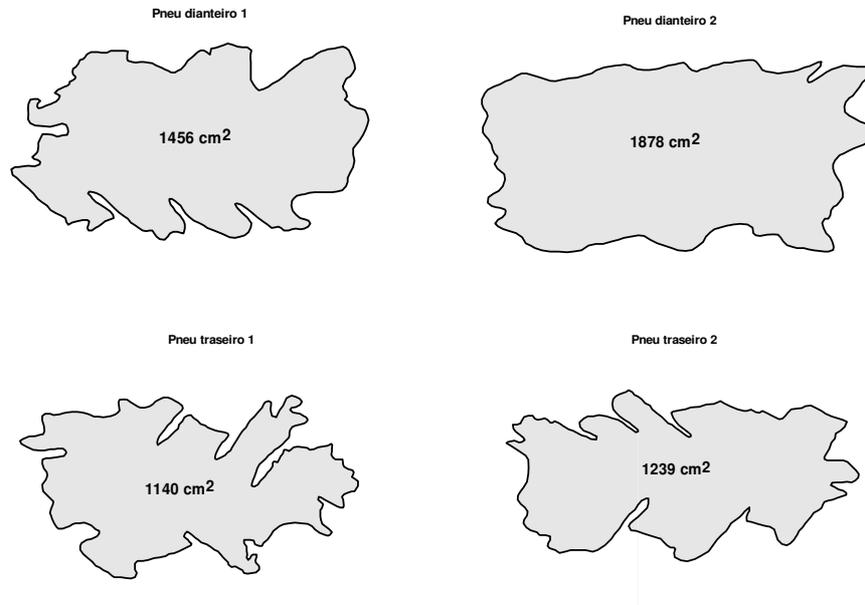


Figura 5 - Área e contato dos pneus com o solo.

O plantio direto com tráfego adicional reflete o efeito sucessivo e cumulativo do tráfego das máquinas agrícolas utilizadas na implantação, condução e colheita das culturas agrícolas nos anos anteriores. A escarificação profunda foi realizada até a profundidade de 0,30 m, com um subsolador de cinco hastes inclinadas. A escarificação superficial foi feita até 0,15 m de profundidade com um subsolador. O preparo convencional foi feito até a profundidade de 0,30 m utilizando um arado de discos e com uma gradagem superficial.

A umidade do solo no momento da aplicação dos tratamentos estava próxima à umidade na capacidade de campo (Tabela 3).

Tabela 3 - Umidade gravimétrica do solo na área experimental no dia da compactação do solo, no dia do preparo do solo e no dia da semeadura do milho.

Camada (m)	Compactação	Preparo do solo	Semeadura
	Umidade gravimétrica (kg kg ⁻¹)		
0,00 - 0,10	0,1432	0,1427	0,1492
0,10 - 0,20	0,1323	0,1304	0,1493
0,20 - 0,30	0,1340	0,1333	0,1472
0,30 - 0,40	0,1299	0,1299	0,1447
0,40 - 0,50	0,1264	0,1264	0,1431
0,50 - 0,60	0,1217	0,1240	0,1412

3.3 Cultura e tratos culturais

No experimento foi implantada a cultura do milho (Pioneer 3069), no dia 07/11/2007, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e 0,27 m entre plantas, resultando numa população aproximada de 80.000 plantas por hectare. A semeadura foi realizada com uma semeadora-adubadora, marca Sfill-Stara, que possui discos de corte e sulcadores do tipo facão, sendo a profundidade de semeadura de 0,04 m. A adubação de base foi com 312 kg ha⁻¹ de 05-20-20 e a adubação de cobertura foi com 140 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de uréia, aplicada quando o milho apresentava três folhas completas expandidas. O controle das plantas daninhas foi realizado com capinas manuais.

3.4 Avaliações físico-hídricas e metodologia empregada

3.4.1 Densidade, distribuição de poros e curva de retenção de água

Paca caracterizar e avaliar o efeito do manejo e dos níveis de compactação sobre a estrutura do solo coletaram-se amostras com estrutura preservada, no início (11/2007) e no final (02/2008) do ciclo do milho, com anéis metálicos com 0,057 m

de diâmetro e 0,04 m de altura, nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40; 0,40 a 0,50 e 0,50 a 0,60 m, na primeira avaliação. Na segunda avaliação, as duas últimas camadas não foram amostradas, por ficarem fora da zona de efeito dos tratamentos. Essas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo, a macroporosidade e microporosidade e a curva de retenção de água no solo.

Após serem preparadas, as amostras foram saturadas por ascensão capilar gradual e, posteriormente, submetidas às tensões de - 6 kPa e -10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), para determinar a macro e microporosidade e a umidade na capacidade de campo. A água retida nas tensões de 33 e 100 kPa foi determinada em Câmara de Richards (KLUTE, 1986).

A umidade na capacidade de campo foi considerada o teor de água retido na amostra no potencial de -10 kPa. A umidade nos pontos de -500 kPa e -1500 kPa, foi determinada com amostras desestruturadas coletadas nas mesmas camadas onde foram coletadas os cilindros, utilizando-se um psicrômetro. Como a umidade obtida nestas condições é a gravimétrica, multiplicou-se este valor pela densidade correspondente da camada amostrada, obtendo-se assim, a umidade volumétrica. A curva de retenção de água no solo foi obtida pela relação entre a umidade e o potencial da água no solo em cada ponto avaliado, sendo os dados ajustados ao modelo de Van Genuchten (1980). A umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente foi utilizada para calcular a quantidade de água disponível armazenada no solo.

3.4.2 Umidade e armazenamento de água no solo

A umidade volumétrica do solo foi monitorada durante todo o ciclo da cultura do milho nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40; 0,40 a 0,50 e 0,50 a 0,60 m, utilizando-se dois TDR -100 (Campbell Cientific) (Figura 6) e um TDR trase (Figura 7). Na programação do sistema para aquisição automática dos dados foi inserida uma equação de calibração específica para o solo em estudo para obter melhor precisão nos dados obtidos (KAISER et al., 2010).

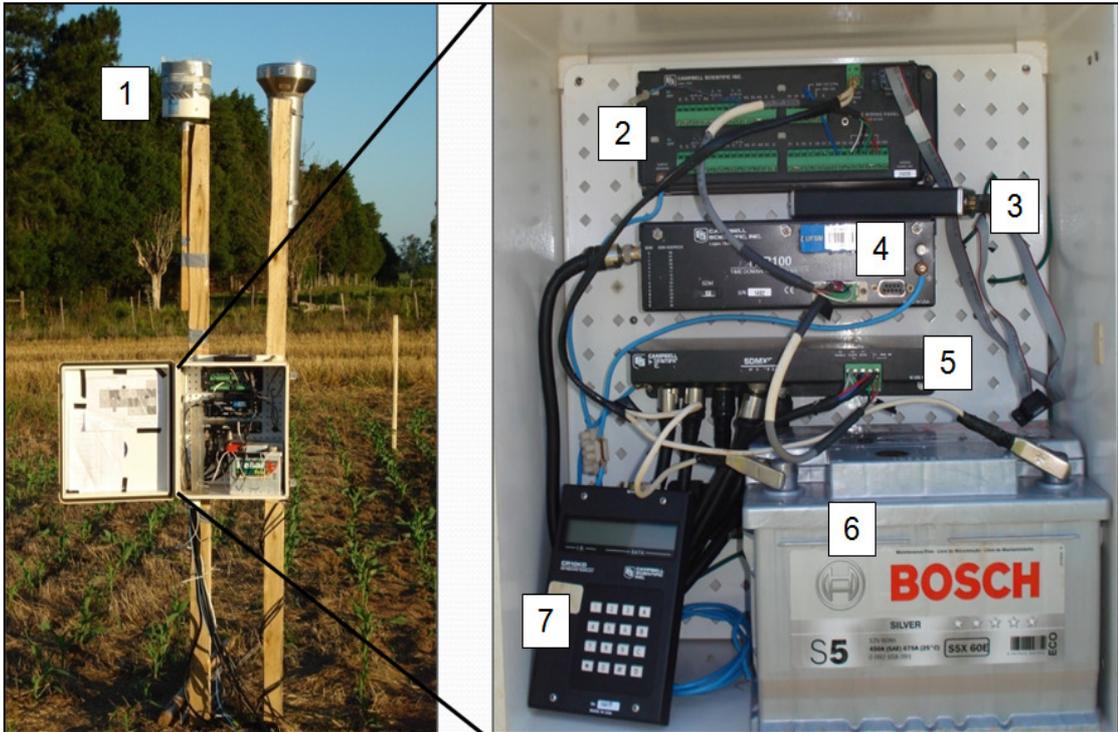


Figura 6 - Sistema automático de monitoramento da umidade do solo e da precipitação. 1: pluviômetro automático, 2: Datalogger, 3: Memória, 4: TDR-100, 5: Multiplexador, 6: Bateria e 7: teclado programador.



Figura 7 - TDR – Trase utilizado para fazer as leituras manuais.

Para monitorar a umidade do solo foram instaladas sondas metálicas com duas hastes, perpendiculares à linha de semeadura da cultura. Nas duas primeiras camadas, as sondas foram inseridas paralelamente e, nas demais camadas, foram inseridas de forma inclinada, com ângulo que permitisse que uma camada de 0,10 m fosse avaliada nas leituras (Figura 8). Essas sondas possuem 0,21 m de comprimento e 0,045 m entre as hastes e foram construídas e testadas no laboratório de física do solo da UFSM. Para instalar as sondas abriu-se uma trincheira retangular, mantendo-se a parede intacta para a inserção das sondas. Após a instalação das sondas, a trincheira foi fechada novamente, tomando-se o cuidado para compactar o solo e repor as camadas de solo na mesma ordem em que foram retiradas. Dessa forma, evita-se a ocorrência de fluxo preferencial da água durante as chuvas.

As sondas das quatro primeiras camadas foram conectadas a multiplexadores e a armazenadores de dados, sendo todo sistema automatizado e alimentado por duas baterias de 12 volts, sendo que as baterias eram recarregadas por uma placa solar. A automatização do sistema permitiu fazer leituras a cada 30 minutos. Nas demais camadas as leituras foram feitas manualmente, uma vez por semana, com o TDR trase. Também foi monitorada a precipitação pluvial durante o ciclo da cultura, com a utilização de um pluviômetro automático conectado ao armazenador eletrônico de dados (datalogger).

A quantidade de água disponível foi calculada pela diferença entre o teor de água obtido no campo e o teor de água retido no potencial de -1500 kPa, considerado como ponto de murcha permanente. Pela curva de retenção de água, a quantidade de água disponível foi calculada pela diferença entre o conteúdo de água retido no potencial de -10 kPa (capacidade de campo) e -1500 kPa (Ponto de murcha permanente).

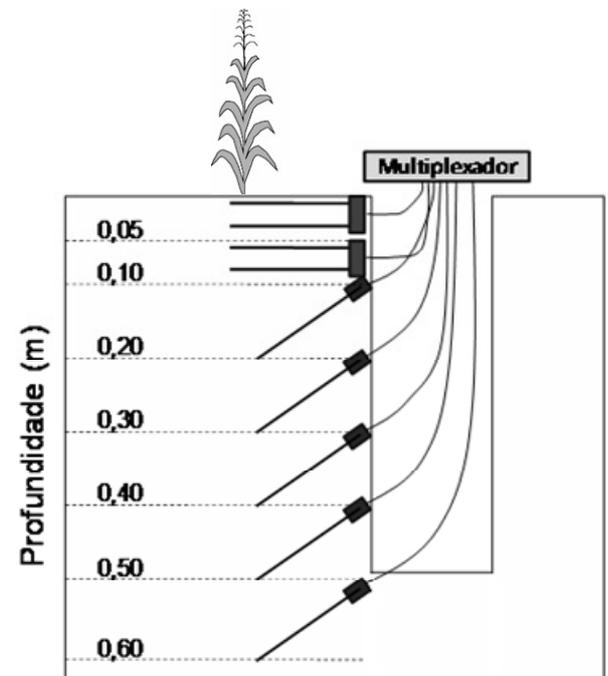
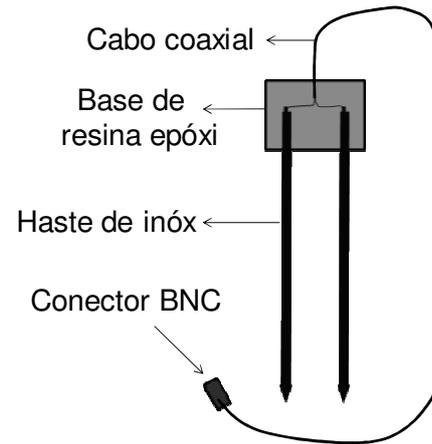


Figura 8 - Esquema da instalação das sondas no perfil do solo e da sonda utilizada.

3.4.3 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi medida com um penetrômetro digital, com ponta cônica e ângulo de penetração de 30°, e armazenamento eletrônico dos dados (marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer). Em cada parcela a

resistência à penetração foi determinada a cada 0,015 m até a profundidade de 0,60 m, em cinco pontos por parcela, separados entre si a cada 0,20 m numa linha horizontal da superfície do solo (Figura 9), procurando-se, assim, obter melhor avaliação do efeito do manejo e da variabilidade do solo sobre a resistência. Os dados assim obtidos foram usados para gerar um mapa da distribuição espacial da resistência à penetração no perfil, utilizando-se o software Surfer. A resistência foi avaliada logo após a aplicação dos tratamentos e aos 29, 34, 44, 71, 114 e 122 dias após a semeadura (DAS).

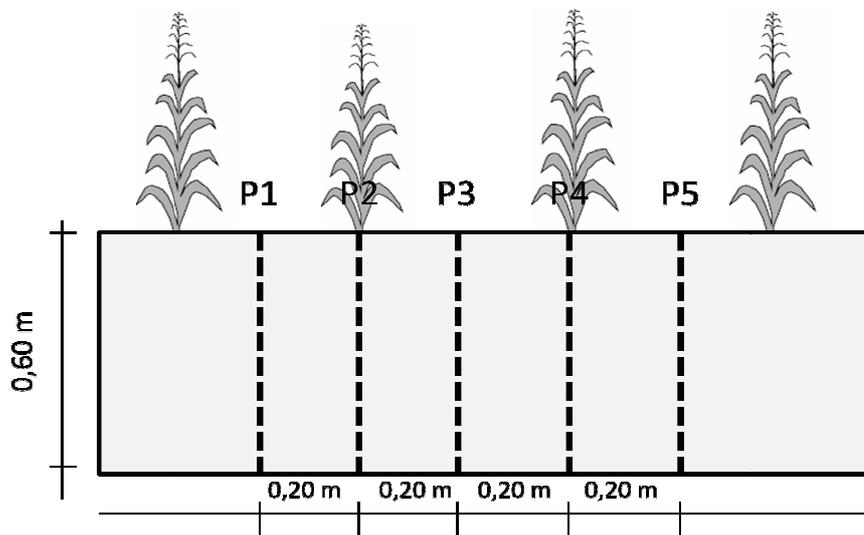


Figura 9 - Localização dos pontos (linhas pontilhadas) onde foram realizadas as medidas de resistência do solo à penetração com o uso de um penetrômetro digital.

Os dados de resistência à penetração, densidade e umidade volumétrica do solo obtida no campo foram utilizados para gerar modelos matemáticos. Para isso, considerou-se a média da resistência do solo à penetração dos cinco pontos medidos em cada parcela. Para ajustar os modelos aos dados, usaram-se os valores médios de resistência à penetração observada nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, pois o penetrômetro fornecia valores de resistência a cada 0,015 m. A partir do modelo obtido, estimou-se a resistência do solo à penetração em função da umidade do solo e da densidade do solo em cada camada, ao longo do ciclo do milho.

3.4.4 Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade do solo ao ar

No laboratório, as amostras coletadas para determinar a densidade do solo, foram saturadas, pesadas e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e 33 e 100 kPa em Câmara de Richards, para calcular a distribuição do tamanho de poros pela equação fundamental da capilaridade e calcular o espaço aéreo pela diferença entre a porosidade total de cada amostra e o conteúdo volumétrico de água em cada tensão. Após o equilíbrio em cada tensão, mediu-se o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeâmetro de carga constante de ar (Figura 10). O equipamento é composto por uma série de fluxímetros com diferentes vazões, por onde o ar flui antes de passar pelo solo. O ar é aplicado a baixa pressão (0,1 kPa) e constante, para evitar o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra é medido por um manômetro de água.

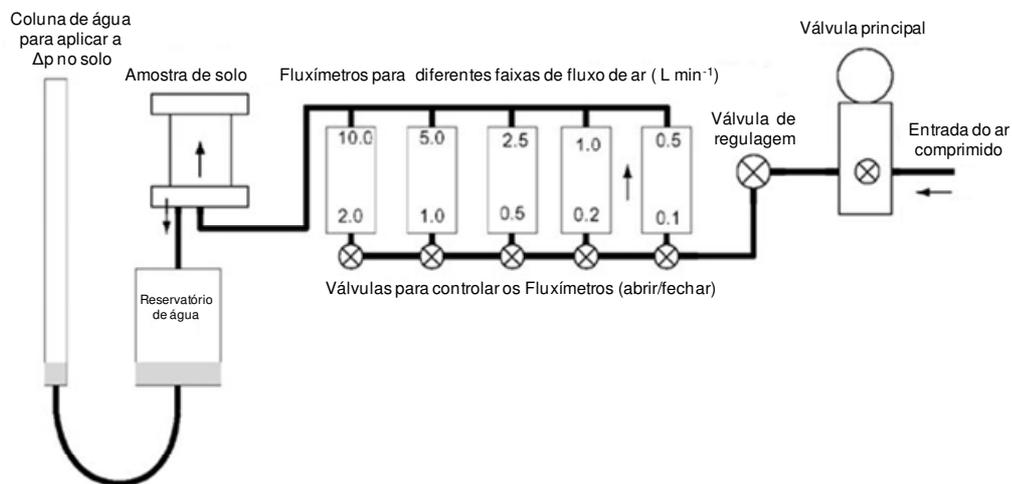


Figura 10 - Permeâmetro para a medida do fluxo de ar em amostras de solo (Adaptado de Horn et al., 2004).

A condutividade do ar no solo (K_l) é calculada usando-se a equação 1.

$$K_l = \rho_l \cdot g \frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \quad [1]$$

Onde:

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

ρ_l = densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3});

g = aceleração da gravidade (981 cm s^{-2});

ΔV = quantidade de ar que passa na amostra na Δt (cm^3);

Δt = variação de tempo (s)

l = altura da amostra (cm);

Δp = pressão do ar que passa pela amostra (1 cm de coluna de água = 1000 dinas cm^{-2} ; Dinas = g cm/ s^2);

A = área do cilindro (cm^2).

A densidade do ar foi calculada com a equação 2.

$$\rho_l = \rho_n \left(\frac{T_n p}{p_n T} \right) \quad [2]$$

Onde:

ρ_l = densidade do ar (kg m^{-3})

ρ_n = densidade padrão do ar ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$)

T_n = temperatura padrão ($273,15 \text{ }^\circ\text{K}$)

p = pressão atmosférica durante a medida (mbar)

p_n = pressão atmosférica padrão (1013 mbar)

T = temperatura do ar durante a medida ($^\circ\text{K}$)

A partir da condutividade ao ar, calculou-se a permeabilidade do solo ao ar (K_a) utilizando a equação 3.

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad [3]$$

Onde:

K_a = permeabilidade ao ar (cm s^{-1});

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

η = Viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$);

ρ_l = densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3});
 g = aceleração da gravidade (981 cm s^{-2})

O espaço aéreo ou porosidade de aeração (E_a) foi estimado para as camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,30 m, pela diferença entre a porosidade total (PT) e o conteúdo volumétrico de água no solo (θ) (Equação 4), durante todo o ciclo da cultura.

$$E_a = PT - \theta \quad [4]$$

O índice de continuidade de poros (C_p) foi estimado pela equação de Ball et al. (1988) (Equação 5), pela relação entre a permeabilidade de ar (K_a) e a porosidade de aeração (E_a):

$$C_p = \frac{K_a}{E_a} \quad [5]$$

3.4.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

Após as amostras estarem equilibradas no ponto de -100 kPa nas membranas de Richards, foram novamente saturadas e mediu-se o fluxo de água nas amostras para calcular a condutividade hidráulica do solo saturado. O fluxo de água foi medido em permeâmetro de carga variável (Figura 11), conforme procedimento descrito em Gubiani et al.(2010).

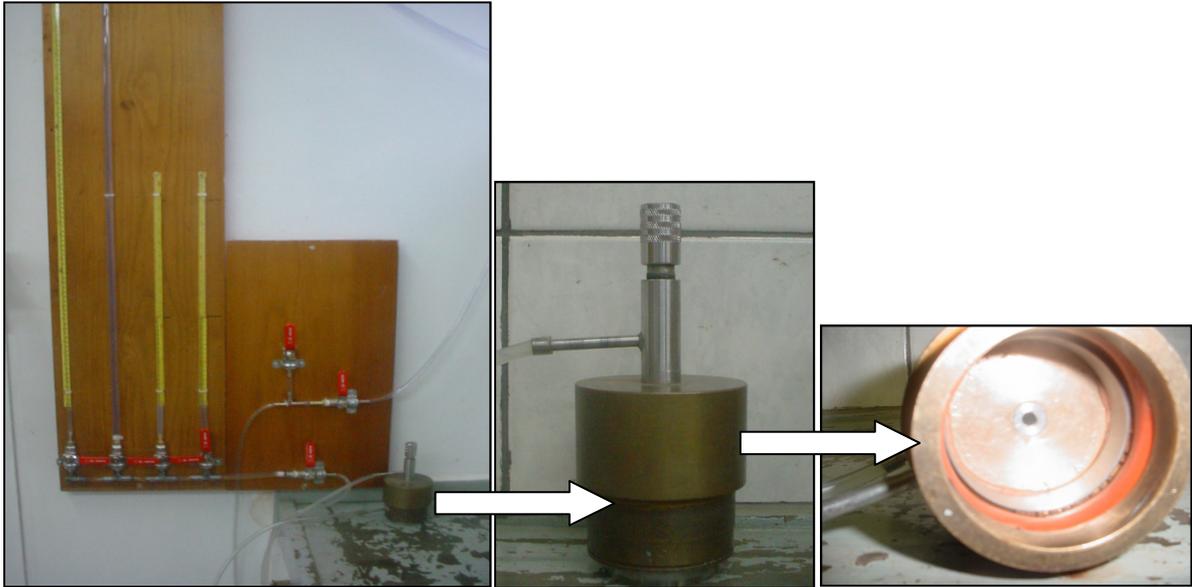


Figura 11 - Permeômetro de carga variável utilizado para a medida do fluxo de água nas amostras de solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado foi calculada com a equação 6:

$$K_{\theta} = \frac{aL}{A(\Delta t)} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad [6]$$

onde:

$\Delta t = t_2 - t_1$ (é o intervalo de tempo para a diferença de potencial total entre os extremos da amostra diminuir de H_1 para H_2);

A = área da seção transversal da amostra de solo;

L = comprimento da amostra de solo;

a = área da seção transversal do tubo onde se mede H .

3.5 Avaliações nas plantas

Na cultura do milho, avaliou-se a emergência das plantas aos 7, 10, 13, 16 e 21 dias após a semeadura, numa área de 3 m² demarcada em cada parcela. Quando a cultura estava na fase de enchimento de grãos (119 DAS), avaliou-se a distribuição do sistema radicular, utilizando-se o método do perfil proposto por Böhn (1979). Para avaliar a distribuição radicular, inicialmente abriu-se uma trincheira paralela a duas plantas, com a parede vertical distanciada em 0,05 m do caule. Em seguida, fez-se a exposição das raízes com hastes metálicas pontiagudas, tomando-se o cuidado de expor e manter as raízes na mesma posição em que elas estavam no perfil. Após, colocou-se na parede do perfil uma grade quadriculada de fios de nylon, que formavam quadrículas de 5 x 5 cm. A partir dessa quadrícula, fez-se o desenho da distribuição radicular em papel, procurando-se representar graficamente a distribuição observada no perfil (Figura 12).

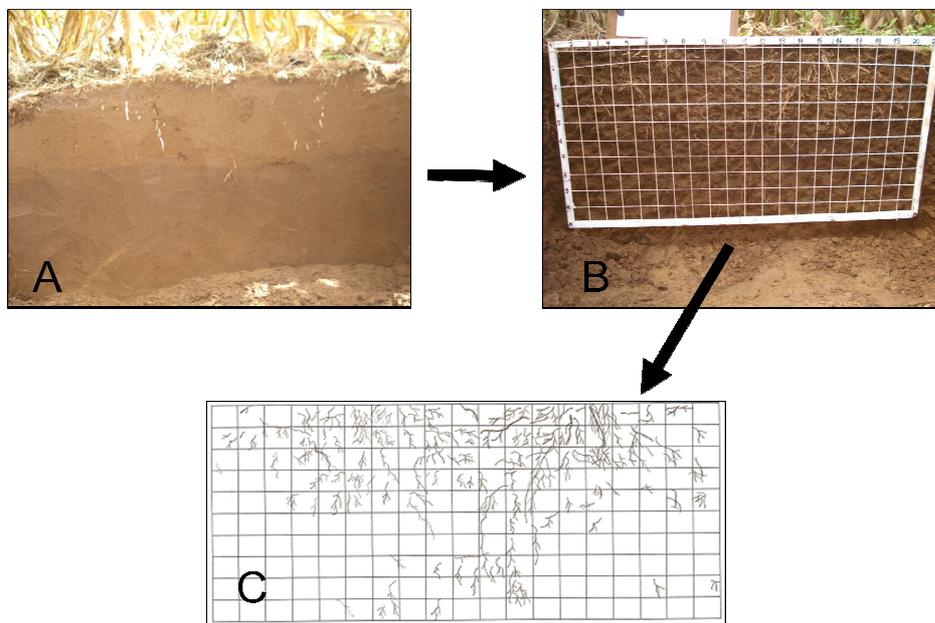


Figura 12 - Procedimento utilizado para avaliar a distribuição radicular da cultura do milho. A: parede vertical do perfil exposta; B: exposição das raízes e quadro com a malha de fios e C: desenho da distribuição radicular observada no perfil.

A massa seca de plantas foi avaliada no dia 31/01/2008, numa área de 2,7 m². A produtividade da cultura foi avaliada na maturação fisiológica (14/03/2008), colhendo-se uma área de 22,5 m² em cada parcela. A umidade dos grãos foi corrigida para 13% e avaliou-se o peso de 1000 grãos.

3.6 Análise estatística

Os dados obtidos nas avaliações foram inicialmente submetidos à análise de normalidade para verificar se seguiam a distribuição normal. O teste de Shapiro Wilk foi utilizado para verificar a distribuição dos dados. Quando os dados não seguiram a distribuição normal, eles foram submetidos à transformação logarítmica antes da aplicação da análise de variância dos testes de comparação de médias e das análises de regressões.

Para todas as variáveis aplicou-se o teste de Tukey para a comparação de médias, com 5 % de probabilidade de erro. Para analisar os dados de densidade, distribuição de poros, condutividade hidráulica saturada e permeabilidade do solo ao ar, considerou-se o delineamento experimental, com blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo o fator principal representado pelos tratamentos (PD, PDc, ESC, SUB e PC) e o fator secundário a camada amostrada. Também foram feitas análises de correlação de Pearson entre as propriedades físicas avaliadas e geraram-se regressões para estimar a resistência do solo à penetração e para a permeabilidade do solo ao ar. Todas as análises foram feitas com o pacote estatístico SAS (SAS, 1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade e distribuição do tamanho de poros do solo

A densidade e a distribuição de poros do solo são as características estruturais possíveis de serem alteradas pelo manejo dado ao solo. O tráfego da carregadeira aumentou a densidade do solo na superfície, em relação ao plantio direto histórico da área, enquanto o preparo convencional reduziu a densidade até 0,15 m de profundidade (Tabela 4). A escarificação profunda (SUB) reduziu significativamente a densidade na camada de 0,05 a 0,10 m e de 0,15 a 0,20 m e a escarificação superficial (ESC) não alterou significativamente a densidade em relação ao plantio direto. Considerando-se as camadas avaliadas, a densidade foi significativamente menor na superfície (0 a 0,05 m) no plantio direto (PD e PDc), na escarificação superficial (ESC) e na escarificação profunda (SUB). No preparo convencional, a camada superficial teve a menor densidade, mas o efeito do revolvimento na desestruturação do solo também ocorreu na camada de 0,05 a 0,15 m, onde aconteceu a redução da densidade. Nas camadas mais profundas, não ocorreu efeito significativo da compactação e do revolvimento do solo sobre a densidade e a distribuição de poros do solo.

Tabela 4 - Densidade do solo em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação. Média das duas épocas de coleta.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)					
0,00-0,05	1,58 Ba	1,43 Bbc	1,42 Bbc	1,45 Bb	1,33 Cc	1,44 C
0,05-0,10	1,68 ABa	1,64 Aa	1,61 Aab	1,53 Ab	1,52 Bb	1,59 B
0,10-0,15	1,70 Aa	1,62 Aa	1,64 Aa	1,60 Aab	1,50 Bb	1,61 B
0,15-0,20	1,67 ABa	1,62 Aa	1,62 Aab	1,56 Ab	1,59 Aab	1,61 B
0,20-0,30	1,67 ABa	1,65 Aa	1,68 Aa	1,62 Aa	1,65 Aa	1,65 A
0,30-0,40	1,64 ABa	1,58 Aa	1,59 Aa	1,55 ABa	1,61 Aa	1,59 B
0,40-0,50	1,62 ABa	1,58 Aa	1,56 Aa	1,51 ABa	1,60 Aa	1,57 B
Média	1,65 a	1,59 b	1,59 b	1,55 c	1,54 c	

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

A densidade do solo é considerada um bom indicativo da qualidade estrutural do mesmo, pois reflete as condições de manejo (REICHERT et al., 2009) e pode ser comparada com valores de referência para definir se houve degradação ou melhoria na estrutura, em função da utilização de determinada prática de manejo (REINERT et al., 2001; REINERT et al., 2006). Os valores encontrados nesse estudo ainda estão abaixo de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, considerado como valor restritivo ao crescimento radicular de plantas em solos franco arenosos (COLLARES et al., 2006; REICHERT et al., 2009).

Apesar do tráfego adicional ter aumentado a densidade, os valores atingidos ainda são baixos em relação aos valores que são encontrados em áreas manejadas sob plantio direto em solo franco arenoso. Reinert et al. (2008) encontraram valores médios de densidade acima de $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ em solo franco arenoso, sendo os valores máximos de $1,92 \text{ Mg m}^{-3}$. Os maiores valores de densidade foram encontrados a partir dos 0,10 m de profundidade e a restrição ao crescimento das raízes das plantas de cobertura foi verificada com densidades acima de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$. Streck et al. (2004) encontraram valores de densidade do solo acima de 1,8 dos 0,05 aos 0,20 m de profundidade em solo franco arenoso sob plantio direto que recebeu o tráfego de 4 passadas de uma máquina com 10 Mg de massa. Collares et al. (2006) encontraram valores de densidade acima de $1,9 \text{ Mg m}^{-3}$ a partir dos 0,10 m de profundidade nesse mesmo solo, devido ao tráfego de uma máquina com 10 Mg de massa. Para o presente estudo, a densidade atingiu o valor máximo de $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0,10 a 0,15 m, não atingindo valores considerados críticos para as culturas agrícolas. Isso indica que o tráfego de máquinas com massa total de 8,5 Mg e pressão de contato de 0,146 MPa com o solo com $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ de umidade não afeta significativamente o estado de compactação do solo, indicando que esses níveis de pressão estão abaixo da capacidade de suporte de carga do solo.

A mobilização do solo através da escarificação é a prática frequentemente utilizada para romper camadas compactadas no solo, pois ocorre a redução na densidade e aumento na porosidade do solo (SILVA, 2003; TORMENA et al., 2004; KLEIN; CAMARA, 2007; REICHERT et al., 2009). No entanto, o efeito da mobilização do solo desaparece num período superior a um ano, pois ocorre a reconsolidação do solo, devido aos ciclos de umedecimento e secagem, o impacto das gotas de chuva, e o tráfego das máquinas agrícolas utilizadas na semeadura, colheita e tratamentos culturais (SILVA, 2003; VEIGA et al., 2008; REICHERT et al., 2009).

A porosidade total foi reduzida pela compactação (PDC) apenas na camada de 0 a 5 cm, mas não foi significativamente alterada pela mobilização do solo (ESC, SUB e PC) em relação ao plantio direto (PD). Na comparação entre as camadas, observa-se que a camada superficial (0 a 0,05 m) tem maior quantidade de poros. Apenas no PDC a quantidade de poros é semelhante no perfil avaliado, pois na superfície do solo ocorreu um aumento da densidade devido à pressão adicional aplicada pelo tráfego.

O volume de macroporos aumentou significativamente na camada de 0 a 0,05 m com o preparo convencional, enquanto a compactação do solo pelo tráfego adicional (PDC) reduziu a macroporosidade nessa mesma camada. A distribuição dos macroporos no perfil avaliado não foi significativamente alterada no PD, PDC e SUB. No PC e ESC ocorreu maior quantidade de macroporos na superfície (0 a 0,05 m), indicando que o efeito desse tipo de mobilização foi mais intenso nessa camada. Dessa forma, o maior efeito sobre a estrutura do solo ocorreu no preparo convencional e o tráfego adicional imposto não foi suficiente para aumentar significativamente o nível de compactação do solo a camadas mais profundas, o que indica que, com essas pressões e nas condições de umidade que o solo se encontrava, a capacidade de suporte de carga não foi superada, não ocorrendo alterações significativas na estrutura do solo. Abreu et al. (2004) encontraram maior macroporosidade na camada superficial em solo franco arenoso sob plantio direto, enquanto Streck et al. (2004) e Collares et al. (2006) constataram redução na quantidade de macroporos na camada superficial em solo compactado pelo tráfego de máquinas.

Um solo fisicamente adequado ao crescimento de plantas deve ter, no mínimo, 10% de macroporos, para manter em níveis adequados a aeração do solo e as trocas gasosas (GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al, 2008). Apenas o PDC apresentou macroporosidade inferior a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ na camada de 0,05 a 0,15 m, podendo limitar as trocas gasosas nessas camadas (Tabela 5).

Tabela 5 - Porosidade total e macroporosidade em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
Porosidade total (m^3m^{-3})						
0,00-0,05	0,38 Ab	0,44 Aa	0,45 Aa	0,43 Aab	0,48 Aa	0,44 A
0,05-0,10	0,35 Ab	0,36 Bab	0,37 Bab	0,41 ABa	0,41 BCa	0,39 B
0,10-0,15	0,34 Ab	0,37 Bab	0,36 Bb	0,38 Bab	0,42 Ba	0,38 B
0,15-0,20	0,36 Aa	0,38 Ba	0,37 Ba	0,40 ABa	0,39 Ba	0,38 B
0,20-0,30	0,35 Aa	0,36 Ba	0,35 Ba	0,37 Ba	0,36 Ca	0,37 BC
0,30-0,40	0,37 Aa	0,39 ABa	0,33 Ba	0,40 ABa	0,37 BCa	0,37 BC
0,40-0,50	0,37 Aa	0,39 ABa	0,40 ABa	0,41ABa	0,38 BCa	0,36BC
Média	0,36 c	0,38 b	0,37 b	0,40 a	0,40 a	
Macroporosidade (Poros maiores que 50 μm) (m^3m^{-3})						
0,00-0,05	0,10 Ac	0,16 Ab	0,18 Ab	0,15 Abc	0,24 Aa	0,17 A
0,05-0,10	0,08 Ab	0,11 Aab	0,12 BCab	0,15 Aa	0,16 BCa	0,15 AB
0,10-0,15	0,09 Ab	0,12 Aab	0,11 BCb	0,12 Aab	0,17 Ba	0,14 BC
0,15-0,20	0,11 Aa	0,13 Aa	0,13 ABCa	0,15 Aa	0,13 BCa	0,13 BC
0,20-0,30	0,11 Aa	0,11 Aa	0,09 Ca	0,12 Aa	0,11 Ca	0,12 C
0,30-0,40	0,12 Aa	0,16 Aa	0,15 ABCa	0,14 Aa	0,11 BCa	0,12 CD
0,40-0,50	0,14 Aa	0,16 Aa	0,17 ABa	0,16 Aa	0,13 BCa	0,11 D
Média	0,11 b	0,13 a	0,14 a	0,14 a	0,15 a	
Microporosidade (Poros menores que 50 μm) (m^3m^{-3})						
0,00-0,05	0,28 Aa	0,28 Aa	0,26 Aab	0,28 Aa	0,23 Ab	0,27 A
0,05-0,10	0,26 ABa	0,25 ABa	0,24 ABa	0,26 ABa	0,25 Aa	0,26 B
0,10-0,15	0,25 Ba	0,24 Ba	0,24 ABa	0,25 ABa	0,25 Aa	0,25 B
0,15-0,20	0,25 Ba	0,24 Ba	0,24 ABa	0,24 Ba	0,25 Aa	0,24 BC
0,20-0,30	0,24 Ba	0,25 Ba	0,25 ABa	0,25 ABa	0,25 Aa	0,24 BC
0,30-0,40	0,24 Ba	0,23 Ba	0,23 ABa	0,24 ABa	0,26 Aa	0,24 BC
0,40-0,50	0,23 Ba	0,23 Ba	0,22 Ba	0,25 ABa	0,25 Aa	0,23 C
Média	0,24 b	0,25 ab	0,25 ab	0,26 a	0,25 a	

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

Os poros com diâmetros menores do que 50 μm não foram significativamente alterados pela compactação e pelo revolvimento do solo, indicando que são pouco influenciados pelo manejo, sendo esses poros condicionados mais pela textura do solo do que pela estrutura (Tabela 6).

Para solos argilosos, a compactação do mesmo aumenta a quantidade de poros menores que 50 μm , com conseqüente redução da condutividade hidráulica e de ar no solo (STRECK, 2007).

Tabela 6 - Diâmetro de poros em diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
Classe de poros de 50 a 30 μm						
0,00-0,05	0,026	0,029	0,027	0,031	0,026	0,03 A
0,05-0,10	0,018	0,021	0,024	0,030	0,026	0,02 B
0,10-0,15	0,019	0,021	0,020	0,022	0,022	0,02 B
0,15-0,20	0,022	0,019	0,021	0,021	0,022	0,02 B
0,20-0,30	0,018	0,019	0,019	0,022	0,022	0,02 B
0,30-0,40	0,015	0,015	0,018	0,019	0,016	0,02 B
0,40-0,50	0,015	0,015	0,017	0,018	0,016	0,02 B
Média	0,019 a	0,020 a	0,021 a	0,022 a	0,022 a	
Classe de poros de 30 a 10 μm						
0,00-0,05	0,042	0,040	0,055	0,040	0,043	0,049 A
0,05-0,10	0,039	0,043	0,049	0,044	0,038	0,047 AB
0,10-0,15	0,039	0,036	0,049	0,036	0,040	0,045 AB
0,15-0,20	0,032	0,036	0,032	0,046	0,036	0,044ABC
0,20-0,30	0,038	0,039	0,036	0,045	0,034	0,044ABC
0,30-0,40	0,026	0,025	0,028	0,026	0,026	0,037 BC
0,40-0,50	0,034	0,023	0,027	0,031	0,034	0,033 C
Média	0,037 a	0,035 a	0,039 a	0,038 a	0,036 a	
Classe de poros de 10 a 3 μm						
0,00-0,05	0,031	0,038	0,033	0,038	0,031	0,034 A
0,05-0,10	0,034	0,028	0,032	0,027	0,029	0,033 A
0,10-0,15	0,030	0,033	0,024	0,031	0,031	0,031 A
0,15-0,20	0,025	0,029	0,032	0,032	0,031	0,030 A
0,20-0,30	0,021	0,023	0,037	0,032	0,024	0,030 A
0,30-0,40	0,020	0,027	0,026	0,027	0,026	0,027 A
0,40-0,50	0,019	0,030	0,035	0,044	0,038	0,025 A
Média	0,026 a	0,030 a	0,032 a	0,033 a	0,030 a	
Classe de poros < 3 μm						
0,00-0,05	0,190	0,176	0,151	0,177	0,138	0,175 A
0,05-0,10	0,182	0,161	0,144	0,162	0,164	0,170 A
0,10-0,15	0,164	0,154	0,152	0,165	0,159	0,166 A
0,15-0,20	0,162	0,161	0,154	0,160	0,164	0,167 A
0,20-0,30	0,170	0,168	0,164	0,159	0,173	0,174 A
0,30-0,40	0,182	0,165	0,157	0,178	0,197	0,186 A
0,40-0,50	0,166	0,167	0,151	0,177	0,169	0,175 A
Média	0,174 a	0,165 ab	0,153 b	0,168 a	0,166 ab	

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

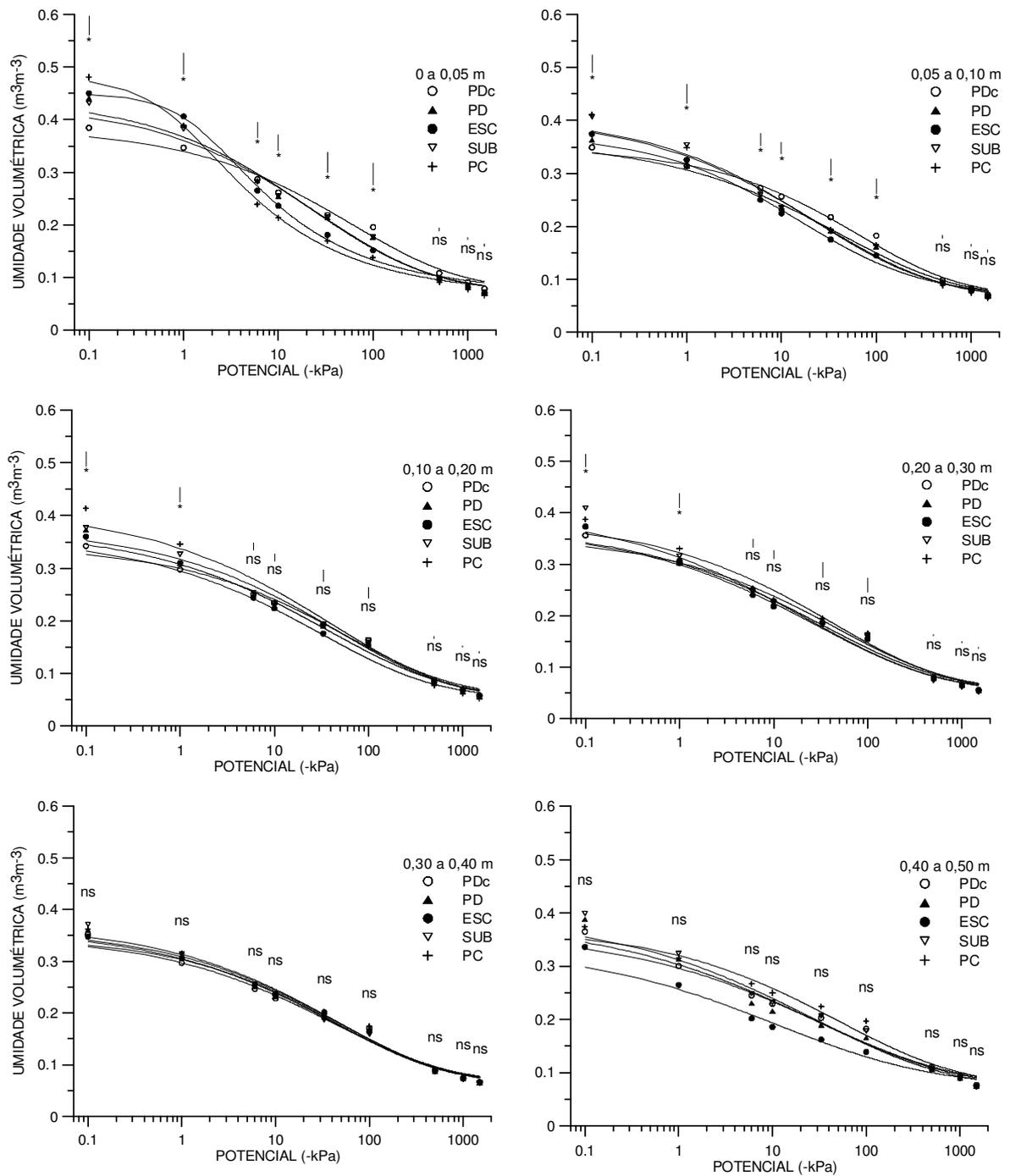
4.2 Curva de retenção e disponibilidade de água no solo

A curva de retenção de água no solo mostra a relação entre o conteúdo de água retido e o potencial com que a água está retida, sendo isso afetado pela textura e condição estrutural do solo, principalmente a distribuição de poros. O efeito do tráfego e do revolvimento se manifestou na curva de retenção de água no solo. A retenção de água na camada superficial do solo (0 a 0,05 m), em condições saturadas, é significativamente maior no preparo convencional (PC), devido à maior porosidade total em relação ao plantio direto compactado (PDC), enquanto nos demais manejos essa diferença não foi significativa (Figura 13). A partir do potencial de 1 kPa até 100 kPa ocorreu um aumento significativo na retenção de água no PD, PDC e SUB, em relação ao SUB e PC. Isso indica que ocorreu uma alteração na distribuição dos poros, principalmente na continuidade destes, pois a quantidade de poros nessas classes foi semelhante entre os manejos.

Na camada de 0,05 a 0,10 m, a retenção de água foi significativamente maior no PC e SUB até o potencial de 1 kPa e, nos potenciais menores, a retenção foi significativamente maior no PDC. Na camada de 0,10 a 0,20 m, a retenção de água foi significativamente maior no PC e dos 0,20 a 0,30 m foi maior no PC e SUB, até o potencial de 1 kPa. Nas demais camadas, o comportamento da curva de retenção de água foi semelhante em todas as condições de manejo do solo, indicando não haver alterações significativas pelo revolvimento e compactação do solo nessas camadas.

O conteúdo de água na capacidade de campo ($CC = -10$ kPa), obtido na curva de retenção de água, foi significativamente menor na camada superficial (0 a 0,05 m) do preparo convencional (PC) (Tabela 7), indicando menor quantidade de microporos nessa camada (Tabela 5). Nas demais camadas, o revolvimento e a compactação do solo não proporcionaram variações significativas no conteúdo de água na capacidade de campo, em relação ao plantio direto contínuo da área. O conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($PMP = -1500$ kPa) variou de 0,05 a 0,08 entre as camadas e tratamentos, não sendo significativa a diferença entre tratamentos, pois nesses potenciais o efeito da textura e da composição mineralógica do solo possui maior efeito na retenção de água do que as condições

estruturais do solo. O teor de água no PMP está próximo aos valores obtidos por Collares (2005), pelo método fisiológico. Klein et al (2004) também verificaram que o teor e água retido no potencial de 1,5 MPa, pela metodologia do psicrômetro (WP4), é próximo aos valores obtidos com o método fisiológico.



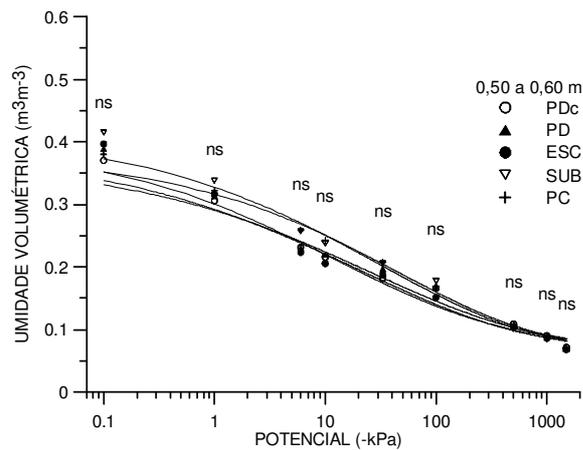


Figura 13 - Curvas de retenção de água no solo. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional, nas camadas avaliadas.

Tabela 7 - Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível (mm) obtida através da curva de retenção de água para os sistemas de manejo estudados.

Camada (m)	Sistema de manejo					CV ¹ (%)
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
Umidade na capacidade de campo (m ³ m ⁻³)						
0,00-0,05	0,26 a	0,25 a	0,24 ab	0,25 a	0,21 b	11,7
0,05-0,10	0,26 a	0,24 ab	0,22 b	0,23 ab	0,22 b	9,4
0,10-0,15	0,23 a	0,23 a	0,22 a	0,23 a	0,23 a	6,4
0,15-0,20	0,23 a	0,23 a	0,22 a	0,23 a	0,23 a	6,2
0,20-0,30	0,23 a	0,23 a	0,24 a	0,23 a	0,23 a	12,1
0,30-0,40	0,23 ab	0,22 ab	0,19 b	0,23 ab	0,25 a	19,5
0,40-0,50	0,22 a	0,22 a	0,21 a	0,24 a	0,24 a	13,3
Umidade no ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)						
0,00-0,05	0,08 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	28,6
0,05-0,10	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,06 a	32,1
0,10-0,15	0,06 a	0,06 a	0,06 a	0,06 a	0,05 a	27,3
0,15-0,20	0,06 a	0,05 a	0,05 a	0,05 a	0,05 a	23,6
0,20-0,30	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,06 a	0,07 a	31,5
0,30-0,40	0,08 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,08 a	21,0
0,40-0,50	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,07 a	17,2
Capacidade de água disponível (mm)						
0,00-0,05	9,0 a	9,0 a	8,5 ab	9,0 a	7,0 b	16,3
0,05-0,10	9,5 a	8,5 ab	7,5 b	8,0 ab	8,0 ab	13,4
0,10-0,15	8,5 a	8,5 a	8,0 a	8,5 a	9,0 a	8,7
0,15-0,20	8,5 a	9,0 a	8,5 b	9,0 ab	9,0 a	7,9
0,20-0,30	16,0 a	16,0 a	17,0 a	17,0 a	16,0 a	17,3
0,30-0,40	15,0 a	15,0 a	12,0 a	16,0 a	17,0 a	20,4
0,40-0,50	15,0 a	15,0 a	14,0 a	17, a	17,0 a	20,4

¹ CV: coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

A quantidade de água disponível para as plantas, considerando a umidade na CC e no PMP, foi significativamente menor na camada superficial do PC, e o ESC teve menor quantidade de água disponível na camada de 0,15 a 0,20 m. Nas demais camadas, a água disponível não foi alterada pelo manejo aplicado, em relação ao plantio direto da área (PD) utilizado como referência, por ser a condição estrutural natural da área.

4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica saturada (k_{sat}) representa uma propriedade dinâmica do solo condicionada pela quantidade, tamanho e continuidade do sistema poroso. Solos compactados com baixa condutividade hidráulica saturada favorecem a perda de água por escoamento (HANZA; ANDERSON, 2005). Neste estudo, as camadas superficiais do solo tiveram maior condutividade saturada, o que indica presença de poros maiores e contínuos. Apesar da grande diferença numérica entre os valores de k_{sat} , a diferença foi significativa apenas entre as camadas de 0 a 0,5 m e 0,10 a 0,15 m entre o plantio direto compactado (PDC) e o preparo convencional (PC), enquanto nas demais condições de manejo as diferenças observadas não foram significativas (Tabela 8).

Tabela 8 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) nos sistemas de manejo e camadas estudadas.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDC	PD	ESC	SUB	PC	
0,00-0,05	54,1 Ab	174,6 Aab	152,1 Aa	140,6 Aab	226,4 Aa	149,6 A
0,05-0,10	30,3 Aa	40,2 ABa	100,5 ABa	120,1 Aa	77,8 ABCa	73,8 B
0,10-0,15	30,8 Ab	45,5 ABab	76,1 ABab	38,6 Aab	151,6 ABa	68,5 B
0,15-0,20	18,9 Aa	61,6 ABa	25,0 Ba	89,9 Aa	45,4 BCa	48,2 BC
0,20-0,30	8,1 Aa	77,3 Ba	18,6 Ba	42,8 Aa	14,8 Ca	32,3 CD
0,30-0,40	8,7 Aa	8,8 Ba	6,2 Ba	10,7 Aa	14,2 BCa	9,7 D
0,40-0,50	5,3 Aa	8,9 Ba	13,1 Ba	35,1 Aa	36,2 Ca	19,7 CD
Média	22,3 b	59,6 a	55,9 a	68,3 a	80,9 a	

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

A presença de maior quantidade de macroporos e menor densidade no PC foi responsável por essa diferença em relação ao PDC (Tabelas 4 e 5). Isso é confirmado pela análise de correlação, que mostra que a densidade do solo possui correlação negativa com a condutividade hidráulica saturada, enquanto a porosidade total e a macroporosidade se correlacionam positivamente (Tabela 9). A retenção e a condução de água no solo são favorecidas por um sistema poroso estável e bem distribuído no perfil. Os poros maiores são responsáveis pela aeração do solo e pela condução de água em condições saturadas, enquanto que os poros menores atuam na retenção e condução de água em condições não saturadas. A redução da proporção de poros maiores pode restringir o fluxo saturado de água (RIBEIRO et al., 2007) e comprometer a entrada e redistribuição de água no perfil do solo.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a condutividade hidráulica do solo saturado com a densidade e classes de tamanho de poros.

Ds	PT	Diâmetro de poros (μm)			
		> 50	<50	10 a 50	10 a 3
-0,54*	0,50*	0,51*	-0,06 ^{ns}	0,17*	-0,20*

*Significativo a 1%. ^{ns} Significativo .

O manejo do solo e o tráfego de máquinas agrícolas alteram as características do sistema poroso e a condutividade hidráulica. Quando o solo é revolvido, sua estrutura é alterada, e um novo sistema poroso é formado, normalmente com poros maiores desconectados e em grande quantidade. O solo mantido sob semeadura direta apresenta o sistema poroso estável e contínuo, devido à maior atividade biológica e a ciclagem de raízes. No entanto, quando solos sob semeadura direta são trafegados, a pressão exercida pelos pneus das máquinas é transmitida ao solo, resultando numa compactação adicional. O impacto do tráfego sob o sistema poroso e a profundidade atingida vão depender da pressão exercida, histórico das pressões já sofridas e da umidade do solo. Albuquerque et al. (2001) verificaram redução de 38 vezes na Ksat nos sistemas plantio direto e convencional, comparados com a condição de mata natural, em um Nitossolo Vermelho. Essa

redução da K_{sat} foi atribuída à redução da macroporosidade, de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na condição da mata para $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na condição de plantio direto.

A condutividade hidráulica saturada é uma propriedade dinâmica do solo e o seu comportamento será determinado pelo grau de compactação que o solo apresenta (REICHERT et al., 2008) e pela quantidade e continuidade dos poros, principalmente macroporos (MESQUITA; MORAES, 2004). À medida que aumenta a densidade, devido à compactação do solo, diminui a porosidade total e o volume de macroporos. Um solo considerado fisicamente adequado às culturas agrícolas deve apresentar no mínimo $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporos, sendo esse valor utilizado como padrão na literatura (TORMENA et al., 1998; COLLARES et al., 2006), por ser considerado suficiente para uma adequada aeração do solo (GRABLE; SIEMER, 1968). Esse volume de macroporos no solo em estudo representaria uma K_{sat} de apenas $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ (Figura 14 a). Para uma K_{sat} de $10,6 \text{ mm h}^{-1}$, a porosidade total do solo mínima deve ser de $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a densidade máxima que o solo pode apresentar é de $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$.

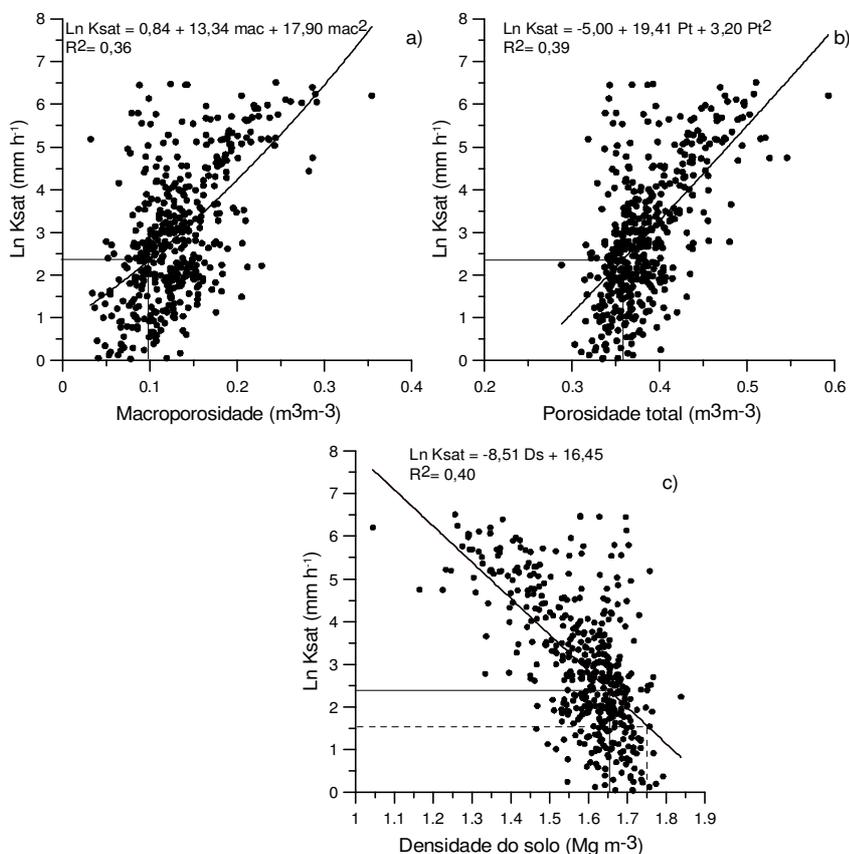


Figura 14 - Regressões entre a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) com a macroporosidade (a), com a porosidade total do solo (b) e com a densidade do solo (c).

Usando esses valores ($K_{sat} = 10,6 \text{ mm h}^{-1}$, $D_s = 1,67 \text{ Mg m}^{-3}$, $P_t = 0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\text{macro} = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) como referência, verifica-se que as maiores limitações ocorrem no tratamento com a compactação adicional do solo (PDC), onde acontece maior densidade e menor porosidade total e macroporosidade, principalmente nas camadas de 0,05 a 0,20 m, em que normalmente se situa a camada compactada dos solos sob plantio direto (COLLARES et al, 2006). Suzuki (2008) encontrou valores médios de 17 mm h^{-1} de k_{sat} em floresta de eucaliptos e 14 mm h^{-1} em área sob pastagem nativa, em solo franco arenoso. Dessa forma, os valores de k_{sat} observados neste estudo podem ser considerados elevados, em relação à floresta e campo nativo. Apesar da mobilização mecânica do solo aumentar a k_{sat} nas camadas superficiais, a reconsolidação do solo reduz novamente a k_{sat} com o passar do tempo (ABREU et al., 2004). Por outro lado, a utilização de plantas de cobertura com raízes pivotantes tem se mostrado mais eficiente em aumentar e manter elevados valores de k_{sat} , por criar poros contínuos no solo (ABREU et al., 2004). Em condições de campo, Streck (2004) e Silva (2003) verificaram que a compactação em plantio direto reduziu os valores de k_{sat} , por ter reduzido a quantidade de macroporos do solo.

A grande dispersão dos pontos e o baixo coeficiente de determinação (R^2) (Figura 14) indicam que, além do volume de poros, a sua continuidade no perfil é fundamental para a drenagem e distribuição de água no solo e, dessa forma, o estabelecimento de valores críticos com base apenas na porosidade torna-se difícil, tornando necessária a medida desse parâmetro para avaliar o real efeito do manejo do solo.

4.4 Precipitação pluvial

A precipitação pluvial foi bem distribuída ao longo do ciclo da cultura do milho, totalizando 561 mm nos 140 dias do ciclo da cultura. Os primeiros 46 dias após a semeadura (DAS) tiveram menor volume de chuva, mas as precipitações foram frequentes (Figura 15). Os períodos mais secos ocorreram dos 36 aos 46 DAS, dos 75 aos 84 DAS e dos 102 aos 112 DAS, mas nunca ultrapassando 10 dias seguidos

sem chuva. Dessa forma, não ocorreram estiagens durante o ciclo do milho, não havendo necessidade de irrigação durante o período.

4.5 Retenção e dinâmica da água no solo

A retenção de água no solo, em condições de campo, é afetada pela textura e estrutura do solo e a sua variação ao longo do tempo é determinada pelas condições meteorológicas, pelo desenvolvimento das plantas e pelos estados superficiais do solo, principalmente pelo grau de cobertura. O conteúdo de água do solo teve uma flutuação com os ciclos de umedecimento e secagem do solo, devido às precipitações que ocorreram durante o ciclo da cultura e pela extração da água pelas plantas e pelas perdas por evapotranspiração.

A retenção de água foi influenciada pelo manejo e nível de compactação do solo, uma vez que a superfície do solo teve a maior variação na umidade (Figura 16 e 17). As maiores diferenças no teor de água do solo são observados entre o plantio direto compactado (PDc) e o preparo convencional (PC), indicando que nessas condições ocorrem as maiores influências sobre a estrutura do solo e que afetaram a dinâmica da água.

Na camada superficial (0 a 0,05 m), o PDc teve maior conteúdo de água que o PC nos períodos compreendidos entre 14 aos 58, 99 aos 101, 104 aos 105 e dos 117 aos 119 DAS. Dos 30 aos 34 DAS, o teor de água do PDc foi superior ao observado no PD e ESC. Dos 36 aos 40 DAS, o PDC reteve mais água que o ESC e entre 41 e 47 DAS, o conteúdo de água no PDc foi superior aos demais tratamentos. Nessa camada, o conteúdo de água do solo ficou acima da capacidade de campo aos 12, 36, 55, 74 e 116 DAS e próximo ao ponto de murcha permanente aos 46 e 112 DAS, devido ao maior intervalo e quantidade de chuvas ocorridas no período.

Após os 50 DAS, observa-se que a diferença entre o conteúdo de água retido nos tratamentos com mobilização e o plantio direto são menores, o que pode estar associado a uma reconsolidação do solo nessa camada, que já é evidente após um período de 67 dias após o preparo em solo franco arenoso (REICHERT et al., 2009). Além disso, nessa fase as plantas já estão em pleno desenvolvimento vegetativo o que permite maior sombreamento do solo, reduzindo o aquecimento das camadas

superficiais e reduzindo a taxa de evaporação de água do solo, principalmente nos tratamentos com revolvimento (SILVA et al., 2006).

Na segunda camada, os efeitos do manejo sobre a retenção de água foram menores, mas observou-se a mesma tendência da camada superficial. O PDc reteve mais água que o PC nos dias 34, 40 a 48, 80, 83, 86 a 88, 91 a 97, 100 a 101, 106 a 111 DAS. Aos 45 DAS, o teor de água no PDc foi superior que nos demais tratamentos (Figura 17).

Na terceira (0,10 a 0,20) (Figura 18) e quarta (0,20 a 0,30) camada (Figura 19), a variação no conteúdo de água foi menor que nas camadas superficiais e o efeito dos tratamentos foi menos pronunciado. No período compreendido dos 80 aos 112 DAS, o conteúdo de água foi menor nessas camadas, pelas chuvas terem sido menos frequentes e em menor quantidade, o que demonstra que a frente de umedecimento não chegou a atingir essas camadas, mantendo o teor de água num nível estável. Nos demais períodos, o teor de água esteve acima ou muito próximo à capacidade de campo. As diferenças no conteúdo de água foram significativas apenas entre o PDc e PC entre os 50 a 54 DAS e aos 68 DAS, para a camada de 0,10 a 0,20 m e, dos 51 aos 54, 83, 86, 88 a 92 e 105 DAS na camada de 0,20 a 0,30 m.

O conteúdo de água no solo nas camadas abaixo de 0,30 m (0,30 a 0,40; 0,40 a 0,50 e 0,50 a 0,60 m) não foi afetado pelo manejo ou compactação do solo (Figuras 20, 21 e 22) e a variação observada está diretamente ligada às condições meteorológicas predominantes no período e pela extração da água pelas raízes das plantas. Até os 60 DAS, o conteúdo de água esteve próximo à capacidade de campo e, dos 60 aos 115 DAS, ocorreu uma queda no conteúdo de água, o que está associada à menor precipitação ocorrida nessa fase e também ao maior consumo pelas plantas que estão na fase de crescimento vegetativo e floração. Além disso, nesse período o sistema radicular já mais desenvolvido, podendo extrair maior quantidade de água das camadas mais profundas do solo.

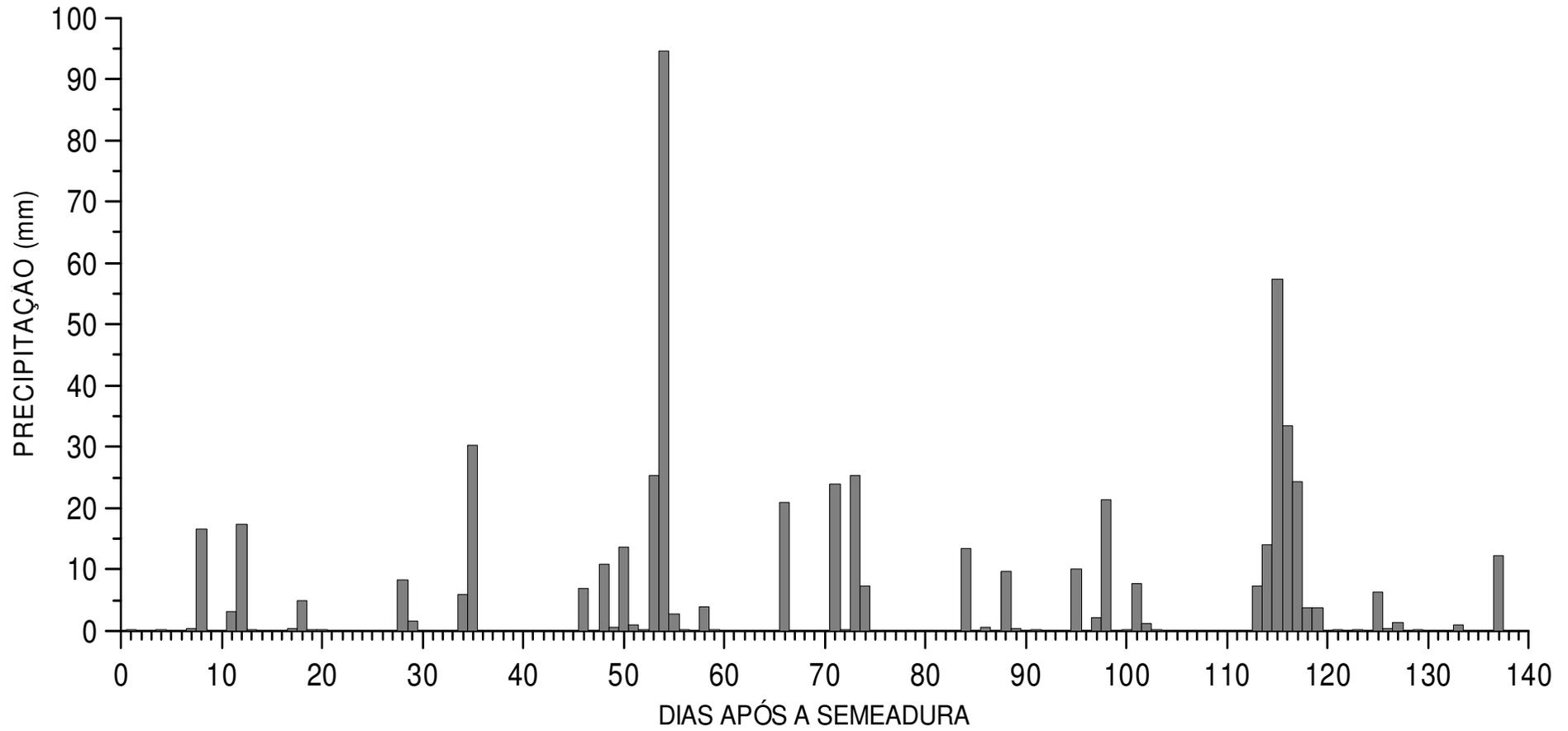


Figura 15 - Precipitação pluvial ao longo do ciclo do milho no período de novembro de 2008 a abril de 2009

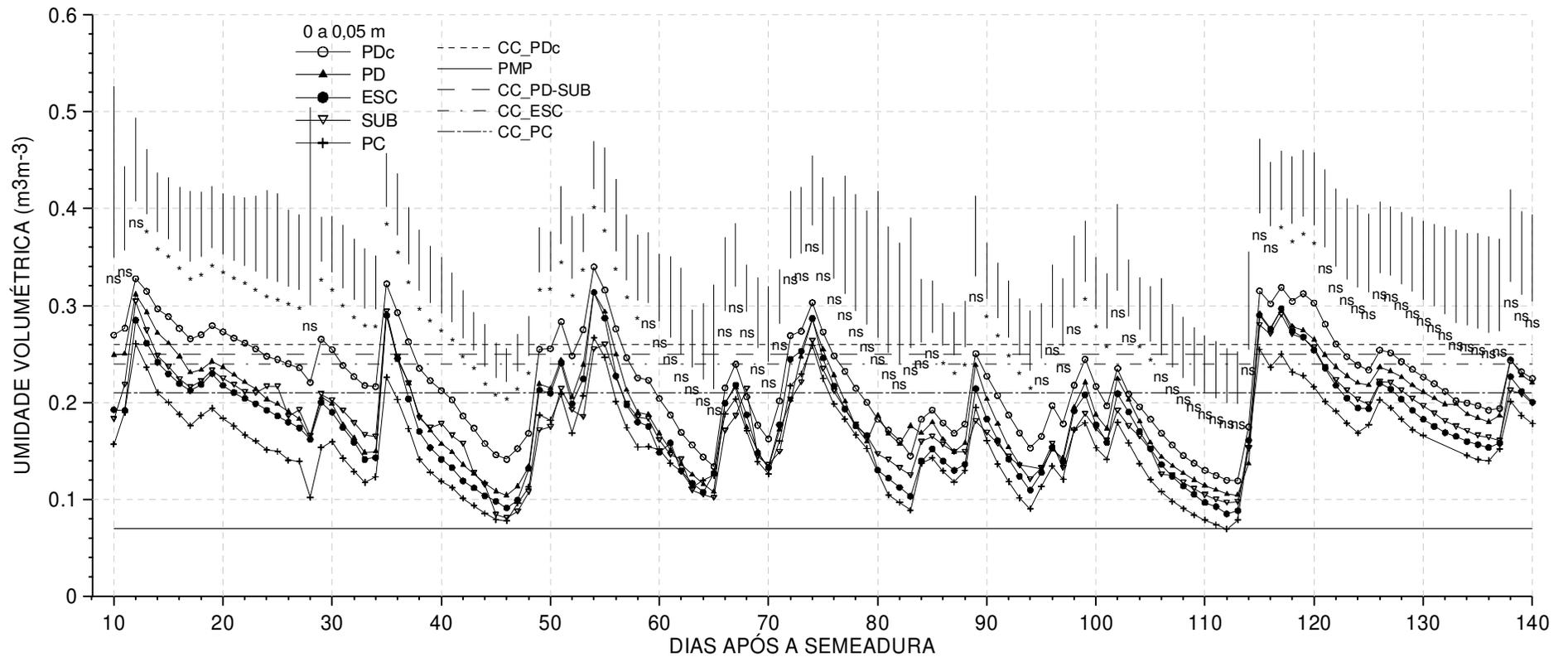


Figura 16 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

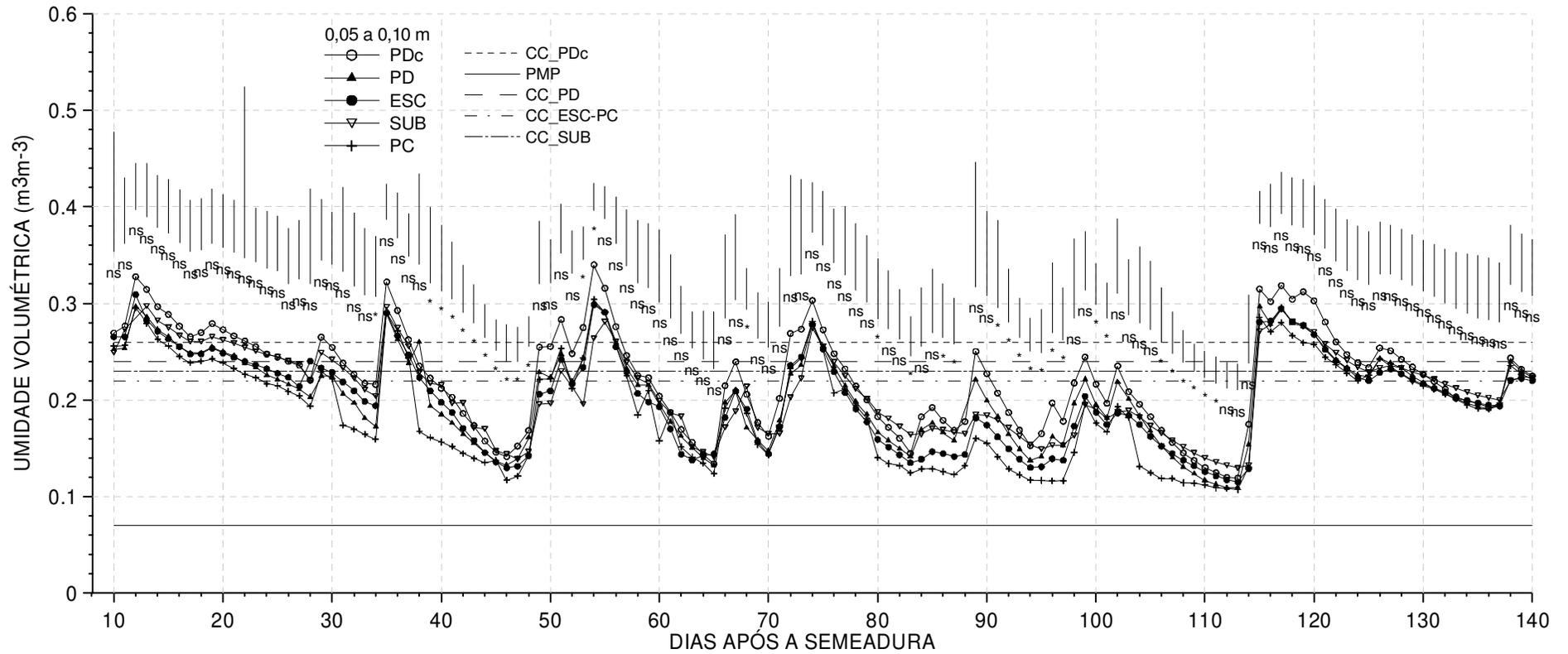


Figura 17 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

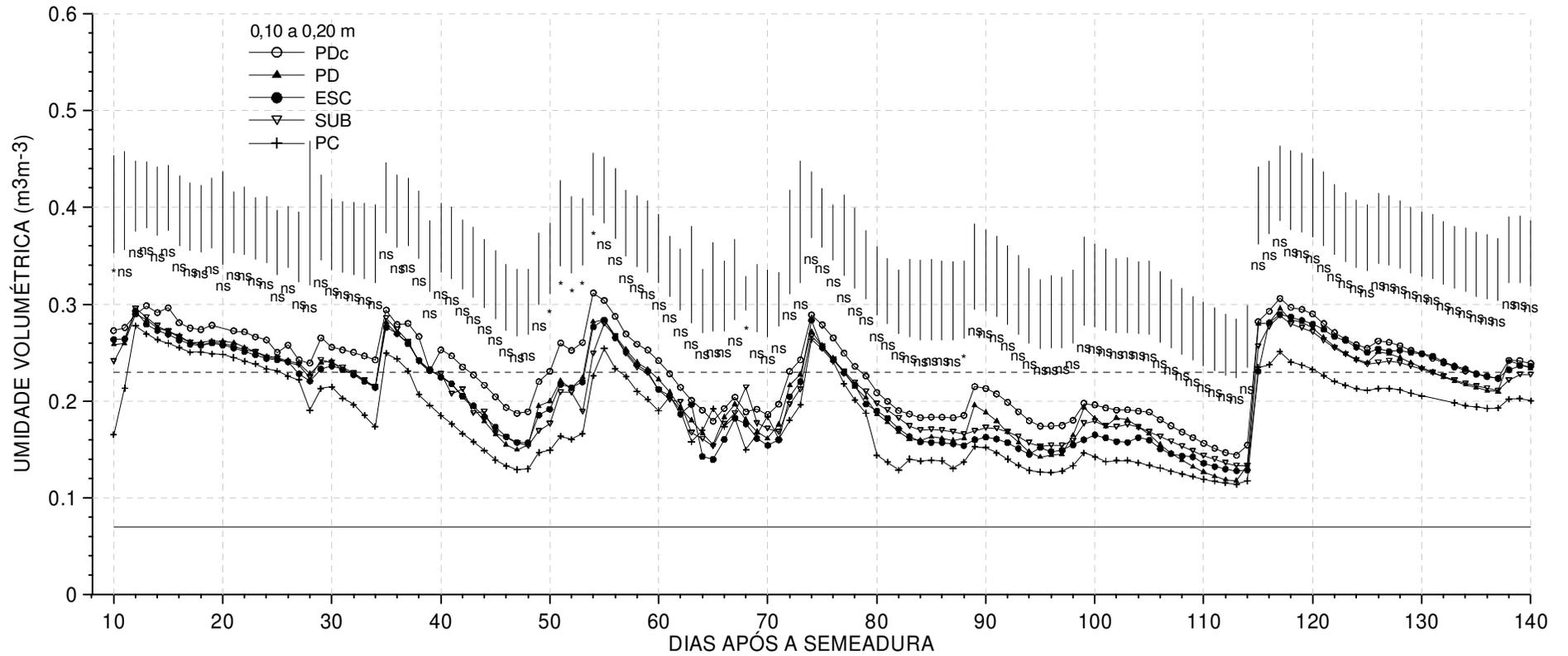


Figura 18 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

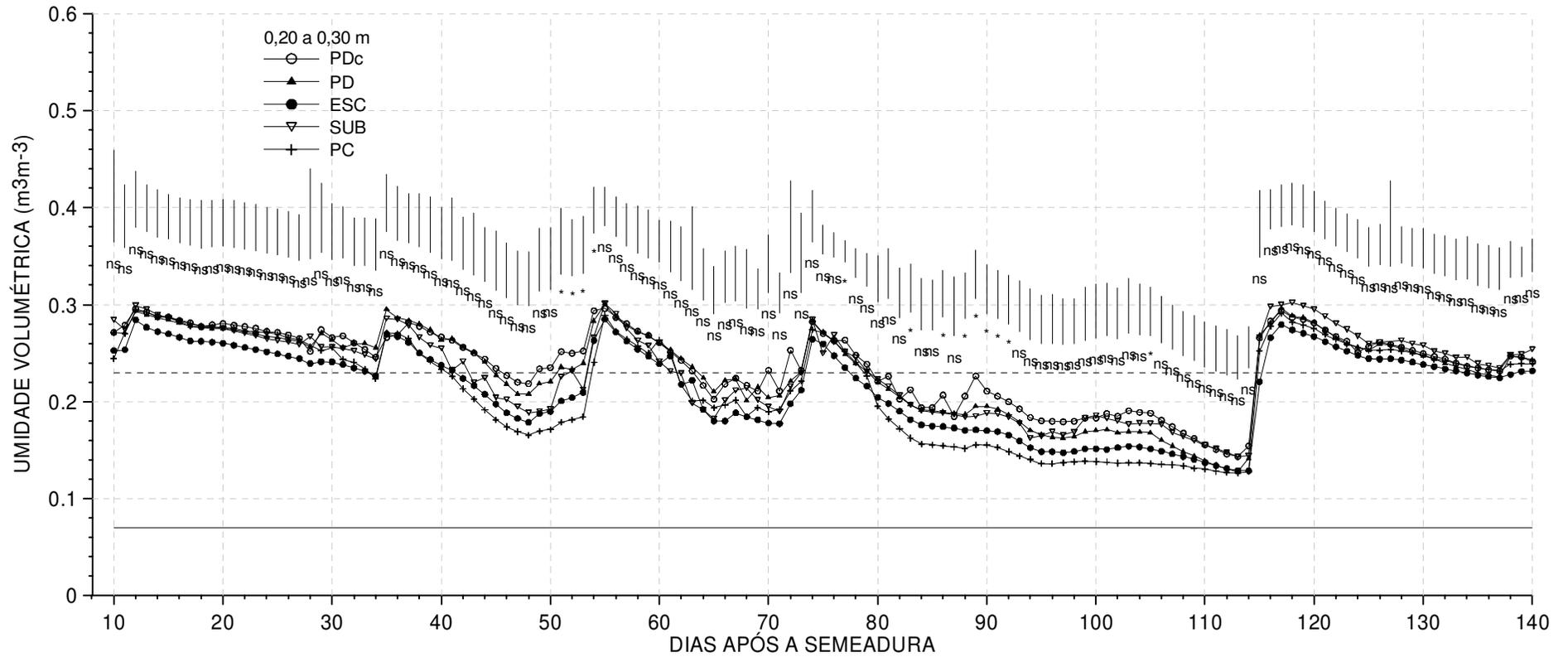


Figura 19 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

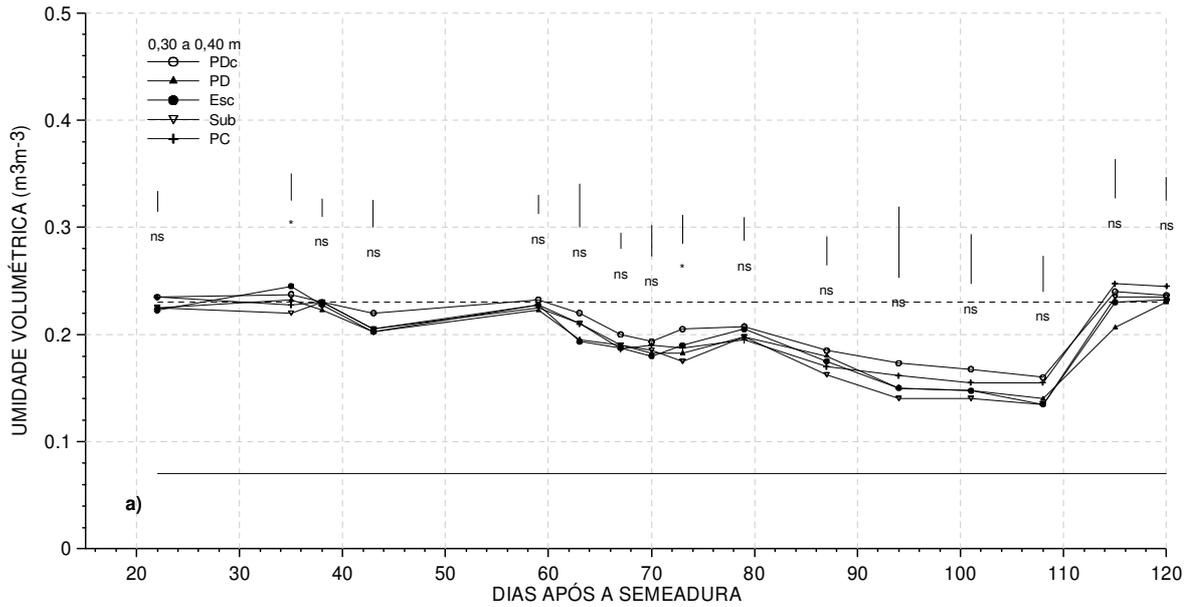


Figura 20 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,30 a 0,40 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

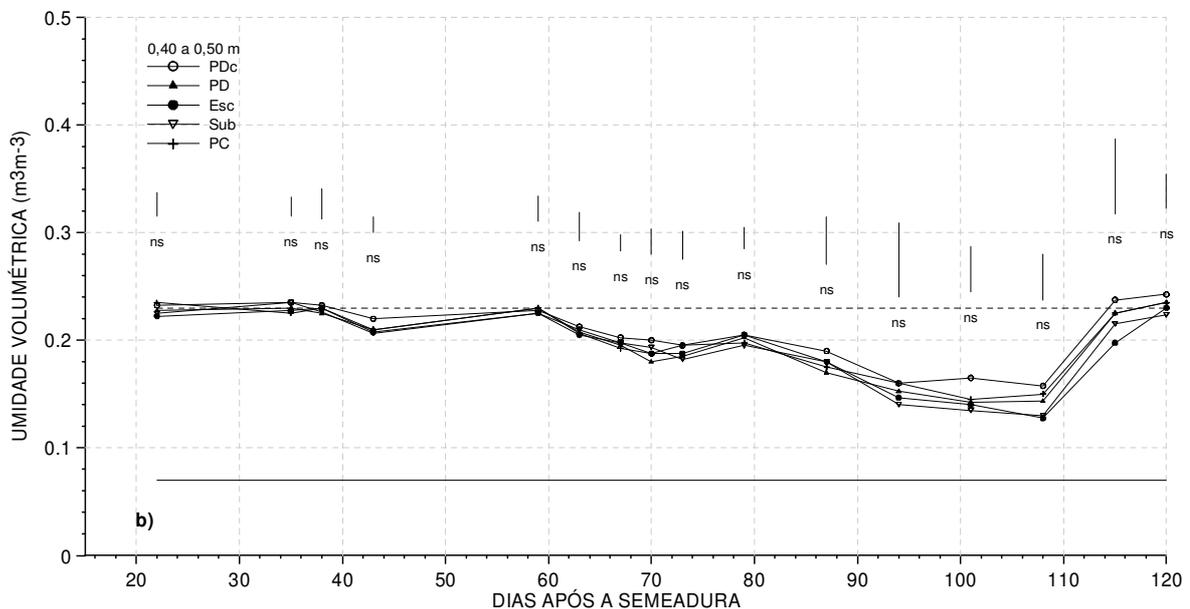


Figura 21 - Umidade volumétrica do solo na camada de 0,40 a 0,50 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

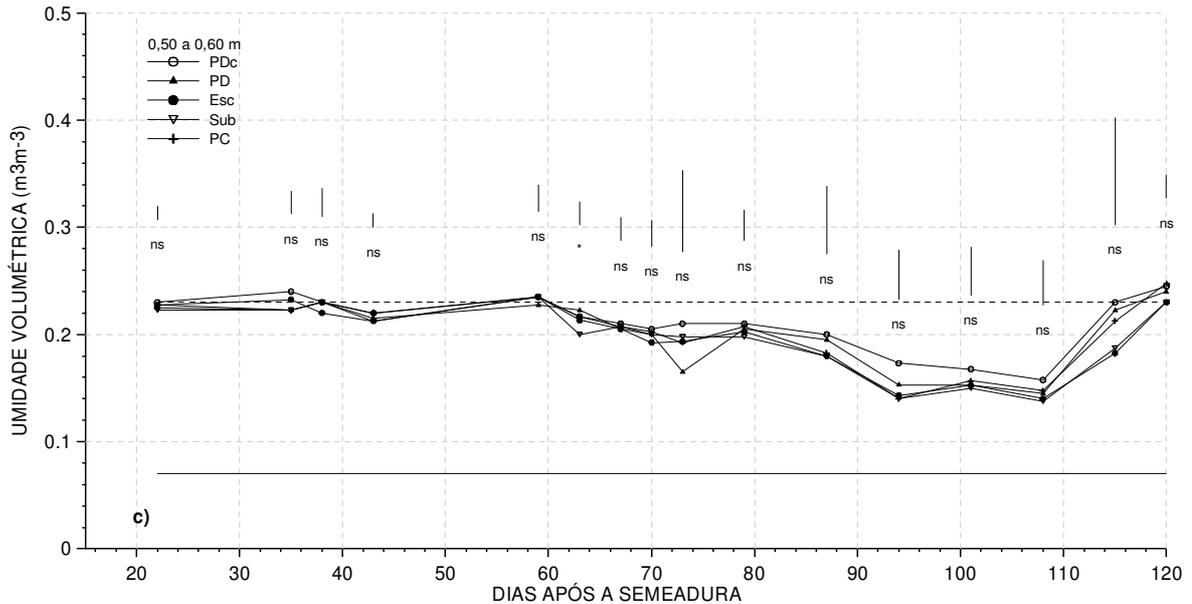


Figura 22 - Umidade volumétrica do solo nas camadas de 0,50 a 0,60 m ao longo do ciclo da cultura do milho. A linha pontilhada representa a umidade média na capacidade de campo e a linha cheia representa a umidade média no ponto de murcha permanente. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

Em todas as camadas houve água disponível ao longo do ciclo da cultura (Figuras 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29) e, a variação na quantidade de água disponível, seguiu a mesma tendência da variação do conteúdo de água em cada camada, devido às condições meteorológicas predominantes. O aumento na quantidade de água disponível em cada camada está associado à entrada de água da chuva e pela redistribuição no perfil, enquanto que a redução na água disponível está associada à taxa de extração pelas raízes das plantas e pelas perdas por evaporação. A camada superficial do solo teve a maior variação e a menor lâmina de água disponível armazenada no período, o que pode ser atribuído a maior extração de água pelas raízes e as maiores perdas por evapotranspiração que ocorrem, principalmente, na superfície do solo (Figura 23).

O maior armazenamento de água no plantio direto pode ser fundamental no início do ciclo das culturas, principalmente para a germinação e emergência das plantas (KARUNATILAKE et al., 2000) e isso é resultante do efeito combinado da estrutura e do grau de cobertura do solo (GUPTA; SCHNEIDER, 1988), que reduz as perdas de água por evaporação no plantio direto (STONE; MOREIRA, 2000;

FREITAS et al., 2004; FREITAS et al., 2006), o que não fica evidente quando a retenção de água é calculada a partir de dados da curva de retenção de água, obtida através de amostras de solo.

A maior continuidade dos poros em plantio direto permite o rápido fluxo da água da chuva e mantém a funcionalidade das propriedades dinâmicas do solo (CAVALIERI et al., 2009), uma vez que a camada superficial do solo apresenta maior variação na quantidade e continuidade dos poros pela maior atividade biológica e decomposição de raízes e pelo maior revolvimento dessas camadas pelos mecanismos sulcadores das semeadoras, o que favorece a entrada e a preservação da água no solo. Com o tráfego das máquinas, a pressão exercida sobre o solo rearranja a estrutura interna, e o maior efeito ocorre sobre os macroporos. Os poros são alterados em tamanho e forma, podendo ser deformados, obstruídos ou desaparecer completamente (BLACKWELL et al., 1990; JEGOU et al., 2002). Os poros tortuosos são comprimidos, ocorrendo a desconectividade entre as camadas enquanto que os poros com formato regular e contínuos, ao serem comprimidos tornam-se mais tortuosos (SCHUNNING; RASMUSSEN, 2000).

O revolvimento mecânico do solo cria condições físicas adequadas ao crescimento das raízes das plantas, mas destrói os bioporos e cria uma nova estrutura no solo, formada por agregados soltos, mantendo-se apenas os microporos no interior dos agregados intactos. A estrutura que se forma na camada revolvida é formada por espaços vazios entre os agregados, cujo formato e a conectividade são bastante irregulares, o que reduz a capacidade de retenção de água pelo solo (DALMAGO et al., 2009). Em função dessas alterações no sistema poroso, observa-se a tendência do plantio direto compactado (PDc) reter maior quantidade de água na camada superficial do solo, devido ao aumento na densidade do solo, em relação ao plantio direto histórico da área (PD), mas o plantio direto não apresenta maior quantidade de água disponível em relação aos diferentes tipos de preparo do solo (ESC, SUB, PC) para as condições desse estudo. Em outros estudos desenvolvidos em solo franco arenoso, também não foi verificada diferença no armazenamento e disponibilidade de água entre o plantio direto e o preparo convencional (PETRY et al., 2007).

A retenção da água no solo está associada com a granulometria, com a densidade e quantidade de microporos (RAWLS et al., 1991), sendo essas as principais variáveis utilizadas para estimativa da retenção e disponibilidade de água

no solo por meio de pedofunções (REICHERT et al., 2009). Com esses modelos é possível prever a capacidade de retenção de água no solo, mas mantêm oculta as informações sobre a dinâmica da água em condições de campo, cujo efeito aqui é demonstrado, ficando evidente que a retenção e a disponibilidade de água no solo é resultante da combinação de fatores edáficos e climáticos.

A compactação ou preparo do solo normalmente alteram a estrutura em camadas diferentes, e em condições de campo, a condição estrutural e a conectividade entre os poros das camadas alteram a distribuição da água no solo, alterando a variação da umidade no tempo em taxas variáveis, o que não fica evidente com a estimativa através de pedofunções (REICHERT et al., 2009). A medida da variação do conteúdo de água diretamente no campo mostra o aspecto dinâmico da água e a resposta da planta é dependente dessa interação com a água do solo e as condições físicas do meio, sendo isso, considerado no passado uma meta fundamental para a melhor compreensão do sistema solo-água-planta (GARDNER, 1965; PHILIP, 1966) e que atualmente é possível de ser monitorada e quantificada pela disponibilidade de equipamentos eletrônicos dinâmicos e precisos.

O solo sob plantio direto armazena maior quantidade de água que o sistema convencional (FABRIZZI et al. 2005), mas não ocorre diferença na produção das culturas quando os demais indicadores físicos (Densidade, porosidade e RP) estão dentro da faixa adequada ao desenvolvimento das plantas. Além disso, mesmo o solo apresentando níveis de compactação considerados restritivos às plantas, a adequada distribuição da precipitação ao longo do ciclo da cultura manteve água disponível em todas as camadas avaliadas, podem não ser observadas respostas da cultura (CARDOSO et al., 2006; REICHERT et al., 2009). Dessa forma, os efeitos negativos da estrutura do solo ficam evidentes em anos que apresentam estiagens prolongadas e, nessas condições, a presença de cobertura do solo sob plantio direto pode favorecer a infiltração e reduzir as perdas de água por evaporação, o que representa uma maior quantidade de água armazenada.

O revolvimento e a escarificação do solo não aumentaram a retenção e a disponibilidade de água para as plantas, o que mostra que essa técnica não é eficiente para aumentar a disponibilidade de água, mesmo que ela eleve a taxa de infiltração de água no solo (CAMARA; KLEIN, 2005) e permita melhor crescimento das raízes das plantas (COLLARES et al., 2006).

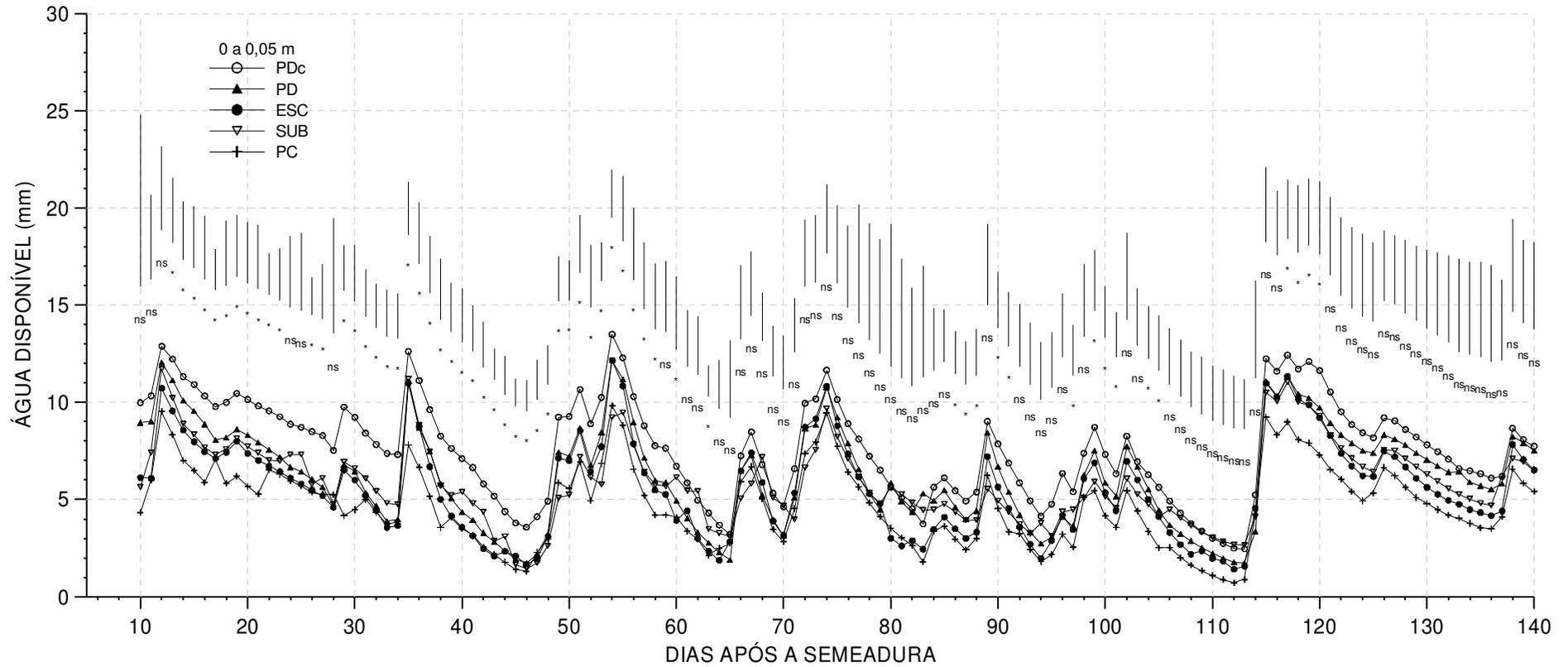


Figura 23 - Água disponível na camada de 0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

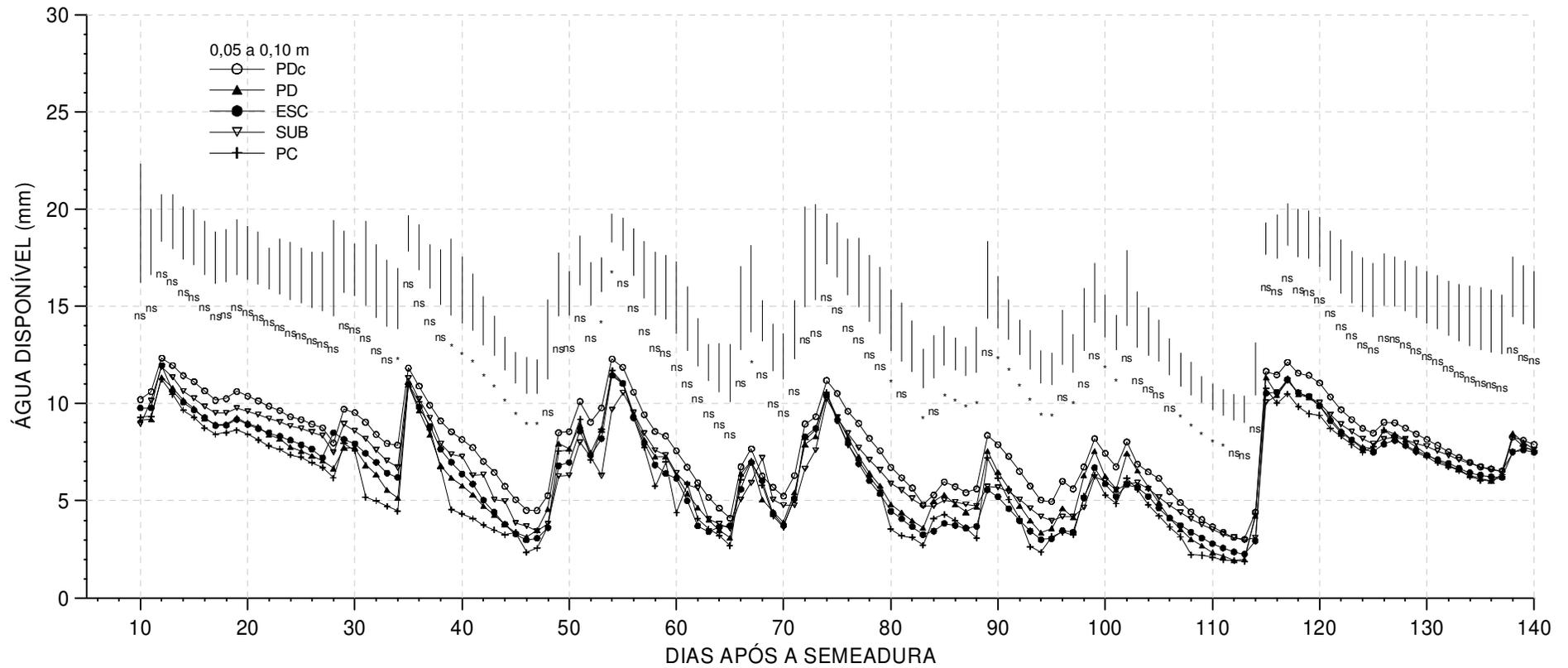


Figura 24 - Água disponível na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

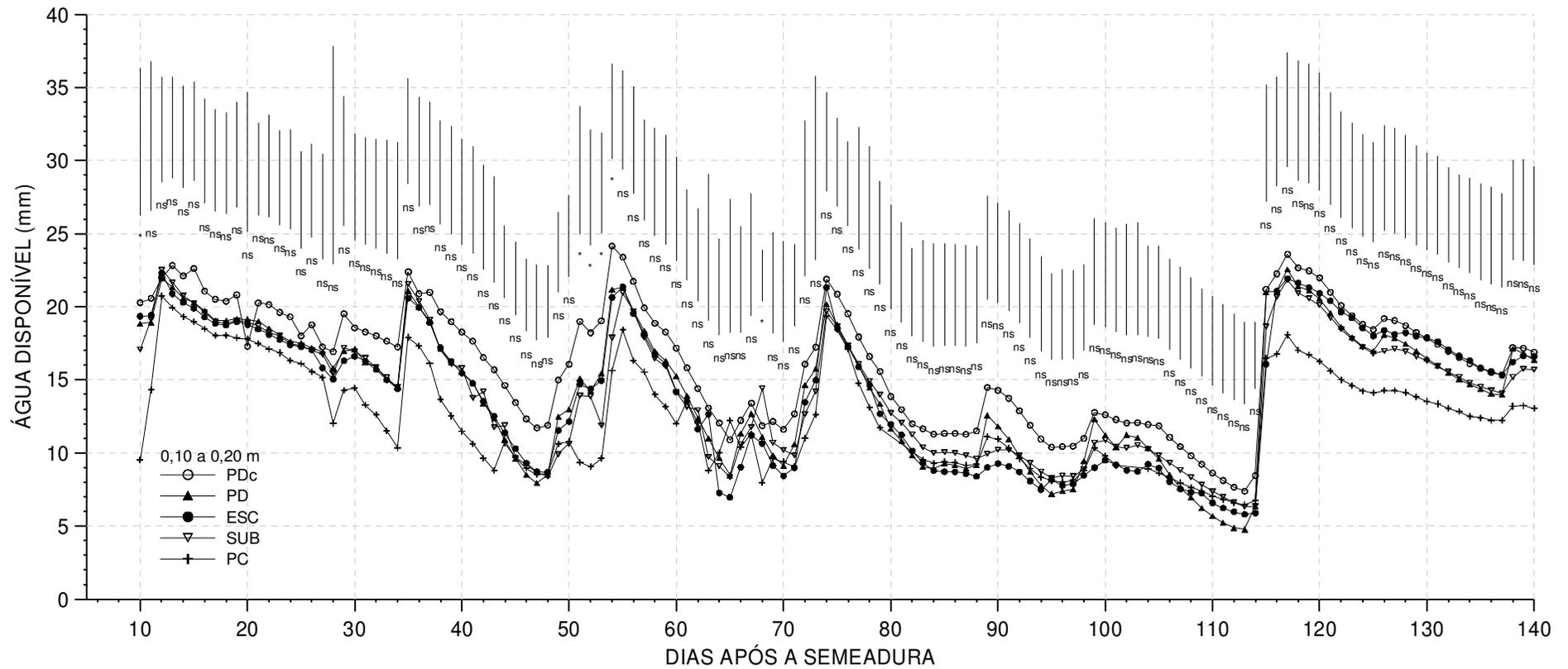


Figura 25 - Água disponível na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

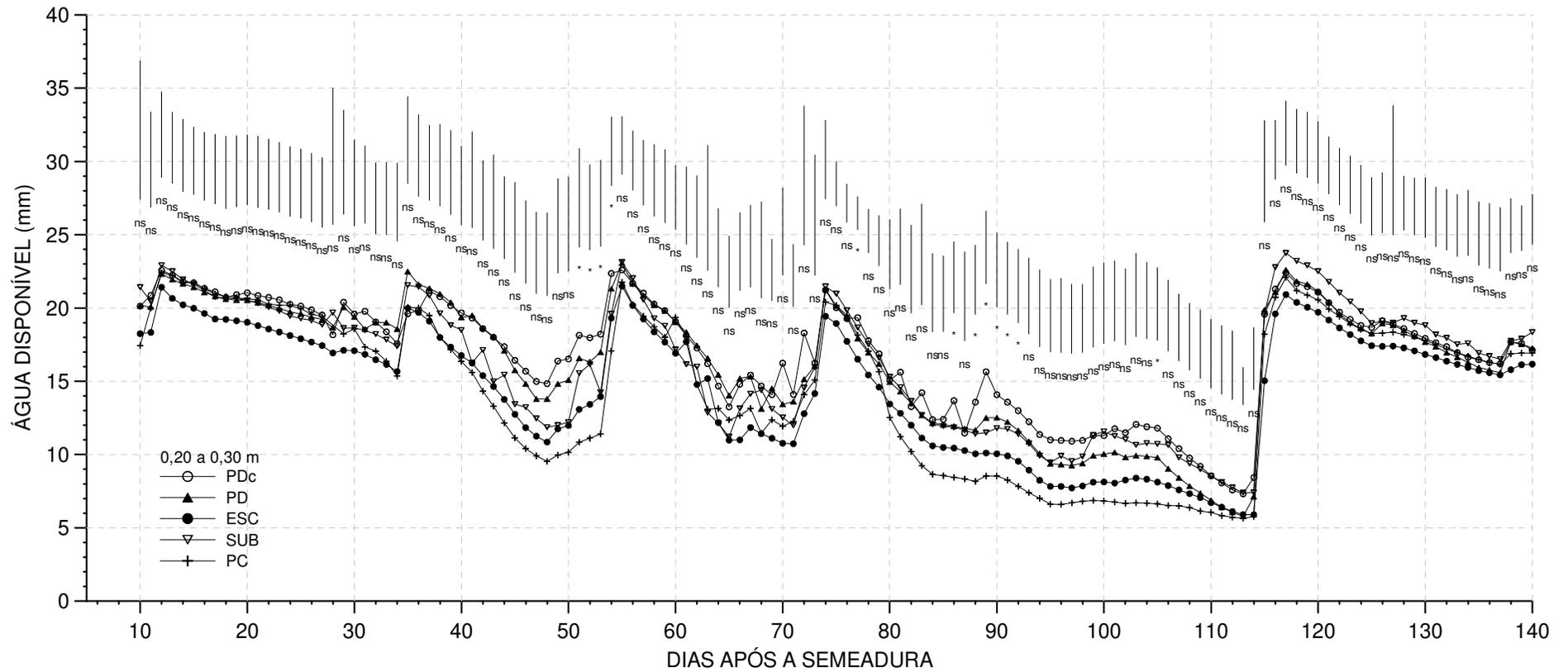


Figura 26 - Água disponível na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

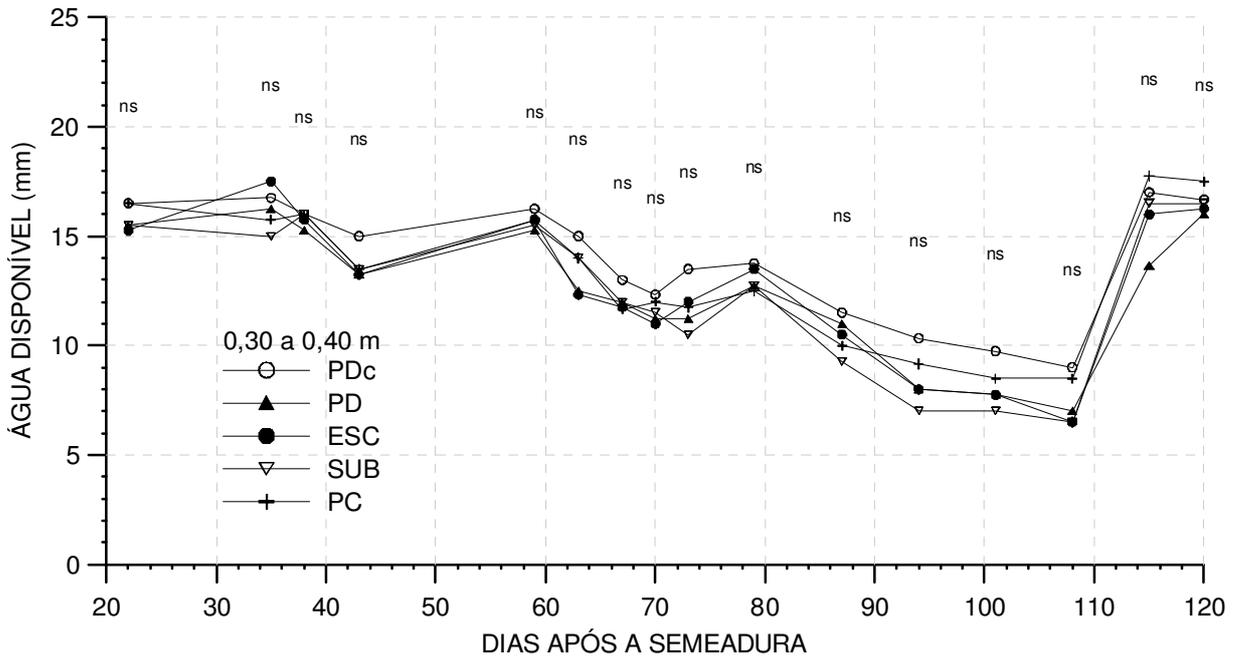


Figura 27 - Água disponível na camada de 0,30 a 0,40 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

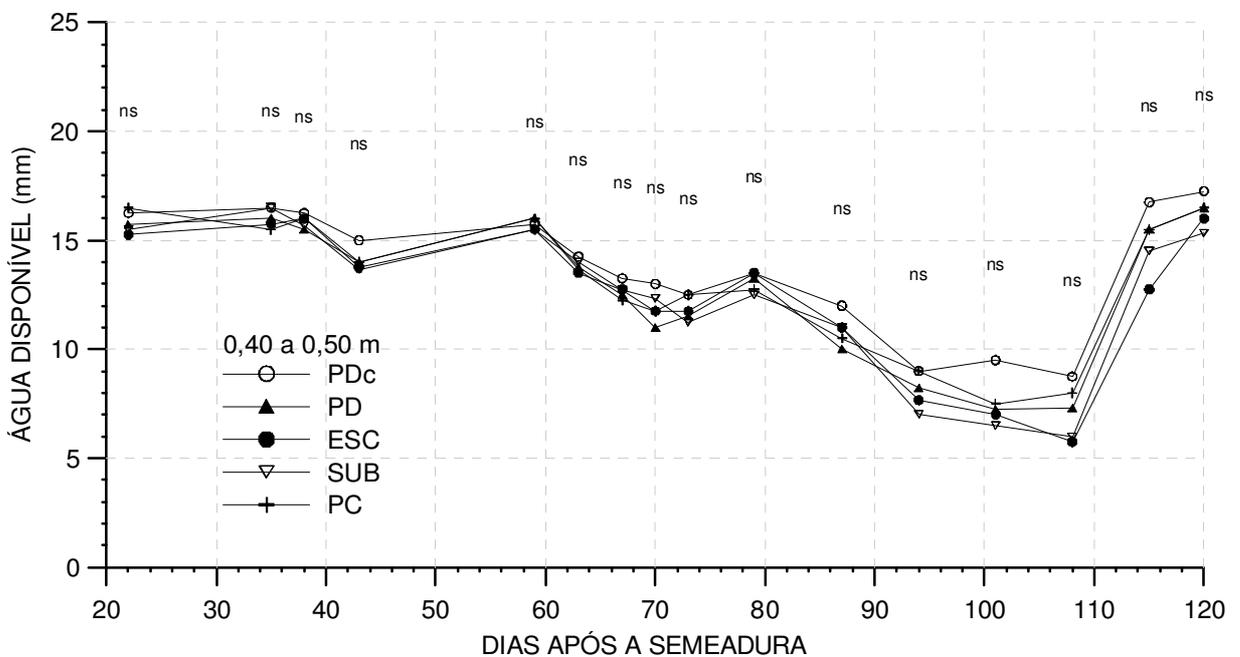


Figura 28 - Água disponível na camada de 0,40 a 0,50 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

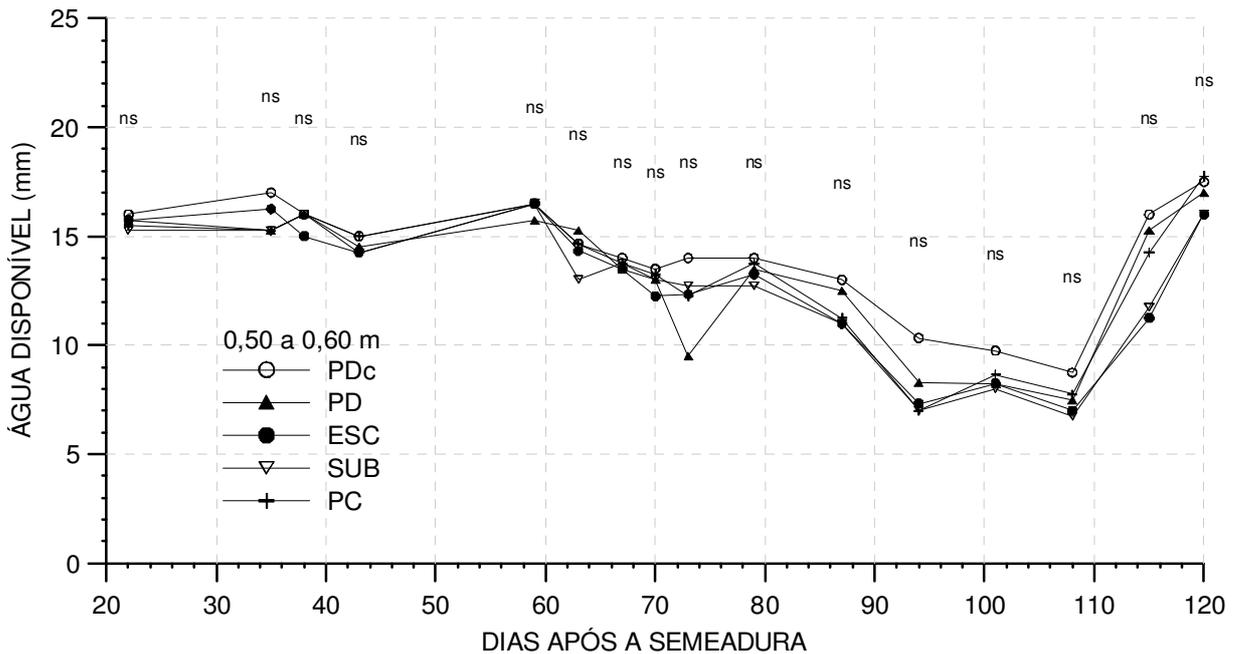


Figura 29 - Água disponível na camada de 0,50 a 0,60 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

4.6 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar não foi significativamente alterada pela compactação do solo, nas diferentes tensões avaliadas (Tabela 10). O preparo convencional teve maior permeabilidade nas camadas de 0,10 a 0,15 m, em relação ao plantio direto e não diferiu do ESC e SUB. Os valores médios de permeabilidade são maiores na superfície do solo em relação às demais camadas. As camadas superficiais, normalmente, apresentam maior permeabilidade, devido à maior quantidade e continuidade dos poros da superfície (STRECK, 2007; SEQUINATTO, 2010), uma vez que o uso do solo para a produção agrícola reduz a permeabilidade ao ar em relação ao campo nativo, devido as alterações ocasionadas na sua estrutura pela compactação do solo (FONTANELA, 2007; BRANDT, 2008).

Tabela 10 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2) em diferentes tensões de água nos sistemas de manejo e camadas do solo.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
Tensão de 6 kPa						
0,00-0,05	5,9 Ac	30,2 Aabc	20,9 Aab	21,4 Abc	63,5 Aa	28,4 A
0,05-0,10	4,8 Aa	6,4 Aa	18,1 ABa	23,5 Aa	21,2	14,8 B
0,10-0,15	3,4 Ab	5,4 Ab	10,8 Abab	8,9 Aab	37,7 ABa	14,2 B
0,15-0,20	5,6 Aa	18,2 Aa	6,2 ABa	29,0 Aa	12,4 Bca	13,3 BC
0,20-0,30	2,3 Aa	4,2 Aa	4,6 Ba	7,6 Aa	5,2 Ca	11,4 C
0,30-0,40	2,5 Aa	6,1 Aa	3,8 ABa	7,2 Aa	2,8 Ca	4,7 BC
0,40-0,50	6,0 Aa	7,0 Aa	7,4 ABa	16,0 Aa	20,4 BCa	4,5 AB
Média	4,4 c	11,1 b	10,3 ab	16,3 ab	23,3 a	
Tensão de 10 kPa						
0,00-0,05	11,1 Ab	31,5 Aab	25,6 Aab	44,7 Aab	74,0 Aa	37,4 A
0,05-0,10	7,2 Aa	7,9 Aa	21,2 ABa	23,7 Aa	26,1 ABa	17,2 B
0,10-0,15	5,2 Ab	10,9 Aab	13,7 Abab	12,9 Aab	39,2 ABa	16,4 B
0,15-0,20	5,1 Aa	17,7 Aa	8,1 ABa	32,5 Aa	15,7 Ba	15,8 B
0,20-0,30	3,5 Aa	4,8 Aa	3,4 Ba	11,7 Aa	7,3 Ba	6,1 C
0,30-0,40	4,0 Aa	7,8 Aa	11,7 ABa	9,6 Aa	4,6 Ba	7,6 BC
0,40-0,50	7,7 Aa	9,6 Aa	11,0 ABa	13,8 Aa	18,7 Ba	12,2 B
Média	6,3 b	12,9 a	13,6 a	21,3 a	26,5 a	
Tensão de 33 kPa						
0,00-0,05	8,3 Ab	39,9 Aab	35,8 Aa	44,2 Aa	86,2 Aa	42,9 A
0,05-0,10	9,6 Aa	11,4 ABa	27,3 ABa	34,8 Aa	32,8	23,16 B
0,10-0,15	8,4 Ab	9,35 Abb	15,8 Abab	16,8 Aab	53,9 ABa	22,4 BC
0,15-0,20	8,9 Aa	19,8 ABa	13,2 ABa	49,6 Aa	20,7 Bca	20,9 BC
0,20-0,30	6,1 Aa	5,6 Ba	5,2 Ba	19,8 Aa	10,0 Ca	9,3 D
0,30-0,40	5,3 Aa	8,9 ABa	18,3 ABa	15,3 Aa	5,6 Ca	10,7 CD
0,40-0,50	9,8 Aa	10,0 ABa	12,3 ABa	21,9 Aa	20,9 BCa	15,0 BC
Média	8,1 c	15,0 bc	18,3 ab	28,9 a	32,9 a	
Tensão de 100 kPa						
0,00-0,05	10,9 Ab	50,9 Aa	36,1 Aa	55,1 Aa	110,9 Aa	52,8 A
0,05-0,10	11,7 Aa	14,5 ABa	33,9 ABa	38,2 Aa	41,5 ABa	28,5 B
0,10-0,15	11,3 Ab	12,7 Abb	19,3 Abab	21,3 Aab	63,7 Aa	27,9 B
0,15-0,20	9,7 Ab	22,7 Abab	12,4 Abab	77,1 Aa	20,9 Bab	25,7 BC
0,20-0,30	8,1 Aa	8,1 Ba	7,7 Ba	17,1 Aa	15,4 Ba	11,4 CD
0,30-0,40	7,2 Aa	11,5 ABa	9,7 ABa	13,2 Aa	7,2 Ba	9,8 D
0,40-0,50	10,9 Aa	12,1 ABa	16,2 ABa	28,5 Aa	20,6 Ba	17,7 CD
Média	9,9 d	18,9 cd	19,4 bc	35,9 a	40,0 ab	

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade de erro. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

A densidade, a porosidade total, a porosidade de aeração e os macroporos (>50 μm) tiveram a melhor correlação com a permeabilidade do solo ao ar, (Tabela 11), indicando que esses são os principais fatores ligados à variabilidade da permeabilidade do solo. A correlação foi negativa com a densidade do solo e positiva com a porosidade total, macroporosidade e com os poros com tamanho de 10 a 50 μm . Os macroporos tiveram a melhor correlação e são os principais responsáveis pelo fluxo de ar no solo (HORN; SMUCKER, 2005), principalmente na camada superficial (Tabela 11). A correlação entre a permeabilidade ao ar nas tensões maiores que 6 kPa teve pouco incremento, o que comprova a eficiência dos macroporos na condução de ar no solo. A contribuição dos macroporos na permeabilidade do solo foi significativamente maior nas camadas de 0 a 0,05 e de 0,10 a 0,15 m do preparo convencional. As demais camadas tiveram um comportamento semelhante.

A redução da permeabilidade do ar no solo está diretamente associada à deformação dos poros quando a pressão aplicada pelas máquinas agrícolas é maior que a capacidade de suporte do solo, o que ocasiona a redução e deformação de parte dos poros (VOSSBRINK; HORN, 2004). A desestruturação do solo reduz a permeabilidade do ar e da água em amostras de solo, devido à destruição dos macroporos (TULI et al., 2005). Dessa forma, a redução na quantidade de macroporos do solo, seja por compactação ou revolvimento, podem reduzir a sua permeabilidade. Valores de permeabilidade menores que 10 μm^2 são considerados baixos e podem comprometer as trocas gasosas (KMOCH; HANUS, 1965). Com base nisso, observa-se que os valores de permeabilidade do solo ao ar menor que 10 μm^2 predominam no plantio direto (PD e PDc), enquanto a mobilização do solo (ESC, SUB, PC) melhora a permeabilidade do solo ao ar (Tabela 11) e valores acima de 10 μm^2 já são observados na tensão de -6 kPa, o que indica que os macroporos criados pela mobilização do solo são mais eficientes em conduzir ar, melhorando a aeração do solo nas diferentes camadas.

Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a permeabilidade do solo ao ar com a densidade e classes de tamanho de poros, espaço aéreo e condutividade hidráulica do solo.

Tensão (kPa)	Ds	PT	Diâmetro de poros (μm)				Espaço aéreo				Ksat
			> 50	<50	10 a 50	10 a 3	Ea6	Ea10	Ea33	Ea100	
6	-0,52*	0,49*	0,57*	-0,17*	0,10**	-0,22*	0,57*	0,56*	0,53*	0,53*	0,80*
10	-0,55*	0,52*	0,59*	-0,14*	0,12**	-0,22*	0,59*	0,58*	0,55*	0,55*	0,78*
33	-0,59*	0,56*	0,63*	-0,14*	0,15**	-0,25*	0,63*	0,62*	0,62*	0,60*	0,79*
100	-0,58*	0,55*	0,61*	-0,13*	0,19*	-0,27*	0,60*	0,60*	0,59*	0,60*	0,75*

*Significativo a 1%. ** Significativo a 5 %. Ksat: condutividade hidráulica do solo saturado. Ea: espaço aéreo.

O índice de continuidade de poros é um indicativo da eficiência dos poros em permitir a passagem do ar (BALL et al., 1988). A mobilização e a compactação do solo não alteraram significativamente o índice de continuidade dos poros, apesar da grande diferença numérica entre os valores, o que é resultante da grande variabilidade desse parâmetro. Observa-se a “tendência” de aumento do índice de continuidade de poros com o preparo do solo, principalmente no preparo convencional (Tabela 12).

Como visto anteriormente, a permeabilidade ao ar é um parâmetro com grande variação espacial no solo, e dependente principalmente da quantidade e continuidade dos macroporos. A porosidade de aeração é um fator fundamental para manter o fluxo de ar entre as diferentes camadas do solo e garantir a respiração das raízes e dos microrganismos do solo. Para o adequado desenvolvimento das plantas, o espaço aéreo deve ser de no mínimo $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al., 2008).

Tabela 12 - Índice de continuidade de poros em diferentes sistemas de manejo e camadas do solo.

Camada (m)	Sistema de manejo					Média
	PDc	PD	ESC	SUB	PC	
Tensão de 6 kPa						
0,00-0,05	54,2 Ab	158,3 Aab	124,7 Aab	94,8 Aab	266,1Aa	139,6 A
0,05-0,10	93,4 Aa	55,1 Aa	132,6 Aa	121,6 Aa	111,7 ABa	102,9 AB
0,10-0,15	40,7 Aa	40,8 Aa	73,4 Aa	64,4 Aa	194,8 ABa	90,1 ABC
0,15-0,20	54,9 Aa	143,7 Aa	46,6 Aa	129,5 Aa	75,5 Ba	82,8 ABC
0,20-0,30	21,1 Aa	32,3 Aa	51,9 Aa	57,1 Aa	40,4 ABa	75,8 BC
Média	46,3 b	73,1 ab	71,4 ab	89,0 a	121,6 a	
Tensão de 10 kPa						
0,00-0,05	89,1 Aa	140,1 Aa	127,1 Aa	173,6 Aa	286,6 Aa	195,7 A
0,05-0,10	108,6 Aa	60,5 Aa	145,5 Aa	111,8 Aa	126,2 ABa	142,3 B
0,10-0,15	50,8 Aa	73,9 Aa	82,9 Aa	81,2 Aa	183,7 ABa	126,4 BC
0,15-0,20	39,1 Aa	118,6 Aa	52,2 Aa	146,6 Aa	88,4 ABa	120,1 BC
0,20-0,30	26,8 Aa	31,0 Aa	30,2 Aa	79,2 Aa	51,6 Ba	113,4 BC
Média	55,9 b	74,9 b	83,0 ab	102,7 a	126,4 a	
Tensão de 33 kPa						
0,00-0,05	44,1 Ab	157,2 Aab	150,9 Aa	160,8	282,2 Aa	159,1 A
0,05-0,10	86,1 Aa	67,4 Aa	142,2 ABa	138,5 Aa	134,8 ABa	113,8 AB
0,10-0,15	59,3 Aa	48,1 Aa	70,9 ABa	82,5 Aa	208,0 ABa	100,1 B
0,15-0,20	50,2 Aa	103,6 Aa	72,9 ABa	178,0 Aa	95,5 ABa	93,8 B
0,20-0,30	35,6 Aa	27,6 Aa	33,9 Ba	100,4 Aa	58,4 Ba	74,8 ABC
Média	51,2 c	71,3 bc	91,7 ab	119,6 a	131,7 a	
Tensão de 100 kPa						
0,00-0,05	49,4 Ab	167,4 Aab	124,4 Aab	178,1 Aa	332,2 Aa	170,3 A
0,05-0,10	74,9 Aa	69,1 Aa	158,0 ABa	145,6 Aa	158,3 ABC	121,2 AB
0,10-0,15	64,8 Ab	57,6 Ab	75,0 Abab	93,6 Aab	230,5 AB	110,4 B
0,15-0,20	49,7 Ab	107,2 Aab	55,2 Abab	251,8 Aa	88,4 Cab	104,3 B
0,20-0,30	42,6 Aa	36,9 Aa	40,3 Ba	79,6 Aa	79,1 Ca	76,8 B
Média	53,5 b	77,3 b	80,2 b	131,2 a	145,4 a	

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade de erro. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

Para o solo em estudo, um espaço aéreo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ representa uma permeabilidade ao ar média de $4,3 \mu\text{m}^2$ ($1,45 \text{ LnKa}$), pois a densidade do solo

deve estar abaixo de $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$ para manter esse valor de permeabilidade ao ar (Figura 30). No entanto, observa-se uma grande dispersão dos pontos nos modelos gerados para estimar a permeabilidade ao ar pela macroporosidade e pela densidade, o que é atribuído a grande variabilidade no formato e continuidade dos poros encontrados no solo.

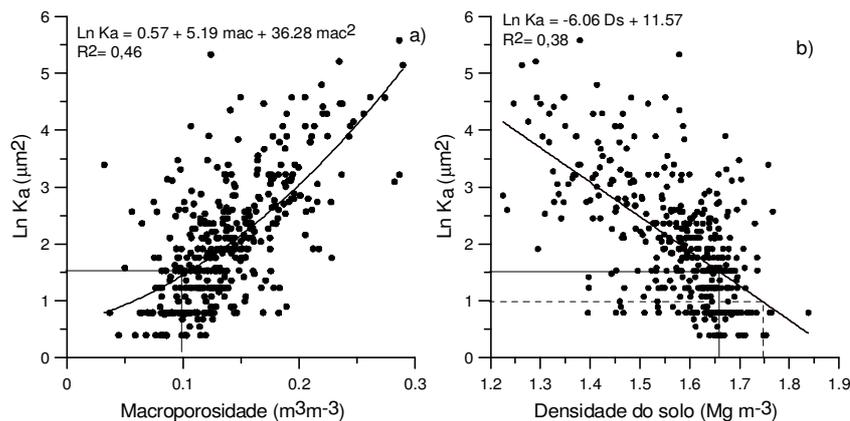


Figura 30 - Regressões entre a permeabilidade do solo ao ar (K_a) na tensão de 6 kPa com a macroporosidade (a), densidade do solo (b).

O espaço aéreo é variável ao longo dos ciclos de umedecimento e secagem do solo e vai controlar o fluxo de ar no solo. O espaço aéreo depende do conteúdo de água e, dessa forma, nos períodos mais chuvosos o fluxo de ar no solo é prejudicado (LINN; DORAN, 1984). Observa-se a tendência de redução do espaço aéreo do solo com o aumento da profundidade, em todas as condições de manejo, o que é esperado devido a maior porosidade da camada superficial e maior variação no conteúdo de água nessa camada (Figuras 31, 32, 33 e 34). Entre os sistemas de manejo e níveis de compactação, observa-se que o plantio direto compactado foi a condição que manteve o menor espaço aéreo ao longo do tempo, de modo que em grande parte do período esteve abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Na camada superficial do solo (0 a 0,05 m) apenas a compactação do mesmo manteve o espaço aéreo abaixo do valor de referência durante 16 dias (Figura 31). O espaço aéreo foi significativamente maior no preparo convencional em relação aos demais manejos, e a compactação do solo em plantio direto reduziu

significativamente o espaço aéreo em relação aos demais manejos. A escarificação, e o plantio direto histórico da área tiveram um comportamento semelhante.

Na camada de 0,05 a 0,10 m, o plantio direto compactado permaneceu por 48 dias com espaço aéreo baixo, o plantio direto por 14 dias e o escarificado (ESC) por 12 dias (Figura 32). No preparo convencional e na escarificação profunda não tiveram espaço aéreo abaixo do valor de referência ($0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). O espaço aéreo foi maior no preparo convencional em relação ao plantio direto compactado, na maior parte do ciclo da cultura, enquanto que o plantio direto, e o escarificado (Superficial e profundo) tiveram um comportamento intermediário, não sendo significativa a diferença nem entre plantio direto compactado nem com o preparo convencional.

Na terceira camada (0,10 a 0,20 m), o preparo convencional do solo proporcionou o maior espaço aéreo da camada e os menores valores são observados no plantio direto compactado (Figura 33). No plantio direto compactado o espaço aéreo permaneceu 64 dias abaixo do limite de referência, no escarificado superficial ocorreram 25 dias, no escarificado profundo seis dias e no plantio direto histórico da área foram 18 dias com espaço aéreo baixo.

Na camada de 0,20 a 0,30 m as variações no espaço aéreo são menores e o preparo convencional manteve os maiores valores apenas nos períodos mais úmidos do solo, onde as chuvas foram mais freqüentes (Figura 34). Nessa camada, o espaço aéreo ficou abaixo de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ por 44 dias no plantio direto compactado, 13 dias no plantio direto e 2 dias no escarificado. A escarificação profunda e o preparo convencional proporcionaram elevado espaço aéreo durante todo ciclo da cultura.

Como pode ser observado, a compactação do solo em plantio direto reduziu a porosidade de aeração do solo em todas as camadas avaliadas, e manteve por maior período de tempo o espaço aéreo abaixo do valor considerado como adequado ao desenvolvimento das plantas.

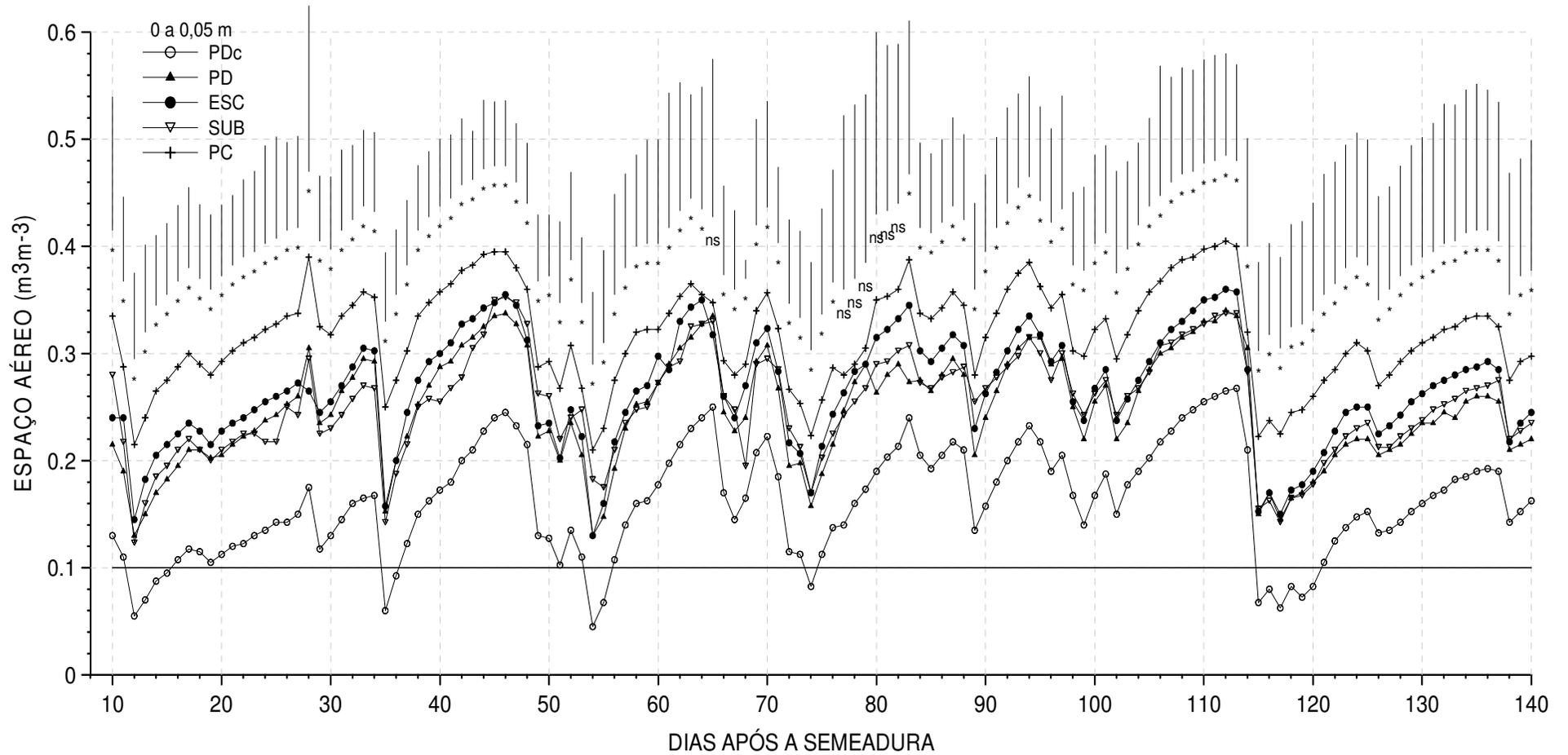


Figura 31 - Espaço aéreo do solo na camada de 0 a 0,05 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

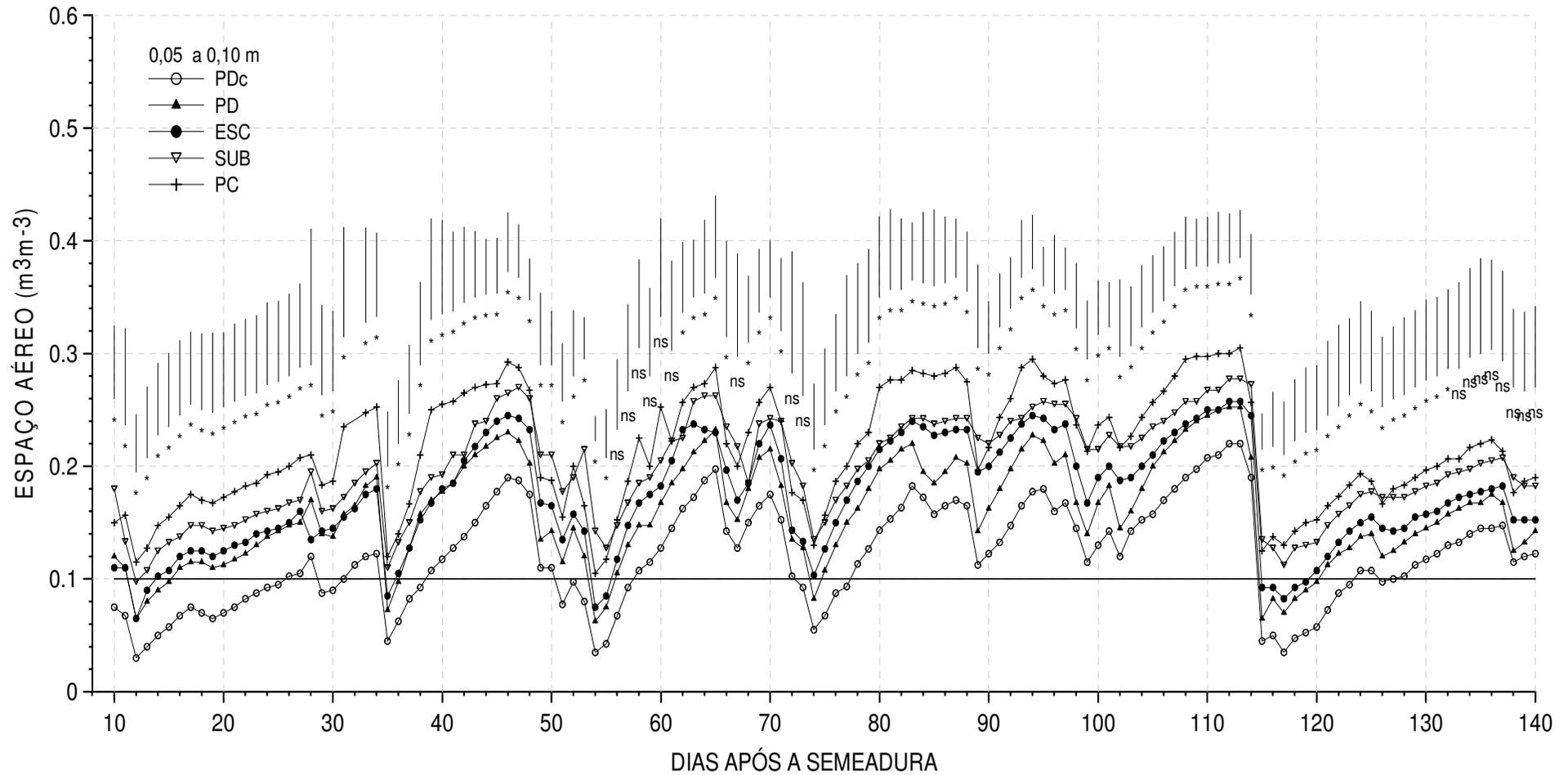


Figura 32 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,05 a 0,10 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

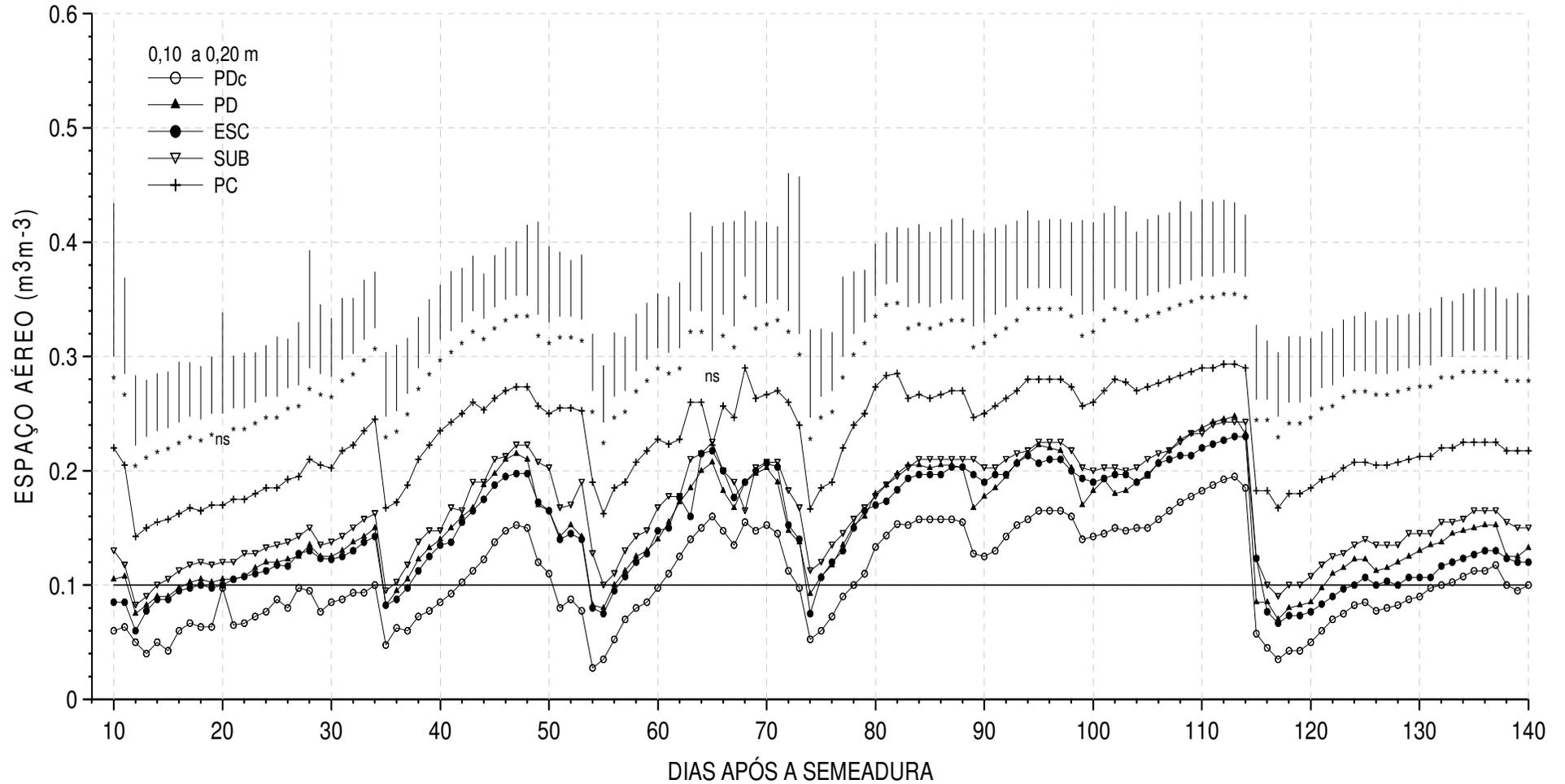


Figura 33 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,10 a 0,20 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

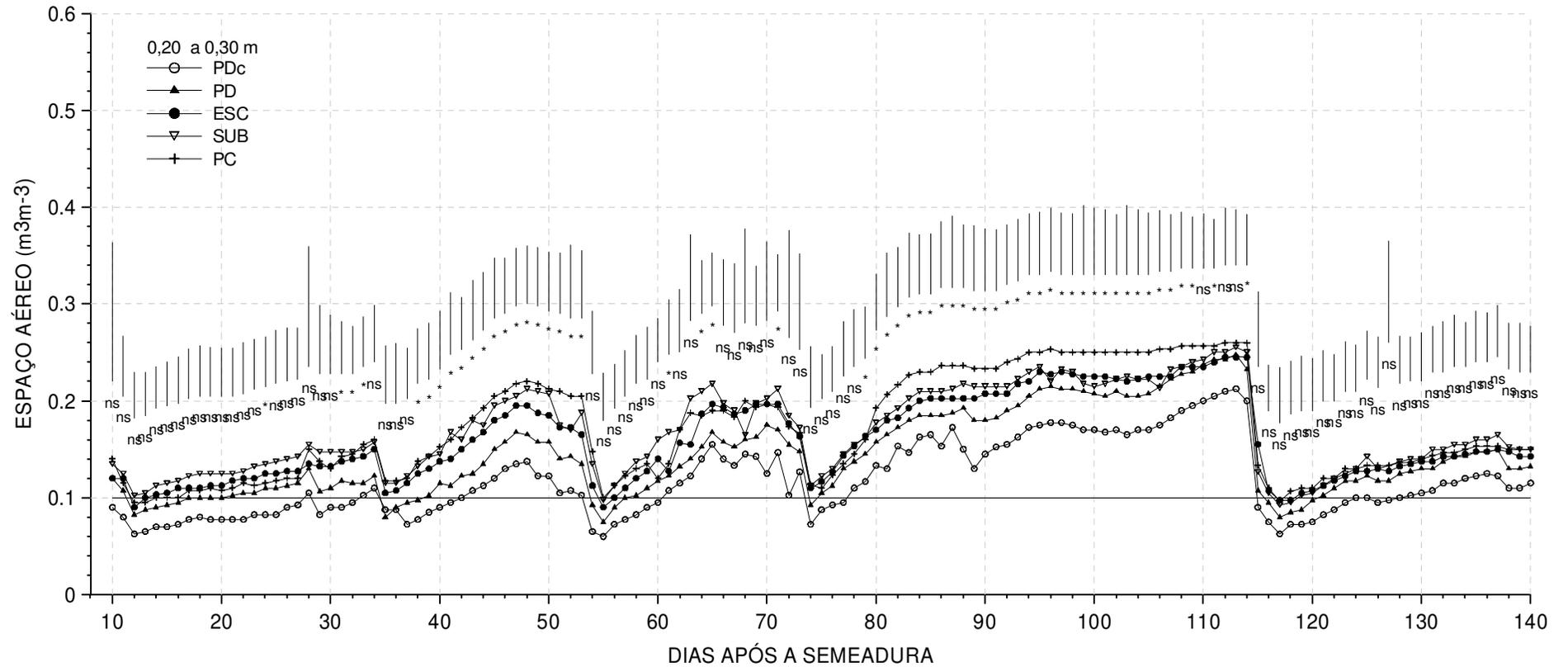


Figura 34 - Espaço aéreo do solo na camada de 0,20 a 0,30 m ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional. . *: significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. ns: não significativo.

A variação do espaço aéreo ao longo do tempo também afeta a permeabilidade do solo ao ar, sendo ambas as propriedades dinâmicas e diretamente relacionadas. A permeabilidade do solo ao ar foi estimada a partir da equação abaixo (7), que foi obtida por análise de regressão pelo procedimento Stepwise do SAS (SAS, 1997).

$$\ln K_a = 4,46 + 10,59 E_a - 2,54 D_s \quad R^2 = 0,57 \quad [7]$$

O espaço aéreo (E_a) e a densidade do solo (D_s) foram os melhores parâmetros correlacionados com a permeabilidade do solo ao ar ($\ln K_a$) e foram utilizados no modelo gerado, de forma que os dados de permeabilidade tiveram que ser normalizados por transformação logarítmica para gerar o modelo. A partir desse modelo, estimou-se a permeabilidade do solo ao ar com base na densidade do solo e do espaço aéreo ao longo do ciclo da cultura.

Como pode ser observado pela estimativa da permeabilidade do solo ao ar, a camada superficial do solo teve os maiores valores de permeabilidade ao longo do ciclo, uma vez que no preparo convencional ocorrem os maiores valores e no plantio direto compactado ocorrem os menores valores de permeabilidade, ficando abaixo de $10 \mu\text{m}^2$ em grande parte do período (Figura 35). Horn et al. (2004) verificaram que a compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas reduziu 40% a permeabilidade do solo ao ar, devido ao rearranjo do sistema poroso do solo. O plantio direto histórico da área, e a escarificação superficial e profunda tiveram a mesma flutuação dos demais manejos, mas com amplitudes semelhantes entre si. Esse comportamento segue a mesma tendência observada para o espaço aéreo, e mostra que as maiores interferências sobre essa propriedade dinâmica do solo é ocasionada pelo revolvimento intensivo do solo e pela compactação.

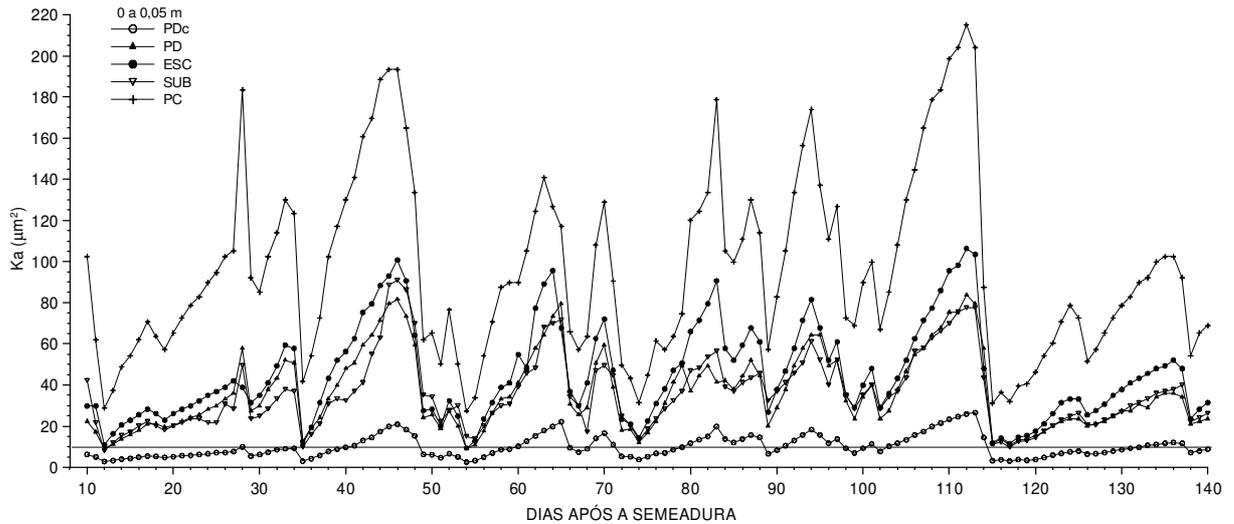


Figura 35 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0 a 0,05 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

À medida que aumenta a profundidade do solo, a tendência observada é a redução da permeabilidade do solo ao ar em todas as condições de manejo. Os maiores picos ainda são observados no preparo convencional nas camadas de 0,05 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m (Figura 36, 37). Na camada de 0,20 a 0,30 m (Figura 38) o comportamento é semelhante entre os manejos, uma vez que a maioria dos valores de permeabilidade permanecem abaixo do limite $10 \mu\text{m}^2$, considerado como adequado para uma suficiente aeração do solo (KMOCH; HANUS, 1965). Esse comportamento diferenciado do solo em maiores profundidades está relacionado ao menor espaço aéreo, devido ao maior conteúdo de água e também pela menor interferência do manejo e da compactação sobre a estrutura do solo nessa camada.

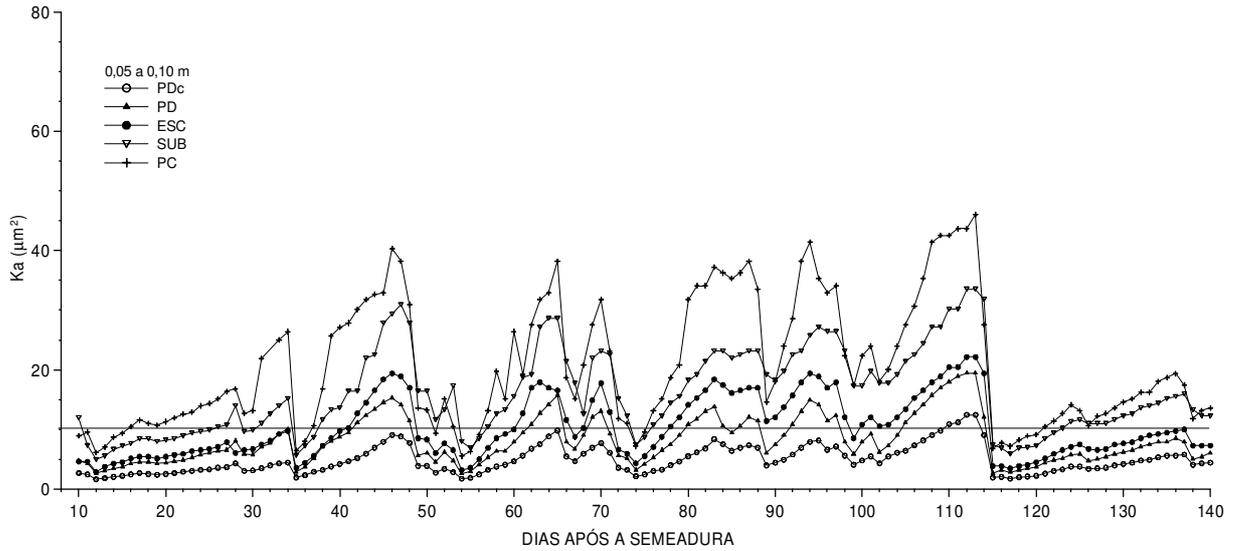


Figura 36 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,05 a 0,10 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

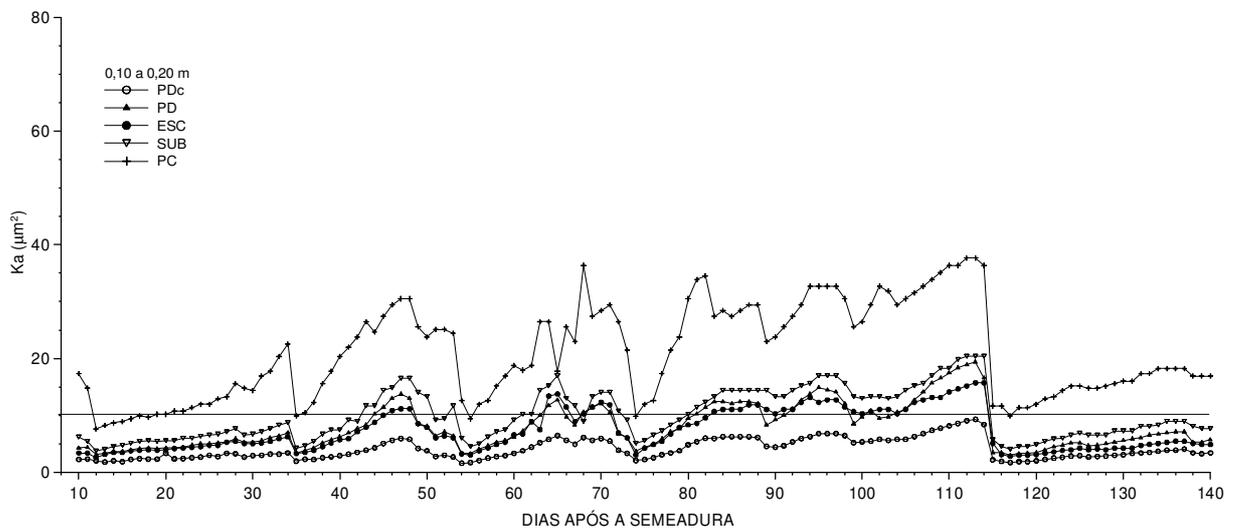


Figura 37 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,10 a 0,20 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

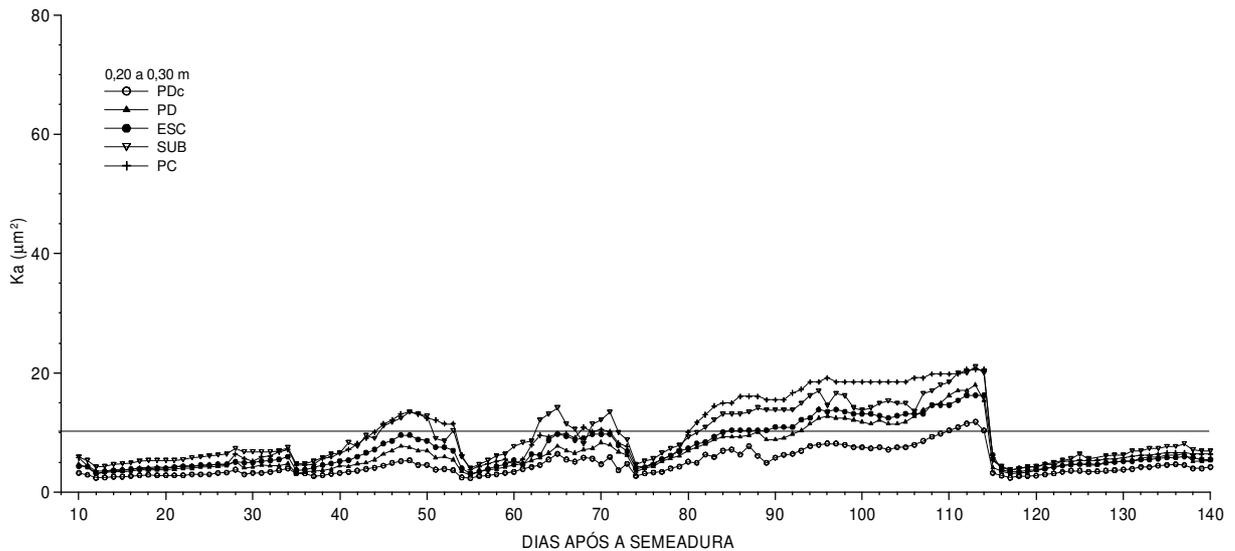


Figura 38 - Estimativa da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,20 a 0,30 m, ao longo do ciclo da cultura do milho. PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

Quando o solo apresenta alto conteúdo de água parte dos poros ficam obstruídos, impedindo o fluxo dos gases gerados em camadas mais profundas do solo (BALL; SCONNING, 2002), seja por atividade microbiana ou respiração radicular, o que pode concentrar os gases liberados, causando efeito tóxico sobre as plantas (DREW, 1983; BORU et al., 2003; GREENWAY et al., 2006). Como observado nesse estudo, as camadas mais profundas do solo e as camadas mais adensadas são as menos permeáveis e isso pode limitar a trocas gasosas entre o ar da rizosfera com a atmosfera externa, o que reduz a taxa de respiração radicular e compromete a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas (MORARD; SILVESTRE, 1996). A compactação do solo nas camadas superficiais altera a concentração de oxigênio nas camadas mais profundas, por dificultar a renovação do ar pela atmosfera externa, devido à descontinuidade no sistema poroso (WEISSKOPF et al., 2010). Além disso, como se cria um ambiente anaeróbico o processo de desnitrificação é favorecido (PALMA et al., 1997), podendo aumentar a emissão de óxido nitroso (STEPNIEWSKI; STEPNIEWSKA, 2009; ROCHETTE, 2008; WEISSKOPF et al., 2010), potencializando o efeito estufa.

A compactação do solo e períodos frequentes de chuva são os principais responsáveis pela redução do espaço aéreo do solo sob plantio direto e resultam em

maior emissão de óxido nitroso para a atmosfera (ARAH et al., 1991; BALL et al., 1999; BALL et al., 2008). Esses são efeitos difíceis de ser quantificados, mas que são ocasionados por uma aeração deficiente do solo (LUO; ZHOU, 2006), o que pode ser comprovado pela medida da permeabilidade do solo ao ar (BALL et al., 1999). A mobilização do solo pela escarificação ou subsolagem são condições de manejo que reduzem os efeitos da compactação do solo e aumentam a permeabilidade do solo ao ar, tendo a vantagem de não expor totalmente o solo como acontece com o preparo convencional.

Dessa forma, a determinação da permeabilidade do solo ao ar em diferentes teores de água do solo ao longo do ciclo das culturas é um bom indicativo da qualidade do mesmo para fins agrícolas e ambientais, podendo ser utilizada para monitorar o efeito de sistemas de manejo sobre o sistema poroso do solo, por estar correlacionada com a emissão de gases para atmosfera (SWEENEY et al., 2006; BALL et al., 2008) e com a produtividade das culturas (OHU et al., 2006). No entanto, a sua avaliação pontual, a partir de amostras de solo, não tem a mesma eficiência na avaliação da qualidade estrutural, devido à grande variabilidade desse parâmetro.

4.7 Resistência do solo à penetração

A análise de correlação mostra que o conteúdo de água no solo é o principal fator que controla a resistência deste à penetração, apresentando uma alta correlação e uma relação inversa com a resistência do solo (Tabela 13). A umidade e a densidade são os fatores controladores da resistência do solo e, normalmente, são os parâmetros utilizados para a modelagem da resistência do solo. Nesse estudo, a densidade teve uma baixa correlação, o que pode ter ocorrido pela pequena variação na densidade do solo.

Tabela 13 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a resistência do solo à penetração (RP) e a densidade (DS) e umidade volumétrica do solo (UV).

Camada (m)	Sistema de manejo				
	PDC	PD	ESC	SUB	PC
	RP x DS				
0,00-0,05	0,05 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,08 ^{ns}
0,05-0,10	-0,04 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,11 ^{ns}
0,10-0,20	-0,26 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
0,20-0,30	0,25 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,42 ^{**}
	RP x UV				
0,00-0,05	-0,91 [*]	-0,85 [*]	-0,82 [*]	-0,74 [*]	-0,63 [*]
0,05-0,10	-0,87 [*]	-0,86 [*]	-0,83 [*]	-0,76 [*]	-0,79 [*]
0,10-0,20	-0,72 [*]	-0,83 [*]	-0,77 [*]	-0,66 [*]	-0,49 [*]
0,20-0,30	-0,02 ^{ns}	-0,44 ^{**}	-0,45 ^{**}	-0,40 ^{**}	-0,53 [*]

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

As medidas pontuais da resistência do solo no campo mostram apenas a condição do mesmo naquele momento, e podem não indicar problemas de compactação do solo e, sim, elevada resistência em função da baixa umidade deste. Em condições de alta umidade do solo, todas as condições do seu manejo tiveram resistência a penetração abaixo de 2 MPa, sem ocorrer diferenças significativas entre tratamentos mobilizados e o plantio direto (34 DAS) (Figura 39). Em condições de baixa umidade do solo (44 e 58 DAS), a resistência do solo à penetração é significativamente maior no plantio direto compactado (PDC) e no plantio direto (PD) em relação a escarificação profunda, mesmo que a umidade do solo é maior no plantio direto. O plantio direto (PD) teve um comportamento semelhante ao escarificado (ESC) e ao preparo convencional (PC). Em todas as condições de manejo, observa-se que a maior resistência do solo ocorre até os 0,15 m de profundidade, onde geralmente se concentra a camada mais compactada (STRECK et al., 2004, SILVA, 2003, COLLARES et al., 2006) e ocorrem as maiores variações na umidade do solo.

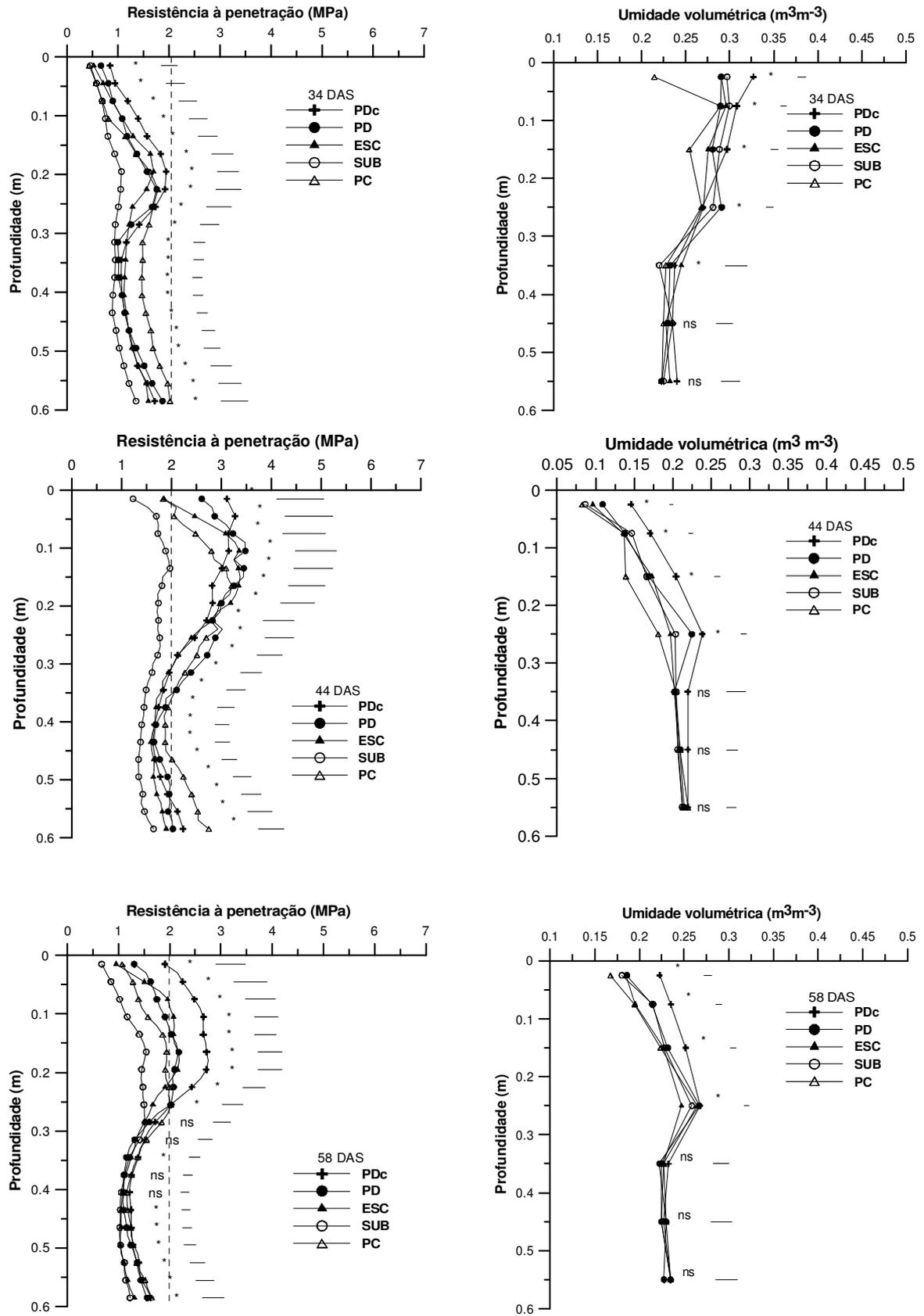


Figura 39 - Resistência do solo à penetração e umidade volumétrica do solo no perfil explorado pelas raízes. * Significativo a 5% pelo teste de Tukey, ns: não significativo.

A modelagem da resistência à penetração permite a estimativa da resistência em condições de campo, conhecendo-se apenas os parâmetros controladores. Na figura 40 é apresentada a relação entre a resistência à penetração observada versus a umidade volumétrica e a densidade do solo; na figura 41 é apresentada a estimativa da resistência do solo com a utilização do modelo de Buscher (1990) (Equação 8); na figura 42 é apresentada a estimativa da resistência com um modelo linear (Equação 9).

$$RP = 0,0752 \times Ds^{4,5766} \times \theta^{-0,6532} \quad R^2 = 0,88 \quad [8]$$

$$RP = - 3,08 - 7,17 \theta + 4,07 Ds \quad R^2 = 0,44 \quad [9]$$

A resistência do solo à penetração apresenta uma relação direta com a densidade e inversa com a umidade do solo. No entanto, observa-se que a variação da umidade do solo gera um maior incremento na resistência do solo do que a densidade, sendo a principal responsável por controlar a sua resistência. Além disso, ocorre uma grande variabilidade dos dados de resistência observados em condições de alta densidade e alta umidade, o que pode ser atribuída à própria variabilidade natural do solo, mas também, pela dificuldade em manter uma velocidade constante durante a medida da resistência com o penetrômetro em condições de baixa umidade do solo (Figura 40). A estimativa da resistência pelos modelos omite essa variabilidade (Figura 41 e 42), mostrando apenas o efeito direto dos fatores controladores (densidade e umidade do solo). O modelo linear (polinomial) apresentou a menor variabilidade na estimativa para os dados médios de todas as camadas avaliadas (Figura 42).

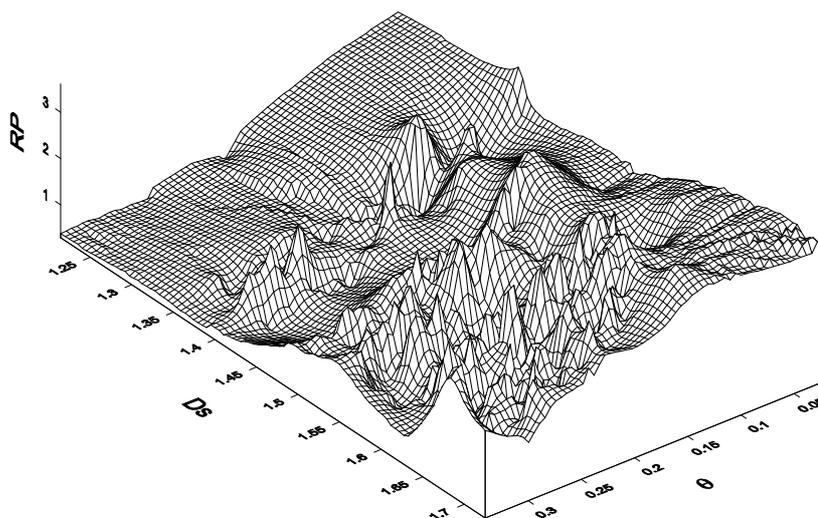


Figura 40 - Resistência do solo à penetração observada. RP: resistência do solo à penetração (MPa), Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ : umidade volumétrica do solo (m^3m^{-3}).

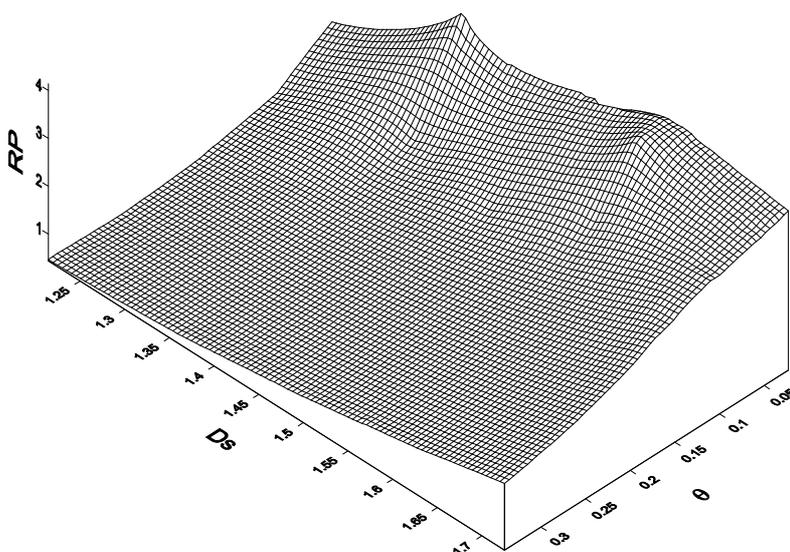


Figura 41 - Resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo de Buscher em função da variação da umidade e da densidade do solo. RP: resistência do solo à penetração (MPa), Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ : umidade volumétrica do solo (m^3m^{-3}).

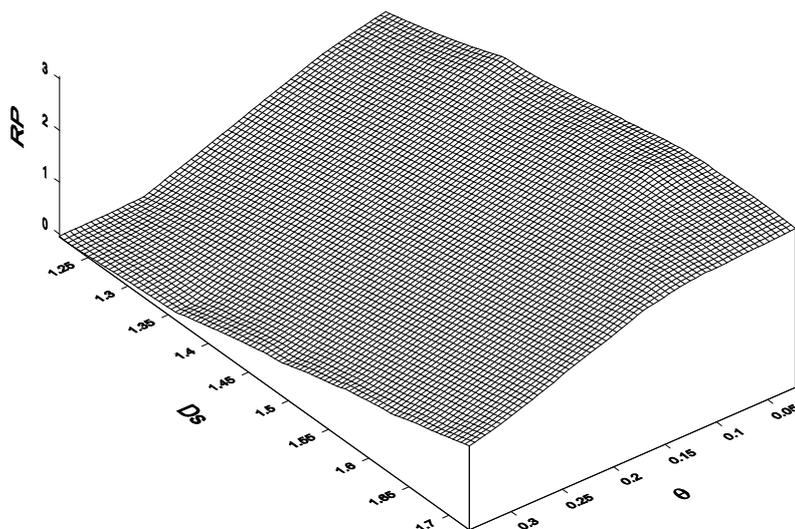


Figura 42 - Resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo linear, em função da variação da umidade e da densidade do solo. RP: resistência do solo à penetração (MPa), D_s : densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ : umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

No entanto, para esse estudo, os modelos gerados a partir de todo o banco de dados, não foram eficientes para estimativa da resistência do solo, o que pode ser comprovado pela grande dispersão dos pontos na comparação dos dados medidos e estimados pelos modelos (Figura 43).

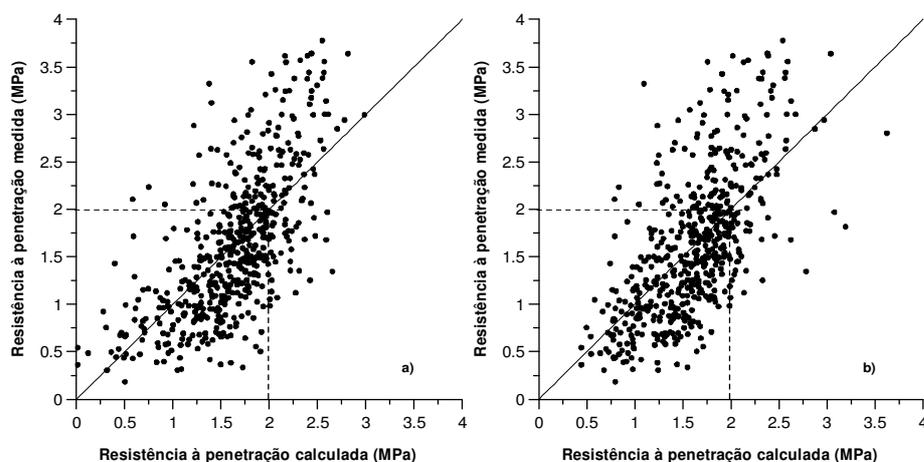


Figura 43 - Relação gráfica 1:1 entre à resistência do solo a penetração medida no campo e a estimada com o modelo matemático linear (a) e o modelo não linear de Busher (b).

Para contornar isso, gerou-se um modelo específico para cada tratamento e para cada camada, obtendo-se um melhor coeficiente de determinação e uma melhor estimativa da resistência (Tabela 14). A umidade e a densidade foram os parâmetros significativos nos modelos gerados. Os modelos gerados para cada tratamento e camada foram usados para estimar a resistência do solo ao longo do tempo, em função da variação da umidade e da densidade específica de cada camada. Como referência utilizou o valor de 2 MPa como resistência restritiva ao crescimento das plantas.

Tabela 14 - Modelos matemáticos para a estimativa da resistência do solo à penetração.

Tratamento	Modelo	R ²
Camada de 0 a 0,05 m		
PD	RP= 5,19 – 28,76 θ + 47,28 θ^2	0,80
PDC	RP= -11,96 θ + 4,73	0,83
ESC	RP= 3,18 – 14,89 θ + 20,60 θ^2	0,72
SUB	RP= 1,89 – 8,32 θ + 12,54 θ^2	0,59
PC	RP= -5,29 θ + 1,87	0,40
Camada de 0,05 a 0,10 m		
PD	RP= 7,11 – 37,23 θ + 56,28 θ^2	0,79
PDC	RP= -12,85 θ + 5,32	0,75
ESC	RP= 7,25 – 39,98 θ + 64,17 θ^2	0,76
SUB	RP= 3,87 – 19,17 θ + 27,91 θ^2	0,60
PC	RP= 6,40 – 39,26 θ + 69,99 θ^2	0,74
Camada de 0,10 a 0,20 m		
PD	RP= 8,73 – 44,92 θ + 68,39 θ^2	0,73
PDC	RP= -12,08 θ + 5,41	0,52
ESC	RP= -13,81 θ + 5,26	0,60
SUB	RP= -6,97 θ + 2,92	0,44
PC	RP= 3,36 – 10,71 θ + 13,8 θ^2	0,25
Camada de 0,20 a 0,30 m		
PD	RP= 9,09 – 47,77 θ + 77,32 θ^2	0,22
PDC	RP= -7,78 θ + 3,95	0,23
ESC	RP= -13,97 θ + 5,28	0,63
SUB	RP= -5,84 θ + 2,89	0,28
PC	RP= 4,05 – 11,21 θ + 10,51 θ^2	0,29

No plantio direto sem compactação adicional, a camada superficial manteve os valores de resistência abaixo de 2 MPa durante todo o ciclo (Figura 44), o que pode ser atribuída a menor densidade dessa camada. Nas demais camadas a resistência do solo permaneceu acima de 2 MPa durante 69, 49 e 33 dias. Os maiores valores de resistência nessas camadas podem ser atribuídos a maior densidade do solo, pois a umidade do solo se manteve mais elevadas nas camadas mais profundas.

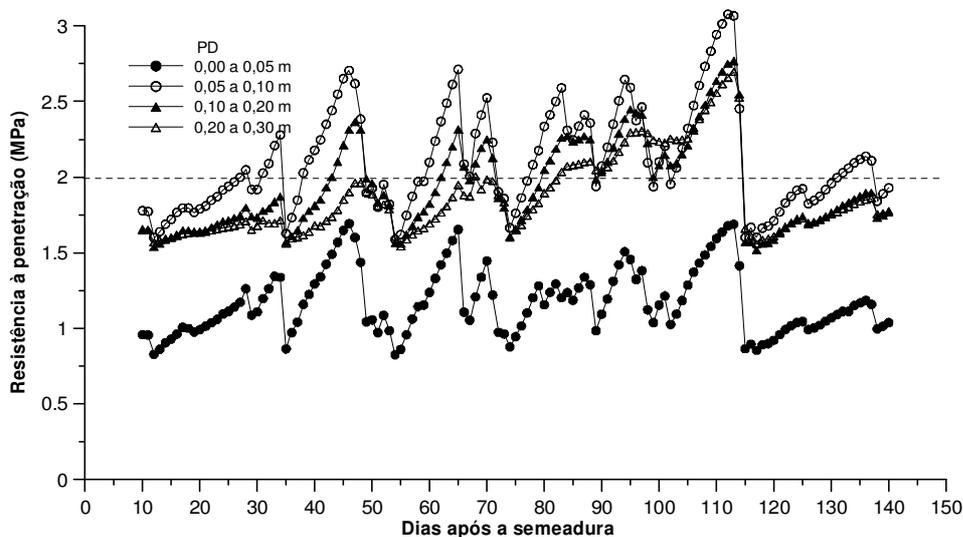


Figura 44 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho no plantio direto (PD).

O plantio direto compactado foi à condição que apresentou os maiores valores de resistência ao longo do tempo (Figura 45) e também foi a condição que manteve por maior tempo a resistência acima do valor de referência (2MPa). No PDC a camada de 0 a 0,05 m ficou 17 dias com a resistência acima de 2 MPa, na camada de 0,05 a 0,10 m foram 86 dias, de 0,10 a 0,20 m foram 105 dias e de 0,20 a 0,30 m foram 56 dias com resistência acima de 2 MPa. Os maiores valores de resistência ocorreram a partir dos 40 dias após a semeadura (DAS), atingindo o período de crescimento vegetativo da cultura.

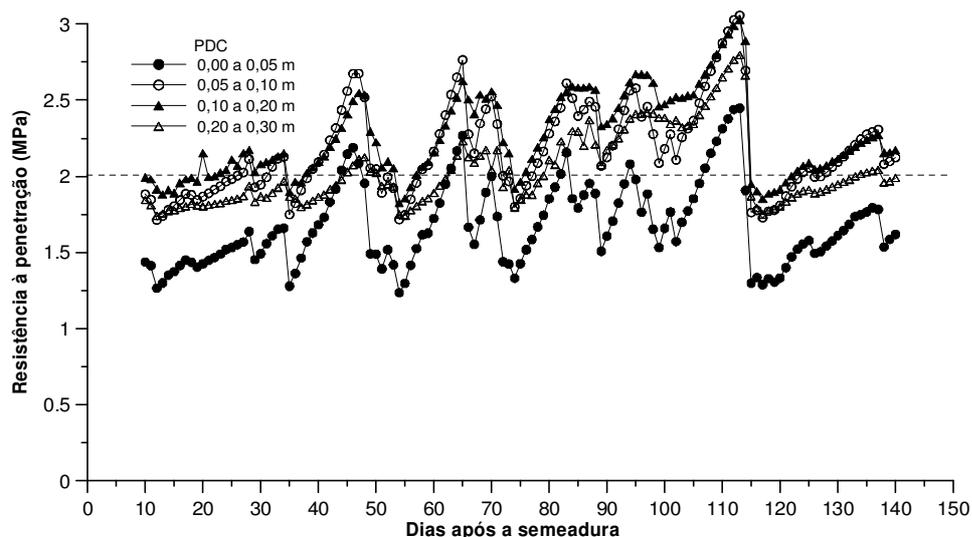


Figura 45 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho no plantio direto compactado (PDC).

A escarificação superficial do solo não proporcionou grandes alterações na resistência do solo ao longo do tempo, em relação ao plantio direto. A camada superficial (0 a 0,05 m) manteve os valores de resistência abaixo de 2 MPa durante todo o ciclo da cultura (Figura 46). Nas demais camadas, onde os valores de densidade são maiores, a resistência ficou acima de 2 MPa durante 55 (0,05 a 0,10 m), 57 (0,10 a 0,20 m), e 50 (0,20 a 0,30 m) dias.

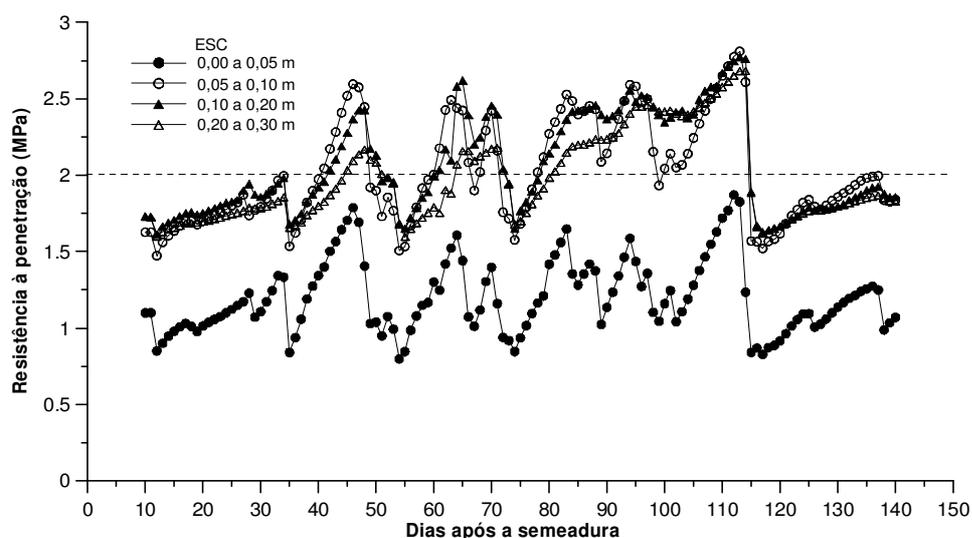


Figura 46 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área escarificada (ESC).

A escarificação profunda proporcionou as maiores alterações na resistência do solo à penetração, em ambas as camadas (Figura 47). Apenas a camada de 0,10 a 0,20 m manteve a resistência do solo acima de 2 MPa, durante 46 dias.

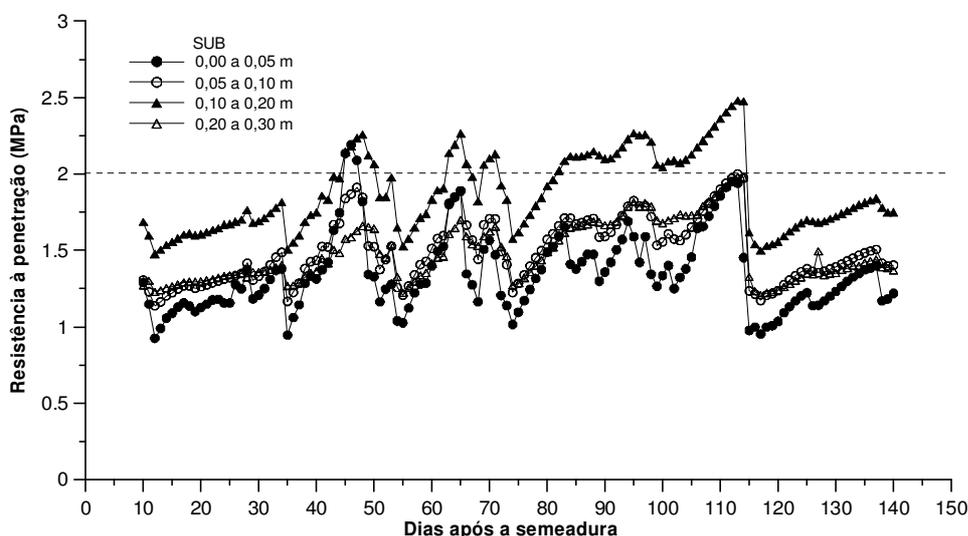


Figura 47- Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área subsolada (SUB).

No preparo convencional do solo, a resistência do solo foi reduzida ao longo do ciclo da cultura e apenas na camada de 0,05 a 0,10 e de 0,20 a 0,30 os valores de resistência do solo ficaram acima de 2 MPa durante 23 e 35 dias, respectivamente (Figura 48).

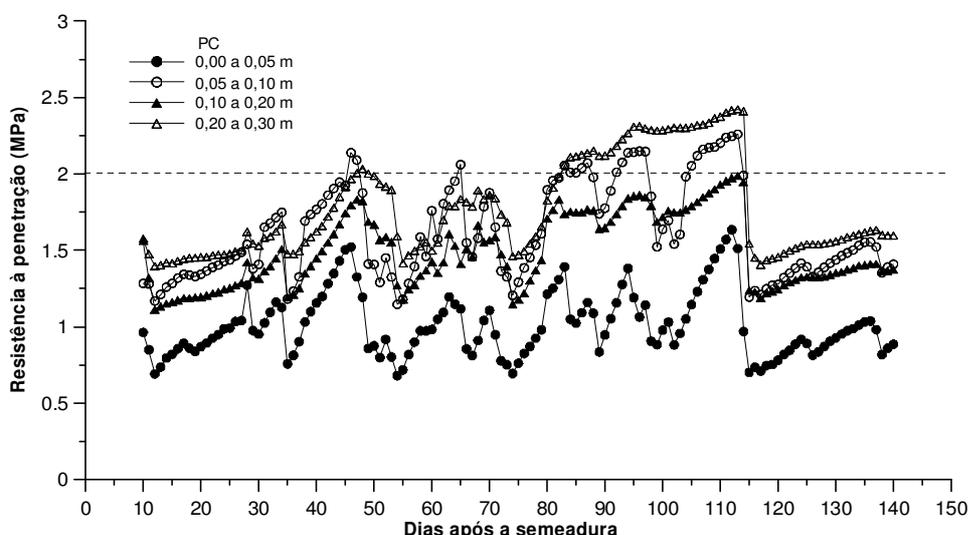


Figura 48 - Resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura do milho na área com preparo convencional (PC).

As medidas pontuais de resistência do solo com os penetrômetros podem indicar a presença de camadas compactadas, mas nem sempre isso está diretamente correlacionada com a produtividade da cultura. Esse efeito pode ser atribuído a variabilidade espacial que a resistência apresenta no perfil, pois a compactação e/ou revolvimento não alteram homoganeamente a estrutura do solo, como indicado nos mapas de resistência do solo ao longo do perfil (Figuras 49, 50, 51 e 52). No perfil do solo ocorrem camadas com maior resistência, como no plantio direto, principalmente na profundidade de 8 a 25 cm, o que indica que em períodos secos essas camadas vão apresentar maior restrição. Por outro lado, existem locais de menor resistência, onde as raízes podem encontrar menor dificuldade para crescerem. O revolvimento do solo reduz a sua resistência, mas ainda permanecem pontos com maior resistência, o que indica que parte da estrutura é mantida sem ser alterada.

A área que estava sob plantio direto, apresentava uma camada com maior resistência na profundidade de 0,10 a 0,30 m, como indicado na figura 49 a. Isso pode ser atribuído a compactação oriunda do preparo convencional utilizado no passado (há 15 anos) e ao plantio direto. Com a aplicação dos tratamentos, observa-se uma alteração nos níveis e na distribuição da resistência do solo ao longo do perfil. Com a compactação adicional do solo proporcionada pelo tráfego da pá carregadeira, a camada de maior resistência no perfil do solo inicia mais superficialmente, próxima aos 0,05 m, indicando ser o local onde ocorreu a maior concentração da pressão e alteração da estrutura do solo. A escarificação do solo reduziu a resistência do solo até próximo aos 0,15 m de profundidade, mas não desestruturou completamente aquela camada de maior resistência que estava presente na área, que é observada no plantio direto. A escarificação profunda e o preparo convencional foram mais eficientes na desestruturação do solo, pois reduziram a resistência do solo até próximo aos 0,30 m de profundidade e romperam a camada de maior resistência que estava presente na área. O maior efeito destes manejos foi nos primeiros 0,10 m, onde os valores de resistência ficaram abaixo de 0,5 MPa.

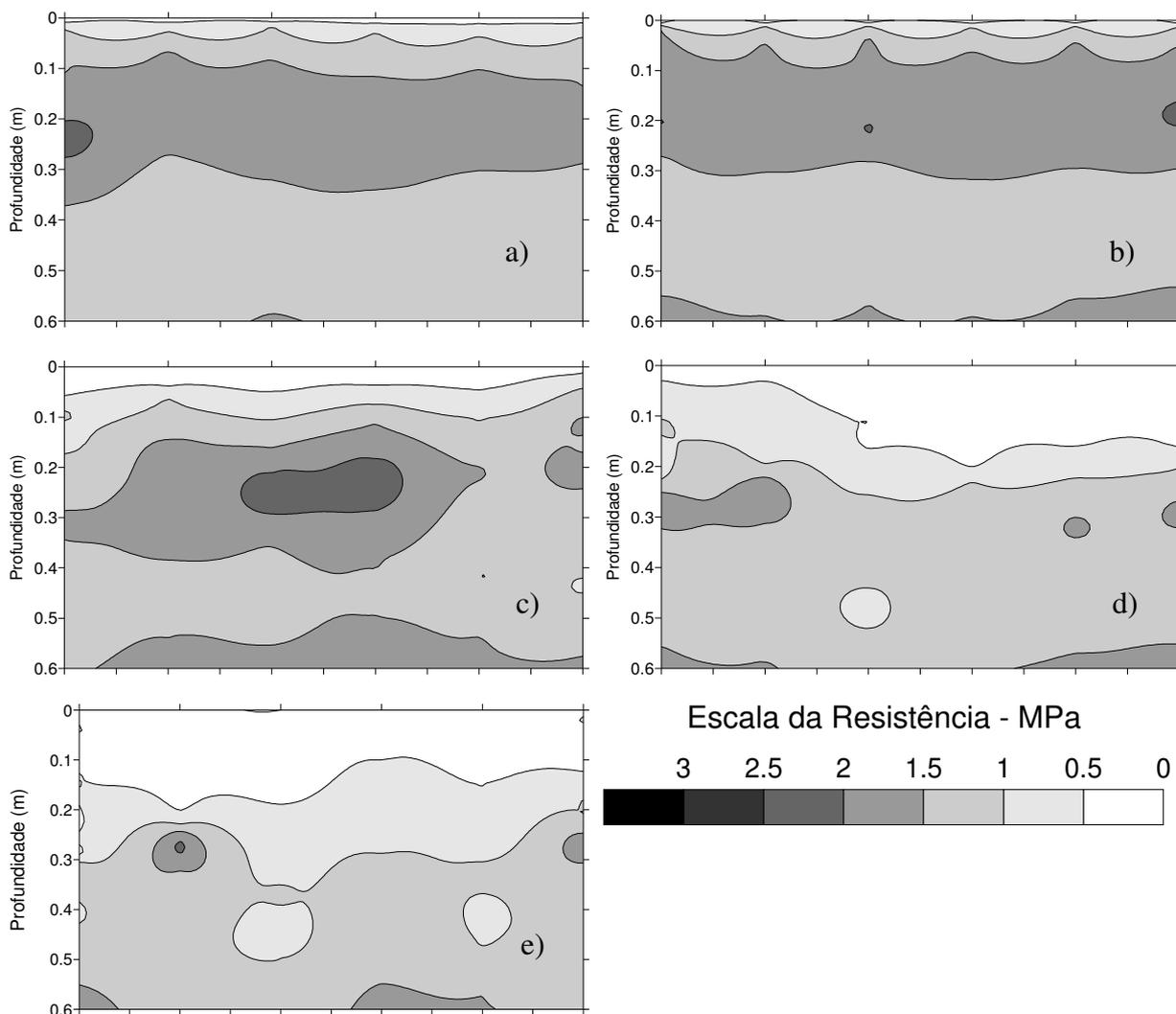


Figura 49 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes no dia da aplicação dos tratamentos. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e d) PC.

Nos demais períodos avaliados, a distribuição da resistência do solo à penetração no perfil variou em função da umidade e da consolidação do solo. Aos 34 DAS, apenas o PDC manteve uma camada (0,10 a 0,30 m) com resistência acima de 2 MPa. A umidade do solo estava acima da capacidade de campo em todos os tratamentos ($< 0,22 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) e, dessa forma, a diferença de densidade do solo foi o principal fator responsável pela variabilidade na resistência do solo. Nos demais tratamentos, a resistência se manteve abaixo de 2 MPa na maior parte do perfil. Os menores valores de resistência ocorreram no perfil da área subsolada.

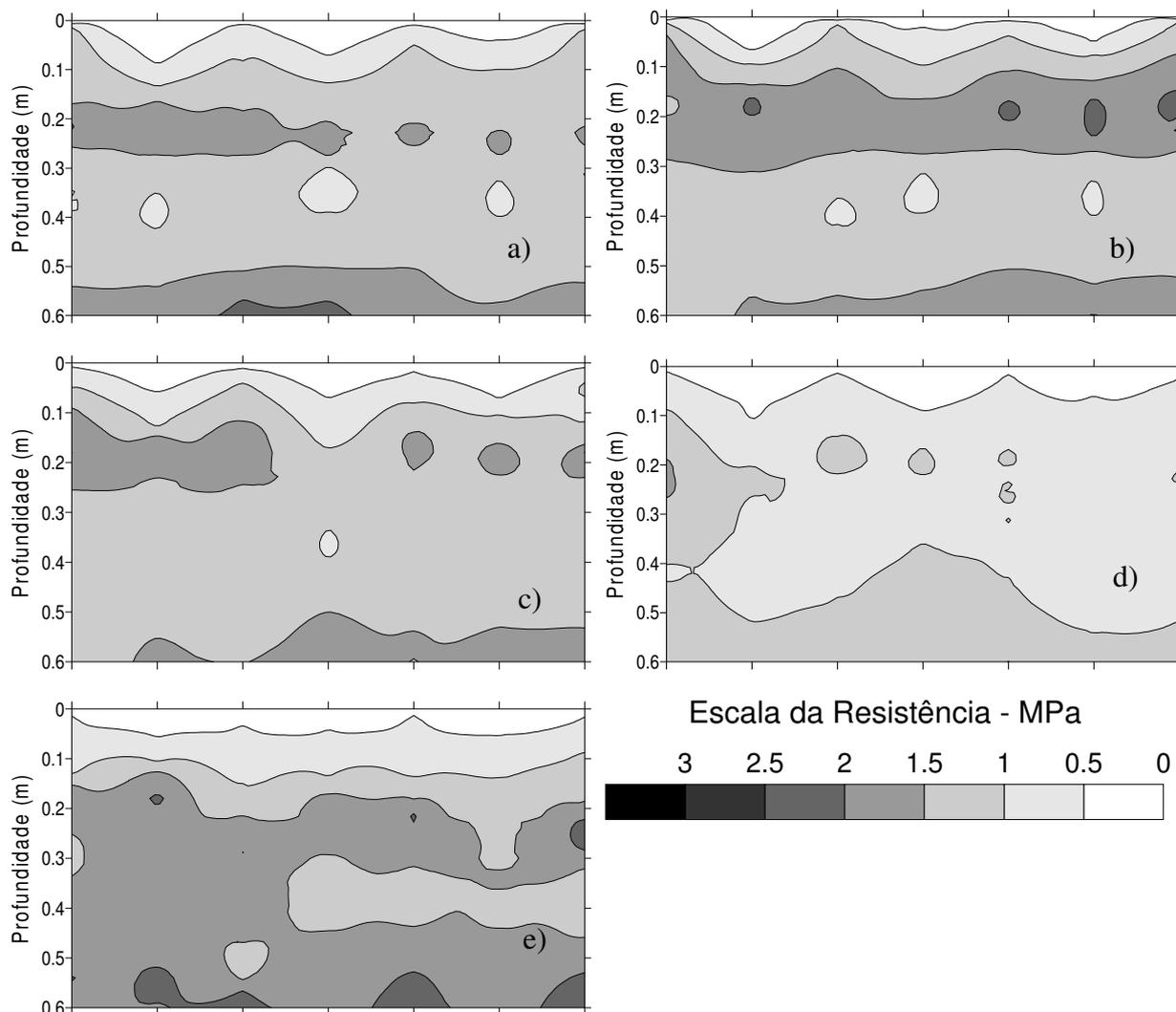


Figura 50 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 34 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.

Em condições de baixa umidade do solo, a variabilidade da resistência do solo é alterada no perfil do mesmo, atingindo valores acima de 4 MPa em alguns pontos. Esse comportamento é verificado aos 44 DAS, quando os valores de umidade do solo chegaram próximo ao ponto de murcha permanente ($< 0,08 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) nas camadas superficiais do solo. Os maiores valores de resistência são observados no plantio direto (PD e PDC), principalmente até os 0,20 m de profundidade. No ESC e PC também ocorrem altos valores de resistência nessa camada, mas abrangendo uma menor área do perfil. Esse aumento da resistência no PC pode ser decorrente da reconsolidação do solo. A área com escarificação profunda (SUB) foi a condição que manteve a menor área comprometida com alta resistência do solo.

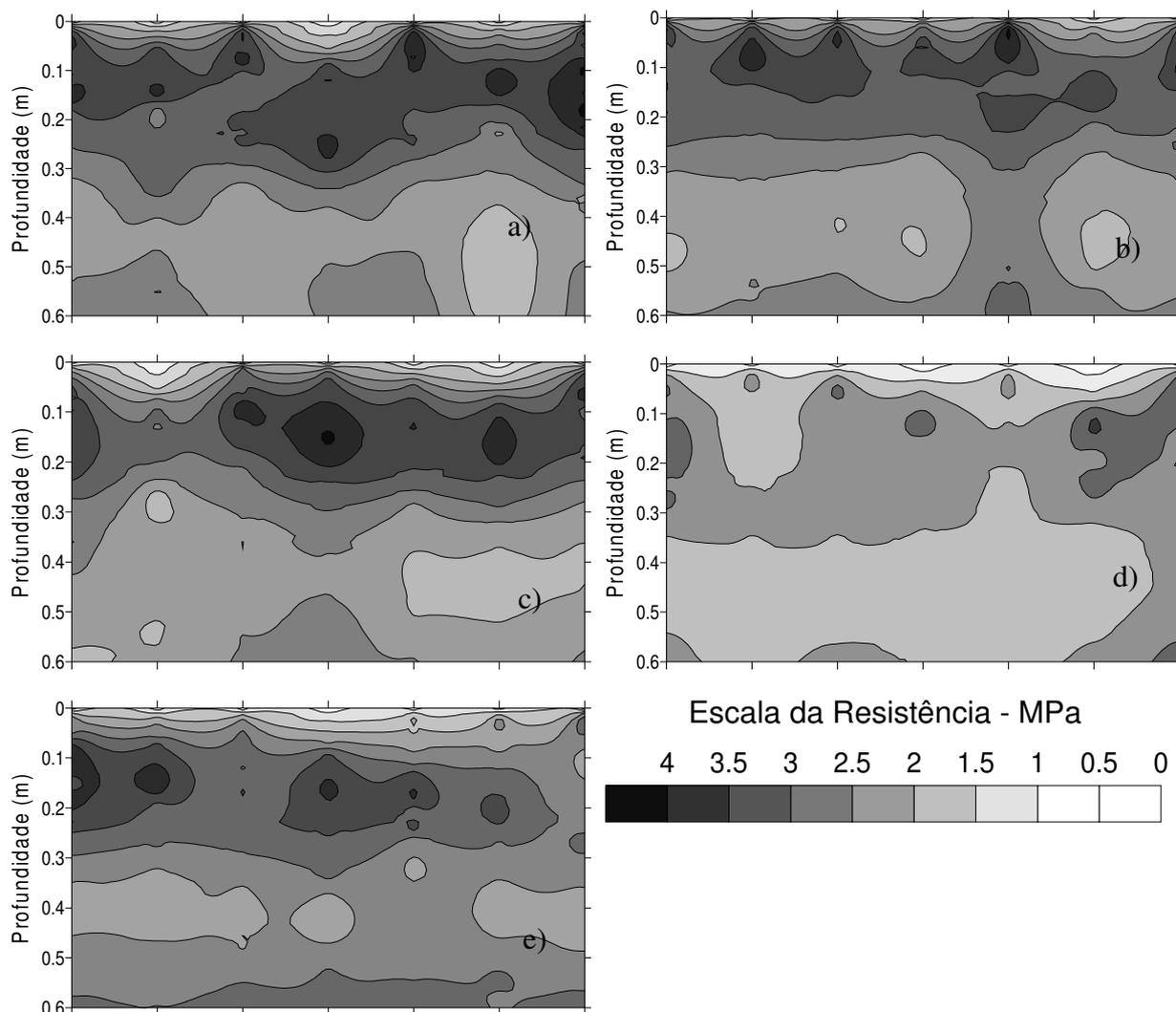


Figura 51 - Distribuição espacial da resistência á penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 44 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.

Em condições intermediárias de umidade do solo, com valores abaixo da capacidade de campo, a resistência do solo é menor que 2 MPa na maior parte do perfil, ocorrendo apenas algumas manchas acima de 2 MPa. No entanto, as camadas com maior resistência mantêm a mesma posição nos tratamentos e a escarificação profunda continua sendo mais eficiente em manter a maior parte do perfil com baixos valores de resistência do solo.

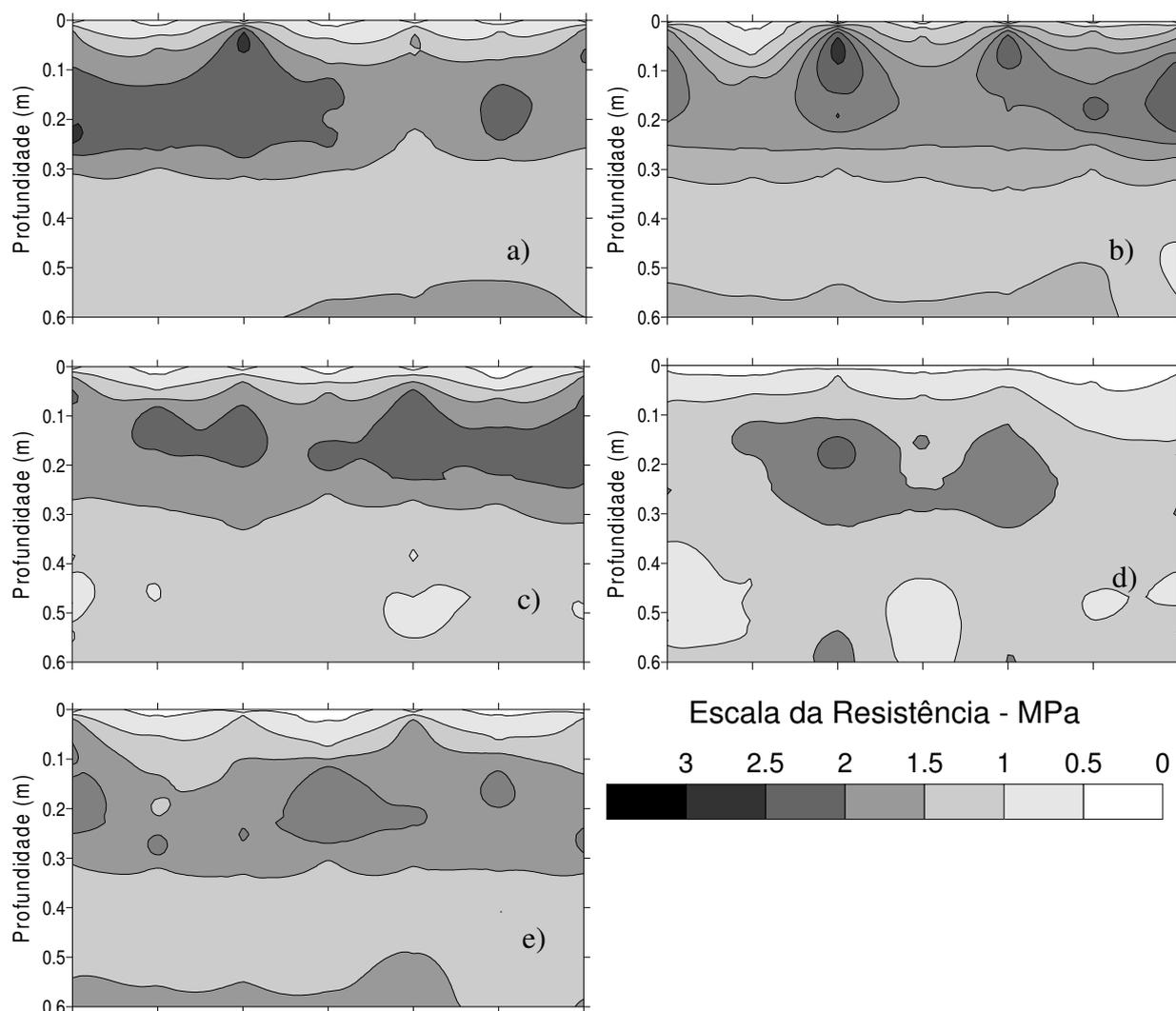


Figura 52 - Distribuição espacial da resistência à penetração no perfil do solo explorado pelas raízes aos 58 DAS. a) PD; b) PDC; c) ESC; d) SUB e) PC.

A utilização de mapas de resistência no perfil do solo mostra a variabilidade espacial que a resistência do solo apresenta e, dessa forma, ajuda a explicar o crescimento radicular das plantas, mesmo que as análises pontuais indiquem a ocorrência de níveis críticos de resistência. A variabilidade da resistência do solo possivelmente mantém o mesmo padrão de distribuição espacial em períodos que apresentam a mesma condição de umidade. Desse modo, a resistência do solo é uma propriedade dinâmica, controlada principalmente pela água, o que torna medidas e limites pontuais pouco precisos para definir restrições às plantas.

4.8 Integração dos fatores físicos de crescimento das plantas através do IHO

O intervalo hídrico ótimo é considerado um índice de qualidade física do solo por integrar os principais fatores físicos do solo que afetam o crescimento das plantas (SILVA et al., 2009; TORMENA et al., 2008). A eficiência desse indicador só pode ser comprovada quando for diretamente correlacionado ao crescimento e produtividade das culturas agrícolas (SILVA, 2003; COLLARES et al., 2006). Os estudos que definem o IHO baseados apenas em modelos matemáticos podem definir limites de densidade críticos, mas que em condições de campo podem não representar restrições ao desenvolvimento das plantas.

Para o solo em estudo, a resistência do solo à penetração é o limite inferior e a umidade do solo na capacidade de campo é o limite superior do intervalo hídrico ótimo (COLLARES et al., 2006) (Figura 53).

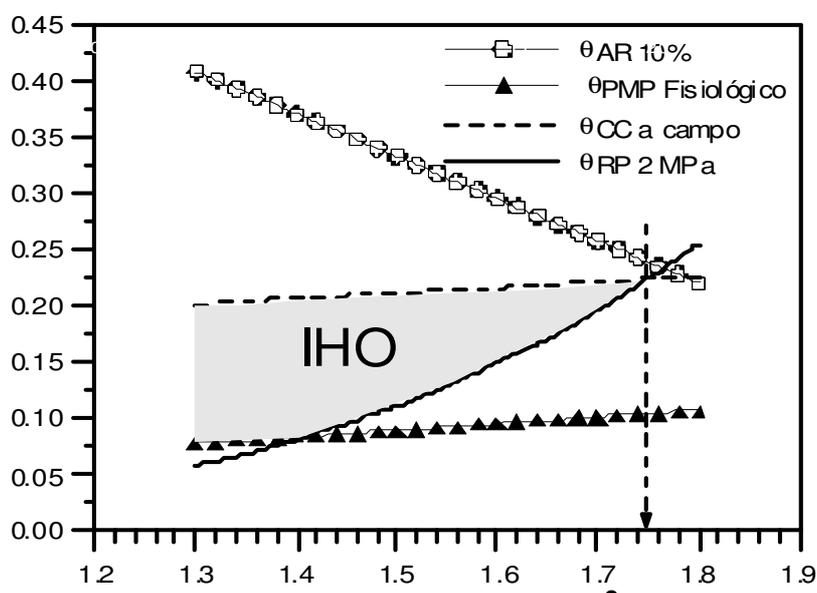


Figura 53 - Intervalo hídrico ótimo (IHO) para o Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico (COLLARES et al., 2006).

A umidade do solo na capacidade de campo é calculada a partir da equação 10 e a umidade do solo onde a resistência do mesmo atinge o valor de 2 MPa é calculado com a equação 11:

$$\theta_{CC} = 0,1387 + 0,0492 D_s \quad [10]$$

$$RP = 0,02499 \times \theta^{-1,0896} \times D_s^{4,9261} \quad [11]$$

O valor da umidade do solo na capacidade de campo, obtida pela equação 10, não apresentou grande variação entre os tratamentos, sendo o valor médio de $0,22 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. A maior variação foi obtida no limite inferior do IHO, onde a resistência do solo passa a ser crítica. Na tabela 15 são apresentados os valores de umidade do solo, calculados a partir da equação obtida por Collares et al. (2006), onde a resistência do solo atinge o valor de 2 MPa. O plantio direto compactado atinge resistência de 2 MPa com maior umidade, enquanto que o plantio direto e os manejos com mobilização do solo, os valores de umidade onde a resistência do solo à penetração passa a ser crítica estão próximos a umidade do ponto de murcha permanente, principalmente na camada superficial. O preparo convencional e a escarificação profunda atingem os valores críticos de resistência com menores valores de umidade do solo.

Tabela 15 - Umidade volumétrica do solo onde a resistência do solo à penetração atinge o valor de 2 MPa.

Camada (m)	Sistema de manejo				
	PDc	PD	ESC	SUB	PC
	Umidade volumétrica (m^3m^{-3})				
0,00-0,05	0,14	0,09	0,09	0,10	0,07
0,05-0,10	0,19	0,17	0,15	0,12	0,12
0,10-0,20	0,19	0,16	0,16	0,14	0,13
0,20-0,30	0,18	0,17	0,19	0,16	0,17

A representação do IHO no perfil do solo mostra, mais claramente, o efeito do revolvimento ou da compactação sobre os limites críticos (Figura 53), indicando a faixa de variação da umidade do solo onde as restrições não ocorrem (KLEIN; LIBARDI, 2000; KLEIN; CAMARA, 2007; KAISER et al., 2009). A compactação do solo pelo tráfego reduziu a faixa do IHO no perfil do solo, sendo maior o “estrangulamento” na camada próxima aos 0,10 m de profundidade, onde os valores de densidade são mais elevados. A mobilização do solo ampliou a faixa do IHO no perfil, sendo o efeito maior com a escarificação profunda e no preparo convencional, o que indica que nessas condições de manejo, a umidade do solo pode atingir valores mais baixos para que a resistência do solo à penetração atinja valores restritivos ao crescimento radicular.

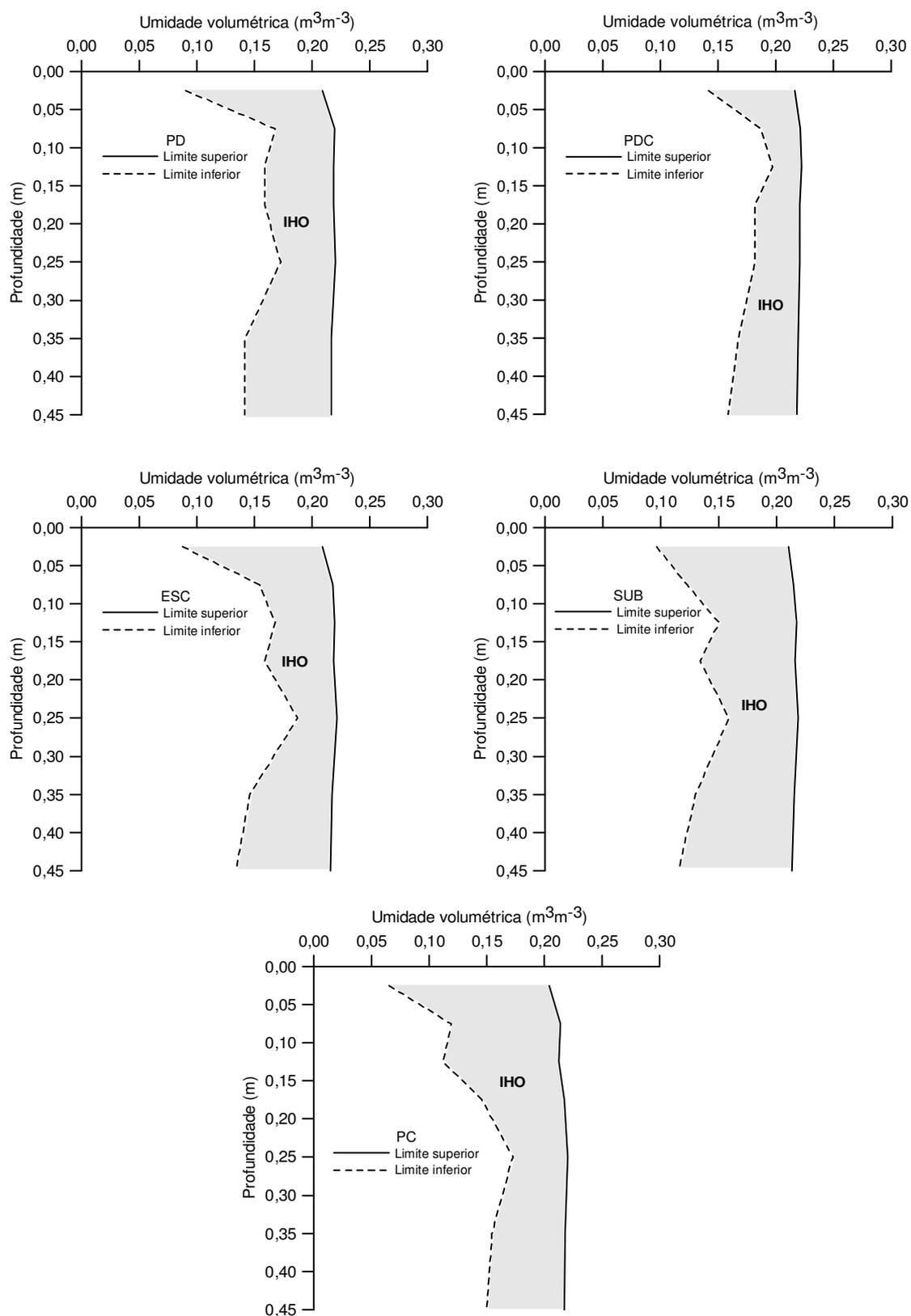


Figura 54 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) no perfil do solo explorado pelas raízes do milho. Limite superior: umidade do solo na capacidade de campo; Limite inferior: umidade do solo onde a resistência do solo à penetração é 2 MPa.

O limite superior do IHO é ultrapassado quando a umidade do solo ficar acima de $0,22 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para todas as condições de manejo, enquanto o valor de umidade do limite inferior, onde a resistência do solo passa a ser crítica, é variável em função da densidade observada em cada camada de solo (Figura 55, 56, 57 e 58). O IHO, representado no perfil, mostra as camadas onde as restrições podem ocorrer de forma mais intensa, devido à degradação do solo. No entanto, para saber se realmente estão ocorrendo restrições físicas (resistência elevada, deficiência hídrica, aeração deficiente) é necessário acompanhar os ciclos de umedecimento e secagem do solo ao longo do tempo, pois as restrições físicas ao crescimento das plantas não dependem apenas da estrutura do solo, representada pela densidade, mas sim da variação do conteúdo de água no solo, que vai interferir diretamente na resistência e na aeração do solo. Isso fica claro nesse estudo, pois, mesmo que a densidade do solo não tenha atingido o valor crítico pelo IHO, a variação na umidade do solo proporcionou altos valores de resistência do solo e baixa aeração, o que é indicado pelos limites superior e inferior do IHO.

Nas camadas superficiais o plantio direto compactado manteve o maior período da umidade abaixo do valor crítico, onde a resistência do solo à penetração atinge valores de 2 MPa, o que indica que, nessas condições, as raízes das plantas encontraram maiores dificuldades para o seu crescimento, pois a umidade já permaneceu abaixo do crítico nas fases iniciais do ciclo da cultura, onde o crescimento radicular é mais intenso. As camadas de 0,05 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 foram que ficaram o maior período com a umidade do solo abaixo da crítica. O plantio direto e a escarificação do solo apresentaram maiores restrições que a escarificação profunda e o preparo convencional, mas menores restrições que o plantio direto compactado. A escarificação profunda e o preparo convencional ampliaram a faixa do IHO e mantiveram a umidade do solo dentro dos limites adequados do IHO ao longo do ciclo da cultura.

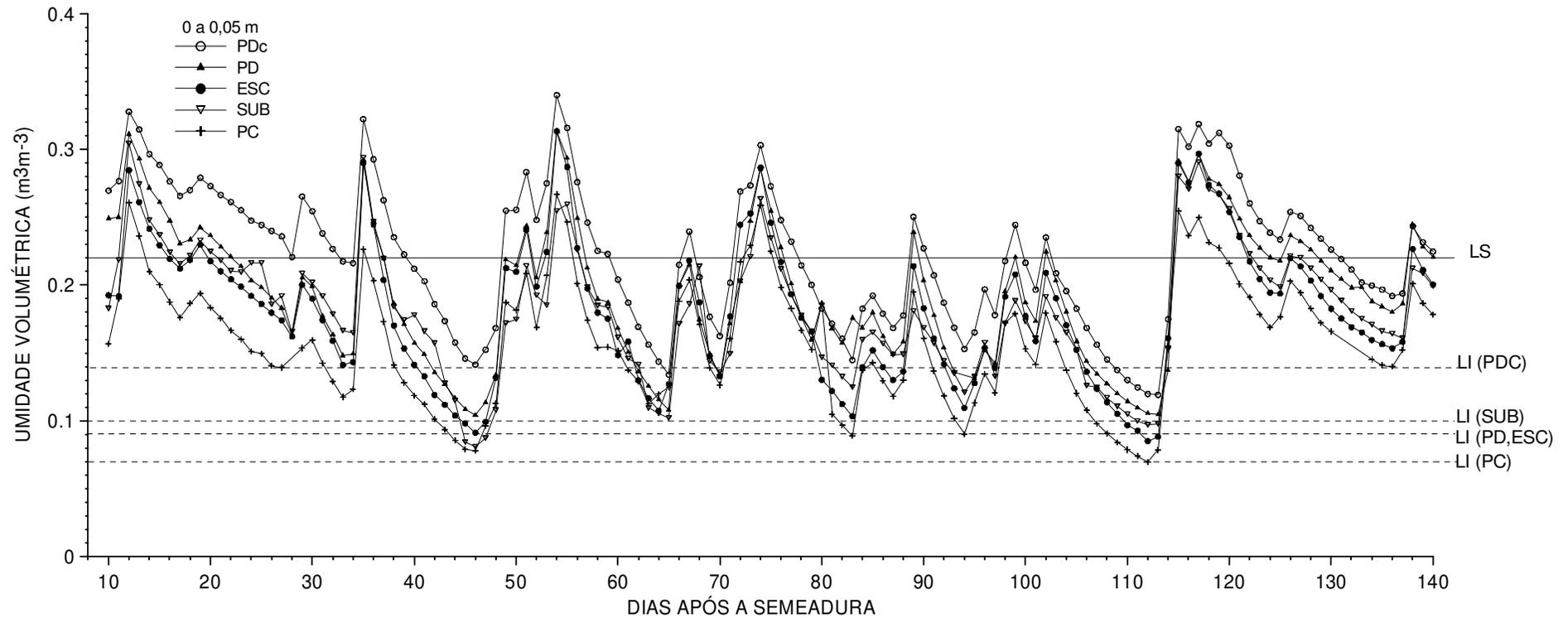


Figura 55 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0 a 0,05 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

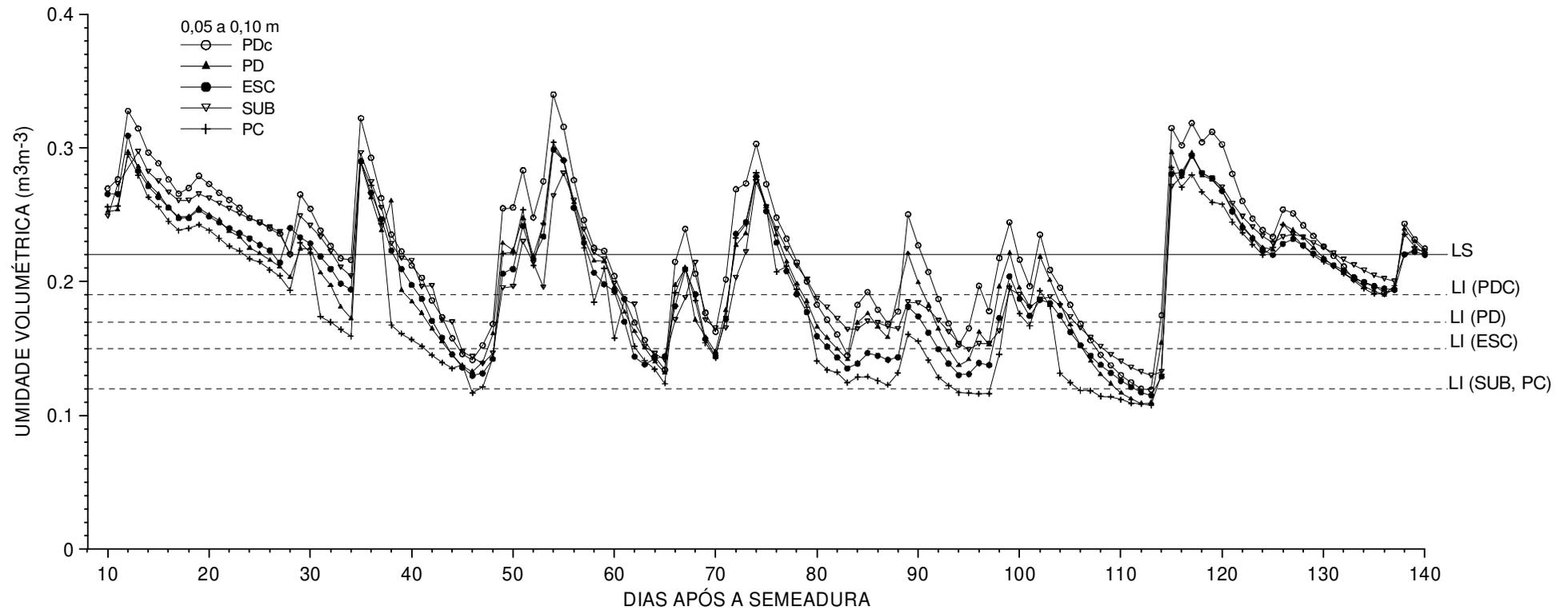


Figura 56 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,05 a 0,10 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDC: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

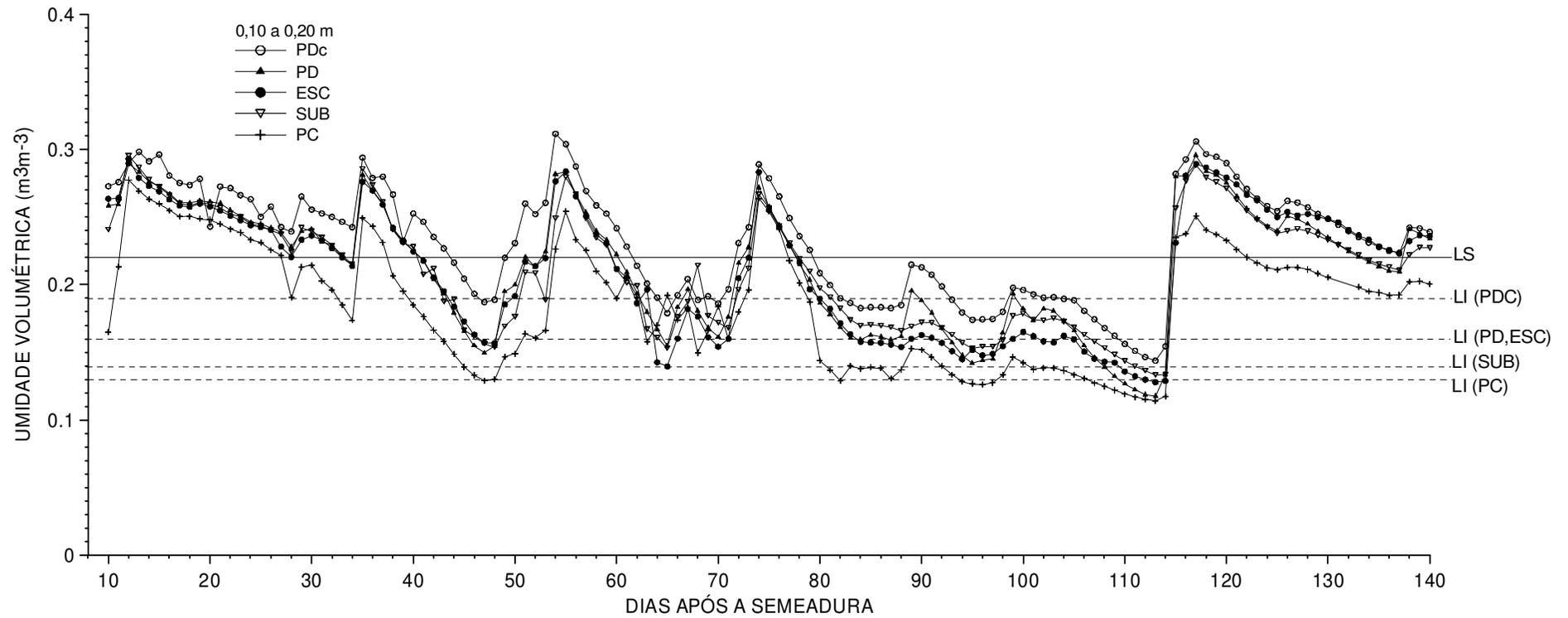


Figura 57 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,10 a 0,20 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

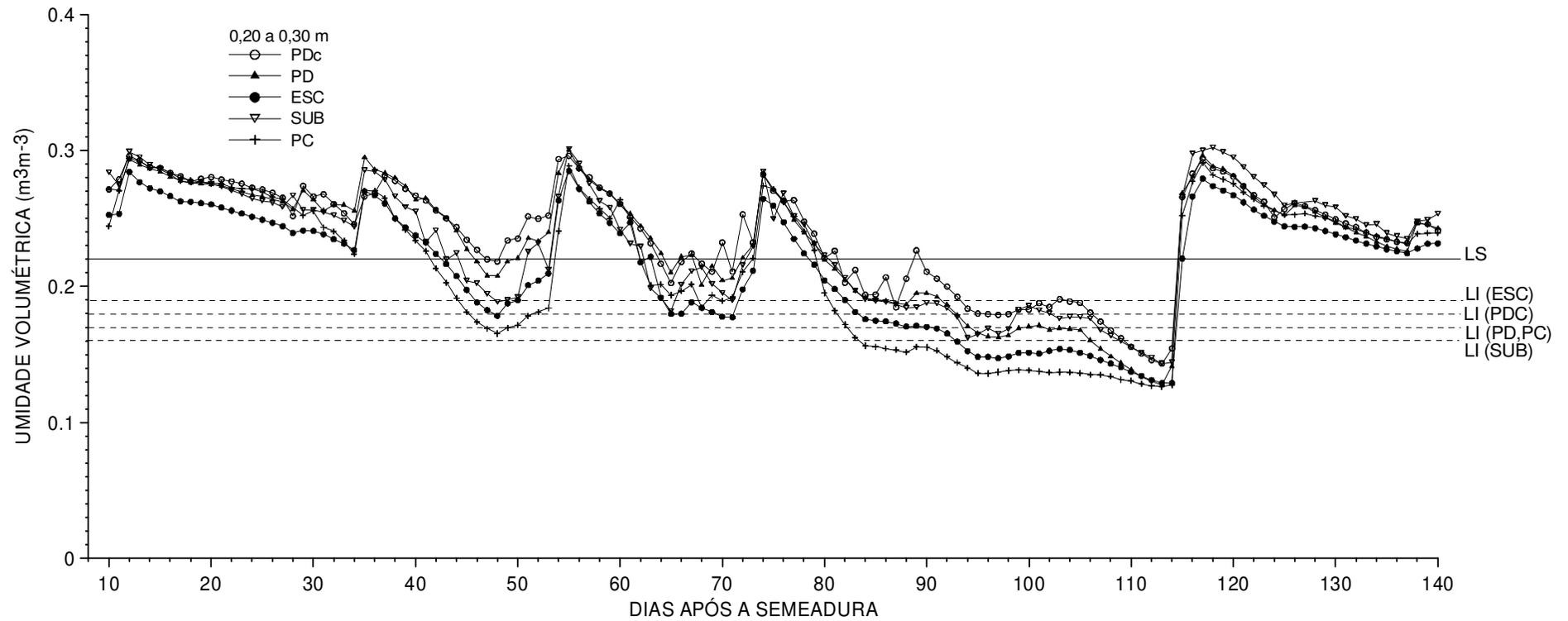


Figura 58 - Variação da umidade volumétrica do solo na camada de 0,20 a 0,30 m e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PDc: plantio direto compactado; PD: plantio direto; ESC: escarificação superficial; SUB: escarificação profunda e PC: preparo convencional.

Dessa forma, mesmo que a densidade do solo esteja abaixo da densidade crítica obtida com o IHO, indicando que existem condições adequadas ao crescimento das raízes, o monitoramento da umidade do solo ao longo do tempo e o estabelecimento dos valores de umidade críticos para cada fator de crescimento das plantas, mostra que ocorrem períodos em que a resistência do solo atingiu valores elevados, principalmente nas camadas mais densas. Além disso, mesmo que o limite superior do IHO foi a capacidade de campo, o monitoramento contínuo da umidade e do espaço aéreo do solo indicam que a permeabilidade do solo ao ar foi limitante em alguns períodos, sendo a deficiência de aeração um dos principais fatores físicos que limita a produção em solo com baixo espaço aéreo (LAPEN et al. 2004). A compactação do solo no plantio direto proporcionou as maiores restrições às plantas, enquanto que a escarificação profunda e o preparo convencional melhoraram o ambiente físico do solo para o crescimento das raízes, por ampliarem a faixa IHO no perfil do solo e manterem a umidade do solo dentro da faixa adequada por maior parte do tempo do ciclo da cultura.

4.9 Distribuição do sistema radicular

A análise da distribuição radicular no perfil é uma metodologia qualitativa, com grande utilidade na avaliação e identificação de camadas de impedimento mecânico ao crescimento radicular (Figuras 59, 60, 61, 62 e 63). O crescimento do sistema radicular das plantas é mais intenso na fase vegetativa das culturas anuais e praticamente cessa na fase reprodutiva. Dessa forma, a avaliação da distribuição das raízes no perfil do solo indica se houve restrições ao seu crescimento durante a fase vegetativa da planta.

No plantio direto (PD) as raízes cresceram em todo o perfil avaliado (Figura 59), com exceção do bloco 4, onde as raízes se concentraram superficialmente, possivelmente pela alta saturação de alumínio nas camadas mais profundas.



Figura 59 - Distribuição do sistema radicular do milho no solo sob plantio direto. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.

No plantio direto compactado o crescimento do sistema radicular foi restringido (Figura 60), com presença de menor quantidade de raízes e a concentração das raízes nas camadas superficiais do solo. Esse comportamento foi verificado em todas as avaliações feitas nesse tratamento, mostrando ser um efeito do tratamento e não da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo.

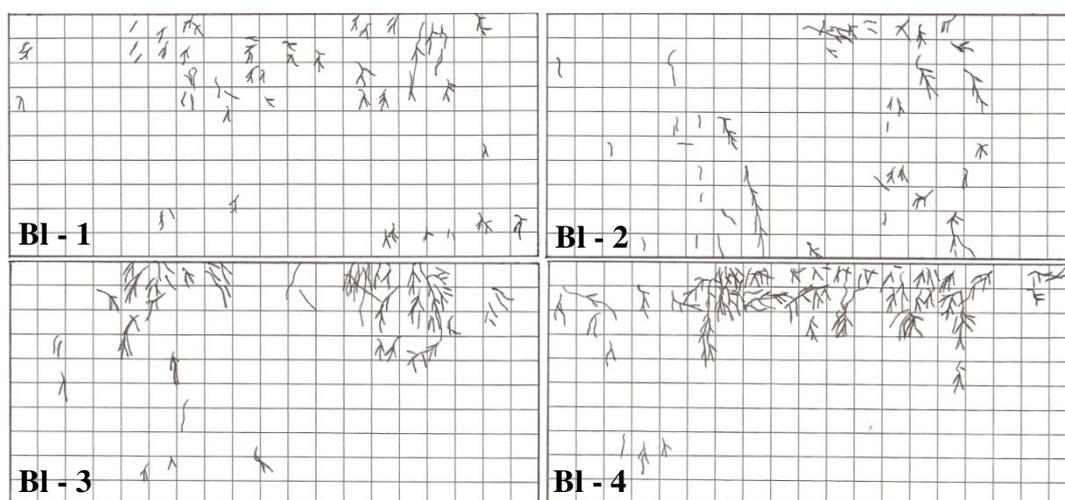


Figura 60 - Distribuição do sistema radicular do milho no plantio direto compactado. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.

No solo que foi mobilizado pela escarificação superficial (ESC) e profunda (SUB) e pelo preparo convencional (PC), o sistema radicular ficou melhor distribuído e atingiu camadas mais profundas do perfil (Figuras 61, 62 e 63), indicando que nessas condições as plantas tem acesso a um maior volume de solo. Apenas o bloco 4 desses tratamentos apresentou menor quantidade e menor profundidade do sistema radicular, o que pode estar associado à maior saturação de alumínio nesse bloco do experimento, o que representa um impedimento químico ao crescimento do sistema radicular.

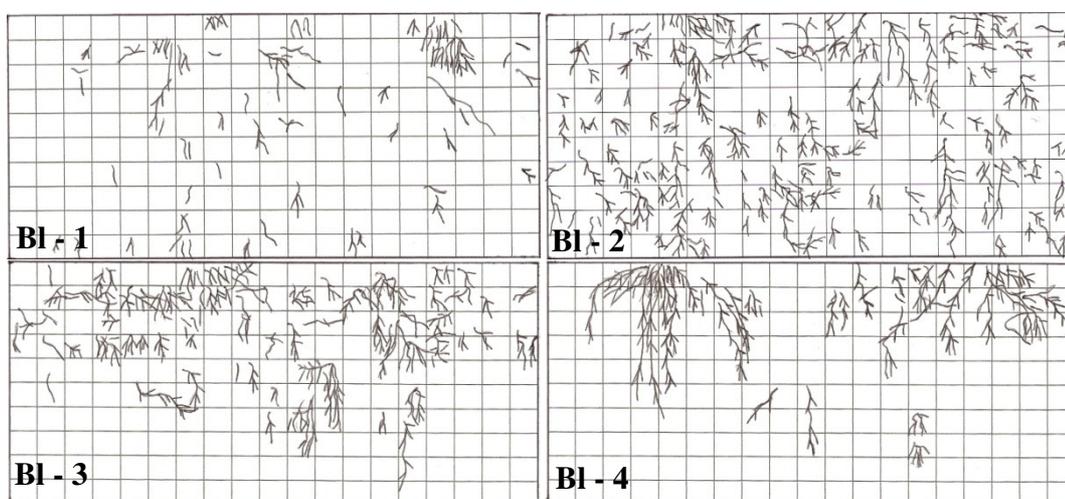


Figura 61- Distribuição do sistema radicular do milho no solo com escarificação superficial (ESC). BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.

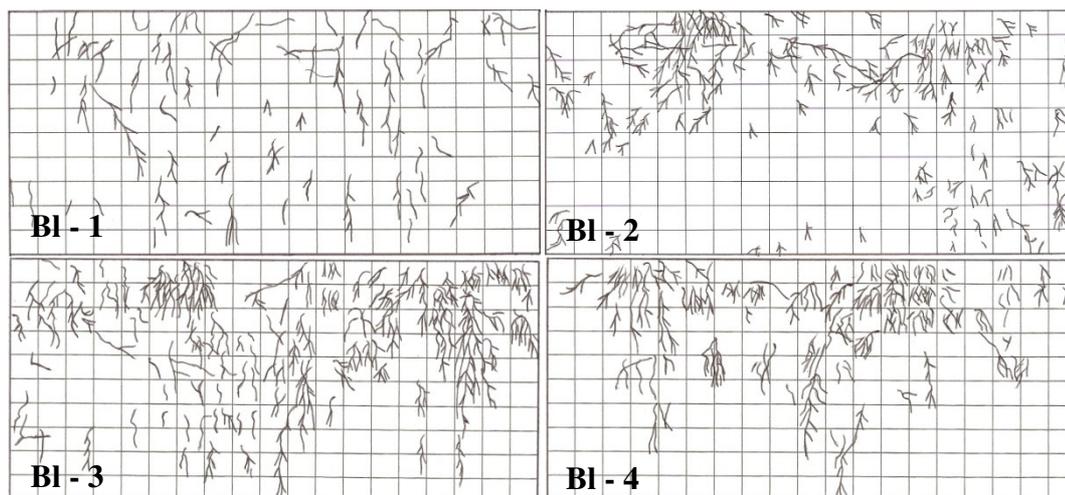


Figura 62 - Distribuição do sistema radicular do milho no solo com escarificação profunda (SUB0. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.

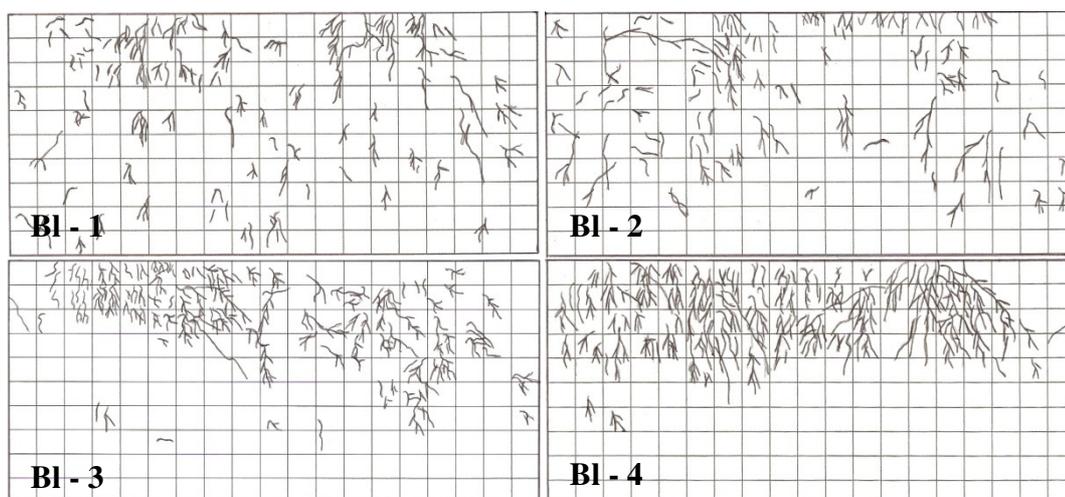


Figura 63 - Distribuição do sistema radicular do milho no preparo convencional. BL: bloco. O quadro possui 1m de comprimento e 0,60 m de largura, sendo a malha das quadriculas de 0,05 x 0,05 m.

A compactação do solo restringiu o crescimento radicular, mesmo que os valores de densidade encontrados estejam abaixo daqueles considerados críticos ao crescimento radicular das culturas agrícolas em solo franco arenoso (REICHERT et al., 2003; COLLARES et al., 2006; REINERT et al., 2008). Essa situação ocorre

porque a resistência do solo à penetração é variável em função dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, e atinge valor crítico em menor espaço de tempo em solos com maior densidade, mantendo os valores fora da faixa adequada do IHO, mesmo que a densidade observada não seja considerada restritiva. A resposta da planta parece estar mais relacionada ao período do ciclo em que os altos valores de resistência ocorrem e do tempo em que elas permanecem sob determinado estresse físico. Além disso, a variabilidade espacial da resistência no perfil também afeta o crescimento das raízes, sendo que com a compactação do solo criou-se uma faixa com maior resistência no perfil.

A resistência do solo à penetração tem sido apontada como a principal restrição física ao crescimento radicular das plantas (STRECK, 2003; COLLARES et al., 2006), mas o seu efeito sobre o sistema radicular só tem sido verificado quando os períodos de alta resistência do solo ocorrem antes do florescimento das plantas (RIQUELME, 2004), que corresponde à fase de maior crescimento das raízes. As raízes das plantas exercem uma pressão de crescimento de 0,2 a 1,2 MPa (CLARK et al., 1999; CLARCK et al., 2003; BENGOUGH; MULLINS, 1990) e a força motora do crescimento radicular é a pressão de turgescência celular na zona de alongação celular da raiz, sendo fundamental a disponibilidade de água para a ocorrência desse processo (BENGOUGH et al., 1997). A capacidade de uma planta vencer a resistência do solo 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) mas a disponibilidade de água no solo é fundamental para manter o seu crescimento. Como demonstrado nesse estudo, a compactação do solo restringiu o crescimento do sistema radicular da cultura, mesmo havendo disponibilidade de água nas camadas mais adensadas.

Outro fator importante que atua na limitação do crescimento radicular é a concentração de alumínio na solução do solo, o que é indicado pela menor quantidade e profundidade do sistema radicular da cultura nas avaliações feitas no bloco 4, onde a saturação de alumínio atingiu valores acima de 60 %, em todas as condições de manejo. Nessa situação, a redução na disponibilidade de água nas camadas superficiais do solo, pode trazer déficit hídrico para as plantas, mesmo que o solo apresente condições físicas adequadas ao crescimento das raízes das plantas.

4.10 Emergência e produtividade da cultura

A variação no conteúdo de água no solo não afetou a emergência das plantas (Tabela 16), indicando que ocorreu um bom contato solo-semente na semeadura, o que permitiu o fluxo de água do solo para a semente, o que é fundamental para a sua hidratação e a ativação das enzimas que desencadeiam o processo de germinação.

Tabela 16 - Emergência das plantas de milho em Argissolo sob diferentes sistemas de preparo e manejo.

DAS ¹	PDc	PD	ESC	SUB	PC	DMS ²	CV ³
Plantas emergidas por m ²							(%)
7	4,8 a	3,3 a	3,3 a	2,2 a	4,8 a	4,1	52
10	6,3 a	4,8 a	5,2 a	3,3 a	5,9 a	4,4	39
13	7,4 a	6,3 a	5,9 a	5,2 a	6,3 a	4,1	29
16	7,4 a	6,3 a	7,0 a	5,6 a	6,7 a	3,7	26
21	7,8 a	6,3 a	7,0 a	5,6 a	7,0 a	4,1	26

¹DAS = dias após a semeadura. ² DMS= diferença mínima significativa pelo teste de Tukey. ³ CV= coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O peso de 1000 grãos e a produção de massa seca e de grãos também não foram afetadas pelo manejo e pela compactação do solo (Tabela 17), indicando que as condições físicas do solo e a disponibilidade de água foram adequadas ao longo do ciclo da cultura. Isso mostra que o menor desenvolvimento radicular no plantio direto compactado não afetou a capacidade produtiva da cultura, pois a quantidade de água armazenada nas camadas exploradas pelas raízes foi suficiente para manter a produtividade. Além disso, mesmo que o espaço aéreo e a permeabilidade do solo ao ar tenham sido reduzidos pela compactação, o tempo em que os valores ficaram abaixo dos valores utilizados como referência não afetou o crescimento e a produtividade da cultura, o que indica que as trocas gasosas, provavelmente, se

mantiveram em taxas adequadas. Outro fator é a variabilidade desses parâmetros no perfil do solo explorado pelas raízes, onde, se uma camada do solo manter taxas adequadas de suprimento de água e oxigênio para as raízes, o desenvolvimento da planta é mantido, mesmo que as demais camadas apresentam condições físicas consideradas inadequadas pelos indicadores físicos utilizados.

Tabela 17 - Produtividade, massa seca e peso de 1000 grãos de milho em Argissolo sob diferentes sistemas de preparo e manejo.

Variável	PDc	PD	ESC	SUB	PC	DMS ¹	CV ² (%)
Peso de 1000 grãos (kg)	0,31 a	0,30 a	0,31 a	0,31 a	0,31 a	0,02	3,06
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	6,76 a	6,94 a	7,07 a	7,14 a	6,76 a	1,17	7,49
Massa seca (Mg ha ⁻¹)	11,6 a	12,1 a	12,0 a	11,7 a	12,0 a	3,99	14,9

¹ DMS = diferença mínima significativa pelo teste de Tukey. ² CV = coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A profundidade efetiva do sistema radicular é um fator fundamental para a planta ter acesso à água e aos nutrientes no solo, isso fica evidente, ao comparar-se a produtividade da cultura em função dos blocos do experimento, que foram delimitados em função da saturação de alumínio no solo. O bloco 4, que apresentou saturação de alumínio acima de 60%, teve uma produtividade de grãos significativamente menor 1000 grãos (Tabela 18). Esse efeito pode ser atribuído ao menor desenvolvimento do sistema radicular da cultura no bloco 4, independentemente do manejo e das condições físicas do solo.

Tabela 18 - Produtividade, massa seca e peso de 1000 grãos de milho em cada bloco do experimento.

Variável	Bloco 1	Bloco2	Bloco 3	Bloco 4	DMS ¹	CV ² (%)
Peso de 1000 grãos (kg)	0,313 a	0,307 a	0,314 a	0,298 a	0,017	3,07
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	7,42 a	7,32 a	6,93 ab	5,98 b	0,97	7,49
Massa seca (Mg ha ⁻¹)	12,9 a	12,3 a	11,7 a	10,5 a	3,32	14,9

¹ DMS = diferença mínima significativa pelo teste de Tukey. ² CV = coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A compactação e a alta saturação de alumínio em subsuperfície são problemas frequentes na maioria das lavouras conduzidas sob plantio direto no Rio Grande do Sul (MARTINAZZO, 2006) e, dessa forma, a associação desses dois fatores pode estar limitando o acesso à água em camadas mais profundas do solo e agravando o efeito de curtos períodos de estiagens sobre o desenvolvimento das culturas agrícolas.

A profundidade do sistema radicular é um fator chave no desenvolvimento das plantas e isso, muitas vezes, não fica evidente nos modelos matemáticos desenvolvidos para simular a extração de água do solo pelas plantas (JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, 1997), em que a condutividade hidráulica do solo é considerada o fator principal (PASSIOURA, 1988). Dessa forma, a manutenção das condições físicas e químicas em níveis adequados no perfil do solo vai determinar a profundidade e a distribuição do sistema radicular, o que é fundamental para a planta ter acesso a água e os nutrientes e reduzir o efeito das estiagens sobre o desenvolvimento e produtividade das plantas.

5 CONCLUSÕES

- 1- A escarificação superficial e a profunda não foi eficiente em aumentar o armazenamento de água no solo.
- 2- O principal benefício da mobilização do solo é a redução da sua resistência à penetração e a melhoria na aeração do solo, o que permite um melhor crescimento e distribuição do sistema radicular das plantas, aumentando o volume de solo explorado pelas raízes. Esse efeito poder vir a ser benéfico em anos com estiagens, mas não fica evidente quando a distribuição das chuvas é equilibrada e suficiente ao longo do ciclo da cultura.
- 3- O sistema plantio direto não armazenou maior quantidade de água para as plantas em relação aos sistemas com preparo convencional e a escarificação.
- 4- A compactação adicional do solo aumentou a retenção de água na camada mais adensada, mas por outro lado reduziu a capacidade da planta em explorar um maior volume de solo, por dificultar o crescimento do sistema radicular e reduzir a aeração do solo.
- 5- A compactação do solo atingiu em menos tempo e manteve por mais tempo valores de resistência do solo à penetração e de permeabilidade do solo ao ar considerados restritivos às plantas, com menor variação no conteúdo de água no solo.
- 6- As estimativas temporais de resistência do solo à penetração, espaço aéreo e permeabilidade do solo ao ar mostram que ocorrem períodos em que o solo oferece restrições ao crescimento radicular das plantas e isso não fica evidente em medidas pontuais, que apresentam grande

variabilidade em função da própria heterogeneidade física criada pelo revolvimento e compactação do solo.

- 7- As respostas das plantas às condições de estresse físicos estão mais associadas com a fase em que elas ocorrem e ao tempo que elas ficam submetidas a essas condições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para uma melhor compreensão dos efeitos da compactação e do manejo do solo sobre a dinâmica da água no mesmo, das propriedades físico hídricas a ela relacionadas e seus efeitos sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas é necessário manter experimentos em longo prazo, de forma a integrar diferentes condições meteorológicas.

Para avaliar a dinâmica da água é necessário isolar o efeito da planta sobre a água retida no solo, sendo, para isso, necessário monitorar a umidade do solo em determinada parte das parcelas onde não tivesse plantas.

Outro fator que precisa ser esclarecido é o efeito da compactação sobre a geração de gases tóxicos para as plantas e na emissão de gases causadores do efeito estufa, como por exemplo, o óxido nitroso. Essas avaliações seriam possíveis utilizando equipamentos que permitissem coletar amostras de ar do solo.

Como foi observado neste estudo, independentemente do manejo, a camada superficial do solo é a que mais rapidamente seca e que permanece por mais tempo com baixo conteúdo de água, o que pode reduzir a eficiência da utilização de nutrientes aplicados na superfície do solo, como vem sendo recomendado em muitas lavouras que utilizam as técnicas de agricultura de precisão.

A densidade do solo deve ser tomada como referência para avaliar a qualidade estrutural do solo em diferentes camadas e manejos, mas os valores de referência devem ser vistos apenas como uma “luz amarela”, indicando que existe probabilidade de ocorrência de restrição física ao crescimento da planta se ocorrer períodos com baixa precipitação.

Outro ponto importante que poderia ser estudado é a condutividade hidráulica não saturada do solo, que pode estar afetando o suprimento de água para as plantas. No entanto, essas medidas deveriam ser feitas diretamente no campo, com a instalação de tensiômetros e monitoramento contínuo, pois a estimativa através de modelos pode não trazer a resposta real, devido à grande variabilidade dos parâmetros físicos avaliados a partir de amostras de solo.

A alta saturação de alumínio prejudicou o crescimento radicular da planta e, assim, ocorreu um efeito associado entre restrição física e química. Para isolar esse

efeito, num próximo estudo, o bloco com alta saturação de alumínio poderia ser subdividido, e em parte das parcelas fazer aplicação de calcário e na outra parte, manter apenas o manejo; assim, poderia-se avaliar o efeito da restrição física e química isolada, e a restrição de ambas associadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AIKEN, R.M.; SMUCKER, A.J.M. Root system regulation of whole plant growth. **Review of Plant Biology**, v. 34, p. 325-346, 1996.

ALAOUI, A.; GOETZ, B. Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow. **Geoderma**, v. 144, p.279-286, 2008.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.717-723, 2001.

ALBUQUERQUE, J. A; REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.249-255, 1997.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.151-157, 1996.

ALLMARAS, R.R.; KRAFT, J.M.; MILLER, D.E. Effects of soil compaction and incorporated crop residue on root health. **Annual Review of Plant Biology**, v. 26, p.219-243, 1988.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28:337-345, 2004.

ARAH, J.R.M., SMITH, K.A., CRICHTON, I.J., Li, H.S., 1991. Nitrous oxide production and denitrification in Scottish arable soils. **Journal of Soil Science**, v. 42, p. 351–367.

BAIS, H.P.; WEIR, T.L.; PERRY, L.G.; GILROY, S.; VIVANCO, J.M. The role of root exudates in rhizosphere and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p.233-266, 2006.

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

BALL, B.C.; SCOTT, A.; PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil and Tillage Research**, v. 53, p.29–39, 1999.

BALL, B.C.; CRICHTON, I.; HORGAN, G.W. Dynamics of upward and downward N₂O and CO₂ fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence. **Soil and Tillage Research**, v.101, p.20–30, 2008.

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

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

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 Experimental Botany**, v.57, p.437-447, 2006.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil**, v. 131, p.59-66, 1991.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E.; WILSON, G. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots. **European Journal of Soil Science**, v. 48, p. 603-612, 2008.

BENGOUGH, A.G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**. v.189, p.155–164, 1997.

BENGOUGH, A.G.; KIRBY, J.M. Tribology of the root cap in maize (*Zea mays*) and peas (*Pisum sativum*). **New Phytology**, v. 142, p.421-425, 1999.

BESCANSA, P; IMAZ, M.J; VIRTO, I; ENRIQUE, A & HOOGMOED, W.B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**. v.8, p.19-27, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F.; M.A.P.C.C.; LEONEL, C.L; JOÃO, A.C.G.S. FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.575-580, 2004.

BLACKWELL, P.S.; GREEN, T.W.; MASON, W.K. Responses of biopore channels from roots to compression by vertical stresses. **Soil Science Society of America Journal**, v.54, p.1088-1091, 1990.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARAES, R. M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo nem Nitossolo Vermelho distroférrico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 273-281, 2009.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo s suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.30, p.605-614, 2006.

BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2009. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 2/2008**. Adota no Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, as especificações para solo que descreve. Brasília: - M.A.A, 2008. Publicado no Diário Oficial da União de 10/10/2008, Seção 1, Página 71.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: convênio MA/DRNR, 1973. 431 p. (Boletim Técnico).

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

BURGESS, S. S. O.; BLEBY, T. M. Redistribution of soil water by lateral roots mediated by stems tissues. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p.3283-3291, 2006.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of America Society of Agricultural Engineering**, v.33, p.519-524, 1990.

BORU, G.; VANTOAI, T.; ALVES, J.; HUA, D.; KNEE, M. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, v.91, p.447-453, 2003.

CAMARA, R.C.; 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.

CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p.493-501, 2006.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v.25, p.183-188, 1995.

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. 30:137-147, 2006.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in Rhodic Ferralsol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p.158-164, 2009.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for Field traffic-induced subsoil compaction: a review. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p.161-174, 2003.

CLARK, L.J.; BARRACLOUGH, P.B. Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons? **Journal of Experimental Botany**, v. 50, p.1263-1266, 1999.

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

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

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.41, p.1663-1674, 2006.

COOK, R.J.; PAPENDICK, R.I. Influence of water potential of soils and plants on root disease. **Annual Review of Phytopathology**. v.10, p.349-374, 1972.

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

CULLUM, R.F. Macropore flow estimations under no-till and till systems. **Catena**, v.78, p.87-91, 2009.

CUNHA, G.R. El Niño – oscilação do sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, p.137-145, 1999.

DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; KRUGER, A.M.B.; COMIRAM, F.; HECKLER, B.M.M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, p.855-864, 2009.

DAVIES, W.; ZHANG, L. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v. 42, p.55-76, 1991.

DREW, M.C. Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**. v. 48, p.223-250, 1997.

DREW, M.C.; LYNCH, J.M.; Soil anaerobiosis, microorganisms and root function. **Annual Review of Phytopathology**. v.18, p.37-66, 1980.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing- a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.46, p.237- 256, 2008.

EMBRAPA/CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306 p.

FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA, J.L.; PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 81, p.57-69, 2005.

FELDMAN, L.J. Regulation of root development. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 35, p.223-242, 1984.

FIORIN, J.E.; REINERT, D. J; ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e produtividade da cultura do milho em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21:249-255, 1997.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FORSYTHE, W. Las condiciones físicas, la producción agrícola y la calidad del suelo. In: X Congresso Agrônômico/ II Congresso de Suelos. Costa Rica, 1996.

FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; COSTA, L.C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.104-111, 2006.

FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. & COSTA, L.C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.85-91, 2004.

FRENSCH, J. Primary responses of root and leaf elongation to water deficits in the atmosphere and soil solution. **Journal of Experimental Botany**, v. 57. p.3283-3291, 1997.

GABET, E.; REICHMAN, O.J.; SEABLOOM, E.W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. **Annual Review of Earth Planetary Science**, v, 31, p. 249-273, 2003.

GARDNER, W.R. Dynamic aspects of soil water availability to plants. **Annual Review of Plant Physiology**. v.16, p.323-342, 1965.

GREENWAY, H.; ARMSTRONG, W.; COLMER, T.D. Conditions Leading to High CO₂ (>5 kPa) in Waterlogged–Flooded Soils and Possible Effects on Root Growth and Metabolism. **Annals of Botany**. v. 98, p. 9–32, 2006.

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 Journal**, v.32, p.18-186, 1968.

GOODMAN, A.M.; ENNOS, A.R. The Effects of Soil Bulk Density on the Morphology and Anchorage Mechanics the Root Systems of Sunflower and Maize. **Annals of Botany**. v.83, p. 293-302, 1999.

GUBIANI, P. I.; WINK, C.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; GELAIN, N. S. Software AreaMed desenvolvido para medição de áreas a partir de imagens digitais. In: Congresso Brasileiro de Ciência do solo, 2009, 32. Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 1 CD-ROM.

GUBIANI, P. I. **Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; GELAIN, N. S.; MINELLA, J. P. G. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 993-997, 2010.

GUPTA, S.C.; SCHNEIDER, E.C.; SWAN, W.B. Planting depth and tillage interactions on corn emergence. **Soil Science Society of American Journal**, v.52, p.1120-1127, 1988.

HALL, S.J.; MATSON, P.A. Nox emissions from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. **Annual Review of Energy and the Environment**. v.21, p.311-346, 1996.

HAMZA, M.A., ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. v.82, p.121–145, 2005.

HETTIARATCHI, D.R.P. Soil compaction and plant root growth. **Philosophical Transactions: Biological Sciences**. v. 329, p.343-355, 1990.

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

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p.207-219, 2004.

HORN, R.; DOMIAL, H.; JURKIEWICZ, A. S.; OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environmental. **Soil and Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; SMUCKER, A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. **Soil and Tillage Research**, v .82, p.5–14, 2005.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**. v. 24, p.519-570, 1973.

IJIMA, M.; HIGUCHI, T.; BARLOW, P.W.; BENGOUH, A.G. Root cap removal increases root penetration resistance in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 54, p.2105-2109, 2003.

JEGOU, D.; BRUNOTTE, J.; ROGASIK, H.; CAPOWIEZ, Y.; DIESTEL, H.; SCHRADER, S.; CLUZEAU, D. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X- Ray computed tomography: preliminary study. **European Journal of Soil Biology**, v. 38, p.329–336, 2002.

JONG VAN LIER, Q. de, LIBARDI, P.L. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.212, p.535-542, 1997.

JONG VAN LIER, Q. J. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.95-106.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.845-855, 2008.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.G. Dielectric Constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.649-658, 2010.

KARUNATILAKE, U.; van ES, H.M.; SCHINDELBECK, R.R. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfafa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. **Soil and Tillage Research**, v.55, p.31-42, 2000.

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. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.959-964, 2000.

KLEIN, V.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.646-650, 2006.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KMOCH, V.H.G.; HANUS, H. Vereinfachte methodic und auswertung der permeabilitatsmessung des bodens für luft. **Zeitschrift für pflanzenernährung Düngung, Bedenkunde**, v. 111, p.1-10, 1965.

LAMANDE, M.; HALLAIRE, V.; CURMI, P.; PERES, G.; CLUZEAU, D. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. **Catena**, v.54, p.637-649, 2003.

LANDEFELD, L.S.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.J.; STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil and Tillage Research**, v. 75, p.75-86, 2004.

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

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

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

LINN, D.M.; DORAN, J.W. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.794-799.

LIPIEC, J.; WOJCIGA, A.; HORN, R. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. **Soil and Tillage Research**, v.103, p.170-177, 2009.

LOWERY, B.; MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of soil analysis- Part 4: Physical methods**. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. 2002

LOGSDON, S.D.; ALMARAS, R.R.; SWAN, J.B.; RANDALL, G.W. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, p.1096-1101, 1990.

LUO, Y.; ZHOU, X. **Soil respiration and the environment**. Academic Press. 2006, 328 p.

MANCINELLI, R.L. The regulation of methane oxidation in soil. **Annual Review of Microbiology**. v.49, p.581-605, 1995.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MCHUGH, A.D.; TULLBERG, J.N.; FREEBAIRN, D.M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p.164-172, 2009.

MCCULLY, M.E. Roots soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p.695-718, 1999.

MEEK, B.D.; RECHEL, E.R.; CARTER, L.M.; DETAR, W.R.; URIE, A.L. Infiltration rate of a sandy loam soil: effects of traffic, tillage and plant roots. **Soil Science Society of American Journal**, v. 56, p.908-913, 1992.

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

MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P; ATWELL, B.J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. **Journal of Experimental Botany**. v.52, p.2127-2133, 2001.

MORARD, P.; SILVESTRE, J. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: a review. **Plant and Soil**, v. 184, p.243-254, 1996.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. Diretoria de Terras e Colonização. Seção de Geografia, 1961.46p.

NAGAYA, L.; LAL, R. Mulching effects on selected soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v.98, p.106-111, 2008.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32, p.1723-1734, 2008.

OHU, J.O.; MAMMAN, E.; MUNI, U.B. Influence of vehicular traffic on air permeability and groundnut production in a semi-arid sandy loam soil. International. **Agrophysics**, v. 20, p.309-315, 2006.

PALMA, R.M.; RIMOLO, M.; SAUBIDET, M.L.; CONTI, M.E. Influence of tillage system on denitrification in maize-crooped soils. **Biology and Fertility of Soils**. v. 25, p.142-146, 1997.

PAIVA, A.S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J.D.; TURCO, J.E.P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p.161-169, 2005.

PASSIOURA, J.B. Water transport in and to roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v. 39, p.245-255, 1988.

PENG, X.; HOLDEN, N.; HORN, R. Dynamics of soil structure as a function of mechanical and hydraulic stress. **ISTRO 18 Triennial Conference Proceedings**, June 15-19, 2009.

PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F.L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C.J.; KUNZ, J.H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.531-539, 2007.

PHILIP, J.R. Plant water relations: some physical aspects. **Annual Review of Plant Physiology**. v.17, p.245-268, 1966.

PORTELA, J.C.; LIBARDI, P.L.; LIER, Q.J.V. Retenção de água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p. 49-54, 2001.

QUASTEL, J.H. Soil metabolism. **Annual Review of plant Physiology**. v. 16, p.217-240, 1965.

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

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v.116, p.61-76, 2003.

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

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

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242–254, 2009.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L.;CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.33, p.1547-1560, 2009.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R; PETRY, M.T.; ROSA, G.M., CERETTA, C.A. ed. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, p. 114-133, 2001.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; SUZUKI, L.E.A.S. **Qualidade física dos solos**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006. Anais. Aracaju, SBCS, 2006. CD-ROM.

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

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, 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 do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B. & SAMPAIO, F.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.31.2007.

RIQUELME, U.F.B. **Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro**. 2004, 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ROCHETTE, P. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soil. **Soil and Tillage Research**, v. 10, p.97-100, 2008.

ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTler, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.395-400, 2008.

SAS INSTITUTE. Statistical Analysis System Institute – **SAS/STAT Procedure guide for personal computers**. Version 5, SAS Inst. Cary, NC. 1997.

SCANLON, B.R.; NICOT, J.P.; MASSMANN, J.W. Soil gas movement in unsaturated systems. In: WARRICK, A.W. **Soil physics companion**. CRC Press, London, New York. 2002, 297-341.

SCHARON, J.H.; MATSON, P.A.; ROTH, P.M. NO_x emissions from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. **Annual Review of Energy Environment**, v.21, p.311–346, 1996.

SCHJUNNINGA, P.; RASMUSSEN, K.J.; Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. **Soil and Tillage Research**, v. 57, p.69-82, 2000.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.431-441, 2001.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.419-430, 2001.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SMUCKER, A.J.M. Soil environmental modifications of root dynamics and measurement. **Annual Review of Phytopathology**, v. 31, p.191-218, 1993.

SILVA, V. R.; REICHERT, J.M & REINERT, D.J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30, p.391-399, 2006.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

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

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

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J.; NEVES JUNIOR, A. F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: RIBEIRO, M.R.; NASCIMENTO, C.W.; RIBEIRO FILHO, M.R.; CANTALICE, J.R.B. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, v. 6, p. 1-30, 2009.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of America Journal**, v.154, p.269-80, 1992.

STEPNIEWSKI, W.; STEPNIEWSKA, Z. Selected oxygen-dependent process-Response to soil management and tillage. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.193–200, 2009.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.835-841, 2000.

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

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

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. & SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002.

SUZUKI, L. E.A.S. **Qualidade físico-hídrica de um argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil**. 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B.; SISSON, J.B. Crop and Soil Response to Wheel-Track Compaction of a Claypan Soil. **Agronomy Journal**, v.98, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia do estresse**. 3ª edição, Porto Alegre: Artmed Editora, 2004.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONCALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, p.795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; FILHO, P.S.V.; GONÇALVES, A.C.; ARAÚJO, M.A.; PINTRO, J.C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 8, p.65-71, 2004.

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

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

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** .v.22, p.573-581, 1998.

TULI, A.; HOPMANS, J.W.; ROLSTON, D.E.; MOLDRUP, P. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.69, p.1361-1371, 2005.

VAZ, C.M.P.; IOSSI, M.F.; NAIME, J.M.; MACEDO, A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water model for Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.577-583, 2005.

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

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.1271-1280, 2007.

VOSSBRINK, J.; HORN, R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. **European Journal of Forestry Research**, v. 123, p.259-267, 2004.

WALTER, A.; SILK, W.K.; SCHURR, U. Environmental effects on spatial and temporal patterns of leaf and root growth. **Annual Review of Plant Biology**, v. 60, p.279-304, 2009.

WARREN, C.R. Soil water deficits decrease the internal conductance to CO₂ transfer but atmospheric water deficit do not. **Journal of Experimental Botany**, v. 59. p. 327-334, 2008.

WARRICK, A.W. 2002. **Soil Physics Companion**. New York, CRC Boca Raton. 403 p.

VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1437-1446, 2008.

WEISSKOPF, P.; REISER, R.; REK, J.; OBERHOLZER, H.R. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. **Soil and Tillage Research**, 2010. No prelo.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of American Journal**, v. 68, p.1403-1409, 2004.

YUAN, C.; LEI, T.; MAO, L.; LIU, H.; WU, Y. Soil surface evaporation processes under mulches of different sized gravel. **Catena**, v. 78, 117-121, 2009.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality for forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, v.38, p.947-958, 2000.