

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

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB DIFERENTES
TEMPOS DE ADOÇÃO E DE ESCARIFICAÇÃO DO
SISTEMA PLANTIO DIRETO E SUA RELAÇÃO COM
A ROTAÇÃO DE CULTURAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Moacir Tuzzin de Moraes

Santa Maria, RS, Brasil

2013

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB DIFERENTES TEMPOS
DE ADOÇÃO E DE ESCARIFICAÇÃO DO SISTEMA
PLANTIO DIRETO E SUA RELAÇÃO COM A ROTAÇÃO DE
CULTURAS**

Moacir Tuzzin de Moraes

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

Orientador: Prof. Ph.D. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Moraes, Moacir Tuzzin de
Qualidade física do solo sob diferentes tempos de
adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua
relação com a rotação de culturas / Moacir Tuzzin de
Moraes.-2013.
205 p.; 30cm

Orientador: Reimar Carlesso
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2013

1. Camadas de impedimento mecânico 2. Indicadores
físicos 3. Modelo de produção 4. Sistemas de manejo do
solo I. Carlesso, Reimar II. Título.

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

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

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB DIFERENTES TEMPOS DE
ADOÇÃO E DE ESCARIFICAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E
SUA RELAÇÃO COM A ROTAÇÃO DE CULTURAS**

elaborada por
Moacir Tuzzin de Moraes

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Reimar Carlesso, Ph.D.
(Presidente/Orientador)

Flávio Luiz Foletto Eltz, Ph.D. (UFSM)

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 26 de Fevereiro de 2013.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Armino
B. de Moraes e Deolivia A. Tuzzin de Moraes;
ao meu irmão, Marcos A. Tuzzin de Moraes; e
à minha irmã, Marinez Tuzzin de Moraes.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Centro Nacional de Pesquisa da Soja da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja), que possibilitaram a realização do curso de mestrado e deste trabalho.

A CAPES pela bolsa concedida.

Ao professor orientador Reimar Carlesso, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, orientação e amizade.

Ao professor Vanderlei Rodrigues da Silva, que desde a minha graduação vem me orientado, ensinando e incentivando a busca de novos conhecimentos.

Aos pesquisadores da Embrapa Soja, Henrique Debiasi e Julio Cezar Franchini muito obrigado pela orientação e ensinamentos transmitidos, por toda a confiança depositada em mim e me dar à oportunidade da realização deste trabalho.

Aos funcionários da área de manejo do solo da Embrapa Soja, Donizete A. Loni, Esmael Lopes dos Santos, Luiz Gustavo Garbelini, Agostinho, Elizeu, Ildefonso, Mariluci Pires, João Macedo, Dudinha, pelo suporte técnico para realização das coletas e análises dos atributos físicos e químicos do solo.

Aos estagiários da Embrapa Soja que colaboraram na coleta de dados para este estudo.

Aos amigos e colegas do Projeto Sistema Irriga, pela companhia, aprendizado e convívio durante este período de Mestrado.

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

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

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

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano."

(Isaac Newton).

RESUMO

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

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB DIFERENTES TEMPOS DE ADOÇÃO E DE ESCARIFICAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO E SUA RELAÇÃO COM A ROTAÇÃO DE CULTURAS

AUTOR: Moacir Tuzzin de Moraes

ORIENTADOR: Reimar Carlesso

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 26 de fevereiro de 2013.

O sistema plantio direto (SPD) é o sistema de manejo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas. No entanto persistem dúvidas relacionadas com a formação de camadas com maior nível de compactação em SPD, efeitos residuais da escarificação do solo, e alteração da estrutura pelo tempo de adoção do SPD. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da rotação de culturas, da escarificação periódica e do tempo de adoção do SPD na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico, e na produtividade de grãos de soja e do trigo. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5x2 (manejos do solo x modelos de produção), com quatro repetições. Os sistemas de manejo do solo foram: (i) sistema de preparo convencional (SPC); (ii) SPD escarificado a cada ano (SPDE1); (iii) SPD escarificado a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos (SPDC11); (v) SPD contínuo por 24 anos (SPDC24). Os modelos de produção foram: (i) rotação e; (ii) sucessão de culturas. A amostragem foi realizada após 10 e 22 meses da última escarificação no SPDE1 e SPDE3, respectivamente. Nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m foram coletadas amostras indeformadas de solo para determinação de atributos físicos (densidade e distribuição do tamanho de partículas, densidade do solo, porosidade total, macro e microporos, resistência do solo à penetração (RP), curva de RP, curva de retenção de água, intervalo hídrico ótimo), e amostras deformadas para determinação de atributos químicos do solo (acidez do solo, macronutrientes, carbono, nitrogênio). Nas profundidades de 0,10 e de 0,20 m, foi determinada a taxa de infiltração tridimensional de água e condutividade hidráulica do solo saturado no campo. Foi determinada a produtividade de grãos de soja e de trigo. Não houve interação entre os sistemas de manejo do solo e os modelos de produção. As variáveis analisadas não foram alteradas em função dos modelos de produção. Os atributos químicos não foram limitantes a produtividade de grãos de soja. Os atributos físicos indicam que os efeitos residuais da escarificação do solo não persistem por um período maior do que 10 meses. O aumento do tempo de adoção do SPD de 11 para 24 anos favoreceu melhorias na qualidade física do solo. O SPDC24 apresentou maior produtividade de grãos de soja do que o SPC. A escarificação do solo não resultou em aumento de produtividade de grãos de soja e de trigo em comparação com SPD. O aumento do tempo sem revolvimento do solo, em uma mesma densidade do solo e conteúdo de água, favorece incrementos na resistência da estrutura do solo. Os limites críticos de RP de 2 MPa são inadequados para avaliação da qualidade física do solo em SPD com ou sem escarificação do solo. Estes limites de RP devem ser ampliados para 3 MPa em SPD com escarificação e para 3,5 MPa em SPD consolidado. O intervalo hídrico ótimo, independente do manejo do solo, modelo de produção e limites críticos de RP, não foi um bom indicador da qualidade física do solo.

Palavras-chave: Camadas de impedimento mecânico. Indicadores físicos. Modelo de produção. Sistemas de manejo do solo.

ABSTRACT

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

SOIL PHYSICAL QUALITY IN DIFFERENT TIMES OF ADOPTION OF CHISELING OF NO-TILLAGE AND ITS RELATION WITH CROP ROTATION

AUTHOR: Moacir Tuzzin de Moraes

ADVISER: Reimar Carlesso

Defense Place and Date: Santa Maria, February, 26nd, 2013.

No-tillage (NT) is a tillage system more important for the sustainability of agro-ecosystems. However doubts remain concerning the formation of layers with high compaction level in NT, residual effects of soil chiseling, and alteration of soil structure during the time of adoption of NT. The objective of this study was to evaluate the effect of crop rotation, chiseling and periodic time of adoption of NT on the physical quality of a Rhodic Eutrudox, and productivity of soybean and wheat. The tillage systems were: (i) conventional tillage by disk harrow (CT); (ii) NT with chiseling every year (NTC1); (iii) NT with chiseling every three years (NTC3); (iv) NT for 11 consecutive years (NT11) and; (v) NT for consecutive 24 years (NT24) while the cropping factor include: (i) crop rotation and (ii) crop succession. Sampling was conducted 10 and 22 months after last chiseling in NTC1 and NTC3, respectively. Undisturbed soil samples were collected in soil layers, 0.0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m for the determination of physical attributes (particle density and particle size distribution, bulk density, porosity, macro and micropores, soil penetration resistance (SPR), SPR curve, water retention curve, least limiting water range), while disturbed samples were used to quantify soil chemical properties (soil acidity, macronutrients, organic carbon, nitrogen). In the soil depth, 0.10 and 0.20 m, three-dimensional infiltration rate and saturated hydraulic conductivity were determined in-situ. At maturity, the productivity of soybeans and wheat was determined. There was no interaction between tillage and cropping system. The variables analyzed did not change as a function of the cropping systems. The chemical attributes were not limiting the productivity of soybeans. The physical attributes indicated that the residual effects of soil chiseling did not persist for longer than 10 months. Increasing the time of adoption of NT from 11 to 24 years favored improvements in soil physical quality. The NT24 had higher yield of soybeans than SPC. Chiseling did not result in increased productivity of soybeans and wheat compared with NT. The increased time without tilling the soil, in the same soil bulk density and water content favored increase in resistance of soil structure. Critical limits of SPR (2 MPa) are inadequate for the assessment of soil physical quality in NT with or without soil chiseling. These SPR limits should be expanded to 3 MPa in NT with chiseling and 3.5 MPa in NT. The least limiting water range, regardless of soil management, cropping system and critical limits of SPR was not a good indicator of soil physical quality.

Key words: Layers of mechanical impediment. Physical indicators. Cropping system. Tillage system.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Imagem de satélite da localização do experimento avaliado. a) Localização do Estado do Paraná no Brasil; b) Localização da Fazenda da Embrapa Soja no Estado do Paraná; c) Fazenda experimental da Embrapa Soja; d) Experimento de longo prazo utilizado neste estudo. Imagens (a,b,c) obtidas no Google Earth (2012) (imagem 13/10/2009). Londrina, PR, 2013..... 38
- Figura 2 - Escarificador tipo Cruzador Carelli MAX, utilizado no sistema plantio direto escarificado a cada ano (SPDE1) e a cada três anos (SPDE3). Londrina, PR 2013..... 39

ARTIGO 1

- Figura 1 - Equipamento amostrador de solo acoplado em um trator (a) e detalhe do cilindro contendo a amostra indeformada de solo. Londrina, PR, 2013..... 47
- Figura 2 - Distribuição do tamanho de partículas em função de modelos de produção (rotação e sucessão de culturas) em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013..... 53
- Figura 3 - Distribuição do tamanho de partículas em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013..... 54
- Figura 4 - Densidade de partículas em função dos modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013..... 54
- Figura 5 - Densidade de partículas em função do manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013. 55
- Figura 6 - Densidade do solo em função dos modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013. 56
- Figura 7 - Densidade do solo em função do manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013. 58
- Figura 8 - Porosidade total calculada em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013..... 62
- Figura 9 - Porosidade total do solo por saturação do solo, em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013..... 63

Figura 10 - Poros bloqueados em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	64
Figura 11 - Porosidade total do solo calculada em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	65
Figura 12 - Porosidade total do solo determinada pela saturação do solo, em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	67
Figura 13 - Poros bloqueados em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	67
Figura 14 - Relação entre porosidade total calculada (Ptc) e a porosidade total determinada por saturação (Pts), nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) 0,20-0,30 m (c). Londrina, PR, 2013.....	69
Figura 15 - Macroporosidade do solo calculada em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	70
Figura 16 - Macroporosidade do solo por saturação do solo em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	71
Figura 17 - Relação entre a macroporosidade calculada e a macroporosidade por saturação nas camadas de 0,0-0,10 m (d) 0,10-0,20 m (e) 0,20-0,30 m (f). Londrina, PR, 2013.	72
Figura 18 - Macroporosidade do solo calculada em função de sistemas de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	73
Figura 19 - Macroporosidade do solo por saturação em função de sistemas de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	75
Figura 20 - Microporosidade do solo em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	75
Figura 21 - Microporosidade do solo em função de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	76
Figura 22 - Infiltração tridimensional de água no solo (a) e condutividade hidráulica saturada no campo (b) em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	77
Figura 23 - Infiltração tridimensional de água no solo (a) e condutividade hidráulica saturada no campo (b) em função de manejos do solo, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	78

ARTIGO 2

- Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água do solo (I) e resistência do solo à penetração (II) em função de modelos de produção, determinado nos potenciais matriciais de -6 kPa (a), -10 kPa (b), -33 kPa (c), -100 kPa (d) e -500 kPa (e), em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013..... 94
- Figura 2 - Conteúdo volumétrico de água do solo (I) e resistência do solo à penetração (II) em função de sistemas de manejo do solo, determinado nos potenciais matriciais de -6 kPa (a), -10 kPa (b), -33 kPa (c), -100 kPa (d) e -500 kPa (e), em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013 96
- Figura 3 - Conteúdo volumétrico de água no solo nos limites de capacidade de campo (-10 e -33 kPa), ponto de murcha permanente (-1.500 kPa) e resistência do solo à penetração de 2 e 3,5 MPa, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) nos diferentes manejo do solo (I) e modelos de produção (II) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013. 99
- Figura 4 - Potencial matricial de água no solo quando a resistência à penetração atinge 2 e 3,5 MPa, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) para os manejos do solo (I) e modelo de produção (II) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013. 102
- Figura 5 - Resistência do solo à penetração na fração de água disponível de 0,7, nos sistemas de manejo do solo e modelo de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. ^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). Londrina, PR, 2013..... 103

ARTIGO 3

- Figura 1 - Relação entre as estimativas de resistência do solo à penetração (RP) pelo modelo de Busscher (1990), para mesmo conjunto de densidades e conteúdo de água, no sistema plantio direto contínuo por 24 anos (RP_{SPDC24}) em relação ao demais tempos de adoção e escarificação do sistema plantio direto: (a) SPDC11; (b) SPDE3; (c) SPDE1; (d) SPC, para as camadas de 0,0-0,10 m (I); 0,10-0,20 m (II) e 0,20-0,30 m (III). Londrina, PR, 2013..... 119

Figura 2 - Variação da resistência do solo à penetração, pelo modelo de Busscher (1990) para cada manejo do solo, em função do conteúdo volumétrico de água do solo na densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, nas camadas de 0,0-0,10 m (a); 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	120
Figura 3 - Relação da macroporosidade determinada por saturação (a,b,c) e da macroporosidade calculada (e,f,g) com a densidade do solo, em função de sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0,0-0,10 m (a,d) 0,10-0,20 m (b,e) e 0,20-0,30 m (c,f) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	125
Figura 4 - Relação da microporosidade com a densidade do solo, em função de sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	127

ARTIGO 4

Figura 1 - Balanço hídrico sequencial conforme Thornthwaite e Mather (1955), por decêndio, no período de outubro de 2011 à setembro de 2012, durante o ciclo das culturas da soja e trigo. Londrina, PR, 2013.	143
Figura 2 - Atributos químicos sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	145
Figura 3 - Atributos químicos sob sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	148
Figura 4 - Altura de planta, altura de inserção do primeiro legume, massa de mil grãos e produtividade da soja sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	151
Figura 5 - Altura de planta (a), altura de inserção do 1º legume (b), massa de mil grãos (c) e produtividade (d) da soja sob diferentes sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	152
Figura 6 - Relação entre a produtividade de grãos de soja e a massa de mil grãos (a), a altura de planta (b) e a altura de inserção do primeiro legume (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	154

Figura 7 - Peso hectolitro (a) e produtividade de grãos (b) de trigo sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	155
Figura 8 - O peso hectolitro (a) e produtividade de grãos (b) de trigo sob sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	156
Figura 9 - Intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Latossolo Vermelho Distroférico, na camada de 0,0-0,10 m (I) 0,10-0,20 (II) e 0,20-0,30 m (III), em função de sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), determinado pela variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($ \Psi = 0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($ \Psi = 1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 2 MPa e 3,5 MPa. Londrina, PR, 2013.	164
Figura 10 - Perfil da variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho Distroférico, sob sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), determinado pela umidade volumétrica do limite superior (porosidade de aeração ou capacidade de campo) e do limite inferior (ponto de murcha permanente ou a resistência a penetração de 2 e 3,5 MPa). Londrina, PR, 2013.....	168
Figura 11 - Densidade do solo crítica em função do intervalo hídrico ótimo com limite inferior crítico de resistência a penetração de 2 MPa (a) e 3,5 MPa (b) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	169
Figura 12 - Percentagem das amostras com densidade do solo (D_s) maior do que a densidade do solo crítica (D_{sc}), com RP de 2 MPa (a) e 3,5 MPa (b), nos diferentes sistemas de manejo em Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	171
Figura 13 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo, na camada de 0,0-0,10 m, em função de sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), nas camadas de 0,0-0,10 m (I); 0,10-0,20 m (II) e 0,20-0,30 m (III), em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	173
Figura 14 - Relação entre a produtividade de grãos de soja (a,b) e trigo (c,d) com a lâmina de água acumulada na camada de 0,0-0,30 m, determinada pelo intervalo hídrico ótimo, utilizando uma resistência à penetração de 2 MPa	

(a,c) ou 3,5 MPa (b,d) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	176
Figura 15 - Relação do intervalo hídrico ótimo utilizando resistência à penetração de 2 MPa (a,c) ou 3,5 MPa (b,d) com o teor de clorofila (a,b) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (c,d) da cultura da soja no estágio reprodutivo R5.3, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	180
Figura 16 - Relação entre a altura de planta de soja e a lâmina de água acumulada de 0,0-0,30 m, determinada pelo intervalo hídrico ótimo, utilizando uma resistência à penetração de 2 MPa (a) ou 3,5 MPa (b) de um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	180
Figura 17 - Relação entre produtividade de grãos de soja com o teor de clorofila (a) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (b) no estágio reprodutivo R5.3. Londrina, PR, 2013.....	181
Figura 18 - Relação entre a produtividade de grãos de soja (a) e trigo (b) com a densidade do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.....	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos manejos do solo realizado em cada um dos tratamentos. Londrina, PR, 2013.....	39
Tabela 2 - Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo. Londrina, PR 2013.....	40

ARTIGO 3

Tabela 1 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$) na camada de 0,0-0,10 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.....	115
Tabela 2 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$) na camada de 0,10-0,20 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.....	116
Tabela 3 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$) na camada de 0,20-0,30 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.....	117
Tabela 4 - Resistência do solo à penetração média entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente para a densidade do solo de $1,30 Mg m^{-3}$, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	121

ARTIGO 4

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e sucessão de culturas, na camada de 0,0-0,10 m, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	157
Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e	

	sucessão de culturas, na camada de 0,10-0,20 m, em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.....	157
Tabela 3 -	Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e sucessão de culturas, na camada de 0,20-0,30 m, em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.....	159
Tabela 4 -	Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,0-0,10 m. Londrina, PR, 2013.	160
Tabela 5 -	Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,10-0,20 m. Londrina, PR, 2013.	161
Tabela 6 -	Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,20-0,30 m. Londrina, PR, 2013.	162

LISTA DE EQUAÇÕES

ARTIGO 1

$D_p = (M_{bs} - M_b) / [50 - (M_{bsa} - M_{bs}) / D_a]$ (1)	49
$D_s = M_{ss} / V_t$ (2)	48
$P_{tc} = 1 - (D_s / D_p)$ (3)	49
$P_{ts} = (m_{su} - m_{ss}) / v_t$ (4)	50
$M_{ic} = (P_{6\text{ kPa}} - m_{ss}) / V_t$ (5)	50
$M_{acc} = P_{tc} - M_{ic}$ (6)	50
$M_{acs} = P_{ts} - M_{ic}$ (7)	50
$P_b = P_{tc} - P_{ts}$ (8)	51

ARTIGO 3

$RP = a D_s^b \theta^c$ (1)	114
$r^2 = 1 - (SQ \text{ resíduo} / SQ \text{ regressão})$ (2)	114

ARTIGO 4

$\theta = a \Psi ^b$ (1)	138
$\theta = \exp(a + b D_s) \Psi^c$ (2)	139
$RP = c \cdot \theta^d \cdot D_s^e$ (3)	139
$r^2 = 1 - (SQ \text{ resíduo} / SQ \text{ regressão})$ (4)	139
$\theta_{cc} = \exp(a + b D_s) 100^c$ (5)	139
$\theta_{PMP} = \exp(a + b D_s) 1.500^c$ (6)	139
$\theta_{rp} = [\theta_{rp} / (c D_s^f)]^{(1/e)}$ (7)	140
$\theta_{ar} = [1 - (D_s / D_p) - 0,10]$ (8)	140

LISTA DE APÊNDICE

Apêndice A - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,0-0,10 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	203
Apêndice B - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,10-0,20 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	204
Apêndice C - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.	205

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	31
2. HIPÓTESES	33
3. OBJETIVO GERAL.....	35
3.1. Objetivos específicos	35
4. MATERIAL E MÉTODOS GERAIS	37
4.1. Localização da área experimental	37
4.2. Tratamentos e histórico da área experimental.....	37
4.3. Implantação e condução das culturas	40
4.4. Avaliações realizadas	41
5. ARTIGO 1: ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E MODELO DE PRODUÇÃO DE LONGO PRAZO.....	43
5.1. Resumo.....	43
5.2. Abstract	44
5.3. Introdução	44
5.4. Material e Métodos	47
5.4.1. Experimento de campo.....	47
5.4.2. Amostragem do solo.....	47
5.4.3. Variáveis determinadas	48
5.4.4. Análise estatística dos dados	52
5.5. Resultados e Discussão	52
5.6. Conclusões	81
5.7. Referências.....	81
6. ARTIGO 2: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO EM SISTEMAS DE MANEJO E MODELOS DE PRODUÇÃO.....	89
6.1. Resumo.....	89
6.2. Summary	89
6.3. Introdução	90
6.4. Material e Métodos	91
6.5. Resultados e Discussão	93
6.6. Conclusões	104
6.7. Referências.....	105

7.	ARTIGO 3: QUANTIFICAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO POR MEIO DA CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	109
7.1.	Resumo	109
7.2.	Abstract.....	110
7.3.	Introdução	110
7.4.	Materiais e Métodos	112
7.4.1.	Determinação da curva de resistência à penetração.....	114
7.4.2.	Análise estatística	114
7.5.	Resultados e Discussão.....	115
7.6.	Conclusões.....	127
7.7.	Referências	128
8.	ARTIGO 4: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA E TRIGO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB SISTEMAS DE MANEJO E MODELO DE PRODUÇÃO.....	131
8.1.	Resumo	131
8.2.	Abstract.....	132
8.3.	Introdução	133
8.4.	Materiais e Métodos	135
8.4.1.	Caracterização da área experimental e tratamentos	135
8.4.2.	Balanco hídrico sequencial	135
8.4.3.	Amostragem de solo para propriedades físicas.....	135
8.4.4.	Amostragem de solo para propriedades químicas	136
8.4.5.	Determinação das propriedades físicas do solo	136
8.4.6.	Determinação das propriedades químicas do solo	137
8.4.7.	Determinação do intervalo hídrico ótimo	138
8.4.8.	Produtividade de grãos, altura de plantas, inserção do primeiro legume, e massa de mil grãos e peso hectolitro	140
8.4.9.	Teor de Clorofila e NDVI da soja.....	141
8.4.10.	Análise estatística	141
8.5.	Resultados e Discussão.....	142
8.6.	Conclusões.....	183
8.7.	Referências	184
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	193
10.	CONCLUSÕES FINAIS	197
	REFERÊNCIAS.....	201
	APÊNDICE	203

1. INTRODUÇÃO GERAL

O sistema plantio direto (SPD) tem sido reconhecido como o sistema de manejo do solo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros. A expansão da área agrícola manejada sob SPD, hoje estimada em cerca de 32 milhões de hectares, só foi possível em função do desenvolvimento contínuo de soluções tecnológicas para superar os problemas e as dificuldades relacionadas ao manejo desse sistema, bem como para aperfeiçoá-lo e adaptá-lo às diferentes regiões do país. No entanto, apesar dos quase 40 anos de pesquisas e observações acumuladas por produtores, técnicos e pesquisadores, alguns problemas ainda persistem e, merecem ser melhor estudados. Dentre eles, destaca-se a existência, em quase todas as áreas sob SPD, de uma camada de maior grau de compactação, geralmente posicionada a 0,1-0,2 m de profundidade (DEBIASI et al., 2010; FRANCHINI et al., 2011; BOTTEGA et al., 2011). Levantamentos de campo realizados pela Embrapa Soja indicam que, em aproximadamente 45% das áreas cultivadas com soja no verão e milho no outono-inverno em solos argilosos do Paraná, o grau de compactação na camada de 0,1-0,2 m é limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas (FRANCHINI et al., 2009; FRANCHINI et al., 2011). A compactação do solo reduz a produtividade das culturas, principalmente em safras caracterizadas por excesso ou deficiência hídrica. Isso porque a degradação da qualidade física do solo diminui o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes às plantas. Além disso, a compactação exerce efeitos negativos sobre o ambiente, aumentando as perdas de água e nutriente, as emissões de gases causadores do efeito estufa e a poluição dos recursos hídricos.

Uma das medidas preconizadas para melhorar a qualidade física de solos compactados é a adoção de sistemas de rotação de culturas que contemplem plantas com elevado potencial de produção de fitomassa e caracterizadas por um sistema radicular abundante, profundo e agressivo. O efeito da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo no SPD foi objeto de diversas pesquisas (GENRO JUNIOR et al., 2009; FRANCHINI et al., 2012), embora ainda persistam dúvidas a respeito da eficiência dessa prática na mitigação de camadas compactadas de solo. Os benefícios da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo nem sempre são detectados, o que pode ser atribuído principalmente ao fato de a maioria dos trabalhos serem embasados em experimentos de curto-médio prazo, sem levar em consideração a fase em que se encontra o SPD. Assim, é necessário que a qualidade física do solo sob sistemas de rotação de culturas seja estudada em experimentos de longo prazo em

SPD, com diferentes tempos de adoção do sistema de manejo. Por outro lado, as informações atualmente disponíveis não são suficientes para indicar sequências de culturas que, em longo prazo, sejam capazes de evitar a formação de camadas compactadas limitantes ao desenvolvimento radicular das culturas e sejam economicamente viáveis de utilização.

A qualidade física é a capacidade do solo proporcionar ao sistema radicular das plantas condições de um ambiente favorável ao seu crescimento e desenvolvimento (SILVA et al., 2009). Para a avaliação dos sistemas produtivos, tem se utilizados diversos indicadores de qualidade física do solo, dentre os mais utilizados, destacam-se a densidade do solo, variáveis de porosidade do solo (MICHELON et al., 2009), resistência do solo à penetração (KLEIN et al., 2009), teor de água no solo, água disponível, índice S (FIDALSKI; TORMENA, 2007), intervalo hídrico ótimo, curva de retenção de água (BLAINSKI et al., 2009, 2012) e, ainda pouco utilizada, a curva de resistência do solo à penetração (BLAINSKI et al., 2008). As principais relações dos indicadores de qualidade física do solo têm sido realizadas com parâmetros morfológicos (área foliar, crescimento de parte aérea e radicular) das culturas, porém, a relação entre compactação do solo em SPD e produtividade de grãos é um assunto com quantidade pequena de publicações científicas, mesmo que já tenham transcorrido 40 anos de SPD (GUBIANI, 2012), mesmo utilizando outros índices, tais como, o intervalo hídrico ótimo, na maior parte das relações com produtividade de grãos os indicadores mais frequentes são a densidade do solo (Ds) e a resistência do solo à penetração (RP) (BEUTLER et al., 2008).

A carência de resultados mais claros a respeito do potencial da rotação de culturas, em preservar e/ou melhorar a qualidade física do solo no SPD, ao longo do tempo constitui-se em uma barreira à adoção da tecnologia pelos produtores que, muitas vezes, optam por métodos mecânicos de controle da compactação, utilizando a escarificação periódica do solo. Nesse contexto, torna-se necessária a obtenção de mais resultados experimentais que contribuam para esclarecer se a utilização da rotação de culturas torna desnecessária a escarificação periódica no SPD. Essa questão é importante quando se considera que, no SPD, a descompactação mecânica, quando utilizada sem necessidade, aumenta os custos e pode influenciar de forma negativa a qualidade estrutural do solo, resultando na quebra da continuidade do espaço poroso e na redução da resistência à compactação pelo tráfego.

2. HIPÓTESES

- (i) A utilização de modelo produção baseado em rotação de culturas, em SPD, são responsáveis pela preservação da qualidade física dos solos ao longo do tempo, evitando a formação de camadas compactadas limitantes ao crescimento e desenvolvimento da soja e do trigo;
- (ii) A realização de escarificação periódica do solo, no SPD, deve ser evitada, quando se utiliza modelos de produção baseados na rotação de culturas, proporcionando redução de custos relacionados com a mecanização agrícola;
- (iii) O efeito residual da escarificação periódica do solo é ampliado em função da utilização de rotação de culturas, porém, persiste por um período inferior a dois anos após a sua implementação.
- (iv) Os limites de RP de 2 MPa são inadequados para Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob SPD consolidado, devem ser alterados em função do sistema de manejo do solo.
- (v) Quanto maior o tempo sem revolvimento do solo, para uma mesma variação de Ds e de conteúdo de água do solo, há incrementos nos valores de RP, em função do aumento de resistência da estrutura de um Latossolo Vermelho Distroférico, porém em SPD não há perdas produtivas.
- (vi) A produtividade de grãos de soja e trigo em SPD escarificado não é incrementada em relação ao SPD contínuo.
- (vii) O aumento do tempo de adoção do SPD favorece melhorias nas condições físicas do solo incrementando a produtividade de grãos de soja e de trigo em relação ao sistema de preparo convencional do solo;
- (viii) O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um bom indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, em sistemas de manejo do solo de longo prazo.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da rotação de culturas, da escarificação periódica e do tempo de adoção do SPD na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico, e na produtividade de grãos de soja e do trigo.

3.1. Objetivos específicos

Determinar o período de duração residual da descompactação mecânica em SPD, com rotação e ou sucessão de culturas, comparando-o ao SPD contínuo ao longo do tempo.

Determinar a capacidade de sistemas de rotação/sucessão de cultura em prevenir e ou reduzir o grau de compactação do solo em SPD ao longo do tempo, e seus efeitos sobre a produtividade da soja e do trigo.

Verificar os efeitos do tempo de adoção do SPD na qualidade física do solo e na produtividade da soja e do trigo.

Quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo do solo e de modelos de produção sobre a RP de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, identificando a necessidade de alteração do limite de RP de 2 MPa para avaliação da qualidade física do solo em função do manejo do solo.

Quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo do solo e modelos de produção sobre a curva de resistência do solo à penetração (CRP) de um Latossolo Vermelho Distroférico e utilizá-la na identificação e descrição da evolução da qualidade física do solo.

Avaliar a eficiência da utilização do IHO como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico em função da relação com a produtividade de grãos de soja e trigo em sistemas de manejo consolidados de longo prazo.

4. MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

4.1. Localização da área experimental

O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, implantado em 1988, localizado na Fazenda Experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Embrapa Soja), situada no distrito da Warta, no município de Londrina, no norte do Estado do Paraná, tendo como coordenadas 23°11' latitude Sul e 51°11' longitude Oeste, e altitude de 620 m. O clima da região é classificado como Cfa (classificação de Köppen), subtropical úmido, mesotérmico, com médias anuais de 20°C de temperatura e de 1.622 mm de precipitação. O solo da área de estudo é de origem basáltica, classificado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como Latossolo Vermelho Distroférrico (SANTOS et al., 2006) com textura muito argilosa, e no Sistema Americano como Rhodic Eutradox (SOIL SURVEY STAFF, 2010). Informações mais detalhadas da descrição morfoestrutural do perfil pedológico do solo deste experimento são obtidas em Piccinin (2005).

4.2. Tratamentos e histórico da área experimental

A Embrapa Soja está localizada na Fazenda Santa Terezinha, desde 1987 (Figura 1). Na área, a vegetação natural foi retirada na metade da década de 60, para iniciar os cultivos de café (*Coffea arabica* L.), cultivado até o ano de 1976, a partir de quando tiveram início os cultivos anuais, com sucessão soja (*Glycine max* (L.) Merr)/trigo (*Triticum aestivum* L.) sob sistema de preparo convencional (aração/gradagem), até o ano de 1986. Nos anos de 1987 e 1988, iniciaram os trabalhos de implantação deste experimento. Visando adequação nos atributos químicos e físicos de toda a área, foi realizada a correção da fertilidade (calagem e adubação) e descompactação (PICCININ, 2005). O preparo do solo, para a instalação das parcelas, foi realizado mediante operações de aração (arado de discos 26") e duas gradagens niveladoras (PICCININ, 2005).

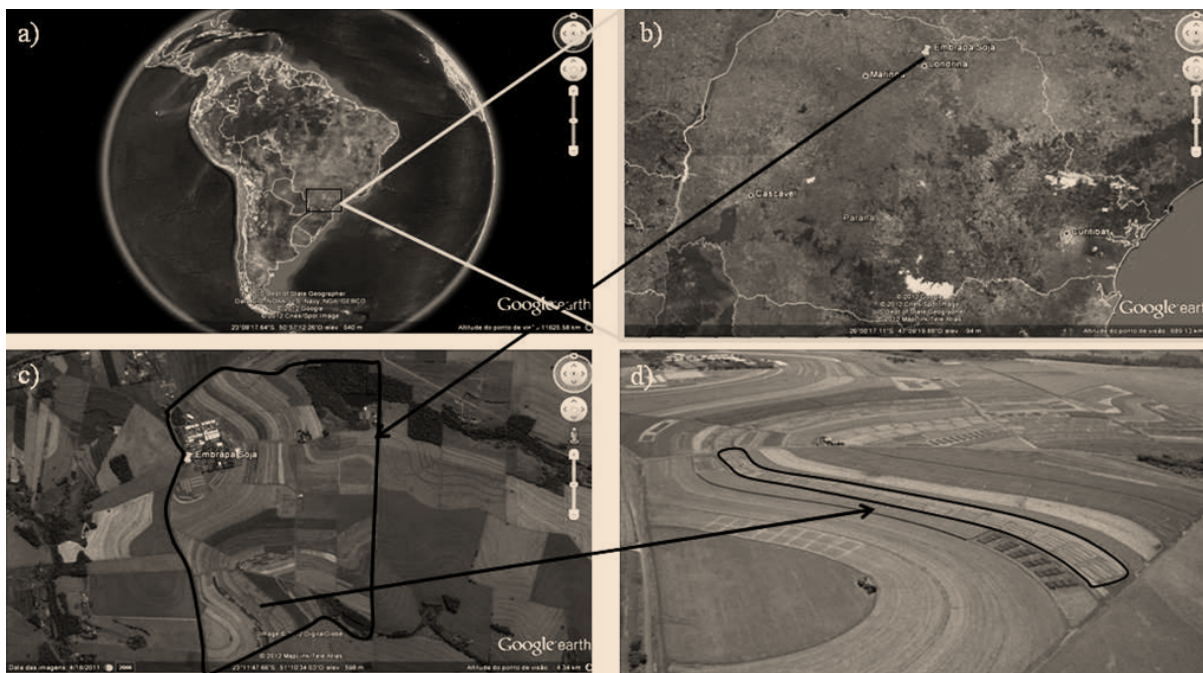


Figura 1 - Imagem de satélite da localização do experimento avaliado. a) Localização do Estado do Paraná no Brasil; b) Localização da Fazenda da Embrapa Soja no Estado do Paraná; c) Fazenda experimental da Embrapa Soja; d) Experimento de longo prazo utilizado neste estudo. Imagens (a,b,c) obtidas no Google Earth (2012) (imagem 13/10/2009). Londrina, PR, 2013.

O delineamento experimental empregado neste estudo foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5×2 (manejo do solo \times modelo de produção), com quatro repetições. As parcelas possuem dimensões de 30×10 m. O fator manejo do solo (Tabela 1) foi constituído pelos seguintes tratamentos: (i) sistema preparo convencional utilizando grade pesada a uma profundidade média de 0,15 m, seguida de grade leve antes de cada cultivo de inverno e verão (SPC); (ii) SPD com escarificação periódica a cada ano (SPDE1); (iii) SPD com escarificação periódica a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos, implantado em 2001 (SPDC11); e (v) SPD contínuo por 24 anos, implantado em 1988 (SPDC24). No SPDC11, entre os anos de 1988 e 2001, o manejo do solo foi realizado com a utilização de arado de aivecas (profundidade média de trabalho de 0,32 m), seguido de gradagem leve antes da cultura de verão, e de gradagem pesada (profundidade média de trabalho de 0,15 m) seguida de gradagem leve antes da implantação da cultura de inverno. O SPDE1 e SPDE3 foram escarificados antes da implantação das culturas de inverno, com escarificador montado tipo Cruzador Carelli MAX (Figura 2), com massa de 360 kg e quatro hastes distanciadas 0,40 m, e profundidade média de trabalho de 0,30 m, com ângulo de ataque de 45° . O escarificador tipo cruzador é ainda composto por um rolo destorroador, com trabalho sem pressão sobre a

superfície do solo, visando o nivelamento do solo. Os manejos do solo foram conduzidos sob dois modelos de produção (Tabela 2): (i) sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glicine max* (L.) Merr) no verão; e (ii) rotação de culturas com ciclo de quatro anos, com as seguintes espécies no inverno-verão: tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja. Maiores detalhes de características físicas e químicas antes da implantação do experimento foram descritas por Piccinin (2005).

Tabela 1 - Descrição dos manejos do solo realizado em cada um dos tratamentos. Londrina, PR, 2013.

Sistema de manejo do solo	Descrição
SPDC24	Sistema plantio direto (SPD) contínuo desde 1988.
SPDC11	SPD contínuo desde 2001.
SPDE1	SPD escarificado com escarificador tipo cruzador ¹ todos os anos antes da implantação da cultura de inverno.
SPDE3	SPD escarificado com escarificador tipo cruzador uma vez a cada três anos (1992; 1995; 1998; 2001; 2004; 2007 e 2010), antes da implantação da cultura de inverno.
SPC	Sistema convencional utilizando grade pesada a uma profundidade média de 0,15 m, seguida de grade leve antes de cada cultivo.

¹Escarificador tipo cruzador carelli MAX, possui 4 hastas distanciadas 0,40 m e profundidade média de trabalho de 0,30 m, com ângulo de ataque de 45° (Figura 2).



Figura 2 - Escarificador tipo Cruzador Carelli MAX, utilizado no sistema plantio direto escarificado a cada ano (SPDE1) e a cada três anos (SPDE3). Londrina, PR 2013.

Tabela 2 - Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo. Londrina, PR 2013.

Modelo de produção	Ciclos							
	1989-1993-1997- 2001-2005-2009		1990-1994-1998- 2002-2006-2010		1991-1995-1999- 2003-2007-2011		1988-1992-1996- 2000-2004-2008- 2012	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
Rotação	Tremoço/ Nabo	Milho	Aveia	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Sucessão	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja

4.3. Implantação e condução das culturas

A cada três anos foram aplicadas, em média, 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico na superfície do solo, para atingir 60% de saturação da capacidade de troca de cátions por bases e 5,5 de pH em água. Em cada safra, todos os tratamentos receberam as mesmas quantidades de fertilizantes, definidas com base na análise química de solo e nas recomendações para cada cultura. Os fertilizantes (N, P₂O₅ e K₂O) foram aplicados juntamente com a semeadura das culturas, localizados 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. Para a cultura da soja, não foi aplicado N mineral, sendo as sementes inoculadas com *Bradyrhizobium elkanii* e *B. japonicum*. Para as culturas de trigo e milho não foi aplicado N como adubação de cobertura. As quantidades de fertilizantes aplicados em cada cultura e safra encontram-se em Franchini et al. (2012). Para as plantas de cobertura (aveia preta e tremoço branco) não foram aplicados fertilizantes.

As parcelas cultivadas com as culturas do trigo e de cobertura do solo no inverno (tremoço branco ou aveia preta) foram semeadas nos meses de abril em todos os anos agrícolas, desde o início do experimento. As culturas de soja e o milho (quando utilizado como rotação) foram semeados nos meses de novembro de cada ano agrícola. A semeadura, o manejo da cultura, e o controle de ervas daninhas, pragas e doenças seguiram as indicações técnicas para as culturas de soja, milho e trigo para a região, e foram as mesmas para todos os tratamentos. No SPD, a vegetação presente na área, antes da semeadura das culturas, foi dessecada com o herbicida glifosato (na dosagem de 720 g ia ha⁻¹) misturada com óleo mineral (0,5 L ha⁻¹).

No ano agrícola de 2011/12 foi utilizada a cultivar de soja BRS 316 RR, semeada no dia 01 de novembro de 2011, por meio de uma semeadora-adubadora equipada com cinco

linhas espaçadas de 0,45 m, mecanismos sulcadores do tipo facão guilhotina para o adubo e discos duplos desencontrados para a semente, regulada de forma a se obter uma população de 250 mil plantas ha^{-1} . A cultivar de trigo BRS Tangará foi semeada no dia 03 de maio de 2012 por meio de uma semeadora-adubadora com 13 linhas espaçadas 0,17 m e sulcadores do tipo discos duplos desencontrados para o adubo e a semente, regulado para distribuir 300 sementes viáveis m^{-2} .

4.4. Avaliações realizadas

O material e as metodologias envolvidas nas avaliações, assim como o procedimento estatístico adotado para a análise dos dados, serão descritos detalhadamente em cada um dos estudos que compõem este trabalho.

5. ARTIGO 1: ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E MODELO DE PRODUÇÃO DE LONGO PRAZO

5.1. Resumo

A sustentabilidade do sistema produtivo está vinculada a preservação da qualidade física dos solos ao longo do tempo. Para tanto, é necessário a utilização de práticas de manejo adequadas que favoreçam a formação e preservação da estrutura do solo em níveis de compactação adequados ao desenvolvimento das plantas. Objetivou-se determinar o potencial de modelo de produção e manejos do solo em preservar e/ou reduzir o grau de compactação do solo em sistema plantio direto (SPD) ao longo do tempo, determinando o período residual das intervenções mecânicas em SPD. O experimento foi conduzido em um delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5x2 (manejos do solo x modelos de produção), com quatro repetições. Os sistemas de manejo do solo foram: (i) sistema de preparo convencional (SPC); (ii) SPD escarificado a cada ano (SPDE1); (iii) SPD escarificado a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos (SPDC11); (v) SPD contínuo por 24 anos (SPDC24). O fator modelo de produção foi composto por: (i) rotação e; (ii) sucessão de culturas. Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Os atributos físicos do solo avaliados foram a densidade e distribuição do tamanho de partículas, densidade do solo, macro, micro e porosidade total, os poros bloqueados, a condutividade hidráulica saturada e a taxa de infiltração tridimensional de água no campo. Os resultados indicaram que não houve interação entre os fatores e não foram observadas alterações no solo em função do uso dos diferentes modelos de produções. Os manejos do solo e modelo de produção não alteraram a distribuição do tamanho e densidade das partículas. O efeito residual da escarificação do solo se restringiu ao período de um ano e até na profundidade de 0,20 m. O uso do SPC ocasionou a pulverização da camada de 0,0-0,10 m, e elevou a níveis críticos os valores de Ds e macroporosidade das camadas abaixo de 0,10 m. A escarificação do solo a cada ano, ou a cada três anos, em relação ao SPDC24, não possibilitam incrementos dos valores de infiltração tridimensional e de condutividade hidráulica saturada do solo no campo na profundidade de 0,10 m. Os resultados indicaram que a escarificação periódica do solo em SPD é dispensável, independente do modelo de produção, pois seus efeitos residuais persistem por um período inferior ou igual a 10 meses. O incremento do tempo de adoção do SPD de 11 para 24 anos favoreceu melhorias na qualidade física do solo.

Palavras-chave: Densidade do solo. Sistema plantio direto. Escarificação do solo. Qualidade do solo.

PHYSICAL ATRIBUTES OF A RHODIC EUTRUDOX UNDER DIFFERENT CROPPING AND TILLAGE SYSTEMS OF LONG TERM

5.2. Abstract

The sustainability of the production system is linked to preservation of soil physical quality over time. Therefore, it is necessary to use appropriate tillage practices that favor the formation and preservation of soil structure under compaction levels suitable for plant development. The objective of this study was to determine the potential of tillage and cropping systems to preserve or reduce the degree of soil compaction in no-tillage (NT) over time and determine the residual period of mechanical interventions in NT. The experiment was a 5x2 factorial (tillage systems vs cropping systems), laid out in a complete randomized block design with four replications. The tillage systems include: (i) conventional tillage by disk harrow (CT); (ii) NT with chiseling every year (NTC1); (iii) NT with chiseling every three years (NTC3); (iv) NT for 11 consecutive years (NT11) and; (v) NT for consecutive 24 years (NT24). The cropping factors were: (i) crop rotation and (ii) crop succession. Undisturbed soil samples were collected from soil depths, 0.0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. The soil physical properties evaluated include particle density and particle size distribution, bulk density, total porosity macroporosity and microporosity, blocked pores, and in-situ three-dimensional infiltration rate and saturated hydraulic conductivity. The results indicated that there was no interaction between factors and no changes were observed in the soil due to the use of different cropping systems. Cropping and tillage systems did not change the particle size distribution and density. The residual effect of soil chiseling was restricted to a period of one year and up to the depth, 0.20 m. CT caused a pulverized layer of 0.0-0.10 m, and increased the critical levels of BD and macroporosity of the layers below 0.10 m. Soil chiseling every year, or every three years, compared to NT24, did not allow increment in the three-dimensional infiltration rate and saturated hydraulic conductivity in the field at a depth of 0.10 m. The results indicated that periodic soil chiseling in NT is expendable, regardless of the cropping systems, because their residual effects persist for a period not exceeding 10 months. The increment of time of adoption of the NT from 11 to 24 years favored improvements in soil physical quality.

Key words: Bulk density. No-tillage. Soil chiseling. Soil quality.

5.3. Introdução

Com o aumento do tempo de uso do sistema plantio direto (SPD), os atributos físicos dos solos têm sido modificados, necessitando, portanto, de pesquisas com períodos de duração mais longos para estudar os fenômenos ligados à sua estrutura (ASSIS; LANÇAS,

2005). As modificações provocadas pelo revolvimento na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico, alteram as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas (SILVA, M. A. S. et al., 2005). A conservação do solo e da água interfere na sustentabilidade do sistema produtivo, necessitando assim de várias práticas de conservação para preservação da qualidade física, química e biológica destes recursos naturais.

A compactação do solo, além de aumentar a resistência do solo à penetração das raízes (CAVALIERI et al., 2006), o que limita a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010), reduz a porosidade total, macroporosidade, aeração, capacidade de infiltração de água (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) e condutividade hidráulica (SILVA, V. R. et al., 2009). Essas modificações podem diminuir a produtividade das culturas, especialmente em anos secos e/ou com excesso de chuvas (TORRES; SARAIVA, 1999; FRANCHINI et al., 2009), bem como aumentar as perdas de água, solo e nutrientes, as emissões de gases causadores do efeito estufa e a poluição dos recursos hídricos (LIPIEC et al., 2003), prejudicando ainda o desempenho das máquinas agrícolas (TULLBERG, 2000; SILVA, V. R. et al., 2000). Reduções na taxa de difusão de alguns nutrientes tais como o fósforo, em função do aumento do grau de compactação do solo, têm sido observadas em alguns trabalhos (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001), aumentando a resposta das culturas ao incremento nas doses de fertilizantes empregadas (BEUTLER; CENTURION, 2004).

O grande problema que o SPD vem sofrendo é a formação de uma camada com maior grau de compactação, a qual se localiza, geralmente, em uma profundidade equivalente a 0,08-0,20 m (FRANCHINI et al., 2009; GENRO JUNIOR et al., 2009; SECCO et al., 2009). Para reduzir este problema, alguns pesquisadores vêm indicando a utilização da escarificação periódica do solo (CAMARA; KLEIN, 2005; KLEIN et al., 2009) como ferramenta para romper camadas compactadas. Desde que bem executada, a escarificação é capaz de romper camadas compactadas de solo de modo imediato (KLEIN; CAMARA, 2007), mas seus efeitos persistem, em geral, por um período efêmero, igual ou inferior a um ano (VEIGA et al., 2007; DEBIASI et al., 2009; REICHERT et al., 2009; SILVA, S. G. C. et al., 2012), uma vez que essa operação não elimina a causa do problema (FRANCHINI et al., 2009). Neste sentido, a utilização de sistemas de rotação de culturas que contemplem plantas com elevado potencial de produção de fitomassa e dotadas de um sistema radicular abundante e agressivo vem sendo indicada como opção para evitar a formação de camadas compactadas e melhorar a qualidade física do solo. Tal recomendação baseia-se na formação de agregados (SILVA;

MIELNICZUK, 1997) e na abertura de bioporos (SILVA; ROSOLEM, 2002; SILVA, V. R. et al., 2009) pelo sistema radicular das plantas envolvidas nos sistemas de rotação, bem como no aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) (OADES, 1993; PICKLER et al., 2012). Por outro lado, a escarificação nem sempre resulta em aumentos na produtividade das culturas (FRANCHINI et al., 2011). Enquanto que, em alguns trabalhos, aumentos de produtividade do trigo (KLEIN et al., 2008) e milho (SECCO et al., 2009) foram atribuídos à escarificação esporádica no SPD, em outros (COLLARES et al., 2006, 2008; DEBIASI et al., 2010; FRANCHINI et al., 2011), essa prática reduziu a produtividade de culturas como a soja, o milho, o trigo e o feijão. A decisão em torno da necessidade ou não da escarificação no SPD deve ser criteriosa, tendo vista o custo relativamente elevado da operação, o aumento da suscetibilidade do solo à compactação pelo tráfego, a destruição da estrutura e a redução da cobertura do solo (REICHERT et al., 2007). Assim, Tavares Filho et al. (2006) recomendam que sistemas que incluam a rotação de culturas e a adoção de culturas de cobertura devem ser a primeira opção para melhorar a qualidade física do solo em áreas sob SPD.

Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e, assim, de alta efetividade para a transmissão de água e ar (OADES, 1993). Dexter (1991) assinala que os bioporos não modificam a densidade média do solo, pois a acomodação das raízes é feita à custa da redução do espaço poroso do solo localizado ao redor das mesmas. Mesmo assim, os bioporos podem diminuir a RP (TARAWALLY et al., 2004), aumentar a friabilidade (CHAN; HEENAN, 1996) e a condutividade hidráulica saturada (ABREU et al., 2004) do solo. Além disso, os bioporos atenuam os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento das plantas, pois, após a decomposição das raízes, os mesmos podem ser utilizados pelo sistema radicular de outras culturas para atravessar camadas compactadas (SILVA; ROSOLEM, 2002). Diante do exposto, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) sistemas de rotação de culturas, em SPD, são responsáveis pela preservação da qualidade física dos solos ao longo do tempo, evitando a formação de camadas compactadas limitantes ao crescimento e desenvolvimento da soja; (ii) a escarificação periódica do solo, no SPD, é dispensável, quando se utiliza modelos de produção baseados na rotação de culturas, proporcionando redução de custos relacionados com a mecanização agrícola; e (iii) a qualidade física do solo é melhorada em função do aumento do tempo de adoção do SPD.

Os objetivos deste trabalho foram: (i) determinar o potencial de dois modelos de produção, em preservar e/ou reduzir o grau de compactação do solo em SPD ao longo do

tempo; e (ii) determinar o período de duração residual da descompactação mecânica em SPD, com rotação e ou sucessão de culturas, comparando-o ao SPD contínuo ao longo do tempo.

5.4. Material e Métodos

5.4.1. Experimento de campo

A descrição geral do experimento bem como as informações de tratamentos, implantação e condução do experimento de campo foram apresentadas no item 4 desta dissertação.

5.4.2. Amostragem do solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em três camadas do solo (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 m), usando anéis de aço inox com volume de 100 cm³ (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno), utilizando um dispositivo amostrador de solo, acoplado a um trator, de modo que os anéis sejam inseridos verticalmente no solo, sem que haja impacto (Figura 3). Foram coletados 20 anéis por tratamento e camada (cinco repetição por parcela), nas entrelinhas não trafegadas da cultura de verão, totalizando 600 amostras.

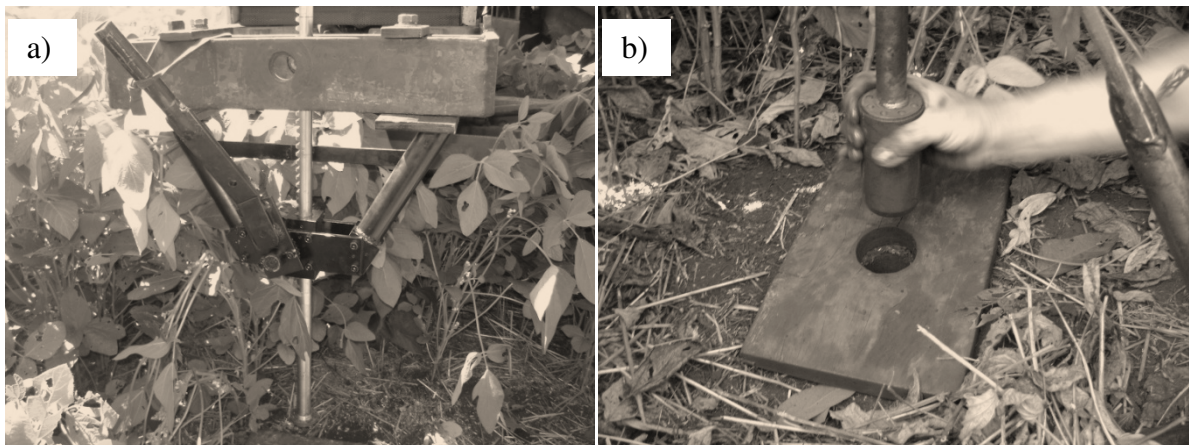


Figura 1 - Equipamento amostrador de solo acoplado em um trator (a) e detalhe do cilindro contendo a amostra indeformada de solo. Londrina, PR, 2013.

O excesso de solo dos anéis foi removido cuidadosamente com auxílio de uma lâmina, revestindo a parte superior e inferior com uma tampa plástica, sendo as amostras armazenadas em caixas com estrutura de proteção para o transporte, evitando deformação e o ressecamento do solo. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório onde permaneceram sob refrigeração ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) para inibir a atividade microbológica bem como eventos que modificam a estrutura do solo, como a germinação de sementes ou a atividade de insetos e minhocas até a sua preparação para análise.

5.4.3. Variáveis determinadas

5.4.3.1. Densidade do solo

No laboratório, foi retirado o excesso de solo e realizada a limpeza externa dos anéis. As amostras foram levadas para estufa, a 105°C , por aproximadamente 24 horas, até peso constante (EMBRAPA, 1997). A equação 2 foi utilizada para determinar a D_s .

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (1)$$

Onde, D_s = Densidade do solo (Mg m^{-3}); M_{ss} = massa da amostra de solo seca à 105°C ; V_t = volume total do anel.

5.4.3.2. Distribuição do tamanho de partículas

Após a determinação da D_s , foi utilizado o solo contido nos anéis volumétricos de quatro repetições por tratamento e camada avaliada para a determinação da distribuição do tamanho de partículas, totalizando 120 amostras. Para a determinação da textura do solo, foi utilizado o método da pipeta. Este método tem como princípio a velocidade de queda das partículas que compõem o solo (EMBRAPA, 1997). Conforme Embrapa (1997) utiliza-se 20 g de solo seco em estufa (60°C), com 100 ml de água e 10 ml de solução normal de hidróxido de sódio (NaOH) a 6%, sendo agitado manualmente por 15 minutos, e deixado em repouso

por uma noite. A agitação mecânica é realizado com um agitador horizontal, velocidade de oscilação de 120 rpm, durante 1 hora.

5.4.3.3. Densidade de partículas

Após a determinação da D_s , foi utilizado o solo contido nos anéis volumétricos de quatro repetições por tratamento e camada avaliada para a determinação da densidade de partícula, totalizando 120 amostras. Foi utilizada a metodologia do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006), a qual visa determinar o volume de álcool que é necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA). A densidade de partículas foi quantificada através da equação 1.

$$D_p = \frac{(M_{bs} - M_b)}{\left[50 - \frac{(M_{bsa} - M_{bs})}{D_a} \right]} \quad (2)$$

Onde, D_p = densidade de partículas do solo ($Mg\ m^{-3}$); M_b = massa do balão volumétrico (g); M_{bs} = massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} = massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g); V_a = volume de álcool gasto para completar o volume do balão contendo o solo (ml); e D_a = densidade do álcool ($g\ cm^{-3}$).

5.4.3.4. Macro, micro e porosidade total do solo

A porosidade total do solo, ou seja, o volume vazio do solo que pode estar ocupado por água ou ar, foram obtidas de duas formas. A primeira foi indiretamente, através da relação existente entre a D_s e a densidade de partículas, conforme metodologia proposta por Embrapa (1997) (Equação 3). Já a segunda maneira de determinação da porosidade total do solo foi através da equação 4, que utiliza a diferença entre a massa saturada do solo (período de saturação de 48 a 72 horas) e a massa de solo seco em estufa a $105^\circ\ C$ (EMBRAPA, 1997).

$$P_{tc} = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (3)$$

Onde, P_{tc} = porosidade total calculada ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); D_p = densidade de partículas ($Mg m^{-3}$).

$$P_{ts} = \frac{(m_{su} - m_{ss})}{V_t} \quad (4)$$

Onde, P_{ts} = porosidade total por saturação ($m^3 m^{-3}$); m_{su} = massa de solo úmida ($kg kg^{-1}$); m_{ss} = massa de solo seco ($kg kg^{-1}$); v_t = volume total ($m^3 m^{-3}$).

A microporosidade do solo foi determinada em todas as 600 amostras, as quais foram saturadas por capilaridade durante 48 a 72 horas. Posteriormente, as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão, onde foram submetidas à tensão de sucção de 6 kPa por 48 horas, para que se estabelecesse o equilíbrio entre a água retida na amostra e a sucção aplicada. Esta tensão é suficiente para drenar a água presente nos macroporos do solo (poros $> 50 \mu m$) (OLIVEIRA, 1968). Após o equilíbrio do conteúdo de água nesta tensão, foi determinada a massa do solo úmido e a amostra foi encaminhada para estufa a $105^\circ C$, obtendo-se o conteúdo de água neste potencial (EMBRAPA, 1997). A microporosidade foi determinada através da equação 5, que utiliza a relação entre o conteúdo de água retido na tensão de 6 kPa e o volume total ocupado pelo solo.

$$M_{ic} = \frac{(P_{6kPa} - m_{ss})}{V_t} \quad (5)$$

Onde, M_{ic} = Microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$); P_{6kPa} = massa de solo após a tensão de 6 kPa (g); m_{ss} = massa de solo seco (g); V_t = volume total do anel (cm^3).

A macroporosidade do solo, tal como a porosidade total, foi calculada de duas maneiras. A primeira foi por diferença, subtraindo-se o conteúdo de água equivalente à microporosidade do conteúdo de água equivalente à porosidade total calculada (Equação 6) (EMBRAPA, 1997). A segunda forma de cálculo foi utilizando a diferença do conteúdo de água presente na microporosidade do solo com o conteúdo de água na saturação do solo, correspondente à porosidade total determinada por saturação (Equação 7) (EMBRAPA, 1997).

$$M_{acc} = P_{tc} - M_{ic} \quad (6)$$

Onde, M_{acc} = Macroporosidade do solo calculada ($m^3 m^{-3}$); P_{tc} = Porosidade total calculada ($m^3 m^{-3}$); M_{ic} = Microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$).

$$\text{Macs} = \text{Pts} - \text{Mic} \quad (7)$$

Onde, Macs = Macroporosidade do solo por saturação do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Pts = Porosidade total por saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Mic = Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A diferença entre a quantidade de poros por saturação e calculada é considerada como poros bloqueados (Equação 8) (CAMARGO et al., 2009). Estes poros são macroporos que não retém ou não conduzem água dentro da amostra indeformada do solo. Estes poros não são preenchidos por água durante o processo de saturação das amostras.

$$\text{Pb} = \text{Ptc} - \text{Pts} \quad (8)$$

Onde, Pb = Poros bloqueados do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ptc = Porosidade total calculada; Pts = Porosidade total por saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A taxa de infiltração tridimensional de água no solo saturado e a condutividade hidráulica do solo saturado no campo foram determinadas nas profundidades de 0,10 e 0,20 m. A infiltração tridimensional considera as componentes direcionais dos fluxos na vertical, horizontal e no declive (PREVEDELLO; REICHARDT, 1991; MIGUEL et al., 2009). Para tanto, abriu-se um orifício no solo, com um extrator de amostras indeformadas de solo, com diâmetro de 5,6 cm, até a profundidade desejada. A taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica foram medidas em duas repetições por parcela com o permeâmetro modelo IAC (infiltrômetro de pressão em profundidade). O permeâmetro funciona pelo princípio de Mariotte, em condições de campo, através do fornecimento de água ao solo com carga hidráulica controlada (POTT; De MARIA, 2003). Foi utilizada carga hidráulica constante de 5 cm, conforme Vieira (1998), Miguel et al. (2009).

Os cálculos da condutividade hidráulica saturada de campo (Kfs) e da infiltração saturada tridimensional, foram realizados com o auxílio do programa computacional ONEHEAD.EXE, que utiliza a equação básica para a condição de fluxo sob carga constante, dentro do orifício cilíndrico, conforme descrito em Villela (2007). Para a determinação da infiltração saturada tridimensional, foi utilizada a taxa de fluxo constante e a geometria do orifício, pela relação entre o volume de água infiltrada e a área molhada do orifício, conforme Miguel et al. (2009).

5.4.4. Análise estatística dos dados

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, fatorial 2x5 (modelo de produção x manejo do solo), em quatro repetições. Foi realizada a comparação estatística isolada para cada camada amostrada (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). Os resultados foram submetidos à análise de variância (Teste F, $p < 0,05$). Quando o efeito dos tratamentos foi significativo em nível de 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias dos modelos de produção e ou manejos do solo em cada uma das camadas avaliadas foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro. Os dados foram analisados por meio do programa estatístico computacional SAS LEARNING EDITION (2002), e os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®10.0 (Systat software, Inc.).

5.5. Resultados e Discussão

A análise de variância indicou que não houve efeito de interação entre os sistemas de manejo do solo e os modelos de produção para nenhuma variável analisada, em ambas as camadas estudadas (Apêndice A, B, C). Assim, para todas as variáveis, a análise estatística foi executada em separado para cada fator (manejos do solo e modelos de produção). A ausência de interação entre o manejo do solo e os modelos de produção corrobora com Spera et al. (2011), os quais não observaram interação sobre os atributos físicos do solo.

Como esperado, a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila) não foi afetada pelos modelos de produção (Figura 2) e ou sistemas de manejo do solo (Figura 3). Isto indica que estas características são muito pouco influenciadas mesmo após 24 anos com diferentes manejos do solo, concordando com Stone et al. (2012) e Ferreira (2010), os quais afirmam que a textura do solo não é alterada pelo manejo do solo. Na camada de 0,0-0,10 m, o solo apresentou os teores médios de 73,17; 19,59 e 7,25 %, para o teor de argila, silte e areia, respectivamente. Na camada de 0,10-0,20 m, o solo teve um teor de 75,78; 18,26 e 6,00 % de argila, silte e areia, respectivamente. Já na camada de 0,20-0,30 m, o teor médio de argila, silte e areia foi de 77,46; 15,61 e 6,93 %, respectivamente. O teor de argila praticamente se mantém constante com o incremento da profundidade do solo, característica

apresentada pela classe dos Latossolos (ANJOS et al., 2012). Este comportamento foi diferente do observado entre os horizontes Ap e BA de um Argissolo Amarelo, onde Santos e Ribeiro (2000) atribuíram a redução do teor de argila do horizonte superficial ao revolvimento intenso do solo, associado ao excesso de água aplicada na irrigação, favorecendo o processo de eluviação. As alterações na textura dos solos estão ligadas diretamente as características morfológicas dos solos, portanto, em Latossolos a textura do solo é uma das características mais difíceis de serem alteradas.

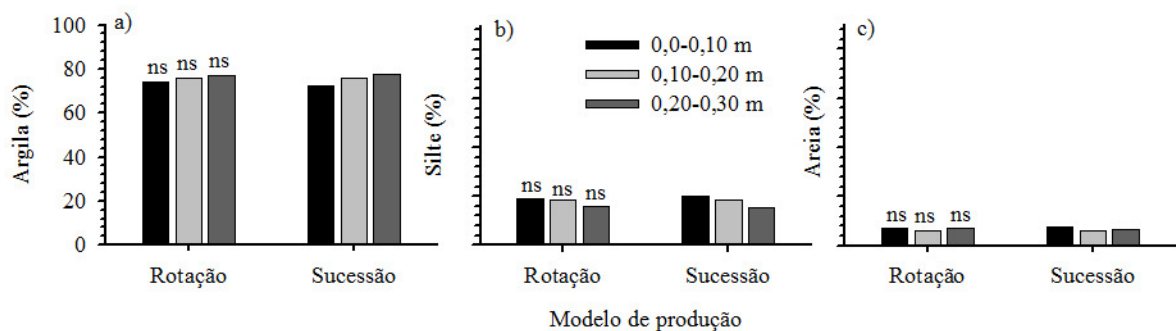


Figura 2 - Distribuição do tamanho de partículas em função de modelos de produção (rotação e sucessão de culturas) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Os resultados de densidade de partículas não foram alterados, em nenhuma das camadas avaliadas, em função dos modelos de produção (Figura 4) ou pelos manejos do solo (Figura 5). Isto demonstra que, a densidade de partículas é uma característica intrínseca dos solos, a qual não sofre alterações em função do manejo, concordando com Viana et al. (2011), os quais afirmam que houve ausência de modificações desse atributo com o manejo ou uso do solo. Todas as camadas avaliadas (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) apresentaram uma densidade de partículas média de $2,90 \text{ Mg m}^{-3}$, indicando homogeneidade entre as camadas. Estes valores são mais altos do que os valores médios indicados para condições de solos tropicais e subtropicais, os quais, em função de uma média da composição mineralógica do solo, são estimados em $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ (KLEIN, 2012). Estes elevados valores de densidade de partículas, observados neste Latossolo Vermelho Distroférico, estão relacionados à presença de altos teores de óxidos de ferro, os quais contribuem para que a média geral da densidade das partículas seja mais elevada do que os valores tradicionais utilizados como referência.

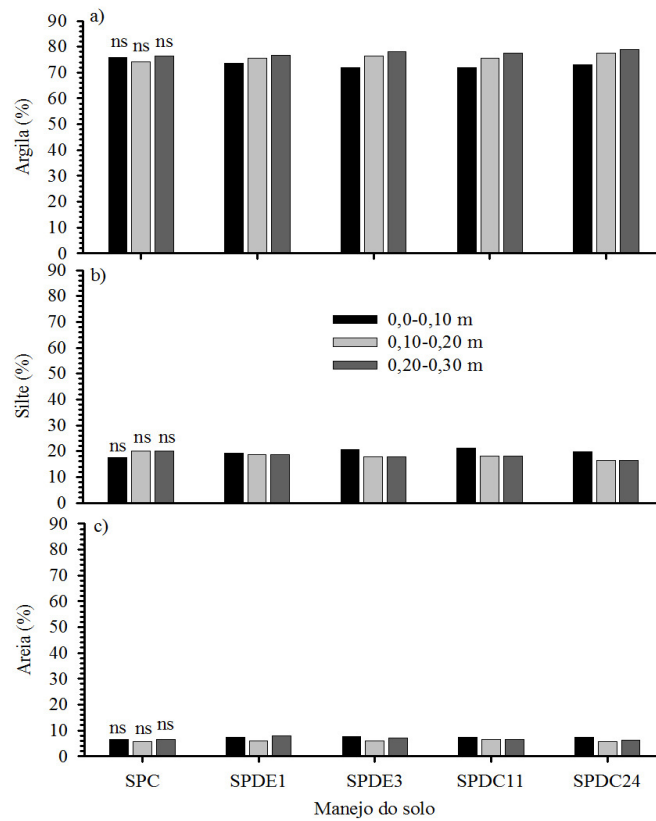


Figura 3 - Distribuição do tamanho de partículas em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

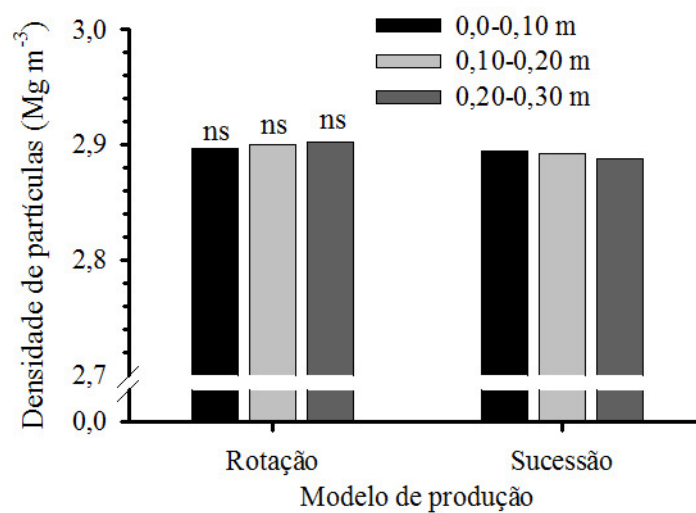


Figura 4 - Densidade de partículas em função dos modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

A densidade de partículas é uma propriedade importante dos solos, pois é através dela que é possível calcular indiretamente a porosidade total (EMBRAPA, 1997; GUBIANI et al., 2006). Para a correta determinação indireta da porosidade total do solo, garantindo a caracterização adequada das alterações estruturais do solo em função do manejo, é necessário a obtenção de valores reais da densidade de partículas.

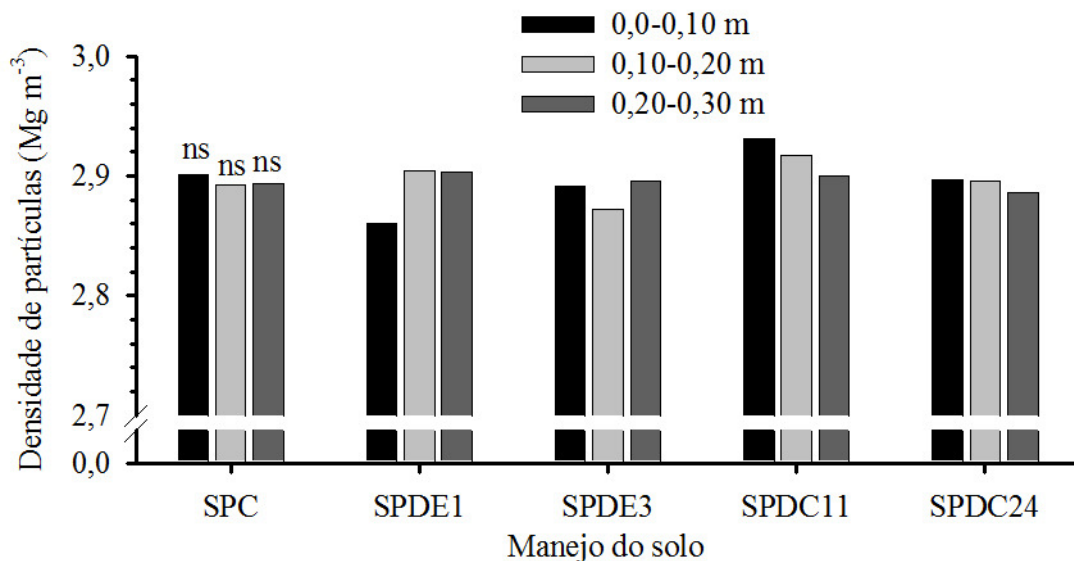


Figura 5 - Densidade de partículas em função do manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Os resultados de Ds não apresentaram diferenças significativas entre os modelos de produção (rotação e/ou sucessão de culturas) nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 6). Na camada de 0,20-0,30 m, houve uma menor Ds no modelo sob sucessão de culturas. Observa-se que um dos motivos para não haver alterações da Ds, nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, em função do modelo de produção, pode estar relacionado à baixa sensibilidade deste indicador da qualidade física do solo em identificar mudanças estruturais do solo. Muitas vezes mudanças na continuidade de poros e formação de poros biológicos não são identificadas por métodos tradicionais de avaliação da qualidade física do solo (REICHERT et al., 2011). Em SPD, os espaços deixados pelas raízes das culturas produzem poros contínuos que facilitam o fluxo saturado de água (TORRES et al., 2011), favorecendo a aeração e a entrada de água (REICHERT et al., 2011).

Neste sentido interações, entre modelos de produção e manejos do solo, podem não ter sido detectados em função da sensibilidade deste método de avaliação. Outro fator que pode ter influenciado na redução das diferenças entre os modelos de produção está relacionado com as sequências de plantas utilizadas. O modelo de rotação de culturas avaliado neste trabalho pode ser pouco intensificado, ou seja, as espécies vegetais utilizadas na rotação e na sucessão de culturas, após o segundo ano de cultivo são iguais entre si (soja no verão e trigo no inverno). A ausência de modelos de produção baseados na rotação de culturas acarreta o surgimento de alterações de ordem química, física e biológica no solo, que podem comprometer a estabilidade do sistema produtivo (FRANCHINI et al., 2011). Neste mesmo experimento de longo prazo, avaliando o SPD contínuo entre 1988 a 2006, Franchini et al. (2011) observaram na camada de 0,0-0,10 m, que a Ds foi menor na rotação do que na sucessão de culturas em seis de nove amostragens de solo. Estes mesmos autores observaram que os efeitos benéficos da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo foram ainda mais evidentes na camada de 0,10-0,20 m onde, das nove amostragens, em oito a Ds foi mais elevada na sucessão trigo/soja do que na rotação de culturas.

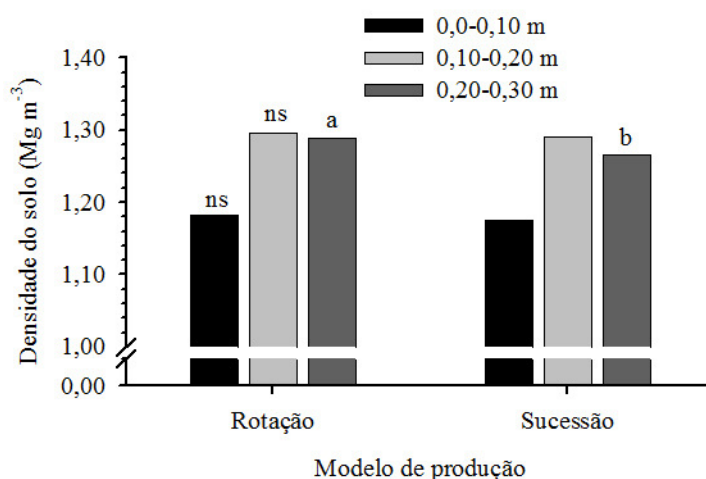


Figura 6 - Densidade do solo em função dos modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ao longo do tempo, há variações estruturais em função da atuação dos sistemas radiculares das culturas e da matéria orgânica do solo, porém, estes efeitos podem não ser

identificados através de métodos tradicionais de avaliação da qualidade física do solo. No SPD ao longo do tempo, há a formação de poros longos e contínuos pela atividade biológica no solo, e estes poros resultam em regiões com menor resistência para o crescimento radicular das culturas. A formação de camadas compactadas no solo causa principalmente uma redução do tamanho dos poros oriundos da atividade biológica (bioporos) (LIMA, H. V. et al., 2005). A formação de poros contínuos no perfil do solo é favorecida pela alternância de sistemas radiculares das plantas, principalmente quando estes são fasciculados, os quais produzem diversos poros pequenos ao longo das principais camadas com interferência de grande parte do sistema radicular das plantas (até aproximadamente 0,30 m de profundidade). Porém, outros estudos corroboram com este, onde não foi possível identificar através de atributos tradicionais (por exemplo, a D_s), melhorias na qualidade física do solo e redução do grau de compactação do solo, em função da inclusão de plantas de cobertura de solo com sistema radicular abundante e formador de poros biológicos (GENRO JUNIOR et al., 2004).

A D_s , nas três camadas avaliadas (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), foi alterada pelos sistemas de manejo do solo (Figura 7). Observa-se que a utilização de grade pesada após cada cultivo (SPC), e a escarificação do solo todo ano (SPDE1), quando comparados com o SPDC11 e SPDC24, reduziram a D_s na camada de 0,0-0,10 m. No SPC, há a formação evidente de uma camada com maior grau de compactação abaixo de 0,10 m. Esta camada compactada está presente no mínimo até 0,30 m de profundidade. No SPC há mudanças estruturais evidentes entre as camadas do perfil do solo, com aumento da D_s de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada de 0,0-0,10 m, para valores de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ nas camadas entre 0,10-0,30 m, podendo apresentar problemas relacionados ao crescimento radicular das culturas, além de apresentar impedimentos nas trocas gasosas, líquidas e térmicas no perfil do solo, principalmente abaixo de 0,10 m. Esse resultado indica que a atuação da grade pesada é de 0,10 m e, abaixo desta profundidade, há a formação de um “pé de grade”, concordando com Reichert et al. (2007), os quais afirmam que no SPC essa camada compactada é resultante da transferência da pressão aplicada na superfície pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. Portanto, a utilização de SPC, favorece a degradação da estrutura do solo, causando rompimento dos poros contínuos entre a superfície com camadas abaixo de 0,10 m. Permanecendo poros grandes na superfície do solo (0,0-0,10 m) e poros pequenos abaixo de 0,10 m, o que possivelmente interrompa o fluxo ascendente de água no perfil do solo. A utilização de sistemas de manejo que favoreçam a preservação da continuidade dos poros no perfil do solo favorece o fluxo ascendente de água no solo (RICHARD et al., 2001), e assim, possibilita que a água seja redistribuída às plantas em períodos com escassez de precipitações

pluviais (PREVEDELO et al., 2007). Além de que, a formação de poros contínuos possibilita que as raízes se aprofundem no solo, possibilitando extrair a água armazenada ao longo do perfil (REICHERT et al., 2011).

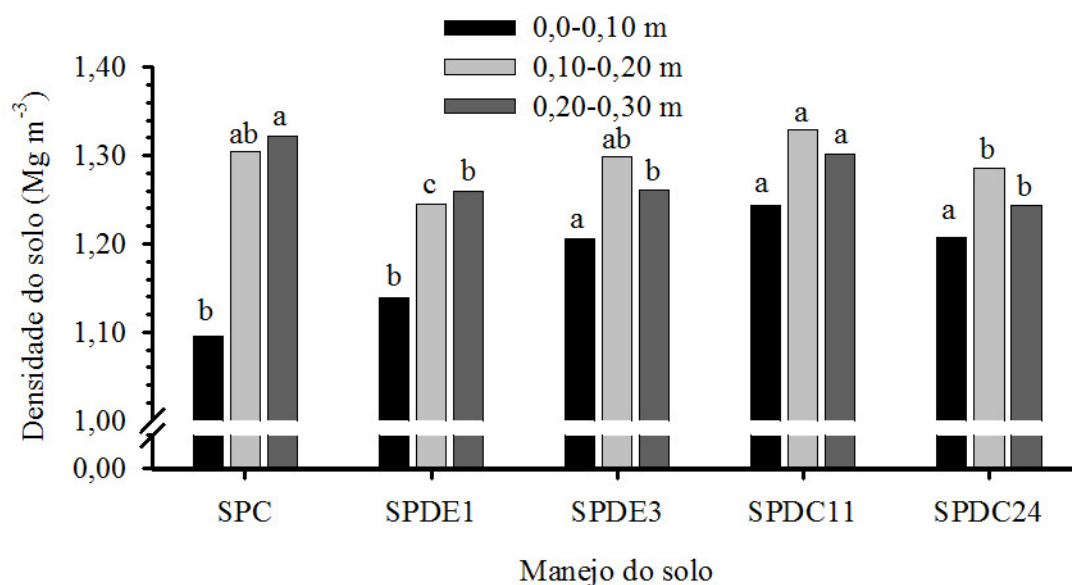


Figura 7 - Densidade do solo em função do manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A escarificação esporádica do solo a cada ano (SPDE1) e ou a cada três anos (SPDE3), mesmo em um sistema de cultivo em SPD de longo prazo, conduzido por 24 anos em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, mostrou-se ineficiente. O período com efeito da escarificação persistiu por apenas dez meses após a realização da escarificação do solo, limitada a camada de 0-0,20 m. Este curto período de eficiência da escarificação do solo está relacionado com a forma de atuação das hastes do escarificador no solo, pois há o rompimento de blocos compactos do solo nos pontos de fraqueza. Com isso, há uma permanência de “agregados” compactos nos espaços entre as hastes do escarificador, favorecendo o “retorno” à condição anterior à escarificação já após o primeiro ano de cultivo sem revolvimento do solo. Outra justificativa para o retorno à condição original do solo, em menos de um ano (dez meses), é que os fatores que levam ao aumento da Ds (tráfego e modelo de produção) não foram alterados, então, a tendência de fato é que o solo retorne à

condição inicial, que está em equilíbrio com as práticas de manejo empregadas. Estas afirmações são comprovadas quando se observa que o SPDE3, o qual foi avaliado, decorridos 22 meses da escarificação, e não apresentou diferenças com o SPDC24. Outro problema observado no SPDE3 é que o grau de compactação da camada de 0,10-0,20 m não se diferenciou do SPC, o qual apresenta nesta profundidade a formação de uma camada com um “pé de grade”. A persistência desta camada compactada estará relacionada com a profundidade que se localiza (CAMARGO; ALEONI, 1997) e com o teor de argila do solo (RICHART et al., 2005), em solos muito argilosos, a presença de partículas de diâmetros reduzidos com elevada superfície de contato, favorecem o rearranjo das partículas nos espaços porosos do solo, intensificando os problemas de compactação e, conseqüentemente, aumentos de D_s (TORRES; SARAIVA, 1999).

Comparando o SPDE1 (dez meses após a escarificação) com o SPDC24, comprova-se que não há reduções da D_s em camadas abaixo de 0,20 m. Demonstrando assim que a escarificação, com o objetivo de reduzir a compactação do solo abaixo de 0,20 m não é eficiente mesmo considerando o primeiro ano após a realização da mesma, pois grande parte dos agregados do solo, na camada de 0,20-0,30 m, é rompida nos pontos de fraqueza e estes permanecem compactos. Portanto, dez meses após a escarificação do solo, não há efeitos residuais na camada de 0,20-0,30 m. Este curto período residual do efeito da escarificação do solo foi relatado por Silva, S. G. C. et al. (2012), onde os autores identificaram que após a realização da escarificação não houve diferenças na camada de 0,20-0,30 m em relação ao SPD contínuo. Além disso, estes autores destacam que, após seis meses da escarificação do solo, houve incrementos de D_s na camada de 0,20-0,30 m, em função da redução da capacidade de suporte ao tráfego das camadas superficiais. Desta forma, não se justifica a utilização da prática de escarificação do solo a cada ano para a redução do grau de compactação de camadas compactas em subsuperfície (0,20-0,30 m). Portanto, o efeito residual da escarificação do solo não foi ampliado nem mesmo com utilização de rotação de cultura, pois não houve interações nem diferenças entre os modelos de produção. Este resultado contraria uma das hipóteses deste trabalho, a qual relacionava a ampliação dos efeitos residuais da escarificação do solo em função de rotação de culturas.

Os maiores efeitos da escarificação do solo são observados na camada de 0,0-0,10 m, onde os valores de D_s são semelhantes aos observados com a utilização do SPC. Porém, é possível que haja muita mobilização e desagregação do solo na camada de 0,0-0,10 m pela escarificação anual do solo, causando redução da capacidade de armazenamento de água, em função do aumento excessivo da quantidade de macroporos e, conseqüentemente, diminuição

do movimento capilar de água no solo (TORRES; SARAIVA, 1999). Além disso, a escarificação mecânica, ao contrário dos efeitos gerados pelas raízes das plantas, resulta na quebra da continuidade dos poros, o que prejudica movimento de água das camadas mais profundas de solo para as camadas superficiais, onde a maior parte do sistema radicular se encontra, bem como desfavorece o fluxo de água do solo para as raízes (FRANCHINI et al., 2009). Neste sentido, o efeito da escarificação do solo é apenas temporário e variável de solo para solo, sendo que o uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo é o mais indicado para o rompimento de camadas compactadas (REICHERT et al., 2007).

A formação de camadas compactadas em Latossolos em SPD normalmente está presentes na camada de 0,10-0,20 m (FRANCHINI et al., 2011; DEBIASI et al., 2011). Neste estudo, independente do manejo do solo, há um incremento na Ds na camada entre 0,10-0,20 m em relação à superfície do solo (0,0-0,10 m). Este aumento da Ds, em função da profundidade do solo, causa uma mudança na continuidade dos poros no perfil do solo. As maiores diferenças, entre as camadas superficiais (0,0-0,10 m) com os valores das camadas de 0,10-0,30 m, são observadas no SPC e no SPDE1. Isso indica que nestes sistemas há modificação da distribuição do tamanho de poros do solo, reduzindo o fluxo de água e gases entre as camadas, além de restringir o movimento capilar de ascensão de água das camadas inferiores para as superficiais (0,0-0,10 m). Isso causa exposição das plantas a períodos mais longos de déficit hídricos, principalmente em épocas com reduzidos volumes de precipitação pluvial, reduzindo a produtividade de grãos das culturas (REICHERT et al., 2011).

A utilização contínua do SPD desde 1988 demonstra que, neste Latossolo Vermelho, a adequada utilização do solo favorece manutenção da qualidade física do solo. Neste sentido, observa-se, nas três camadas avaliadas, que os valores de Ds no SPDC24 não são restritivos ao desenvolvimento das culturas. Conforme Torres e Saraiva (1999), valores de Ds menores que $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$, não afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas anuais, tais como a soja. Além disso, o SPDC24 apresenta, nas três camadas avaliadas, Ds igual ao sistema com revolvimento a cada três anos, demonstrando que ao longo do tempo, se o solo for adequadamente manejado, não haverá a necessidade de realizar a escarificação do solo para redução do grau de compactação do perfil do solo. Observa-se também que não há diferenças entre o SPDE3 e o SPDC11 nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, comprovando que a escarificação esporádica do solo a cada três anos, não tem efeito residual suficiente para redução do grau de compactação do solo.

A manutenção da qualidade física do solo ao longo do tempo é um dos principais fatores que determinam a produtividade das culturas. A formação de agregados estáveis em

função dos processos físicos, químicos e biológicos são determinantes para a obtenção de elevados potenciais produtivos. Neste sentido, a preservação da qualidade física do solo, destaca-se como prática fundamental, pois esta tem influência direta no crescimento e desenvolvimento das plantas e, indireta, sobre os demais atributos do solo (químicos e biológicos) (FRANCHINI et al., 2011).

Ao longo do tempo, desde que bem manejado, a tendência do SPD é resultar na formação de agregados estáveis e reduzir ao grau de compactação do solo. Isso foi comprovado neste estudo, onde é possível observar que a D_s foi menor no SPDC24 em relação ao SPDC11 nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-20 m, concordando com Silveira et al. (2008) que observaram reduções da D_s sob SPD em função do tempo de adoção do sistema. A partir da estabilização do SPD, ao longo dos anos, há incrementos na quantidade de poros no solo, o que confere uma redução nos valores de D_s , observada no SPDC24. Esta redução nos valores de D_s , principalmente abaixo de 0,10 m, estão relacionadas com a melhoria da agregação, maior teor de carbono orgânico e maior continuidade e estabilidade de poros (SILVEIRA et al., 2008; ROSA, 2009). Este resultado demonstra a importância de um dos princípios básicos do SPD, correspondente ao mínimo revolvimento do sistema ao longo do tempo. Ou seja, para a manutenção do SPD ao longo do tempo, é imprescindível a presença de resíduos vegetais na superfície do solo para proteger fisicamente o solo contra a erosão, controlar ervas daninhas e preservar a água no solo (ZOTARELLI et al., 2012).

No SPDC11, mesmo com valores de D_s ($1,33 \text{ Mg m}^{-3}$) próximos dos valores indicados por Torres e Saraiva (1999), estes podem não ser limitantes ao crescimento e desenvolvimento das culturas, pois no SPD ao longo do tempo há a formação de poros longos e contínuos, além da presença de poros biológicos, os quais favorecem que o perfil apresente locais com menor resistência ao crescimento das raízes. A variabilidade da compactação do solo não está somente no sentido vertical, esta se localiza também, no sentido horizontal (SILVA, V. R. et al., 2004), favorecendo assim que haja pontos com menor grau de compactação, onde seja facilitada a penetração das raízes, trocas gasosas, e infiltração de água.

A porosidade total do solo determinada por cálculo (P_{tc}) não apresentou diferenças entre sucessão e rotação de culturas nas camadas de 0,0-0,10 m e de 0,10-0,20 m (Figura 8). De forma geral, na camada de 0,0-0,10 m houve uma média de $0,59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de poros. Na camada de 0,10-0,20 m, há uma redução da porosidade total para $0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, demonstrando que há uma adequada relação entre o volume de sólidos e de poros neste solo. Silveira Neto et al. (2006) observaram que sistemas de rotação de culturas que incluem mais cultivos de

gramíneas proporcionaram aumentos dos valores de macroporosidade e de porosidade total na camada de 0,10-0,20 m, permitindo nestes solos uma maior infiltração de água e maior aproveitamento da água da chuva (STONE et al., 2012).

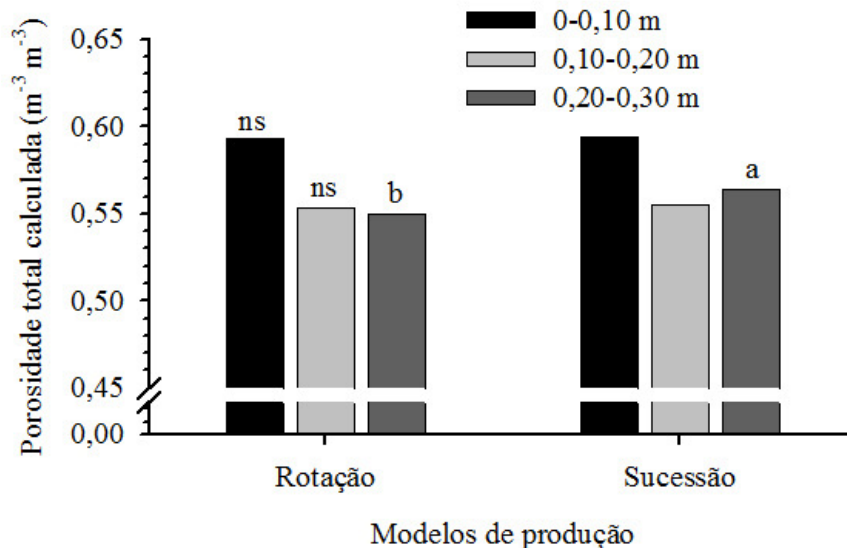


Figura 8 - Porosidade total calculada em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando se analisa a camada de 0,20-0,30 m, constata-se que há uma maior porosidade total no sistema com sucessão de culturas. No entanto, esta diferença é pequena, de apenas 1% a mais de poros no sistema com sucessão de culturas. A quantidade de poros na camada de 0,0-0,10 m foi maior em relação às camadas abaixo de 0,10 m. A porosidade total calculada, como já esperado, em função de ser uma relação da D_s com a densidade de partículas, identificou as mesmas alterações na estrutura do solo observadas pela D_s entre os modelos de produções baseados na rotação e sucessão de culturas.

A porosidade total por saturação (Pts) não apresentou diferenças entre os modelos de rotação e sucessão de culturas (Figura 9). A não ocorrência de diferenças entre os modelos de produção pode estar relacionada à baixa intensificação na quantidade de culturas rotacionadas com a soja e o trigo. Neste sentido, pode-se inferir que este sistema de rotação de culturas utilizado [tremoço ou nabo/milho – aveia/soja – trigo/soja- trigo/soja], favorece a redução da magnitude dos efeitos residuais da porosidade total, no terceiro ano após o início do ciclo de

rotação de culturas, em relação à sucessão de culturas. Observa-se que há uma redução nos valores absolutos quando comparado a Pts com a Ptc, e esta diferença é classificada como sendo a quantidade de poros bloqueados (Figura 10). Esses poros não são efetivos na condução de água, devido a formação de gases que, embora parcialmente solúveis na água, não a deixam circular livremente. Os poros bloqueados, por não tomarem parte na rede de poros, funcionam como macroporos. A tendência destes poros bloqueados é a evolução para microporos, o que favorece aumentos na retenção de água, porém há diminuição na taxa de difusão de oxigênio e outros gases do solo (TAYLOR, 1950). Outra causa para estas diferenças entre a porosidade total calculada em relação a Pts é devido à dificuldade em saturar-se completamente a amostra, ou à perda de água antes da pesagem, principalmente dos bioporos (SILVA, V. R. et al., 2000). Os bioporos correspondem às cavidades ou canais do solo, originadas pela presença de minhocas e cupins e pelo desenvolvimento de raízes no interior do solo (RIBEIRO et al., 2007).

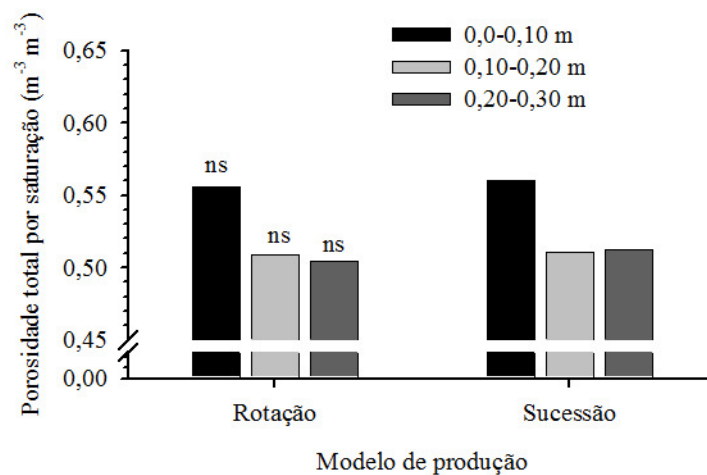


Figura 9 - Porosidade total do solo por saturação do solo, em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

O volume de poros bloqueados não diferiu entre os modelos de produção nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 10). O solo apresentou, nas camadas até 0,20 m, aproximadamente 4 % do total de poros do solo classificados como bloqueados, valores semelhantes aos observados em um Latossolo Vermelho Distrófico sob rotação de culturas por Rodrigues et al. (2011). Na camada de 0,20-0,30 m, há maior quantidade de poros

bloqueados no modelo produção que envolve sucessão de culturas. Assim, neste sistema, na camada de 0,20-0,30 m, pode haver maiores dificuldades relacionadas à dinâmica da água no solo em relação ao modelo de produção baseado em rotações de culturas. Partes dos poros bloqueados são aqueles potencialmente ocupados por água, mas que se encontram somente com ar, mesmo quando o solo está saturado (CASTRO et al., 2011), o restante destes poros bloqueados, são megaporos, que perdem água antes da pesagem do solo saturado (SILVA, V. R. et al., 2000). Os poros bloqueados são identificados quando há ausência de fluxo de água e ar mesmo em condições de um solo com porosidade elevada, são poros isolados que não estejam conectados à outros poros (RODRIGUES et al., 2011). A existência de grande volume de poros bloqueados é indesejável, pois implica em menor capacidade de retenção de água no perfil do solo (CASTRO et al., 2011). Assim, em modelos de produção baseados em rotações de culturas, há aprofundamento do sistema radicular das culturas rotacionadas, as quais tem potencial para modificar, na camada de 0,20-0,30 m, a distribuição do tamanho de poros através da redução do volume de poros bloqueados.

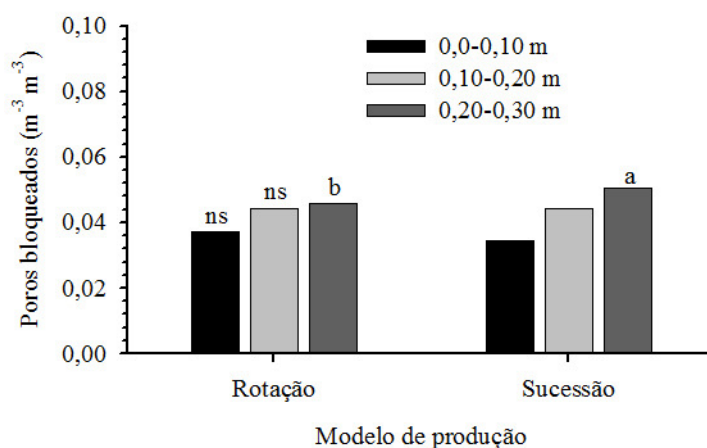


Figura 10 - Poros bloqueados em função de modelos de produção em um Latosolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados de Ptc foram semelhantes em relação aos manejos do solo (Figura 11). Os maiores valores de Ptc foram observados na camada de 0,0-0,10 m. Nesta camada, houve aumentos da Ptc em função da mobilização do solo ano SPC e SPDE1 em relação aos sistemas sem mobilização do solo. Observa-se que os efeitos residuais da escarificação do

solo, na camada de 0,0-0,10 m, persistiram somente por dez meses após a realização desta prática, pois, após 22 meses da realização da escarificação (SPDE3), não houve mais diferenças com os sistemas contínuos (SPDC11 e SPDC24). Os poros do solo sob SPD geralmente conduzem água mais eficientemente do que poros sob SPC, mesmo com porosidade inferior ao SPC (WU et al., 1992), em função dos poros biológicos no SPD (REICHERT et al., 2007).

Na camada de 0,10-0,20 m, os maiores valores de Ptc foram observados no SPDE1. No entanto, nesta camada, a Ptc no SPDE3 não diferiu dos sistemas sem mobilização do solo, comprovando que, decorridos 22 meses da escarificação houve reconsolidação da estrutura do solo. Observa-se que houve diferenciação entre os tempos de adoção do SPD, de forma que houve incrementos dos valores de Ptc no SPDC24 em relação ao SPDC11 na camada de 0,10-0,20 m.

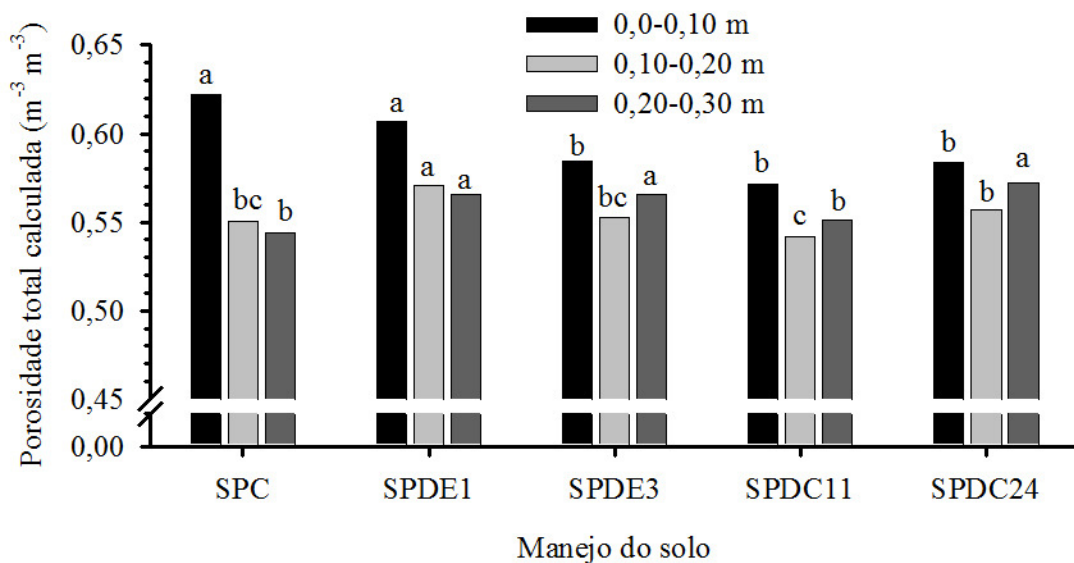


Figura 11 - Porosidade total do solo calculada em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A camada de 0,20-0,30 m demonstra que não há efeitos residuais da escarificação do solo mesmo à, apenas, dez meses após a sua realização (SPDE1), pois este manejo não se diferenciou do SPDC24. Isto indica que, ao longo do tempo, o SPD mantém sua qualidade física, e que a escarificação periódica do solo é uma prática dispensável. Durante o processo

de compactação, que ocorre no SPDE3 em relação ao SPDE1, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retém água (REICHERT et al., 2007). Observa-se ainda que, ao longo do tempo, há tendência de incrementos dos valores de porosidade do solo em função da estabilização do sistema produtivo, assim, observa-se que houve maior porosidade do solo no SPDC24 em relação ao SPDC11.

A Pts foi inferior aos valores de Ptc, indicando alterações nas diferenças entre os sistemas de manejo do solo em função do método utilizado para cálculo da porosidade do solo (Figura 12). Estas diferenças foram de 3 a 5 %, valores estes que correspondem aos poros bloqueados (Figura 13). Na camada de 0,0-0,10 m, a maior quantidade de poros foi observada no SPC, em função da desestruturação do solo e fragmentação dos agregados do solo pela ação da grade pesada. Conforme Veiga et al. (2008), no SPC, após a excessiva pulverização do solo, há oxidação da matéria orgânica e destruição dos agregados. Isso, associado ao tráfego das máquinas agrícolas sobre a área, resulta na formação dos conhecidos “pé-de-arado” e “pé-de-grade”. Nicoloso et al. (2008), avaliando a eficiência do método mecânico (escarificador) e do método biológico (nabo-forageiro), associado ou não, de descompactação de um Latossolo Vermelho Distroférico, observaram que a Pts foi um indicador mais sensível às alterações induzidas pelos tratamentos do que a Ds. A Ptc como esperado, apresentou as mesmas diferenças observadas pela Ds, pois a Ptc é uma relação entre a Ds e a densidade de partículas. A Ptc foi mais sensível do que a Pts para detectar diferenças, na camada de 0,10-0,20 m, entre os tempos de adoção do SPD. Nas demais camadas, sob SPD contínuo, independente do método de determinação da porosidade, foram detectadas as mesmas diferenças. No sistema com escarificação, utilizando a Ptc, foi possível detectar diferenças, na camada de 0,0-0,10 m, entre o SPDE1 e SPDE3, as quais no Pts não são observadas. No entanto, na camada de 0,0-0,10 m, a Pts foi mais sensível do que a Ptc, para detectar diferenças entre o SPC e o SPDE1. Porém, são necessários maiores estudos para confirmar a hipótese de qual método de determinação do volume total de poros são mais indicados. Pois não foi possível confirmar se o volume considerado como poros bloqueados são poros isolados, sem conexão com a rede de poros do solo, os quais não foram preenchidos com água, ou estes são megaporos que perderam água no momento da pesagem.

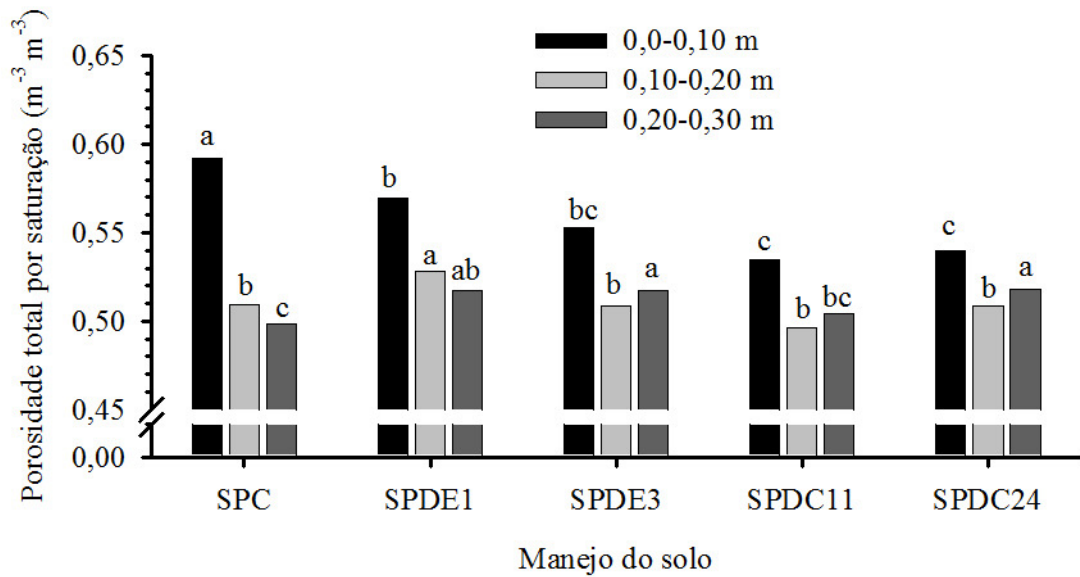


Figura 12 - Porosidade total do solo determinada pela saturação do solo, em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013. *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

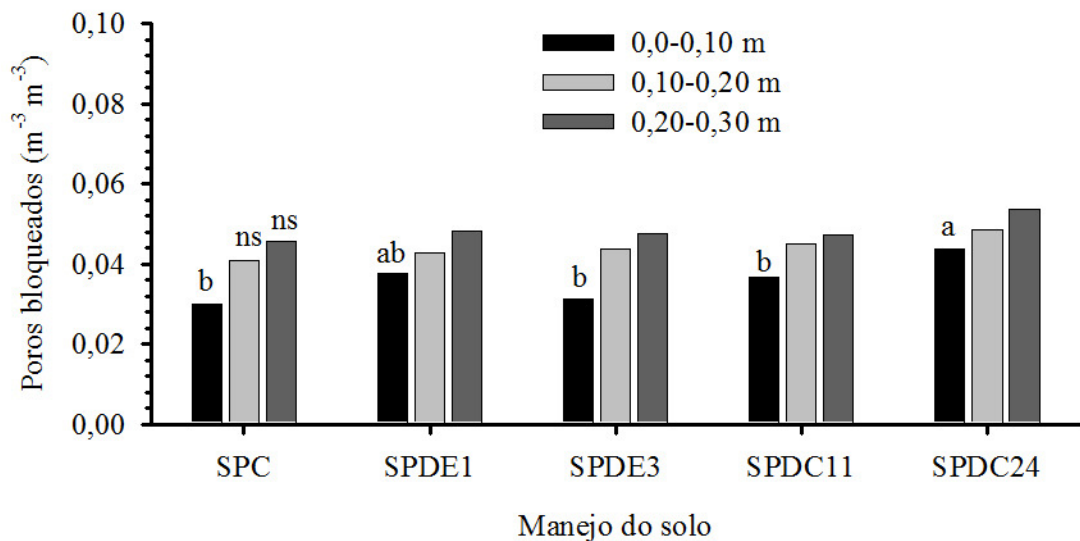


Figura 13 - Poros bloqueados em função de sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Pts no SPDE3 não se diferenciou dos sistemas contínuos sem revolvimento do solo e do SPDE1. Isto comprova novamente que os efeitos residuais da escarificação do solo persistem na camada de 0,0-0,10 m, por um período igual ou inferior a dez meses. Deste

modo, não há benefícios de longo prazo em função da utilização da prática de escarificação do solo. Ao longo do tempo, há preservação e manutenção da qualidade física do solo sob SPD, pois se observa que em sistemas consolidados com 11 e 24 anos, não diferem na quantidade de poros, na camada de 0,10-0,20 m, em relação ao SPDE3.

A quantidade de poros bloqueados em função dos sistemas de manejo teve variação em função da camada avaliada (Figura 13). Na camada de 0,0-0,10 m, houve diferença entre a quantidade de poros classificados como bloqueados nos diferentes manejos do solo, sendo os maiores valores observados no SPDC24. Este aumento da quantidade de poros no SPD24 ocorre devido à dificuldade em saturar-se completamente a amostra, ou à perda de água antes da pesagem, principalmente dos bioporos (SILVA, V. R. et al., 2000), pois no SPD24 as raízes e a atividade biológica são os principais responsáveis pela criação de poros contínuos e alongados no solo (RODRIGUES et al., 2011). Estes bioporos em área sob SDP, apesar de representarem pequeno volume em relação ao volume total de poros, são altamente funcionais e reduzem a resistência do solo, especialmente por formar macroporos que podem ser comprimidos quando há pressões aplicadas ao solo (GENRO JÚNIOR et al., 2004). Após o tráfego de máquinas em um Latossolo Vermelho cultivado com citrus, os bioporos, tipo canais, foram os primeiros a sofrerem os impactos da compactação do solo, e tiveram o seu volume reduzido em aproximadamente 90 % (LIMA, H. V. et al., 2005).

A relação da P_{tc} com a P_{ts} demonstra que, nas três camadas avaliadas, o comportamento foi semelhante (Figura 14a,b,c). Os valores da P_{tc} foram sempre superiores aos observados quando utilizado a determinação pela saturação do solo. Isso demonstra que há dificuldades metodológicas para a completa saturação do solo. Mesmo com as amostras permanecendo dentro de um recipiente contendo água até 0,01 m abaixo da borda superior dos anéis volumétricos, não houve completa saturação do solo, ou não houve retenção de água, nos bioporos, no momento da pesagem das amostras indeformadas. Estas diferenças entre a quantidade de poros observada por cálculos e por saturação tem grande importância, pois para toda a amplitude de poros do solo, houve esta mesma tendência. Porém, houve uma tendência de um maior distanciamento entre os valores calculados e observados dos poros do solo em valores mais baixos de porosidade. Há duas hipóteses para estes resultados. A primeira é de que os poros não estavam completamente preenchidos com água no momento da pesagem do solo saturado. Já a segunda é de que a P_{tc} superestima os valores de porosidade do solo.

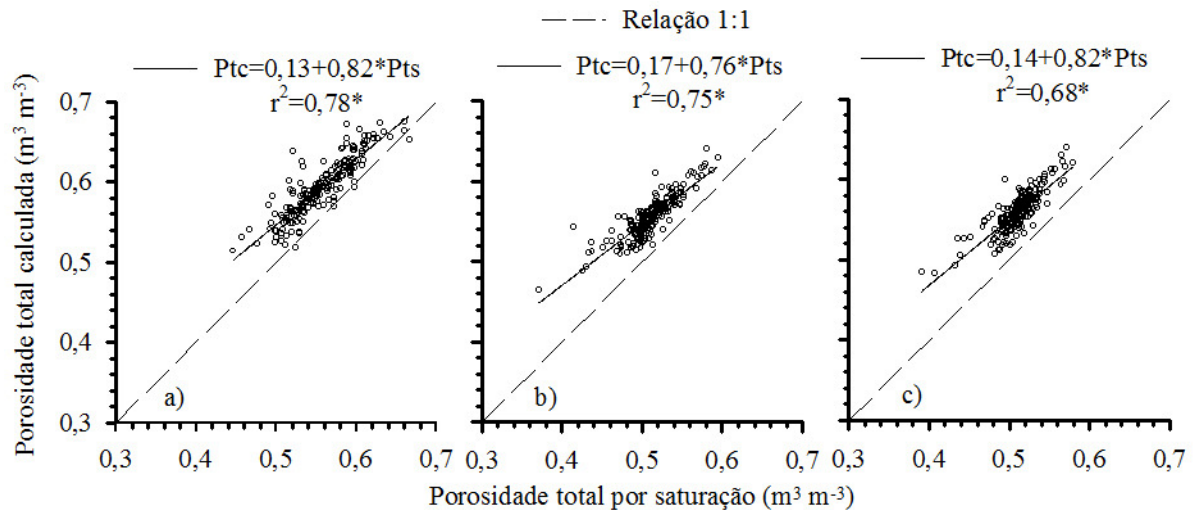


Figura 14 - Relação entre porosidade total calculada (Ptc) e a porosidade total determinada por saturação (Pts), nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) 0,20-0,30 m (c). Londrina, PR, 2013.

*Equações significativas pelo teste F ($p < 0,05$).

Caso não houvesse completa saturação do solo, estes efeitos seriam mais pronunciados em solos mais compactados, com menor volume total de poros. Observa-se através das equações da relação Ptc e Pts (Figura 14a,b,c) que em solos com menor volume de poros, há maior distanciamento entre os valores observados por cálculos e por saturação. Há aproximação dos valores de Ptc e Pts quando o total de poros foi próximo de $0,70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Isto indica que em solos mais compactos há maior dificuldade de saturar a amostra de solo em função que há muitos poros isolados onde não há fluxo de água, portanto, permanecem com ar retido no interior de micro-agregados. Porém, há necessidade de ampliação destes estudos para possibilitar validar ou refutar a hipótese de que a determinação da Ptc pode mesmo superestimar o volume total de poros neste Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso.

A macroporosidade do solo foi determinada de duas formas, pela diferença entre a microporosidade e o total de poros calculados conforme Embrapa (1997) (Figura 15), e também pela diferença entre o volume de microporos e a saturação do solo (Figura 16). Em todas as camadas a macroporosidade calculada foi superior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, demonstrando que há adequado fluxo de água e gases em todo o perfil estudado. Os macroporos são os principais poros responsáveis pelos fluxos de gases no solo, e conforme Prevedello (1996) para obter um ótimo desenvolvimento das plantas, a porosidade de aeração não deve ser menor do que $0,10$ a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, principalmente dentro de dois ou três dias após ocorrer chuva ou irrigação (PREVEDELLO, 1996).

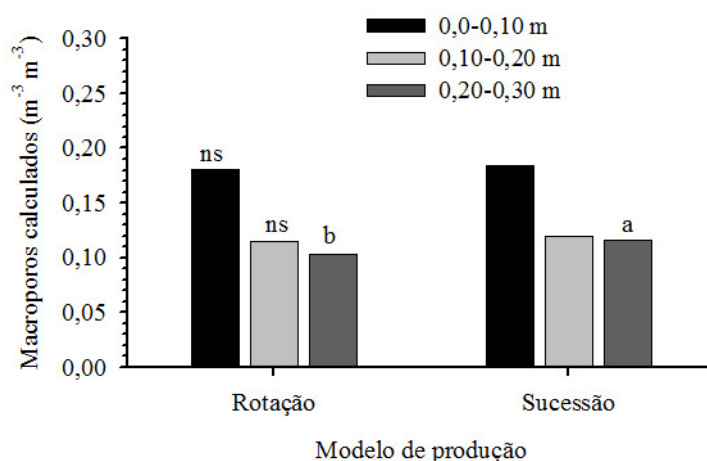


Figura 15 - Macroporosidade do solo calculada em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em função dos modelos de produção, observam-se diferenças de macroporosidade somente na camada de 0,20-0,30 m, em que os maiores valores ocorreram na sucessão de culturas. Porém, conforme relatado anteriormente, estas diferenças podem estar relacionadas ao maior volume de poros bloqueados do solo, os quais são poros que podem estar isolados e não contribuir no fluxo de água e ar. Conforme Torres e Saraiva (1999), nos Latossolos do Norte do Paraná, quando se encontram compactados devido às práticas de manejo inadequadas, a macroporosidade chega a ser inferior a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Reduções de produtividade de soja em solos argilosos (654 g kg^{-1} de argila) foram observadas por Suzuki (2005) quando a macroporosidade chegou a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com Ds de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$. Os solos com altos teores de argila apresentam maiores suscetibilidade à compactação. A manutenção, por longos períodos de tempo, da qualidade física de Latossolo sob SPD, e de uma adequada distribuição radicular das espécies cultivadas, depende fortemente da preservação dos bioporos (TORRES; SARAIVA, 1999).

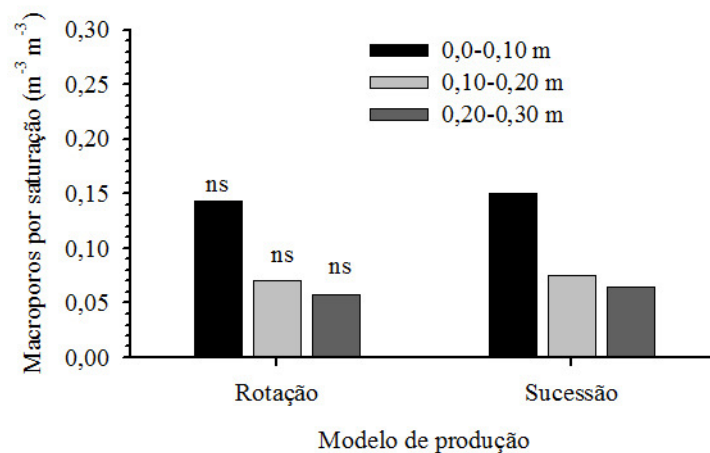


Figura 16 - Macroporosidade do solo por saturação do solo em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

A macroporosidade determinada por saturação do solo (Figura 16) não considera o volume total dos poros bloqueados (Figura 10). Em ambas as camadas, a macroporosidade por saturação não foi alterada em função do modelo de produção. Somente a camada de 0,0-0,10 m, houve valores de macroporosidade por saturação acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Assim, se não for computado os valores dos poros bloqueados, em ambos os modelos de produção, os valores de macroporosidade estariam abaixo dos níveis considerados limitantes para o fluxo de água e ar nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Segundo Reichert et al. (2007), os valores críticos de macroporosidade para o crescimento das plantas parecem estar bem estabelecidos, ficando próximos de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Porém não tem sido comprovado a importância destes valores limitantes de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade de aeração em solos bem drenados sob SPD (GUBIANI, 2012). Na literatura também não está bem definido se a porosidade de aeração deve ser determinada através de cálculos pela relação da D_s com a densidade de partículas, ou através dos valores obtidos com o solo saturado. Neste sentido, reforça-se que o método de cálculo para a macroporosidade pode influenciar em tomada de decisão para realizar operações desnecessárias, para aumento da macroporosidade em SPD.

Observa-se alto coeficiente de determinação ($>86 \%$) na relação entre a macroporosidade calculada e a macroporosidade por saturação para as camadas de 0,0-0,10 m (Figura 17a), 0,10-0,20 m (Figura 17b) e 0,20-0,30 m (Figura 17c). Porém, quando se observa os dados em função da relação 1:1, é constatado que há superestimativa dos valores de macroporosidade calculada em relação à macroporosidade por saturação. O limite mínimo de

macroporosidade de um solo com condições ideais de aeração para o desenvolvimento das plantas é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (BAVER et al., 1972). Valores baixos de macroporosidade podem resultar em má drenagem, baixa aeração e aumento da resistência do solo à penetração de raízes, sendo um dos indicadores de degradação do solo (STOLF et al., 2011). Já Hillel (1970) afirma que as plantas necessitam de para um adequado desenvolvimento das culturas valores de macroporosidade, no mínimo, entre $0,06$ e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporos, esta variação depende do tipo de solo. Isso indica que caso seja utilizado os valores de macroporosidade por saturação como referência para identificar a porosidade de aeração do solo, grande parte das amostras analisadas independente do sistema de manejo, principalmente nas profundidades inferiores a $0,10 \text{ m}$, estarão em níveis abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerados como críticos para o crescimento das plantas (REICHERT et al., 2007).

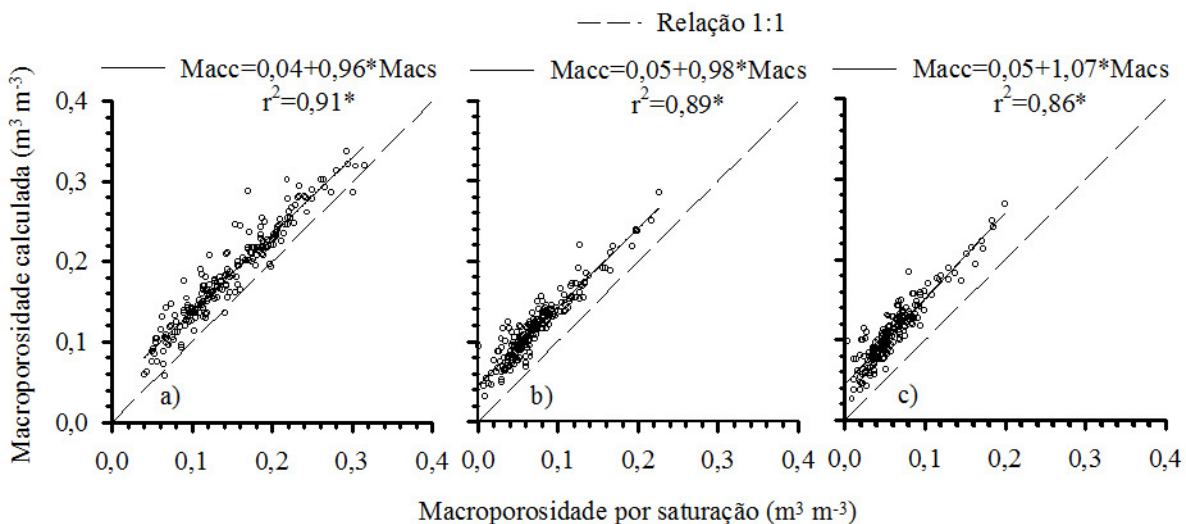


Figura 17 - Relação entre a macroporosidade calculada e a macroporosidade por saturação nas camadas de 0,0-0,10 m (d) 0,10-0,20 m (e) 0,20-0,30 m (f). Londrina, PR, 2013.

*Equações significativas pelo teste F ($p < 0,05$).

Nos sistemas de manejo do solo, a macroporosidade do solo calculada esteve acima dos limites críticos de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em todos os sistemas, com exceção da camada de 0,20-0,30 m no SPC (Figura 18). Observa-se que, na camada de 0,0-0,10 m, no SPC e SPDE1, houve elevação da macroporosidade calculada do solo em relação aos demais sistemas. Nestes tratamentos, a mobilização do solo “pulverizou” os agregados do solo, resultando em macroporosidade acima de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, elevando a suscetibilidade do solo à erosão, pois não há continuidade de poros no perfil do solo. No SPC, a perda da continuidade de poros no

perfil é mais acentuada, pois na camada de 0,10-0,30 m, há redução de 48 % da quantidade de macroporos calculados em relação à camada de 0,0-0,10 m, demonstrando que há uma formação de um “pé de grade”, o qual inicia na camada de 0,10 m, restringindo o fluxo de água no perfil do solo (SORACCO et al., 2012). Na camada de 0,20-0,30 m, a macroporosidade calculada foi inferior aos demais tratamentos, inclusive o SPDC11 e SPDC24. Esta redução ocorre em função de que, no processo de compactação, os poros maiores que 50 μm , considerados como macroporos, são os primeiros a serem reduzidos (REICHERT et al., 2007), indicando reduções na qualidade física do solo (SORACCO et al., 2012).

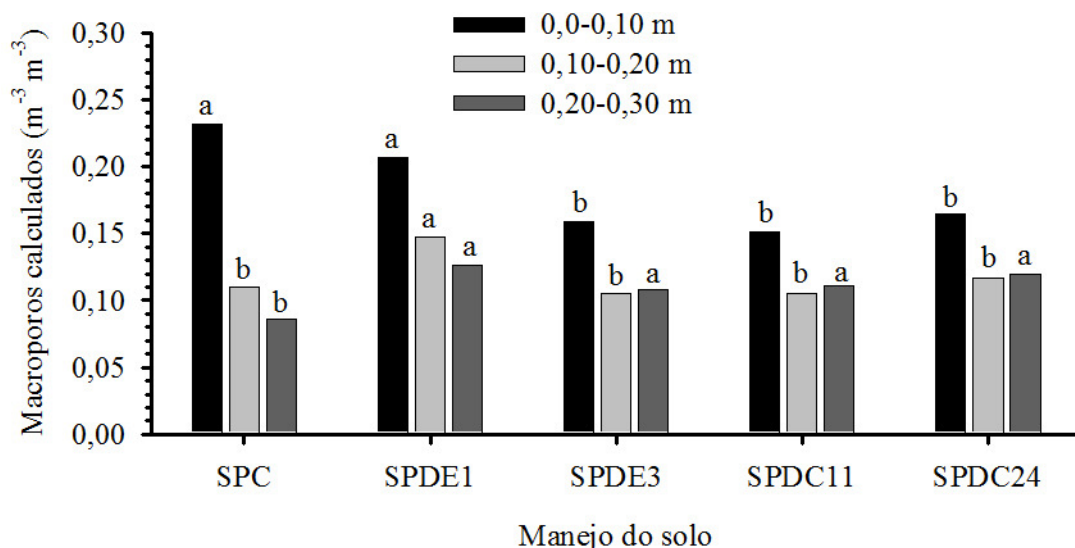


Figura 18 - Macroporosidade do solo calculada em função de sistemas de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O SPDE1 aumentou a macroporosidade calculada somente nas camadas até 0,20 m em relação aos cultivos sob SPD. Porém o SPDE3 não diferiu a quantidade de macroporos calculados, em relação ao SPDC11 e SPDC24, demonstrando que os efeitos da escarificação persistiram por menos de 22 meses, de forma que esta prática de manejo torna-se desnecessária. Não houve diferenças no volume de macroporos calculados em função dos tempos de adoção do SPD. Conforme Franchini et al. (2011), a escarificação, como prática a ser adotada sistematicamente, é desnecessária quando o SPD é manejado de acordo com os

seus princípios básicos (mínimo revolvimento, cobertura permanente do solo e rotação de culturas). Estes mesmos autores observaram que a escarificação periódica do solo, quando associada à sucessão de culturas, em experimento de longo prazo, reduziu a produtividade de grãos da soja em até 600 kg ha^{-1} .

Na camada de 0,0-0,10 m, todos os sistemas de manejo apresentaram valores de macroporosidade por saturação, superiores ao limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 19). Porém, quando se observa a camada de 0,10-0,20 m, somente o SPDE1 apresentou valores de macroporosidade por saturação superior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já na camada de 0,20-0,30 m, em nenhum sistema de manejo há valores de macroporosidade por saturação considerados “adequados” quando se utiliza o limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, preconizados na literatura (REICHERT et al., 2007; KLEIN et al., 2008). Neste sentido, a determinação de limites mínimos para porosidade de aeração é bastante complexa (KLEIN et al., 2008). Conforme De Jong Van Lier (2001), a porosidade de aeração mínima de um solo varia em função de diversos fatores, que determinam características de drenagem e o tempo que o sistema radicular fica exposto a uma oxigenação deficiente. A utilização de valores fixos para parametrizar a aerabilidade do solo, deve, portanto, ser considerada falha e aspectos físicos e biológicos podem ser utilizados para uma estimativa mais precisa deste parâmetro (De JONG VAN LIER, 2010). A macroporosidade por saturação foi mais sensível em detectar diferenças, na camada de 0,0-0,10 m, entre o SPC e o SPDE1. Nos demais tratamentos, a macroporosidade por saturação demonstrou diferenças similares às observadas com a macroporosidade calculada. Porém, destaca-se que os valores absolutos da macroporosidade por saturação foram inferiores aos valores de macroporosidade por cálculos, esta redução de valores foram considerados como poros bloqueados.

Com base no conjunto dos dados deste trabalho, pode-se considerar que o método de determinação dos valores de porosidade total altera os indicativos de qualidade física do solo. O uso da macroporosidade por saturação poderá indicar compactação do solo, porém, o cálculo em função da P_{tc} , poderá indicar valores acima dos níveis críticos, levando ao diagnóstico de que a aeração do solo é adequada. Há necessidade de padronização das avaliações dos atributos físicos para possibilitar o diagnóstico correto da qualidade física do solo.

A microporosidade do solo, responsável pelo armazenamento de água no perfil do solo, não foi alterada em função dos modelos de produção (Figura 20), indicando que esta propriedade física é pouco sensível à alternância de sistemas radiculares de plantas diferentes em sistemas de rotação e ou sucessão de culturas. Observa-se que há aumentos da quantidade

de microporos em função do incremento da profundidade do solo. Estes incrementos estão relacionados ao aumento da D_s em função do incremento da profundidade do solo, observada anteriormente. Neste sentido, há redução do tamanho dos poros, e estes poros passam a ser responsáveis pelo armazenamento de água e nutrientes para as plantas.

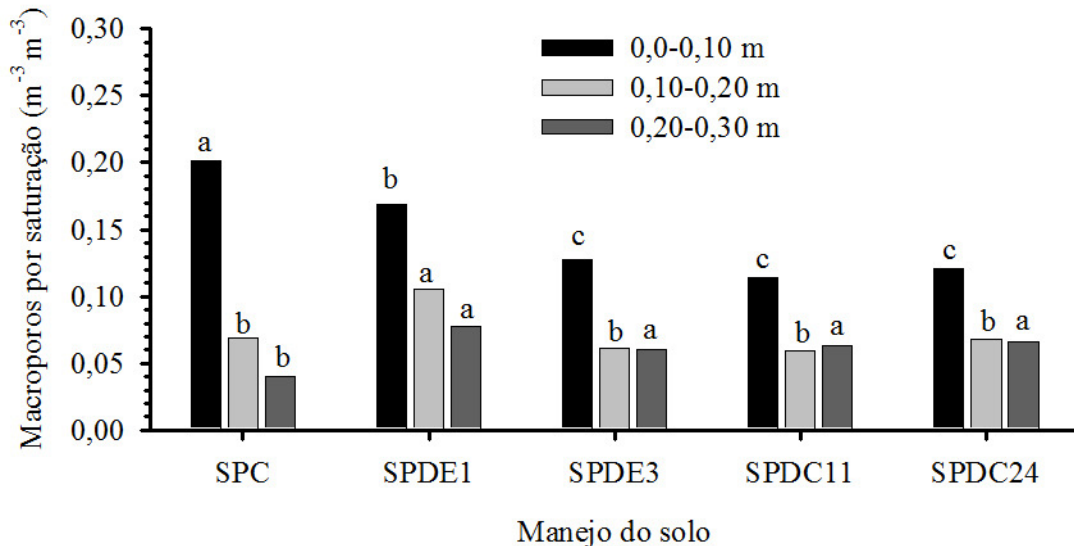


Figura 19 - Macroporosidade do solo por saturação em função de sistemas de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

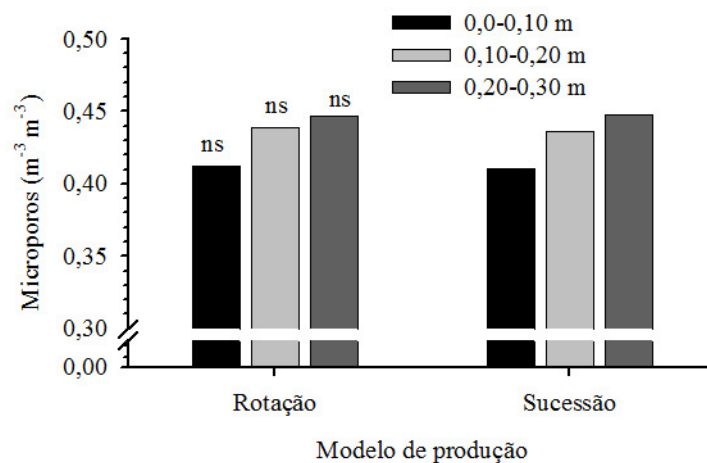


Figura 20 - Microporosidade do solo em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Com relação à microporosidade, houve diferenças significativas entre os sistemas de manejos do solo nas três camadas avaliadas (Figura 21). Na camada de 0,0-0,10 m, os sistemas com mobilização contínua do solo (SPDE1 e SPC) apresentam menores valores de microporosidade do solo em relação aos demais tratamentos, que não diferiram significativamente entre si. Constata-se que, após 22 meses da realização da escarificação no SPDE3, não foram observadas alterações na quantidade de microporos em relação ao SPDC11 e SPDC24. Na camada de 0,0-0,10 m é onde são observados os menores valores de microporosidade. Os valores de microporosidade não foram alterados em função do tempo de adoção do SPD nas camadas superficiais do solo (0-0,20 m). Há incremento da microporosidade do solo com o aumento da profundidade do solo. Na camada de 0,10-0,20 m, somente o sistema com escarificação anual do solo diferiu dos demais, apresentando os menores valores de microporosidade. Na camada de 0,20-0,30 m, houve diferenciação da quantidade de microporos entre os tempos de adoção do SPD, sendo a quantidade de microporos maior onde o SPD foi implantado há 24 anos. A microporosidade, na camada de 0,20-0,30 m, do SPDE1 não diferiu do SPDC11, porém foi reduzida em relação a todos os demais tratamentos, indicando que há alterações significativas no volume de poros capazes de armazenar água no solo em relação ao SPDC24. A importância dos microporos está relacionada à relação solo-água-planta, pois estes poros são responsáveis pela armazenagem e retenção de água no solo (SOUZA et al., 2010).

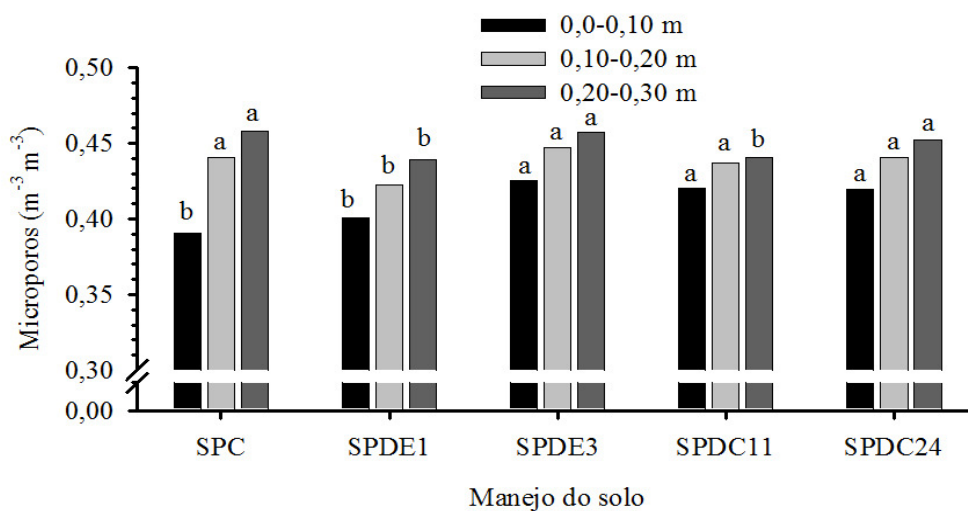


Figura 21 - Microporosidade do solo em função de manejos do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A infiltração tridimensional de água no solo (Figura 22a) e a condutividade hidráulica saturada do solo no campo (k_{fs}) (Figura 22b) não foram alteradas, nas profundidades de 0,10 e de 0,20 m, em função dos modelos de produção. Porém, observa-se que os valores de infiltração tridimensional do solo saturado, na profundidade de 0,10 m, são três vezes maiores do que a observada na profundidade de 0,20 m. A grande redução da infiltração tridimensional e da k_{fs} em função do incremento de profundidade está diretamente relacionada com a redução da macroporosidade do solo (Figura 15 e 16). A infiltração tridimensional e a k_{fs} foram mais sensíveis do que a macroporosidade para identificar aumento de restrições físicas abaixo de 0,20 m. Neste sentido, independente do modelo de produção, há uma maior restrição ao fluxo de água no solo abaixo de 0,20 m. Esta redução da infiltração tridimensional é um indicativo de formação de camadas com maior estado de compactação (BERTOLANI; VIEIRA, 2001; MIGUEL et al., 2009; SILVA, V. R. et al., 2009).

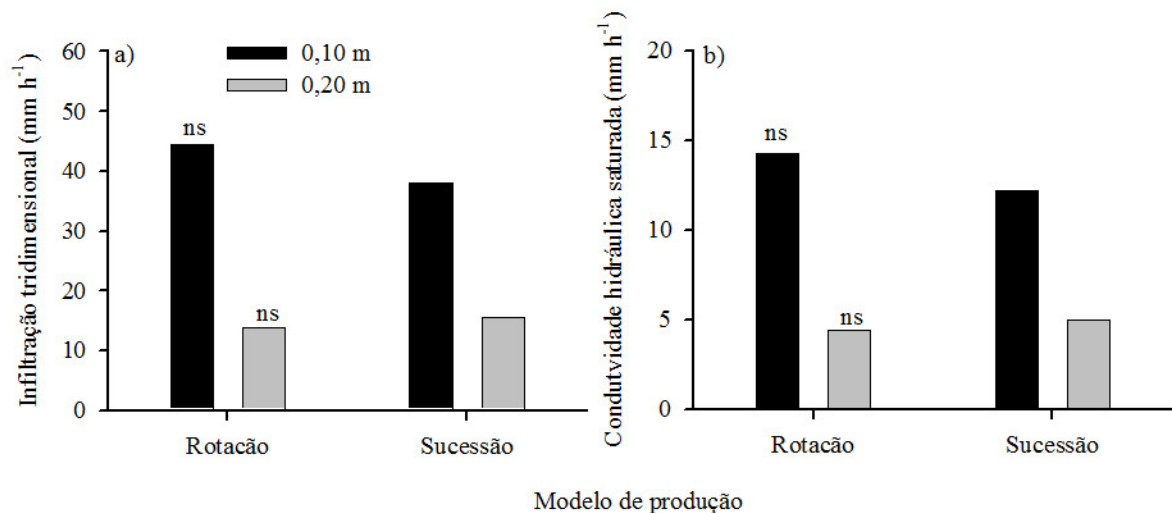


Figura 22 - Infiltração tridimensional de água no solo (a) e condutividade hidráulica saturada no campo (b) em função de modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Os valores de k_{fs} foram classificados em classes por Millar (1988), o qual definiu os valores de k_{fs} como: muito lenta ($< 1,25 \text{ mm h}^{-1}$), lenta ($1,25-5 \text{ mm h}^{-1}$), moderada lenta ($5-20,8 \text{ mm h}^{-1}$), moderada ($20,8-62,5 \text{ mm h}^{-1}$), moderada rápida ($62,5-125 \text{ mm h}^{-1}$), rápida ($125-208,3 \text{ mm h}^{-1}$), muito rápida ($208,3 \text{ mm h}^{-1}$). Na profundidade de 0,10 m a k_{fs} é classificada

como moderada lenta. Já na profundidade de 0,20 m, os valores de kfs são reduzidos e são considerados como lentos. Assim, independentemente do modelo de produção utilizado, houve aumento da restrição ao fluxo de água no solo saturado abaixo da profundidade de 0,20 m em relação à profundidade de 0,10 m. Estas restrições ao fluxo podem estar relacionadas à redução da continuidade dos poros no perfil do solo, ou ao aumento do grau de compactação do solo em função do manejo.

Os sistemas de manejo alteraram, nas mesmas proporções, a taxa de infiltração tridimensional de água no solo (Figura 23a) e a kfs (Figura 23b). Os menores valores de infiltração tridimensional e kfs, na profundidade de 0,10 m, foram observados no SPC, porém não diferiu dos sistemas com escarificação do solo, nem do SPDC11. Observa-se, na profundidade de 0,10 m, um incremento de quase 100 % na infiltração tridimensional e na kfs, com a utilização do SPDC24 em relação ao SPC. Isso está relacionado à continuidade de poros, à tortuosidade dos interstícios e à maior atividade biológica observada no SPD consolidado, que facilita a movimentação tridimensional da água (ASSIS; LANÇAS, 2005). Não houve incrementos da infiltração tridimensional de água e da kfs, na profundidade de 0,10 m, em função da escarificação do solo a cada ano (SPDE1) e ou a cada três anos (SPDE3) em relação aos sistemas contínuos (SPDC11 e SPDC24), demonstrando que esta prática não melhora a estrutura do solo para o fluxo de água na superfície do solo. Não houve diferenças de infiltração e de kfs, na profundidade de 0,10 m, entre o SPDC11 e SPDC24, demonstrando que há preservação e manutenção dos poros contínuos sob SPD ao longo do tempo.

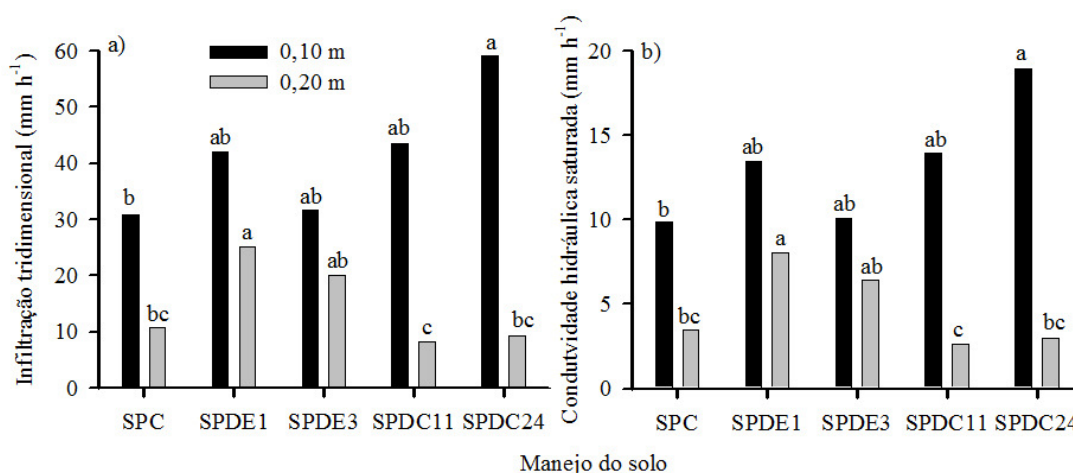


Figura 23 - Infiltração tridimensional de água no solo (a) e condutividade hidráulica saturada no campo (b) em função de manejos do solo, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na profundidade de 0,20 m, não houve diferenças na infiltração tridimensional e na kfs entre o SPDE3 e o SPDC24, demonstrando que, também em profundidade, os efeitos benéficos da escarificação do solo tem um efeito residual em apenas um curto período de tempo. O SPDE1 apresentou os maiores valores de infiltração tridimensional e kfs, porém não diferiram do SPDE3. Em relação aos tempos de adoção do SPD, na profundidade de 0,20 m, não houve diferenças entre si, demonstrando que há manutenção das taxas de infiltração tridimensional e de kfs ao longo dos anos. Porém, destaca-se que há grandes reduções dos valores da infiltração tridimensional e kfs, quando analisado a profundidade de 0,20 m e relação ao observado na profundidade de 0,10 m.

Estas duas variáveis apresentam uma relação direta entre si. A kfs é definida como sendo a capacidade de um solo em transmitir água através de seus vazios, quando estes estão cheios de água. Portanto, a kfs é considerada uma variável de grande utilidade na diferenciação dos efeitos de sistemas de preparo na movimentação de água no perfil (ASSIS; LANÇAS, 2005). Brandt (2010) observou redução da kfs, na camada 0,00-0,07 m, da mata nativa ($754,82 \text{ mm h}^{-1}$) para cultivos sob sistema plantio direto ($2,56 \text{ mm h}^{-1}$), demonstrando que o cultivo do solo favorece a redução do tamanho dos poros. Santi et al. (2012) concluíram que, independente do infiltrômetro utilizado, as maiores taxas de infiltração de água no solo foram determinadas nas zonas de alta produtividade de grãos, seguidas pelas de média e baixa. Benefícios da utilização da rotação de culturas, são apontados por Abreu et al. (2004), os quais observaram que a “escarificação biológica” com crotalaria foi mais eficaz, em médio prazo, na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água do que a escarificação mecânica do solo. Sobrinho et al. (2003) observaram que a infiltração de água é favorecida quando se tem uma cobertura mais homogênea do solo, associada com adequado desenvolvimento radicular das culturas, favorecendo a formação de poros contínuos no perfil do solo.

A escarificação aumenta de forma significativa a infiltração da água no solo sob plantio direto, porém esse aumento não perdura por mais de um ano (TAVARES-FILHO et al., 2006). Além de trazer benefícios somente de curto prazo menores que um ano, a escarificação do solo, aumenta o risco de compactação do solo em profundidade (SILVA, S. G. C. et al., 2012). A busca por formar poros contínuos ao longo do perfil do solo, deve ser uma prática comum em lavouras sob SPD, para tanto, é necessário a utilização de plantas com elevada quantidade de raízes e a intensificação da atividade biológica (RODRIGUES et al., 2011). Além disso, práticas inadequadas, tais como a gradagem do solo, causa desestruturação do solo, resultando em grande quantidade de partículas finas, ocasionando selando

parcialmente os poros e dificultando o aumento das taxas de infiltração de água no solo (ASSIS; LANÇAS, 2005). Assim, observa-se que o SPDC24, na profundidade de 0,10 m, apresenta aumentos de infiltração tridimensional e na kfs em relação ao SPC, este estudo concorda com Stone et al. (2012), onde afirmam que o efeito da cobertura do solo contínuo sob SPD, favorece o aumento da estabilidade estrutural, e da infiltração de água no solo, ocasionando menor perda de água por escoamento superficial. Além disso, incrementos na taxa de infiltração de água no solo em SPD são esperados quando comparado com cultivo mínimo e ou sistema convencional com aração do solo (ALVAREZ; STEINBACH, 2009), principalmente em função da continuidade de poros no SPD.

Os efeitos da escarificação do solo não se prolongam ao longo dos cultivos, demonstrando que esta prática, não apresenta benefícios para melhoria da qualidade física do solo ao longo do tempo. Na profundidade de 0,10 m, não houve aumentos na infiltração tridimensional e de kfs dez meses após a escarificação do solo em relação ao SPDC11 e SPDC24. Isto demonstra, que a ausência de mobilização do solo, aliada à boas práticas de conservação do solo, preconizada pelo SPD ao longo do tempo, tem potencial para manter um adequado fluxo de água entre as camadas do perfil do solo. Nicoloso et al. (2008), avaliando métodos mecânicos e biológicos para mitigação da compactação do solo, observaram que a escarificação mecânica do solo teve efeito temporário, não sendo constatadas melhores condições físicas do solo após nove meses, além de não aumentar a infiltração de água no solo. Já a escarificação biológica aumentou a macroporosidade, reduziu a resistência à penetração e melhorou a infiltração de água. Tormena et al. (2008), avaliando sistemas com escarificação e rotação de culturas em um Latossolo Vermelho Distroférrico, observaram que a adoção de um sistema planejado de rotação de culturas é imprescindível para a manutenção da qualidade estrutural do solo em SPD, além de suprimir a escarificação do solo como prática mecânica complementar de manejo físico do solo.

Outros estudos já têm demonstrado que a escarificação nem sempre tem resultado em aumentos significativos na taxa de infiltração do solo e na kfs em relação ao SPD contínuo. Camara e Klein (2005), avaliando os efeitos da escarificação em um SPD contínuo com seis anos sob um Latossolo Vermelho Distrófico, observaram que para a taxa de infiltração, não houve diferenças em função da escarificação do solo em um SPD. Abreu et al. (2004), observando o efeito da escarificação do solo em SPD sob um Argissolo Vermelho, verificaram que não há efeitos após 4,5 meses da escarificação, além de que esta prática não foi eficiente em aumentar a kfs do solo.

5.6. Conclusões

A avaliação da qualidade do solo através dos atributos físicos não possibilitou identificar mudanças significativas na qualidade do solo entre estes dois modelos de produção (rotação e sucessão de culturas) de longo prazo testados em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso.

A qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, sob SPD melhorou ao longo do tempo, e mesmo após 24 anos sem revolvimento o solo oferece condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento das culturas de soja e de trigo.

A utilização de escarificação periódica do solo, no SPD de longo prazo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, é dispensável independente do modelo de produção, pois seus efeitos residuais persistem no solo por um período inferior ou igual a 10 meses.

5.7. Referências

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 1-15, 2009.
- ANJOS, L. H. C.; JACOMINE, P. K. T.; SANTOS, H. G. dos; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B. VIII – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. Eds. **Pedologia; Fundamentos**. Viçosa, SBCS, 2012, 343p.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: J. WILEY, 1972. 498 p.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o

crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 681-691, 2010.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 626-631, 2004.

BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2010, 162f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p.789-796, 2005.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Degaspar, 1997. 132p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).

CASTRO, W. J.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. F. C.; RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de solos do cerrado Goiano. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 4, n. 2, p. 305-320, 2011.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; 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**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 37, n. 1-2, p.113-125, 1996.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA, F. A.; MACHADO, T. M. Ajuste de grades amostrais para o mapeamento da resistência à penetração de um Latossolo Bruno. n:

INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, p.138-142, 2011.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Rendimento do milho em diferentes condições físicas de solo e quantidade de resíduo na ausência ou na presença de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1069-1076, 2009.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

De JONG VAN LIER, Q. IV - Gases no solo. In: De JONG VAN LIER, Q. (ed.) **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, 1 ed, 2010, 298p.

De JONG VAN LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, 2 ed., 1997, 212p.

FERREIRA, M. M. I – Caracterização física do solo. In: De JONG VAN LIER, Q. (ed.) **Física do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, 1 ed, p.1-28, 2010.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 65-73, 2009.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

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

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo-RS. 2.ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240p.

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

KLEIN, V.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, 2009.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-170, 2003.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2009.

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas: Bases agronômicas**. São Paulo: Editora, 1988. 306p.

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**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 197-200, 1968.

- PICKLER, E. P.; NÓBREGA, L. H. P.; LIMA, G. P.; KNOPATZKI, M. R. S.; PACHECO, F. P. Influência da cobertura de inverno nos atributos físicos do solo em culturas de milho e soja sob plantio direto. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 33-45, 2012.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 19-27, 2003.
- PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Saeafs, 1996, 446p.
- PREVEDELLO, C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; LOYOLA, J. M. T.; DIAS, N. L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 1-8, 2007.
- PREVEDELLO, C. L.; REICHARDT, K. Modelo tridimensional para medida da condutividade hidráulica de solos não saturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 121-124, 1991.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 1-54, 2011.
- REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 310-319, 2009.
- REICHERT, J. M.; SUZUKY, 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: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134, 2007.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p.151-160, 2001.
- RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; GUÊRIE, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, n. 1, p. 49-58, 2001.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 105-114, 2011.

ROSA, V. T. **Tempo de implantação do sistema plantio direto e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo**. 2009. 101f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J.; DELLA FLORA, L. P.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T. Infiltração de água no solo, determinada por diferentes métodos, como indicador do potencial produtivo em dois Latossolos manejados com agricultura de precisão. **Interciência**, Caracas, v. 37, n. 3, p. 2004-2008, 2012.

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um Argissolo da região do submédio São Francisco: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 875-884, 2000.

SAS LEARNING EDITION. **Getting started with the SAS Learning Edition**. Cary, 2002. 200p.

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

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.544-552, 2005.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, R. H. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 855-860, 2002.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 547-555, 2012.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n. 5, p.1097-1104, 2009.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 1065-1068, 2000.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; ALVES JUNIOR, J.; SILVA, J. G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 53-59, 2008.

SILVEIRA NETO, A. N.; SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 29-35, 2006.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; BALBUENA, R.; RESSIA, J. M.; FILGUEIRA, R. R. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1149-1155, 2012.

SOUZA, F. R.; ROSA JUNIOR, E. J.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; VENTUROSO, L. R.; ROSA, Y. B. C. J. Atributos físicos e desempenho agrônômico da cultura da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico submetido a dois sistemas de manejos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1357-1364, 2010.

SPERA, S. T.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; KLEIN, V. A.; DENARDIN, J. E.; SANTOS, H. P. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Revista Agrária**, Dourados, v. 4, n. 14, p. 313-323, 2011.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Efeitos do sistema plantio direto no uso da água pelas culturas e no manejo da irrigação**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012. (Comunicado Técnico, 207).

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 447-459, 2011.

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

TARAWALLY, M. A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M. E.; ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 95-103, 2004.

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

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 14, n. C, p. 55-61, 1950.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavra, v. 35, n. 3, p. 437-445, 2011.

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

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, 2008.

TULLBERG, J. N. Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 75, n. 4, p. 375-382, 2000.

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

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**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1437-1446, 2008.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMANA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2105-2114, 2011.

VIEIRA, S.R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agrônomo**, v. 47-50, p. 32-33, 1998.

VILLELA, A. L. O. **Variabilidade Espacial da Qualidade Físico-Hídrica dos Solos de uma Unidade de Pesquisa em Produção Agroecológica**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

WU, L.; SWAN, J. B.; PAULSON, W. H.; RANDALL, G. W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p.17-33, 1992.

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVES, B.J.R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.132, p.185-195, 2012.

6. ARTIGO 2: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO EM SISTEMAS DE MANEJO E MODELOS DE PRODUÇÃO

6.1. Resumo

A resistência do solo à penetração (RP) é um importante indicador da qualidade física do solo, e o limite de 2 MPa vem sendo usualmente utilizado para caracterizar a qualidade física do solo, tanto em sistema plantio direto (SPD) como em cultivos convencionais. O objetivo deste trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo do solo e modelos de produção sobre a RP em um Latossolo Vermelho Distroférico, identificando a necessidade de ampliação do limite de RP de 2 MPa em função do manejo do solo. O experimento foi conduzido em um delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5x2 (manejos do solo x modelos de produção), com quatro repetições. Os sistemas de manejo do solo foram: (i) sistema de preparo convencional (SPC); (ii) SPD escarificado a cada ano (SPDE1); (iii) SPD escarificado a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos (SPDC11); (v) SPD contínuo por 24 anos (SPDC24). O fator modelo de produção foi composto por: (i) rotação e; (ii) sucessão de culturas. A RP foi determinada em 20 amostras indeformadas de solo por tratamento e por camada (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) as quais foram equilibradas nos potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100, -500 kPa. Foi determinado a RP no conteúdo de água volumétrico equivalente à fração de água disponível as plantas de 0,7. Os resultados não indicaram diferenças nos valores de RP entre os modelos de produção. A detecção de diferenças de RP entre os sistemas manejo do solo foi dependente do potencial matricial de água no solo em que as amostras foram equilibradas. O limite crítico de RP usualmente utilizado de 2 MPa deve ser utilizado somente para o SPC, sendo inadequado para a caracterização física deste solo sob SPD contínuo ou com escarificação do solo. Independente do modelo de produção, os limites de RP devem ser ampliados para 3 MPa no SPDE1 e SPDE3, e para 3,5 MPa no SPD contínuo.

Termos de indexação: sistema plantio direto; escarificação do solo; nível de compactação.

SOIL PENETRATION RESISTANCE IN A RHODIC EUTRUDOX UNDER TILLAGE AND CROPPING SYSTEMS

6.2. Summary

Soil penetration resistance (SPR) is an important indicator of soil physical quality, and the limit of 2 MPa has been largely used to characterize soil physical quality in both no-tillage (NT) and in conventional systems. The objective of this study was to quantify the influence of different tillage and cropping systems on the SPR in a Rhodic Eutrudox and identify the necessity to expand the critical limit of SPR of 2 MPa depending on soil management used. The experiment was a 5x2 factorial (tillage systems vs cropping systems), laid out in a complete randomized block design with four replications. The tillage systems include: (i) conventional tillage by disk harrow (CT); (ii) NT with chiseling every year (NTC1); (iii) NT with chiseling every three years (NTC3); (iv) NT for 11 consecutive years (NT11) and; (v)

NT for consecutive 24 years (NT24). The cropping factors were: (i) crop rotation and (ii) crop succession. SPR was determined using twenty soil samples per treatment and layer (0.0-0.10; 0.10-0.20 e 0.20-0.30 m) which were equilibrated to matric potentials, -6, -10, -33, -100, and -500 kPa. SPR was determined at a volumetric soil water content equivalent to the fraction of plant available water, 0.7. The results indicated no differences in values of SPR between the cropping systems. Differences of SPR values among tillage systems were dependent on the matric potential at which the samples were equilibrated. The critical limit of SPR usually used (2 MPa) should only be employed for CT cultivation systems, but is inappropriate for the physical quality characterization of soils under NT or NT + chiseling. Therefore, independent of the cropping systems, SPR critical limit should be increased to 3 MPa for NTC1 and NTC3 systems, and 3.5 MPa for NT.

Index terms: no-tillage; soil chiseling; level compaction.

6.3. Introdução

O sistema plantio direto (SPD) tem sido cada vez mais utilizado em função das inúmeras vantagens econômicas e agronômicas, tais como a conservação do solo e água, além de melhorias na produtividade das culturas (Silva et al., 2012). Resultados apresentados na literatura têm demonstrado que, no SPD, ocorre a formação de uma camada caracterizada por um maior grau de compactação, a qual se localiza, geralmente, em uma profundidade equivalente a 0,10-0,20 m (Franchini et al., 2009). Além de aumentar a resistência do solo à penetração das raízes (Moraes et al., 2012), limitando a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (Bergamin et al., 2010), a compactação do solo reduz a porosidade total, a macroporosidade, a aeração, a capacidade de infiltração de água (Dias Junior & Pierce, 1996) e a condutividade hidráulica saturada do solo (Silva et al., 2009).

A resistência do solo à penetração (RP) tem sido usada por vários pesquisadores para quantificar a qualidade estrutural do solo, além de identificar a presença de camadas com maior grau de compactação. Portanto, na tomada de decisão para a realização de descompactação do solo em SPD, tem sido utilizado valores considerados limitantes (Reichert et al., 2007; Betioli Júnior et al., 2012) fixos de RP independente do tipo de solo, ou sistema de manejo. O valor mais comumente utilizado é de 2 MPa (Tormena et al., 1998; Silva et al., 2008; Lima et al., 2012). Porém, recentemente, trabalhos de pesquisa têm apontado a possibilidade de aumentar os valores limitantes de RP para 3,5 MPa em condição de SPD consolidado, com a justificativa da presença de poros contínuos e biológicos, os quais favorecem o crescimento do sistema radicular das culturas em áreas com menores RP (Tormena et al., 2007; Betioli Júnior et al., 2012). Entretanto, ainda existem muitas dúvidas

relacionadas aos níveis utilizados como críticos ou limitantes do solo em SPD consolidado de longo prazo, pois áreas consideradas com altos níveis de compactação em função dos valores medidos de RP não estão apresentando reduções na produtividade de grãos, indicando que estes limites críticos de RP podem estar inadequados. Neste sentido, é possível que os valores limitantes de RP ao crescimento radicular das plantas variem em função do sistema de manejo do solo utilizado.

Práticas de manejo do solo para controle da compactação do solo, baseadas na escarificação periódica, têm sido usadas por vários autores (Tavares Filho et al., 2006; Silva et al., 2012). Porém, o efeito residual das intervenções com aração ou escarificação sobre os atributos físicos do solo desapareceram em poucos ciclos de cultivo (Drescher et al., 2011) ou em períodos inferiores a seis meses (Silva et al., 2012) ou a um ano (Tavares Filho et al., 2006). Outra medida que vem sendo preconizada para melhorar a qualidade física de solos compactados envolve a adoção de modelos de produção que contemplem plantas com elevado potencial de produção de fitomassa e caracterizadas por um sistema radicular abundante, profundo e agressivo. Embora o efeito da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo no SPD tenha sido objeto de diversas pesquisas (Genro Junior et al., 2009; Lanzanova et al., 2010; Debiasi et al., 2010; Costa et al., 2011), ainda persistem dúvidas a respeito da eficiência dessa prática na mitigação de camadas compactadas de solo. Isso ocorre porque os benefícios da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo nem sempre são detectados, o que pode ser atribuído principalmente ao fato de a maioria dos trabalhos serem embasados em experimentos de curto-médio prazo, sem levar em consideração o tempo de adoção do SPD.

O objetivo deste trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo do solo e de modelos de produção sobre RP de um Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso, identificando a necessidade de alteração do valor de RP de 2 MPa como crítico ou limitante na avaliação da qualidade física do solo em função do manejo do solo.

6.4. Material e Métodos

O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, implantado em 1988 na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, situada no município de Londrina/PR, (23°11' S, 51°11' O, e altitude de 620 m). O clima da região é classificado como Cfa (classificação de Koppen), subtropical úmido, mesotérmico, com médias anuais de 20°C de temperatura e de 1622 mm de precipitação. O solo da área de estudo é de origem basáltica, classificado no

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como Latossolo Vermelho Distroférico (Santos et al., 2006) com textura muito argilosa.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 2 (manejo do solo x modelo de produção), com quatro repetições e parcelas de 30 x 10 m. O fator manejo do solo foi constituído pelos seguintes tratamentos: (i) sistema preparo convencional utilizando grade pesada a uma profundidade média de 0,15 m, seguida de grade leve antes de cada cultivo de inverno e verão (SPC); (ii) SPD com escarificação periódica a cada ano (SPDE1); (iii) SPD com escarificação periódica a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos, implantado em 2001 (SPDC11); e (v) SPD contínuo por 24 anos, implantado em 1988 (SPDC24). No SPDC11, entre os anos de 1988 e 2001, o preparo do solo foi realizado com a utilização de arado de aivecas (profundidade média de trabalho de 0,32 m), seguido de gradagem leve realizada antes da cultura de verão, e de gradagem pesada (profundidade média de trabalho de 0,15 m) seguida de gradagem leve realizada antes da implantação da cultura de inverno. O SPDE1 e SPDE3 foram escarificados antes da implantação das culturas de inverno, com escarificador montado tipo cruzador equipado com rolo destorroador e quatro hastes distanciadas 0,40 m, e profundidade média de trabalho de 0,30 m, com ângulo de ataque de 45°. A amostragem foi realizada após 10 e 22 meses da última escarificação, respectivamente. Os sistemas de manejo do solo foram conduzidos sob dois modelos de produção: (i) sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr) no verão; e (ii) rotação de culturas com ciclo de 4 anos, com as seguintes espécies no inverno-verão: tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja. Maiores detalhes de características físicas e químicas antes da implantação do experimento foram descritas por Piccinin (2005).

A amostragem do solo foi realizada com a coleta de 20 anéis de aço inox com volume de 100 cm³ (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno) por tratamento e por camada do perfil do solo (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), nas entrelinhas da cultura de verão (soja), totalizando 600 amostras de solo com estrutura preservada. Os anéis eram coletados com o conteúdo de água do solo próximo da capacidade de campo, utilizando um dispositivo amostrador de solo acoplado a um trator, de modo que os mesmos foram inseridos verticalmente no solo, de forma sequencial no centro das camadas avaliadas.

As 600 amostras foram divididas em cinco grupos de 120, sendo oito por sistema de manejo e camada de solo avaliada, independente dos modelos de produção. Cada grupo de amostras foi saturado e submetido a um dos seguintes potenciais matriciais de água no solo

(Ψ): -3 e -6 kPa utilizando mesa de tensão (Embrapa, 1997) e nos Ψ de: -10; -33; -100; -500 kPa por meio de pressões aplicadas em câmaras de Richards com placas porosas. Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ , as amostras de solo foram pesadas e a RP determinada utilizando um penetrógrafo estático de bancada marca Marconi, modelo MA 933, constituído de uma haste metálica com um cone na sua extremidade possuindo um semi-ângulo de 30°, diâmetro de 4 mm e área da base de 0,1256 cm². A velocidade de penetração foi de 20 mm min⁻¹. Em seguida, as amostras de solo foram secas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ por 24h, permitindo a quantificação do conteúdo volumétrico de água do solo (θ) (m³ m⁻³) pelo quociente da massa de água retida na amostra em cada Ψ e o volume do solo de cada amostra.

Na determinação do conteúdo de água retido no Ψ de -1.500 kPa, utilizou-se um o psicrômetro modelo WP4-C, utilizando amostras de solo deformadas (Klein et al., 2006). Assim, foi determinado o conteúdo gravimétrico de água na amostra de solo que, multiplicado pelo valor de densidade do solo da amostra, resultou no θ no Ψ de -1.500 kPa.

Utilizando a curva de RP de cada manejo do solo, descrita em Moraes (2013), foi determinado a RP no θ equivalente à fração de água disponível às plantas (FAD) de 0,7. A FAD é a razão entre a capacidade de armazenamento de água atual, em lâmina (CADa) e a capacidade de armazenamento potencial de água no solo (CAD) (Santos & Carlesso, 1998). Para a CAD do solo, foi considerado os valores de θ entre a capacidade de campo (CC), no Ψ de -10 kPa, e o ponto de murcha permanente (PMP) no Ψ de -1.500 kPa. A estimativa do θ para os Ψ intermediários entre a CC e o PMP foi realizada utilizando a curva de retenção de água para cada manejo do solo, descrita em Moraes (2013).

Os resultados de RP e θ foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$), em separado para cada camada (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) e Ψ (-6, -10, -33, -100, -500 kPa). Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos, as médias, foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro. As análises foram realizadas através do programa computacional SAS Learning Edition (2002).

6.5. Resultados e Discussão

A interação entre os sistemas de manejo do solo e os modelos de produção não foi significativa para todas as variáveis avaliadas, nas três camadas do perfil do solo. Desta forma, foi comparado o efeito simples de cada um dos fatores (manejo do solo e modelo de produção) nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Evidentemente que o θ diminuiu com o incremento dos Ψ (Figura 1-I). Não houve influência significativa dos modelos de produção na retenção de água do solo em todas as camadas avaliadas, de forma que diferenças nos valores de RP em cada Ψ podem ser atribuídas a variações no estado de compactação do solo e ou à força das ligações entre as partículas e agregados do solo.

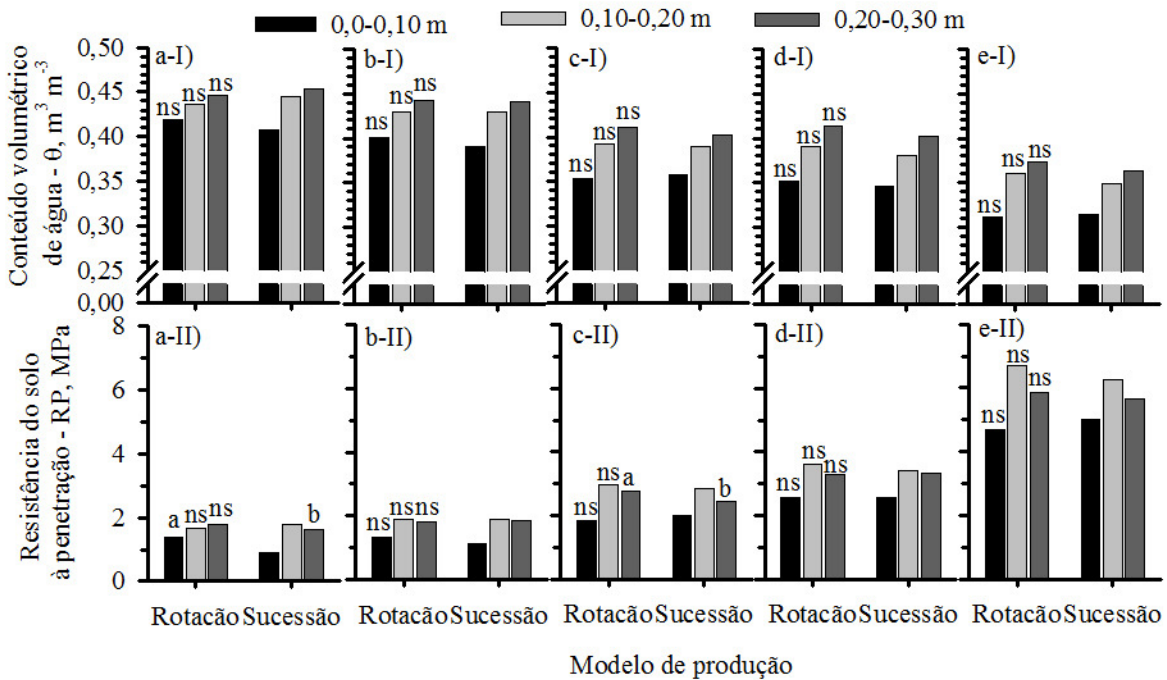


Figura 1 - Conteúdo volumétrico de água do solo (I) e resistência do solo à penetração (II) em função de modelos de produção, determinado nos potenciais matriciais de -6 kPa (a), -10 kPa (b), -33 kPa (c), -100 kPa (d) e -500 kPa (e), em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os efeitos dos modelos de produção sobre a RP foram pequenos, independentemente dos Ψ em que a mesma foi determinada (Figura 1-II). Na camada de 0,0-0,10 m, com a utilização do Ψ de -6 kPa (Figura 1a-II), e na camada de 0,20-0,30 m, sob um Ψ de -33 kPa (Figura 1c-II), a RP foi significativamente maior na rotação do que na sucessão de culturas. Nos demais Ψ , a RP não foi influenciada pelos modelos de produção. Esse resultado foi coerente com a ausência de efeitos significativos dos modelos de produção sobre os demais atributos físicos do solo medidos (Moraes, 2013), demonstrando que mesmo a RP, considerada uma propriedade com alta sensibilidade a alterações estruturais induzidas por diferentes manejos (Abreu et al., 2004), não foi capaz de diferenciar a rotação da sucessão de culturas. Abreu et al. (2004), avaliando ruptura de camadas compactadas usando escarificação

ou plantas com sistema radicular agressivo, concluíram que a detecção de melhorias nas condições físicas do solo depende do atributo físico utilizado. Estes autores, utilizando a condutividade hidráulica do solo, observaram que a escarificação biológica foi mais eficaz que a escarificação mecânica do solo, porém, quando utilizaram como indicador a RP, os resultados foram inversos. Nas camadas abaixo de 0,10 m, foi observado que no Ψ de -10 kPa (capacidade de campo), os sistemas de rotação e sucessão de culturas atingiram o nível crítico de 2 MPa. Isso demonstra que, em θ abaixo da capacidade de campo, utilizando o critério de RP de 2 MPa, as plantas estariam sob condições físicas restritivas ao crescimento e desenvolvimento.

À exceção do Ψ de -10 kPa, o θ foi influenciado pelos sistemas de manejo (Figura 2-I). De forma geral, os sistemas de manejo com maior intensidade de mobilização do solo (SPC e SPDE1) resultaram em menores valores de θ comparativamente aos demais tratamentos, o que foi mais evidente na camada de 0,0-0,10 m. Tais diferenças nos valores de θ podem ter resultado em variações na RP entre os sistemas de manejo do solo. Além disso, independentemente do sistema de manejo e do Ψ , houve um incremento no θ em função do aumento da profundidade da camada avaliada, indicando a existência de alterações na distribuição do tamanho de poros no perfil do solo.

Os valores de RP foram influenciados pela variação do θ em cada um dos Ψ , e pelos sistemas de manejo do solo (Figura 2-II). A redução da RP em função do aumento do θ pode ser observado entre os Ψ . Este efeito de redução dos valores de RP em altos conteúdos de água ocorre possivelmente porque a presença de água facilita a penetração da haste, pela ação lubrificante entre as suas partículas (Assis et al., 2009). Além disso, o aumento do θ reduz as forças de fricção e coesão entre as partículas e agregados do solo, diminuindo a RP (ROS et al., 2011). Utilizando os Ψ de -6 e de -10 kPa (Figura 2a,b-II), os valores de RP médios dos sistemas de manejos foram próximos de 2 MPa. Porém, a redução do Ψ para valores abaixo de -33 kPa (Figura 2c-II) resultou em valores de RP acima de 2 MPa, com exceção da camada de 0,0-0,10 m do SPC. Assim, mesmo quando determinada em altos θ (capacidade de campo), os valores de RP foram próximos ou maiores do que 2 MPa em todos os sistemas de manejo sob SPD, inclusive nos que foram submetidos à mobilização recente (SPDE1 e SPDE3), demonstrando claramente que o limite de 2 MPa é inadequado para este Latossolo Vermelho Distroférrico.

Na camada de 0,0-0,10 m, na maior parte dos Ψ , os valores de RP no SPC foram inferiores aos dos sistemas de manejo do solo (Figura 2-II), demonstrando o efeito de

rompimento da estrutura do solo pela utilização da gradagem pesada. Por outro lado, a RP do SPDC24 não diferiu significativamente do SPDC11 na camada de 0,0-0,10 m em nenhum dos Ψ avaliados, demonstrando que a RP não diminuiu com o aumento do tempo de adoção do SPD. Da mesma forma, a RP nos tratamentos SPDE1 e SPDE3 foi similar à observada no SPDC11 e SPDC24, indicando que, na camada de 0,0-0,10 m, os efeitos da duração da escarificação foram inferiores a dez meses.

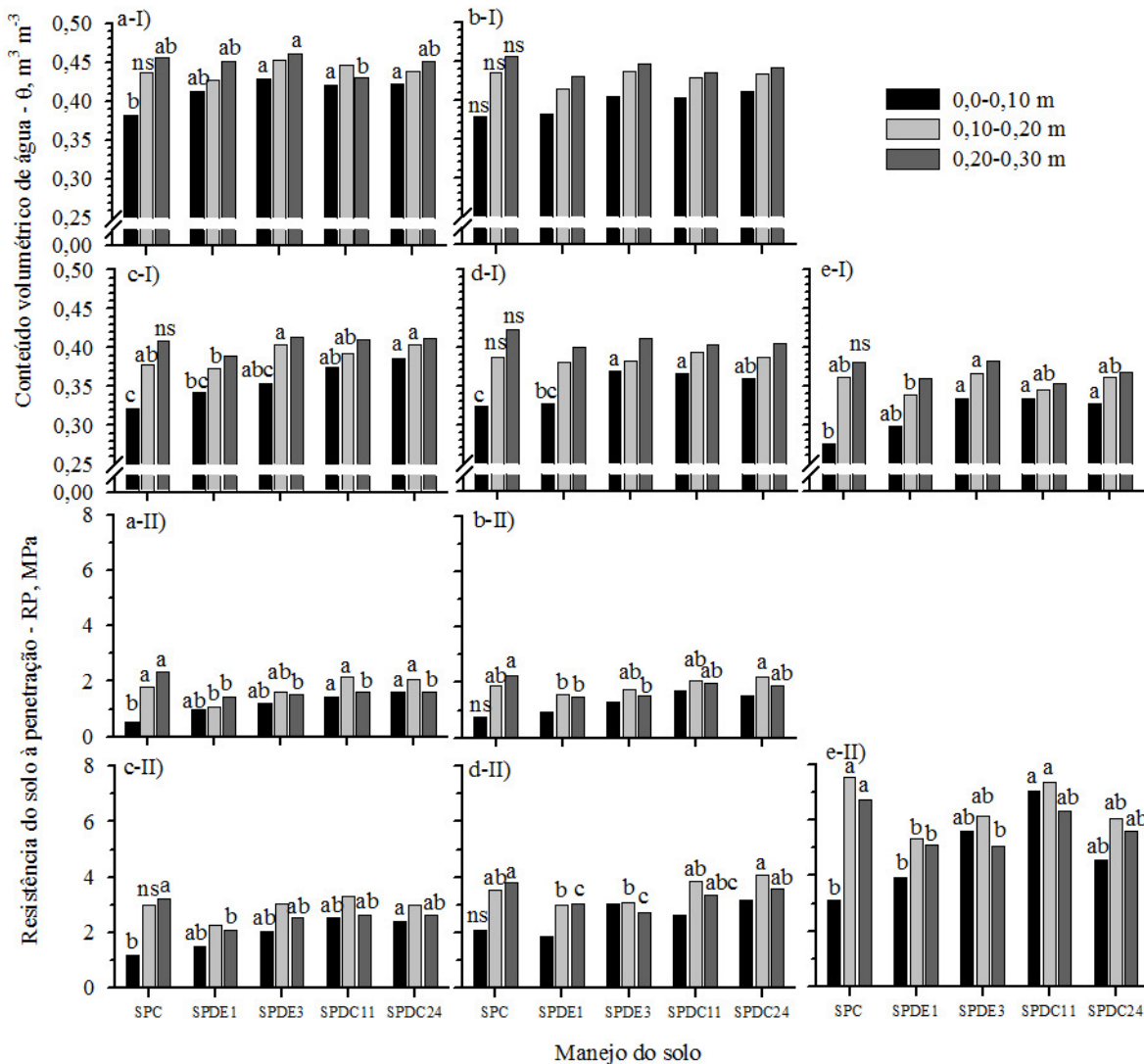


Figura 2 - Conteúdo volumétrico de água do solo (I) e resistência do solo à penetração (II) em função de sistemas de manejo do solo, determinado nos potenciais matriciais de -6 kPa (a), -10 kPa (b), -33 kPa (c), -100 kPa (d) e -500 kPa (e), em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada de 0,10-0,20 m, a RP foi, na maior parte das situações, superior no SPC em relação ao SPDE1, demonstrando claramente o efeito da formação de um “pé de grade” no

SPC abaixo de 0,10 m de profundidade. Nesta mesma camada, não foram observadas diferenças significativas para a RP, entre o SPDE1 e o SPDE3 em todas as situações avaliadas, porém, destaca-se que, em duas situações (Figura 2c,e-II), o θ do SPDE1 foi inferior ao SPDE3, o que pode contribuir para mascarar as diferenças de RP entre os tratamentos (Moraes et al., 2012). Não houve diferenças de RP entre os tempos de adoção do SPD na camada de 0,10-0,20 m, demonstrando que, ao longo do tempo, não houve aumento no grau de compactação do solo.

Na camada de 0,10-0,20 m, as diferenças na RP entre o SPDE1 e os sistemas contínuos sem revolvimento (SPDC11 e SPDC24) foram alteradas em função do Ψ (Figura 2-II). No Ψ de -500 kPa (Figura 2e-II), a RP foi significativamente maior no SPDE1 do que no SPDC11. Já o SPDE1 resultou em maiores valores de RP em relação ao SPDC24 no Ψ de -6, -10 e -100 kPa (Figura 2a,b,d-II). Isto demonstra que, na camada de 0,10-0,20 m, a redução nos valores da RP pela escarificação foi perceptível até 10 meses após a sua realização. Por outro lado, não houve diferenças entre o SPDE3 e os sistemas contínuos sem mobilização do solo (SPDC11 e SPDC24), com exceção do Ψ de -100 kPa, onde a RP foi significativamente maior no SPDC24 (Figura 3d). Assim, após 22 meses da escarificação do solo, não foi possível detectar efeitos residuais desta prática sobre a RP.

Na camada de 0,20-0,30 m, também foram observadas diferenças para os resultados de RP entre os sistemas de manejo em função do Ψ (Figura 2-II). Em todas as situações, na camada de 0,20-0,30 m, não houve diferenças de RP entre os tratamentos com escarificação periódica do solo (SPDE1 e SPDE3). Da mesma forma, em todos os Ψ não houve diferenças de RP entre os tempos de adoção do SPD (SPDC11 e SPDC24). Comparando os sistemas com escarificação periódica (SPDE1 e SPDE3) com os sistemas sem mobilização do solo (SPDC11 e SPDC24), na camada de 0,20-0,30 m, diferenças foram observadas apenas quando a RP foi determinada no Ψ de -100 kPa (Figura 2d-II). Neste caso, os valores de RP foram maiores no SPDC24 em relação ao SPDE1 e SPDE3. A ausência de diferenças entre a utilização de escarificação periódica do solo (SPDE1 e SPDE3) em relação ao SPDC11 e SPDC24 demonstra que não se justifica a utilização da escarificação periódica do solo para redução do nível de compactação deste Latossolo Vermelho Distroférico, pois o efeito é inferior a dez meses, e não há incrementos de produtividade de grãos de soja e trigo em relação ao sistema contínuo, conforme apresentado por Moraes (2013) em trabalho conduzido no mesmo local deste experimento.

A existência de camadas com maior grau de compactação no SPC “pé-de-grade”, são identificadas em função do incremento acentuado nos valores de RP na camada de 0,20-0,30 m em relação à camada de 0,0-0,10 m (Figura 2-II). Entretanto, na camada de 0,20-0,30 m, as variações de RP no SPC em relação aos demais manejos do solo são dependentes da variação do θ nos diferentes Ψ . Os valores de RP no SPC, avaliados no Ψ de -6 kPa, foram superiores a todos os manejos do solo. Porém, diferenças na camada de 0,20-0,30 m entre o SPC e os sistemas contínuos (SPDC11 e SPC24) não foram observadas em todos os demais Ψ , indicando que a redução do θ pode ter alterado a sensibilidade da RP em detectar aumento no nível de compactação do SPC em relação ao SPDC11 e SPDC24. Provavelmente, a ausência de diferenças da RP no SPDC24 em relação ao SPC em Ψ maiores que -6 kPa está relacionada à estrutura do solo formada no SPDC24, no qual a resistência de ligação dos agregados do solo foi maior, mesmo apresentando uma densidade do solo menor que o SPC (Moraes, 2013).

Avaliando a possibilidade de ampliação dos limites críticos de RP para o Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, foi observado que os valores de θ em que a RP atinge 2 MPa e 3,5 MPa foram alterados em função do manejo do solo (Figura 3-I) e não dependeram do modelo de produção (Figura 3-II). Na camada de 0,0-0,10 m, o θ da RP de 2 MPa no SPDC11 foi igual ao θ no Ψ de -10 kPa e superior ao θ no Ψ de -33 kPa. Não houve diferenças significativas do θ no Ψ de -33 kPa em relação ao θ na RP de 2 MPa do SPDE3 e SPDC24. O θ na RP de 3,5 MPa, na camada de 0,0-0,10 m, em todos os manejos do solo e modelos de produção foi inferior ao θ no Ψ de -33 kPa. Na camada de 0,0-0,10 m, o θ na RP de 2 MPa, sob rotação e sucessão de culturas, se equivaleu ao θ no Ψ de -33 kPa. Na camada de 0,0-0,10 m, o θ na RP de 3,5 MPa no SPC não diferiu do θ no Ψ de -1.500 kPa, indicando que para esta condição de estrutura do solo pode não ser recomendado a ampliação do limite de RP de 2 para 3,5 MPa. Todos os demais manejo do solo, na camada de 0,0-0,10 m, apresentaram o θ na RP de 3,5 MPa superior ao θ no Ψ de -1.500 kPa.

Na camada de 0,10-0,20 m, o θ na RP de 2 MPa foi superior ao θ no Ψ de -10 kPa no SPDE3 e SPDC11. O θ no Ψ de -10 kPa, na camada de 0,10-0,20 m do SPC, SPDE1 e SPDC24 foi idênticos ao valor do θ na RP de 2 MPa. Indicando que o limite de RP de 2 MPa não pode ser considerado um valor adequado em nenhum dos manejo do solo, pois este valor sugere que, independente do manejo do solo, o θ deve ser igual ou superior à capacidade de campo no Ψ de -10 kPa, para que o crescimento radicular não fosse reduzido. Em todos os manejos do solo e modelos de produção, na camada de 0,10-0,20 m, o θ na RP de 2 MPa foi

superior ao θ do Ψ de -33 kPa e, em alguns casos, foi igual (SPC, SPDE1, SPDC24 e sob sucessão de culturas) ou superior (SPDE3 e SPDC11, e sob rotação de culturas) ao θ no Ψ de -10 kPa. Novamente, isto indicando que em todos os sistemas de manejo do solo e modelos de produção, a RP já estaria limitando o crescimento e desenvolvimento das plantas, porém, esta limitação não corrobora com os resultados de produtividade da soja e trigo desta safra agrícola (Moraes, 2013) e de resultados observados de produtividade de grãos em duas décadas neste experimento (Franchini et al., 2012). O θ na RP de 3,5 MPa, independente do manejo do solo e modelo de produção, na camada de 0,10-0,20 m, foi inferior ao θ no Ψ de -10 kPa, indicado que utilizando este limite, houve condições físicas para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Conforme resultados apresentados por Betioli Junior et al. (2012), em um Latossolo Vermelho Distroférico, o valor de RP de 2 MPa, superestimou a condição restritiva ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas em SPD no longo prazo, e a utilização de RP crítica maior que 2,0 MPa resultou em um intervalo hídrico ótimo condizente com a qualidade física desse solo sob SPD.

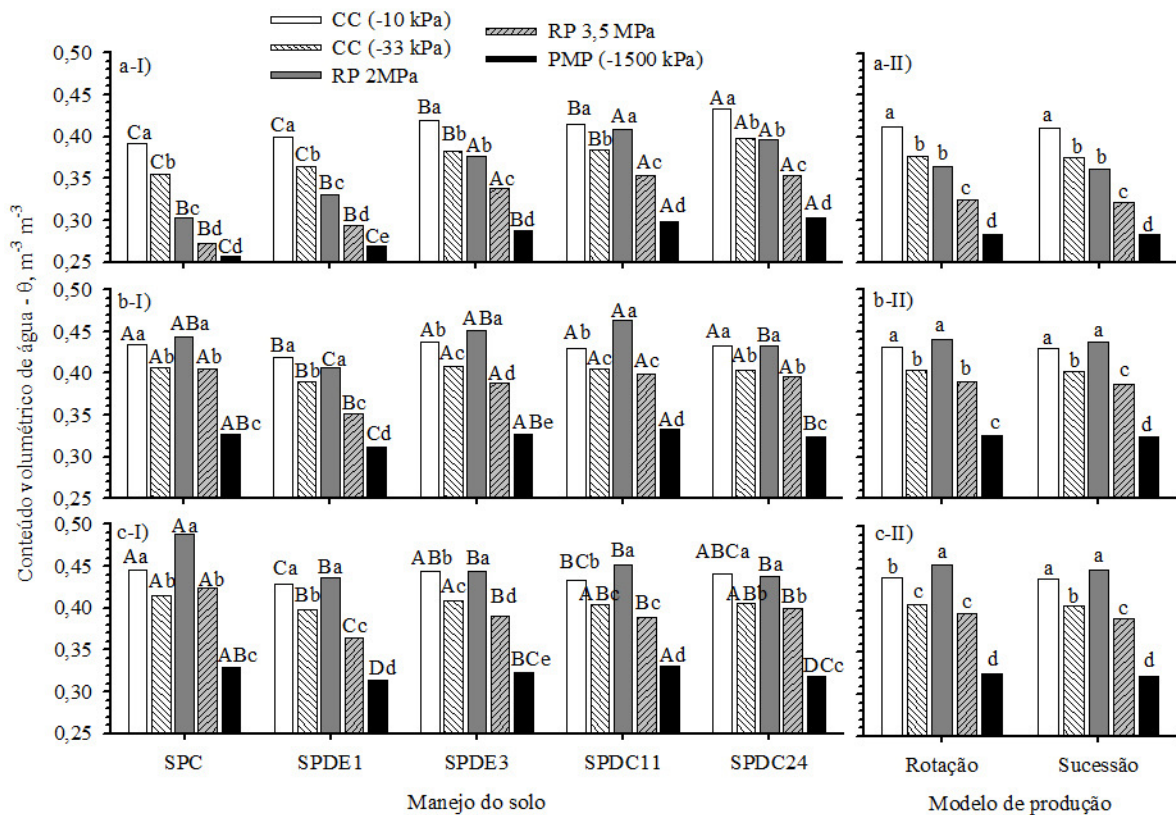


Figura 3 - Conteúdo volumétrico de água no solo nos limites de capacidade de campo (-10 e -33 kPa), ponto de murcha permanente (-1.500 kPa) e resistência do solo à penetração de 2 e 3,5 MPa, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) nos diferentes manejo do solo (I) e modelos de produção (II) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre os manejos do solo, e minúscula em mesmo manejo do solo ou modelo de produção, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada de 0,20-0,30 m, o θ no Ψ de -10 kPa foi inferior ao θ na RP de 2 MPa no SPDE3 e SPDC11, e igual ao θ na RP de 2 MPa no SPC, SPDE1 e SPDC24. O θ no Ψ de -10 kPa, na camada de 0,20-0,30 m, foi inferior ao θ na RP de 2 MPa sob rotação de cultura, e igual ao θ na RP de 2 MPa sob sucessão de culturas. Esses resultados indicam que a utilização do valor de RP crítico de 2 MPa, em todos os manejos do solo e modelo de produção, na camada de 0,20-0,30 m, haveria fortes restrições físicas para penetração radicular, reduzindo a extração de água e nutrientes pela planta. Portanto, ampliando o limite crítico de RP de 2 MPa para 3,5 MPa, na camada de 0,20-0,30 m, foi observado que o θ em todos os sistemas de manejo do solo e modelos de produção, foi inferiores ao θ no Ψ de -10 kPa. Assim, existem condições adequadas de θ no solo sem impedimento mecânico à penetração das raízes, condição necessária para justificar a elevada produtividade de grãos nestes manejos do solo e modelo de produção observada em Moraes (2013), além de justificar a estabilidade produtiva sob SPD ao longo do tempo, observada por Franchini et al. (2012) neste mesmo experimento.

Analisando-se o Ψ no solo quando a RP atinge 2 e 3,5 MPa, nas três camadas avaliadas, foi observado que houve influência dos sistemas de manejo do solo (Figura 4-I), mas não dos modelos de produção (Figura 4-II). Na camada de 0,0-0,10 m, os manejos SPDE3, SPDC11 e SPDC24 apresentaram valores de Ψ na RP de 2 MPa próximos à -33 kPa. Nestes manejos, a ampliação do limite de RP para 3,5 MPa resultou um Ψ próximo de -150 kPa. A ampliação da RP de 2 para 3,5 MPa na camada de 0,0-0,10 m, no SPC e SPDE1, foi inadequada, pois o Ψ passou de -260 kPa para -920 kPa e de -108 para -460 kPa, respectivamente, indicando que, em solos desestruturados pelo intenso revolvimento todo ano com gradagem pesada, deve ser mantido o limite de RP em 2 MPa, e no SPDE1 o valor limitante de RP deve ser inferior a 3,5 MPa.

Na camada de 0,10-0,20 m, considerando uma RP de 2 MPa, o Ψ em todos os sistemas de manejo do solo foi superior a -18 kPa. A ampliação da RP para 3,5 MPa indica que na camada de 0,10-0,20 m, o solo poderia atingir um Ψ de -50 kPa no SPC, SPDC11 e SPDC24, de -88 kPa no SPDE3 e de -200 kPa no SPDE1, sem que houvesse restrições físicas ao crescimento radicular das plantas. Considerando o manejo de irrigação através da tensiometria, em solos argilosos com a cultura da soja, a irrigação deve ser iniciada quando no

solo o Ψ atinge -70 kPa (Guerra & Antonini,1997). Collares (1994), estudando o desempenho produtivo da cultura da soja sob diferentes níveis de manejo da irrigação, observou que não houve perdas na produtividade de grãos de soja quando as plantas são submetidas a níveis de deficiência hídrica até -150 kPa, na camada de 0,0-0,20 m.

Na camada de 0,20-0,30 m, considerando uma RP de 2 MPa, o Ψ no SPDC24 foi de -15 kPa, para os demais sistemas de manejo do solo e modelos de produção o Ψ foram inferiores à -10 kPa. Isso indica que o θ deve ser maior do que a capacidade de campo (-10 kPa) para que o sistema radicular das culturas não seja reduzido ou até mesmo impedido de penetrar no solo. Na camada de 0,20-0,30 m, no SPDE3, SPDC11 e SPDC24, foi possível observar que a RP atinge 3,5 MPa para um Ψ inferior a -70 kPa. No SPDE1, na camada de 0,20-0,30 m, a RP de 3,5 MPa apresentou um Ψ de -160 kPa. Porém, no SPC para uma RP de 3,5 MPa, o Ψ foi de -20 kPa. Esta redução no Ψ está relacionada ao aumento do nível de compactação do SPC, pois o uso da grade pesada atinge uma profundidade de até 0,15 m, ou seja, neste manejo do solo, na camada de 0,20-0,30 m, ocorreram grandes restrições físicas ao crescimento e desenvolvimento das plantas, ocasionando redução da produtividade de grãos da soja no SPC em relação ao SPDC24 (Moraes, 2013). Isso indica que, a utilização do valor de RP de 3,5 MPa foi adequado para condições de SPD consolidado ou com escarificação periódica a cada três anos em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso.

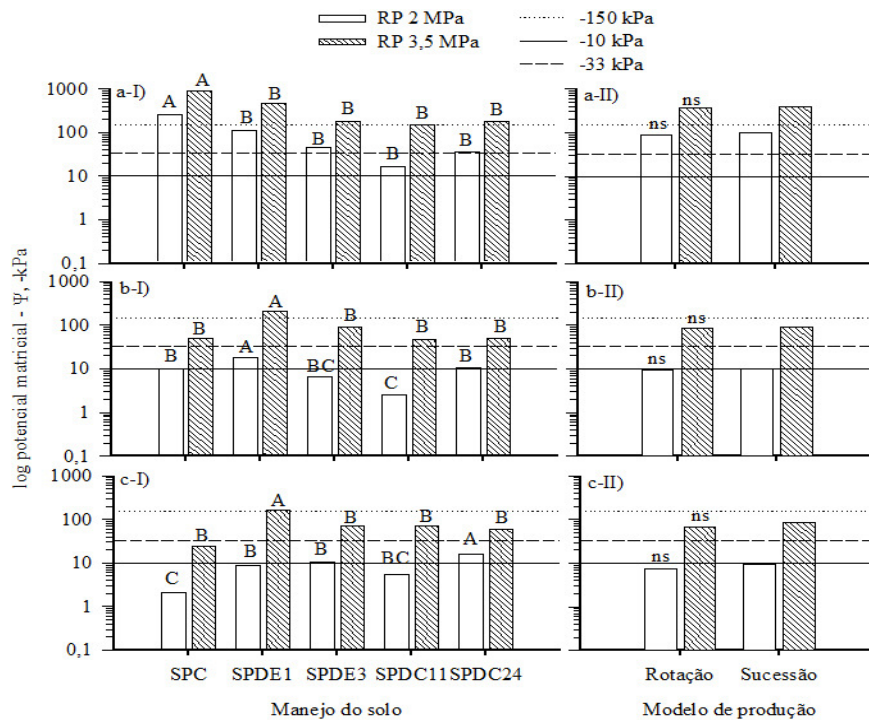


Figura 4 - Potencial matricial de água no solo quando a resistência do solo à penetração atinge 2 e 3,5 MPa, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) para os manejos do solo (I) e modelo de produção (II) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre os manejos do solo, e minúscula em mesmo manejo do solo ou modelo de produção, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O uso do valor de RP de 2 MPa, claramente indica que esse limite crítico é muito conservador, e que não condiz com os resultados de produtividade de grãos de soja e trigo. Com exceção da produtividade de grãos de soja no SPC, em todos os demais manejos do solo não houve perdas em função de restrições físicas neste Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso (Moraes, 2013). Conforme Moraes (2013), a produtividade de grãos de soja e trigo foi semelhante à produtividade de grãos média da safra de 2011/12 no Estado do Paraná (CONAB, 2012). Adicionalmente, a produtividade de grãos de soja, milho e trigo neste experimento, observa ao longo de duas décadas apresentou estabilização a partir do sétimo ano do SPD, com ou sem escarificação a cada três anos (SPDE3), promovendo aumento da produtividade de soja quando comparado com o SPC, principalmente com utilização de rotação de cultura (Franchini et al., 2012).

Analisando os resultados do θ e Ψ nas três camadas avaliadas, foi possível constatar que a ampliação do limite de RP de 2 para 3,5 MPa é adequada para sistemas produtivos sob SPD consolidado (SPDC11 e SPDC24) ou com escarificação periódica a cada três anos (SPDE3). Importante também esclarecer que a ampliação do limite de RP de 2 para 3,5 MPa, não pode

ser indicado para sistemas com revolvimento intenso do solo, tais como sob SPC com utilização de grade pesada, e ou com escarificação periódica do solo a cada ano (SPDE1).

Analisando a RP quando a FAD (Carlesso, 1995; Santos & Carlesso, 1998) atinge o valor de 0,7, ou seja, quando foram extraídos 30% da CAD (entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente) do solo, observa-se que, nas três camadas do perfil do solo, houve efeito dos sistemas de manejo do solo, mas não do modelo de produção utilizado (Figura 5).

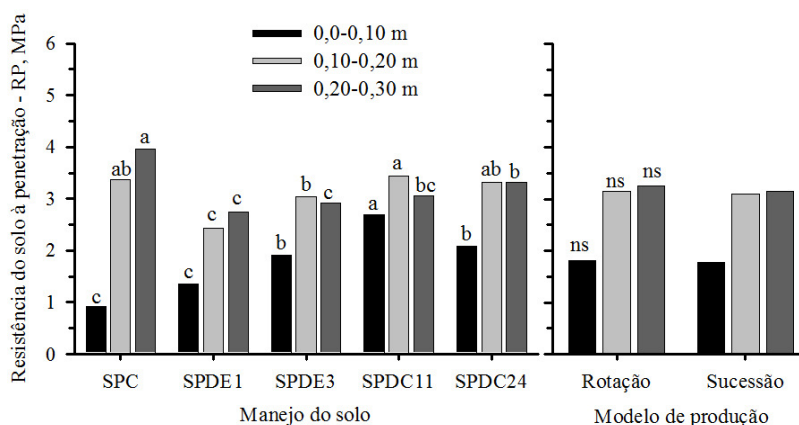


Figura 5 - Resistência do solo à penetração na fração de água disponível de 0,7, nos sistemas de manejo do solo e modelo de produção em um Latossolo Vermelho Distroférrico. ^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). Londrina, PR, 2013.

*médias seguidas pela mesma letra minúscula, em mesma camada dos manejos do solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada de 0,0-0,10 m, o maior valor de RP na FAD de 0,7 foi observado no SPDC11 (2,7 MPa). Os menores valores de RP para a FAD de 0,7, na camada de 0,0-0,10 m, foram observados no SPC e SPDE1, com RP de 0,95 e 1,4 MPa, respectivamente. Na camada de 0,10-0,20 m, o SPDC11 e o SPDC24 apresentaram os valores de RP na FAD 0,7, de 3,5 e 3,3 MPa, respectivamente. Os sistemas com escarificação do solo, SPDE1 e SPDE3, na camada de 0,10-0,20 m, apresentaram RP de 2,5 e 3,0 MPa, respectivamente. Na camada de 0,20-0,30 m, na FAD de 0,7, a RP do SPDC11 e SPDC24, foi de 3,1 e 3,3 MPa, respectivamente. Entretanto o SPDE1 e SPDE3, na camada de 0,20-0,30 m, apresentaram uma RP de 2,8 e 2,9 MPa, respectivamente. Carlesso (1997) sugere o valor crítico de FAD de 0,6, como sendo o limite para que não ocorra redução da área foliar das plantas, sendo que em valores abaixo de 0,5 foi constatado senescência das plantas de sorgo. Portanto, para que seja satisfeita uma condição de que as plantas não sejam submetidas ao déficit hídrico, o valor de RP onde a FAD atinge 0,7, no perfil até 0,30 m deste Latossolo Vermelho Distroférrico, deve

ser alterado em função do sistema de manejo do solo. Considerando os resultados de produtividade de grãos de soja e trigo ao longo de duas décadas (Franchini et al., 2012) e na safra de 2011/2012 (Moraes, 2013), recomenda-se a ampliação dos limites críticos de RP do solo em função do sistema de manejo do solo. Em sistemas com escarificação esporádica do solo a cada ano ou a cada três anos (SPDE1 e SPDE3) poderá ser utilizado uma RP de até 3 MPa. Em SPD consolidado (SPDC11 e SPDC24) poderá ser ampliado esses valores de RP limitante para 3,5 MPa. No entanto, é importante reforçar que para sistemas com utilização de grade pesada (SPC), o valor crítico de RP de 2 MPa não deve ser alterado, pois os resultados de produtividade de grãos de soja indicaram que houve perdas produtivas em relação ao SPDC24 (Moraes, 2013), ocasionando restrições hídricas no perfil do solo sob SPD, e a utilização da RP crítica para um valor de FAD de 0,7 pode não ser adequada para o SPC.

6.6. Conclusões

1 A utilização do valor de resistência do solo à penetração limitante de 2 MPa em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob sistema plantio direto, independente do modelo de produção utilizado é inadequado, e o valor desse limite crítico de RP deve ser diferente para cada sistema de manejo do solo utilizado.

2 Em sistema plantio direto contínuo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, o limite de resistência do solo à penetração deverá ser ampliado para 3,5 MPa.

3 No sistema plantio direto com intervenção mecânica a cada ano ou a cada três anos, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, o valor de resistência do solo à penetração limitante deverá ser ampliado do usual 2 MPa para 3 MPa.

4 Em sistemas de preparo convencional do solo utilizando anualmente grade pesada em cada cultivo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, deve ser mantido o valor de resistência do solo à penetração crítica de 2 MPa.

5 A resistência do solo à penetração, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não é alterada em função do modelo de produção, sucessão de cultura [trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja (*Glycine max* L.)] ou de um sistema de rotação de culturas [tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja].

6 A escarificação do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso influencia positivamente nos valores de resistência do solo à penetração por um período inferior a 22 meses em relação ao sistema plantio direto contínuo.

6.7. Referências

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28: 519-531, 2004.
- ASSIS, R.L.; LAZZARINI, G.D.; LANÇAS, K.P. & CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. Eng. Agric. 29:558-568, 2009.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A. & SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. Pesq. agropec. bras., 45:299-305, 2010.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P. & GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 36:971-982, 2012.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. Ci. rural, 25:183-188, 1995.
- CARLESSO, R.; PEITER, M.X.; PETRY, M.T. & WOSCHICK, D. Resposta do sorgo grânifero a déficits hídricos aplicados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Ci. rural, 27:211-215, 1997.
- COLLARES, G. L. Resposta da soja a diferentes níveis de manejo da irrigação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1994. 65p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola).
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra Brasileira: Grãos 2011/2012, Oitavo levantamento. Brasília, 2012. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_05_10_08_49_52_boletim_mai_2012.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2013.
- COSTA, M.S.S.M.; PIVETTA, L.A.; COSTA, L.A.M.; PIVETTA, L.G.; CASTOLDI, G. & STEINER, F. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. R. Bras. Eng. Agríc., 15:810-815, 2011.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O. & KAMIMURA, K.M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. Pesq. agropec. bras., 45:603-612, 2010.
- DIAS JUNIOR, M. S. & PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.
- DRESCHER, M S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E. & FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 35:1713-1722, 2011.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro, 2 ed., 1997, 212p.

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A.L. & FARIAS, J.R.B. Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; TONON, B.C.; FARIAS, J.R.B.; OLIVEIRA, M.C.N. & TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil, *Field Crop. Res.*, 137:178-185, 2012.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. *Ci. rural*, 39:65-73, 2009.

GUERRA, A.F. & ANTONINI, J.C.A.; Irrigação suplementar para a cultura de soja. In EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Planaltina, DF). Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1991 a 1995. Planaltina, 1997, p.99-100.

KLEIN, V.A.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. *R. Bras. Eng. Agríc.*, 10:646-650, 2006.

LANZANOVA, M.E.; ELTZ, F.L.F.; NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. & ROCHA, M.R. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1333-1342, 2010.

LIMA, C.L.R.; MIOLA, E.C.C.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A. & SILVA, A.P. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 124:190-195, 2012.

MORAES, M.T. Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2013. 188p. (Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo).

MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. & SILVA, V.R. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1395-1406, 2012.

PICCININ, J.L. Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenções mecânicas sob sucessão e rotação de culturas. Campinas. Universidade Estadual de Campinas, 2005. 112p. (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola).

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: CERRETA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.v.5. p.49-134.

ROS, V.V.; SOUZA, C.M.A.; VITORINO, A.C.T. & RAFULL, L.Z.L. Oxisol resistance to penetration in no-till system after sowing. *Eng. Agríc.*, 31:1104-1114, 2011.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F. & CUNHA, T. J. F. (Ed.). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R.; Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. R. Bras. Eng. Agric., 2:287-294, 1998.

SAS LEARNING EDITION. Getting started with the SAS Learning Edition. Cary, 2002. 200p.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & IMNHOF, S. funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. R. Bras. Ci. Solo, 32:1-10, 2008.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian Oxisols under no-tillage. R. Bras. Ci. Solo, 33:1097-1104, 2009.

SILVA, S.G.C.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A. & SÁ, J.C.M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. R. Bras. Ci. Solo, 36:547-555, 2012.

TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A. & BARBOSA, G. M. C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. Ci. rural, 36:996-999, 2006.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22:573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M.. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 31:211-219, 2007.

7. ARTIGO 3: QUANTIFICAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO POR MEIO DA CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

7.1. Resumo

A qualidade física do solo pode ser avaliada através da resistência do solo à penetração (RP), porém, a RP é influenciada positivamente pela densidade do solo (D_s) e negativamente pela umidade do solo, entretanto, pode ser descrita matematicamente pela curva de resistência do solo a penetração (CRP). O objetivo deste trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo sobre a CRP em um Latossolo Vermelho Distroférico, e utiliza-la na descrição da evolução da qualidade física do solo. O experimento foi conduzido em um delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5x2 (manejo do solo x modelo de produção), com quatro repetições. Os sistemas de manejo do solo foram: (i) sistema de preparo convencional (SPC); (ii) sistema plantio direto (SPD) escarificado a cada ano (SPDE1); (iii) SPD escarificado a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos (SPDC11); (v) SPD contínuo por 24 anos (SPDC24). O fator modelo de produção foi composto por: (i) rotação e; (ii) sucessão de culturas. A CRP foi determinada em amostras indeformadas de solo, coletadas nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, as quais foram equilibradas nos potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100, -500 kPa. Através da CRP foi determinado a RP para uma densidade do solo (D_s) de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ para todos os manejos do solo, independente do modelo de produção, pois a RP não foi alterada pelos modelos de produção. Para uma mesma situação de D_s a RP sempre foi maior em função do aumento do tempo sem intervenção no solo. Quanto maior o tempo do solo sob SPD, maior foi o aumento da resistência da estrutura do solo. Considerando uma mesma D_s , não se observou alteração da quantidade de macro e microporos em função do manejo do solo, sendo que as alterações de RP foram atribuídas à recuperação e aumento da resistência da estrutura do solo. Há necessidade de se estabelecer limites distintos de RP em função do tempo de adoção do SPD.

Palavras chave: Sistema plantio direto. Escarificação do solo. Recuperação da resistência.

QUANTIFICATION OF SOIL PHYSICAL QUALITY IN TILLAGE SYSTEMS IN A RHODIC EUTRUDOX FROM SOIL PENETRATION RESISTANCE CURVE

7.2. Abstract

The physical quality of the soil can be assessed using soil penetration resistance (SPR), however SPR is positively affected by bulk density (BD) and negatively influenced by soil moisture, but, can be described mathematically from soil penetration resistance curve (SPRC). The aim of this study was to quantify the influence of different management systems on SPRC in a Rhodic Eutrudox, and use it to describe the evolution of soil physical quality. The experiment was a 5x2 factorial (tillage systems vs cropping systems), laid out in a complete randomized block design with four replications. The tillage systems include: (i) conventional tillage by disk harrow (CT); (ii) NT with chiseling every year (NTC1); (iii) NT with chiseling every three years (NTC3); (iv) NT for 11 consecutive years (NT11) and; (v) NT for consecutive 24 years (NT24). The cropping factors were: (i) crop rotation and (ii) crop succession. The SPRC was determined on undisturbed soil samples, collected from soil layers, 0.0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m, which were equilibrated to matric potentials, -6, -10, -33, -100, -500 kPa. From the SPRC, SPR was determined for a BD of 1.30 Mg m^{-3} for all tillage systems, regardless of the cropping systems, because the RP was not affected by cropping systems. At a single BD, the SPR was always higher due to the increase in time without soil disturbance. The longer the time the soil is under NT, the higher the increase in soil resistance. At a single BD, macro and micropores did not change due to soil management, whereas changes in SPR were attributed to recovery and increased resistance of the soil structure. Therefore, there is need to establish distinct boundaries of SPR versus time of adoption of NT.

Key Words: No-tillage. Soil chiseling. Age-hardening

7.3. Introdução

A variação da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade e da densidade do solo (D_s) pode alterar a interpretação do nível de compactação do solo (MORAES et al., 2012). Para contornar este problema, pode ser optado por determinar a curva de resistência do solo à penetração (CRP), para tanto, utilizam amostras indeformadas, ou no campo, obtendo medidas de RP durante o secamento de solo em distintos valores de D_s (BLAINSKI et al., 2008). Imhoff et al. (2000) afirmaram que a CRP foi um parâmetro útil na avaliação da qualidade física do solo num sistema de pastejo intensivo. Araujo et al. (2004) utilizaram a CRP para caracterizar o efeito do cultivo do solo em relação à mata nativa. Fidalski e Tormena (2007) utilizaram funções de pedotransferência para estimativa da CRP em um Argissolo cultivado com citros. Estes autores observaram que as funções de pedotransferência foram dependentes da D_s , do carbono orgânico e da espécie vegetal

(gramínea, leguminosa ou vegetação espontânea) presentes nas entre linhas de citros. A ausência de vegetação reduziu a retenção de água do solo, incrementando os valores de RP (FIDALSKI; TORMENA, 2007), demonstrando assim a importância do manejo do solo para a qualidade física do solo. Já Silva et al. (2008) não observaram influências dos teores de carbono orgânico do solo na CRP, e indicam que devem ser buscados manejos que mantêm ou reduzam a Ds, de modo a não acentuar as restrições físicas pela RP.

A formação de uma camada caracterizada por um maior grau de compactação, em sistema plantio direto (SPD), a qual se localiza, geralmente, em uma profundidade equivalente a 0,08-0,20 m (FRANCHINI et al., 2009; GENRO JUNIOR et al., 2009; SECCO et al., 2009), vem questionando a sustentabilidade do SPD sem utilização de práticas de manejo que envolvam a mobilização do solo. Além de aumentar a RP das raízes (CAVALIERI et al., 2006), limitando a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010), a compactação do solo reduz a porosidade total, macroporosidade, aeração, capacidade de infiltração de água (Dias JUNIOR; PIERCE, 1996) e condutividade hidráulica (SILVA et al., 2009). Porém, os níveis de RP considerados como críticos não são dependentes dos sistemas de manejo do solo, nem em função do tempo de adoção do SPD, porém, em muitas áreas sob SPD consideradas com elevados valores de RP (acima de 2 MPa) não tem reduzido a produtividade de grãos (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012), nem o crescimento radicular (KAISER et al., 2009), indicando que pode haver mudanças na resistência da estrutura do solo em função do sistema de manejo do solo.

A decisão em torno da necessidade ou não da escarificação no SPD deve ser criteriosa, tendo vista o custo relativamente elevado da operação, o aumento da suscetibilidade do solo à compactação pelo tráfego, a destruição da estrutura e a redução da cobertura do solo (REICHERT et al., 2007). Assim, Tavares-Filho et al. (2006) recomendam que sistemas que incluam a rotação de culturas e a adoção de culturas de cobertura devem ser a primeira opção para melhorar a qualidade física do solo em áreas sob SPD.

A definição dos valores críticos de RP sob SPD de longo prazo vêm sendo questionada na literatura (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JÚNIOR et al. 2012), indicando assim, que são necessários estudos em sistemas de manejo de longa duração para que seja definido novos limites críticos de RP para o monitoramento da compactação e da qualidade física do solo com uso de penetrômetros (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012).

A hipótese testada é de que quanto maior o tempo sem revolvimento do solo, para uma mesma situação de Ds, há incrementos nos valores de RP, necessitando que sejam

determinados limites críticos distintos de RP em função do sistema de manejo, sendo possível utilizar a CRP como indicador da qualidade física do solo em diferentes sistemas de manejos do solo. O objetivo do trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de manejo do solo sobre a curva de resistência do solo à penetração (CRP) de um Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso e utilizá-la na identificação e descrição da evolução da qualidade física do solo.

7.4. Materiais e Métodos

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 2 (manejo do solo x modelo de produção), com quatro repetições e parcelas de 30 x 10 m. O fator manejo do solo foi constituído pelos seguintes tratamentos: (i) sistema preparo convencional utilizando grade pesada a uma profundidade média de 0,15 m, seguida de grade leve antes de cada cultivo de inverno e verão (SPC); (ii) SPD com escarificação periódica a cada ano (SPDE1); (iii) SPD com escarificação periódica a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos, implantado em 2001 (SPDC11); e (v) SPD contínuo por 24 anos, implantado em 1988 (SPDC24). No SPDC11, entre os anos de 1988 e 2001, o preparo do solo foi realizado com a utilização de arado de aivecas (profundidade média de trabalho de 0,32 m), seguido de gradagem leve realizada antes da cultura de verão, e de gradagem pesada (profundidade média de trabalho de 0,15 m) seguida de gradagem leve realizada antes da implantação da cultura de inverno. O SPDE1 e SPDE3 foram escarificados antes da implantação das culturas de inverno, com escarificador montado tipo cruzador equipado com rolo destorroador e quatro hastes distanciadas 0,40 m, e profundidade média de trabalho de 0,30 m, com ângulo de ataque de 45°. A amostragem foi realizada após 10 e 22 meses da última escarificação, respectivamente. Os sistemas de manejo do solo foram conduzidos sob dois modelos de produção: (i) sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glicine max* (L.) Merr) no verão; e (ii) rotação de culturas com ciclo de 4 anos, com as seguintes espécies no inverno-verão: tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja. Maiores detalhes de características físicas e químicas antes da implantação do experimento foram descritas por Piccinin (2005).

Foram coletados vinte anéis de aço inox com volume de 100 cm^3 (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno) por tratamento e camada (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), nas entrelinhas da cultura de verão (soja), totalizando 600 amostras de solo com estrutura preservada. Os anéis foram coletados com o conteúdo de água do solo próximo da capacidade de campo, utilizando um dispositivo amostrador de solo acoplado a um trator, de modo que os anéis foram inseridos verticalmente no solo, de forma sequencial no centro das camadas avaliadas (0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m). Para evitar a perda, deformação e o ressecamento do solo, os anéis foram revestidos na parte superior e inferior com uma tampa plástica, e armazenados em caixas com estrutura de proteção para o transporte. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório, onde permaneceram sob refrigeração ($\pm 5^\circ\text{C}$) para inibir a atividade biológica e a ocorrência de eventos que modificam a estrutura do solo, como a germinação de sementes ou a atividade de insetos e minhocas, até a sua preparação para análise.

As 600 amostras foram divididas em cinco grupos de 120, sendo oito por sistema de manejo e camada avaliada, independente dos modelos de produção. Posteriormente, cada grupo de amostras foi submetido às tensões equivalentes a um dos seguintes potenciais matriciais de água no solo (Ψ): -3 e -6 kPa utilizando mesa de tensão (EMBRAPA, 1997); -10; -33; -100; -500 kPa por meio de pressões aplicadas em câmaras de Richards com placas porosas. Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ , as amostras foram pesadas e a RP determinada utilizando um penetrógrafo estático de bancada similar ao descrito por Tormena et al. (1998). O penetrógrafo, modelo MA 933 da marca Marconi, é constituído de uma haste metálica com um cone na sua extremidade com semi-ângulo de 30° , diâmetro de 4 mm e área da base de $0,1256 \text{ cm}^2$, ligado a um medidor composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kgf. A velocidade de penetração foi de 20 mm min^{-1} , de forma que, em cada amostra, foram realizadas 120 leituras de RP até a profundidade de 0,040 m. A RP foi calculada considerando a média das leituras entre 0,005 e 0,04 m de profundidade. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^\circ\text{C}$ por 24h. O θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi quantificado pelo quociente da massa de água retida na amostra em cada Ψ e o volume do solo de cada amostra. A D_s foi obtida conforme metodologia descrita em Embrapa (1997).

Na determinação do conteúdo de água retido no Ψ de -1.000 e -1.500 kPa, empregou-se o psicrômetro modelo WP4-C, utilizando amostras deformadas (KLEIN et al., 2006). Assim, obteve-se o conteúdo gravimétrico de água que, multiplicado pelo seu valor de D_s , resultou no θ no Ψ de 1.500 kPa.

7.4.1. Determinação da curva de resistência à penetração

Para o ajuste da CRP, a variação da RP foi relacionada ao θ e à D_s , por meio de um modelo não-linear conforme Busscher (1990) e Silva, A. P. et al. (1994), descrito na equação 1. O coeficiente de determinação (r^2) do modelo não linear foi calculado pela equação 2, conforme Kaiser et al. (2009).

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

Onde, RP: Resistência do solo à penetração (MPa); D_s : Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); e a , b e c : são parâmetros obtidos por meio do ajuste dos modelos.

$$r^2 = 1 - \left(\frac{SQ\ resíduo}{SQ\ regressão} \right) \quad (2)$$

A partir da CRP, foram feitas as estimativas de RP em função da D_s para toda a amplitude de valores observados de θ determinados em toda a amplitude dos Ψ de -10 a -500 kPa.

7.4.2. Análise estatística

Os ajustes da CRP foram realizados através da rotina “PROC NLIN”, do módulo de estatística do programa computacional SAS LEARNING EDITION (2002). As equações de ajuste da RP foram submetidas à análise da variância (teste F, $p < 0,05$), e os gráficos plotados por meio do programa SigmaPlot®10.0 (Systat software, Inc.). Foi relacionado a RP para uma D_s de $1,30\ Mg\ m^{-3}$, utilizando toda a amplitude de θ observado nos Ψ em que foi determinado a RP. Para a comparação das CRP, foram utilizados os valores de RP em cada manejo do solo observados em diferentes θ (repetições), submetendo à análise de variância (Teste F, $p < 0,05$) e quando significativos analisados pelo teste T ($p < 0,05$).

7.5. Resultados e Discussão

O ajuste dos modelos da CRP aos dados de RP em função da Ds e θ , para a camada de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, encontram-se nas tabelas 1, 2 e 3, respectivamente. Os modelos explicaram acima de 87; 78 e 84 % da variabilidade da RP, para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. As equações de ajuste da RP foram significativas pelo teste F ($p < 0,05$) em todos os sistemas de manejo e camadas avaliadas. O sinal dos coeficientes associados a cada variável, indica que a RP variou positivamente com a Ds (coeficiente b) e negativamente com a θ (coeficiente c) concordando outros autores, em solos de mesma classe com teores similares de argila (PETEAN et al., 2010; BETIOLI JUNIOR et al., 2012), e com teores inferiores de argila (BLAINSKI et al., 2012).

Tabela 1 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$) na camada de 0,0-0,10 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r^2
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	0,0014	0,0009	-0,0005	0,00325	0,94*
b	10,2964	1,0316	8,2043	12,3886	
c	-5,3125	0,4981	-6,3228	-4,3023	
-----SPDE1-----					
a	0,00426	0,00244	-0,0007	0,0092	0,93*
b	7,9621	0,7075	6,5286	9,3955	
c	-4,6272	0,4600	-5,5593	-3,6952	
-----SPDE3-----					
a	0,0017	0,0011	-0,0005	0,0039	0,96*
b	9,9153	0,6908	8,5156	11,3150	
c	-5,3255	0,4769	-6,2818	-4,3592	
-----SPDC11-----					
a	0,0193	0,0137	-0,00847	0,0471	0,87*
b	5,3898	0,9176	3,5305	7,2490	
c	-3,8757	0,6007	-5,0928	-2,6586	
-----SPDC24-----					
a	0,00402	0,0022	-0,0003	0,0084	0,96*
b	8,8037	0,7309	7,3227	10,2847	
c	-4,8792	0,4312	-5,7529	-4,0055	

$r^2 = [1 - (SQ_{resíduo} / SQ_{regressão})]$; *significativo pelo teste F, ao nível de 5 % de probabilidade de erro.

Tabela 2 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$) na camada de 0,10-0,20 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r^2
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	0,0740	0,0613	-0,0502	0,1982	0,78*
b	3,4985	0,9459	1,5820	5,4151	
c	-3,1692	0,7547	-4,6984	-1,6400	
-----SPDE1-----					
a	0,0214	0,0156	-0,0103	0,0530	0,78*
b	4,5706	0,7511	3,0488	6,0924	
c	-3,9248	0,6172	-5,1753	-2,6743	
-----SPDE3-----					
a	0,0276	0,0205	-0,0138	0,0691	0,84*
b	4,9886	1,0448	2,8718	7,1055	
c	-3,7445	0,6254	-5,0118	-2,4773	
-----SPDC11-----					
a	0,0450	0,0235	-0,0025	0,0925	0,89*
b	3,0957	0,9480	1,1748	5,0166	
c	-3,7821	0,4288	-4,6510	-2,9132	
-----SPDC24-----					
a	0,0009	0,00046	0,000004	0,00184	0,98*
b	9,7291	0,8743	7,9576	11,5007	
c	-6,22421	0,3430	-6,9370	-5,5472	

$r^2 = [1 - (SQ_{resíduo} / SQ_{regressão})]$; *significativo pelo teste F, ao nível de 5 % de probabilidade de erro.

Os resultados da estimativa de RP, em cada manejo do solo e camada avaliada, são influenciados pelos coeficientes de ajuste. Os coeficientes de ajuste das equações demonstram que, na camada de 0,0-0,10 m, houve um incremento nos valores dos coeficientes em função do tempo sem revolvimento do solo. No SPDE3 o módulo dos valores dos coeficientes a, b e c, são superiores aos observados no SPDE1, indicando que há aumento dos valores de RP em mesma Ds e θ em função do aumento do tempo sem revolvimento do solo. Entre os tempos de adoção do SPD, foi observado que há aumentos do módulo dos coeficientes b e c no SPDC24 em relação ao SPDC11, ou seja, indicando elevação dos valores de RP em uma mesma Ds e θ .

Na camada de 0,10-0,20 m, nos manejos com escarificação do solo, observa que os coeficientes a e b, são maiores no SPDE3 em relação ao SPDE1. Observa-se que os coeficientes b e c, no SPDC24 foram superiores à todos os outros manejos do solo, indicando que os efeitos de elevação dos valores de RP em função do incremento de Ds ou redução do θ

são mais pronunciados no SPDC24 do que nos demais manejos do solo. Além de que, na camada de 0,10-0,20 m, em função dos coeficientes de ajustes, é possível afirmar que em uma mesma D_s e θ , serão observados maiores valores de RP no SPDC24.

Na camada de 0,20-0,30 m, no SPC, é possível destacar que o efeito do coeficiente b , que acompanha a D_s na equação de ajuste da CRP, apresentou pouca influência no modelo. E os principais incrementos nos valores de RP serão observados em função da redução do θ . Analisando o comportamento dos coeficientes b e c , nos manejos com escarificação do solo, observa-se que estes coeficientes foram superiores no SPDE3 em relação ao SPDE1. Este mesmo comportamento foi apresentado em função dos tempos de adoção do SPD, pois os coeficientes b e c foram superiores no SPDC24 em relação ao SPDC11. Destaca-se ainda que os coeficientes b e c , do SPDC24 foram superiores aos manejos com escarificação (SPDE1 e SPDE3) e com grade pesada (SPC).

Tabela 3 - Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRP ($RP = a D_s^b \theta^c$) na camada de 0,20-0,30 m. θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); D_s é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa). Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r^2
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	0,0998	0,0552	-0,0121	0,2116	0,91*
b	0,7897	0,9885	-1,2132	2,7925	
c	-3,8852	0,6307	5,1630	-2,6073	
-----SPDE1-----					
a	0,0624	0,0449	-0,0284	0,1533	0,84*
b	3,8942	0,8098	2,2535	5,5349	
c	-3,0966	0,6640	-4,4419	-1,7513	
-----SPDE3-----					
a	0,0217	0,0151	-0,00882	0,0522	0,91*
b	4,3161	1,0580	2,1723	6,4599	
c	-4,3430	0,6080	-5,5750	-3,1111	
-----SPDC11-----					
a	0,0356	0,0251	-0,0154	0,0865	0,89*
b	3,9592	1,1884	1,5512	6,3671	
c	-3,7502	0,5369	-4,8380	-2,6623	
-----SPDC24-----					
a	0,0022	0,0012	-0,0001	0,0046	0,97*
b	8,3026	0,9201	6,4382	10,1670	
c	-6,0537	0,4096	-6,8836	-5,2238	

$r^2 = [1 - (SQ_{resíduo} / SQ_{regressão})]$; *significativo pelo teste F, ao nível de 5 % de probabilidade de erro.

A alteração no valor absoluto de cada coeficiente influência de forma diferente na estimativa da RP em uma mesma Ds e θ em função dos manejos do solo e camadas avaliadas. Para melhor visualização das alterações influenciadas pelos coeficientes de ajuste das equações do modelo de Busscher (1990), são observadas as relações entre a estimativa da RP no SPDC24 em relação aos demais sistemas de manejo do solo (Figura 1), para as três camadas avaliadas. Nesta relação, foram estimados os valores de RP em todos os sistemas de manejo, utilizando o modelo de Busscher (1990) com os coeficientes ajustados no respectivo manejo do solo e camada (Tabela 1,2,3), em função de um mesmo conjunto de dados (Ds e θ) observados no SPDC24. Em todas as situações os valores de RP observados no SPDC24 são superiores aos demais sistemas de manejo do solo (SPDC11, SPDE3, SPDE1 e SPC), com exceção do SPC na camada de 0,20-0,30 m (Figura 1d-III).

A curva de resistência à penetração do solo (CRP) foi plotada em função da variação da θ considerando uma Ds média ($1,30 \text{ Mg m}^{-3}$) para todos os sistemas de manejo do solo, observada para as camadas de 0,0-0,10 m (Figura 2a), 0,10-0,20 m (Figura 2b) e 0,20-0,30 m (Figura 2c). Desta forma, mantendo uma Ds igual para todos os tratamentos, é possível observar alteração no aumento exponencial da RP em função do conteúdo de água do solo, para cada manejo do solo.

Na camada de 0,0-0,10 m, observa-se que, em uma mesma Ds e θ , os valores de RP observados no SPDC24 são maiores do que os demais sistemas de manejo, indicando que a ausência de mobilização do solo resulta, ao longo do tempo, em um aumento de resistência da estrutura do solo (Figura 2 e Tabela 4). Esta constatação fica ainda mais evidente quando o SPDC24 é comparado com o SPDC11. Para θ abaixo de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (próximo da capacidade de campo) há modificações no padrão de RP do solo em função do tempo de adoção do SPD. Quando ocorrem reduções no conteúdo de água do solo para $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as diferenças tornam-se mais evidentes, sendo possível observar diferenças de até 3 MPa a mais no SPDC24 quando comparado com sua adoção há 11 anos.

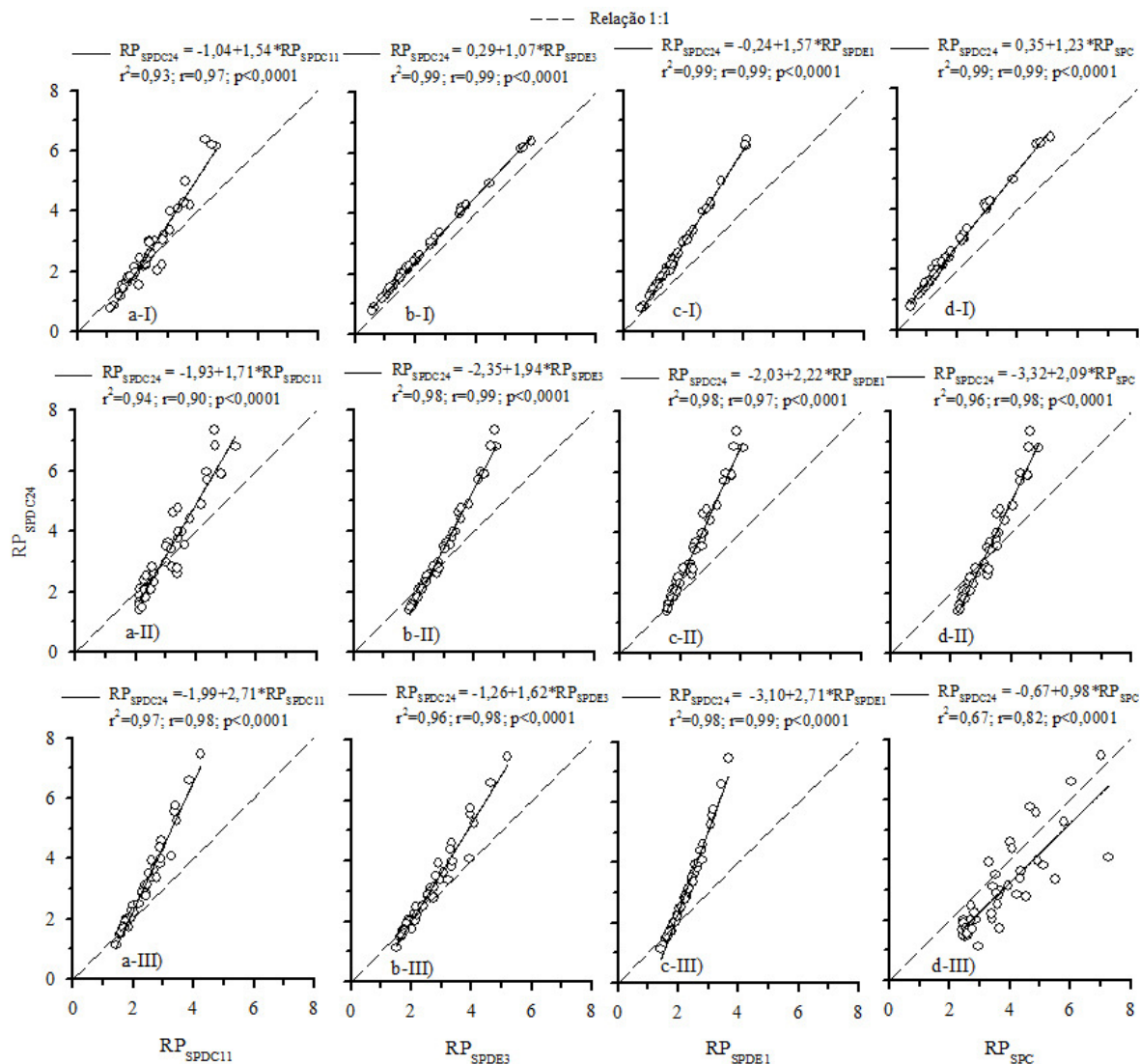


Figura 1 - Relação entre as estimativas de resistência do solo à penetração (RP) pelo modelo de Busscher (1990), para mesmo conjunto de densidades e conteúdo de água, no sistema plantio direto contínuo por 24 anos (RP_{SPDC24}) em relação ao demais tempos de adoção e escarificação do sistema plantio direto: (a) SPDC11; (b) SPDE3; (c) SPDE1; (d) SPC, para as camadas de 0,0-0,10 m (I); 0,10-0,20 m (II) e 0,20-0,30 m (III). Londrina, PR, 2013.

$SPDC24$: sistema plantio direto contínuo por 24 anos; $SPDC11$: sistema plantio direto contínuo por 11 anos; $SPDE1$: sistema plantio direto escarificado todo ano; $SPDE3$: sistema plantio direto escarificado a cada três anos; SPC : sistema plantio convencional.

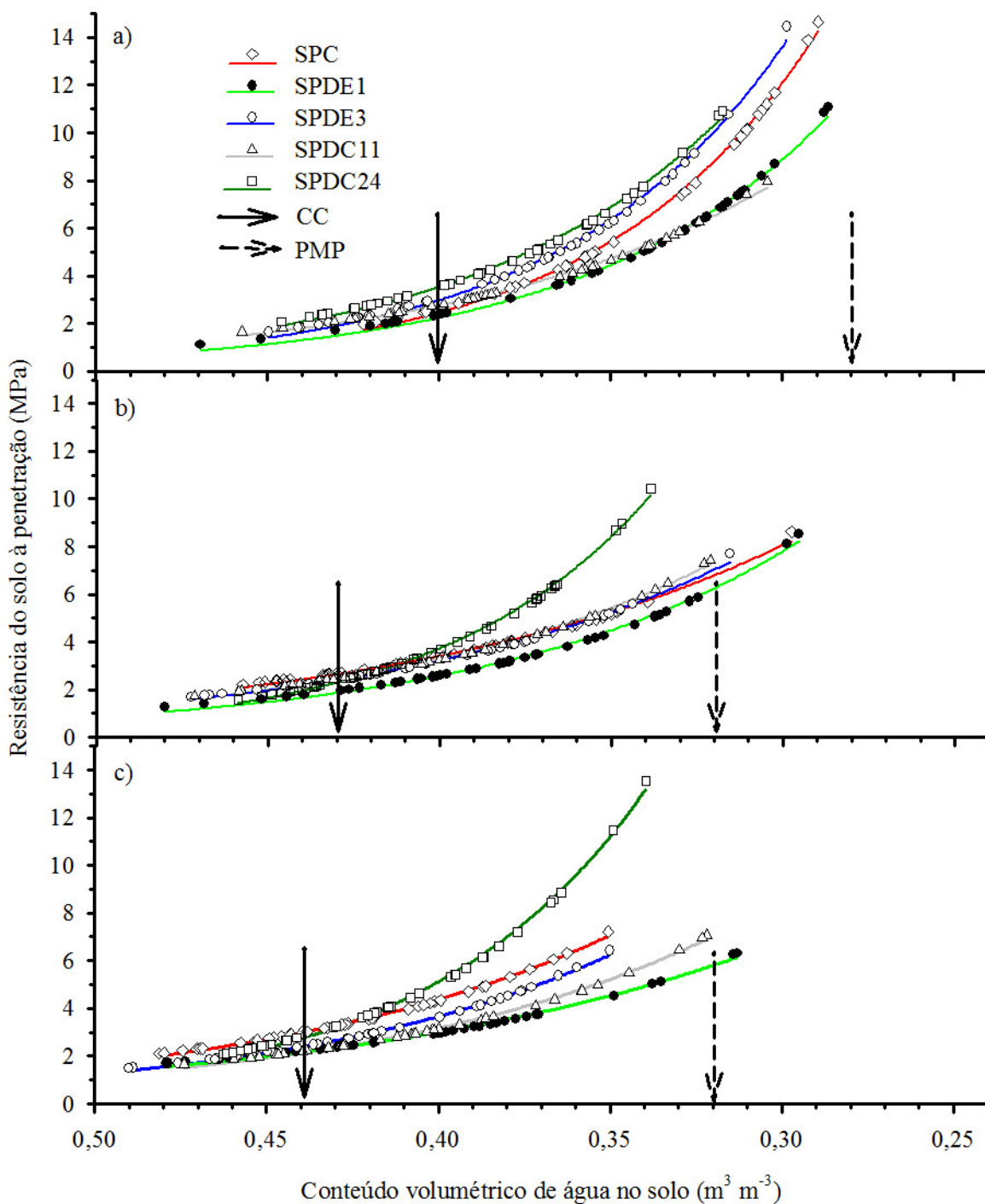


Figura 2 - Variação da resistência do solo à penetração, pelo modelo de Busscher (1990) para cada manejo do solo, em função do conteúdo volumétrico de água do solo na densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, nas camadas de 0,0-0,10 m (a); 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

SPC: sistema plantio convencional; SPDE1: sistema plantio direto (SPD) escarificado todo ano; SPDE3: SPD escarificado a cada três anos; SPDC11: SPD contínuo por 11 anos; SPDC24: SPDC por 24 anos; CC: capacidade de campo (10 kPa); PMP: ponto de murcha permanente (1.500 kPa).

Tabela 4 - Resistência do solo à penetração média entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente para a densidade do solo de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Manejo do solo	Camadas (m)		
	0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
SPC	4,58c	4,64bc	6,40b
SPDE1	3,81d	3,85c	4,03d
SPDE3	5,31b	4,61bc	5,61bc
SPDC11	4,09d	4,75b	4,57cd
SPDC24	5,86a	7,13a	9,52a
Média	4,73	5,00	6,02
Cv	8,41	17,06	19,74

*Médias seguidas de mesma letra, em mesma camada do solo, não diferem entre si pelo teste T, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Comportamento similar ao SPD, na camada de 0,0-0,10 m, foi observado quando comparados os sistemas com escarificação periódica do solo (Figura 2 e Tabela 4). Para uma mesma D_s , em todos os conteúdos de água do solo o SPDE3, mostrou-se com maior RP do que o SPDE1. Este incremento de RP em uma mesma D_s enfatiza que, ao longo do tempo, há um fortalecimento da estrutura do solo, mantendo os agregados mais estáveis, e possibilitando a formação de poros contínuos ao longo do perfil do solo. A suscetibilidade do solo à compactação aumenta quando há perturbações através da escarificação do solo. Quanto mais frequente a mobilização mecânica do solo, maiores serão os prejuízos quanto à suscetibilidade do solo à recompactação, pois há redução da capacidade de suporte do solo (SILVA, V. R. et al., 2002).

Na camada de 0,10-0,20 m, houve um comportamento semelhante ao da camada de 0,0-0,10 m, pois, para um valor constante de D_s ($1,30 \text{ Mg m}^{-3}$) e para um mesmo θ , os maiores valores de RP foram encontrados no SPDC24 (Figura 2b e Tabela 4). Observa-se que, em um conteúdo de água de $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a RP aumentou de 6 MPa no SPDC11, para 11 MPa no SPDC24, demonstrando assim os efeitos de longo prazo na “cimentação” da estrutura dos agregados do solo. Estas diferenças, especialmente do SPDC24 em relação aos demais manejos do solo, são incrementadas em função da redução do θ do solo. Portanto, estes

resultados, sugerem que devem ser utilizados limites diferentes em função do tempo de adoção e sistema de manejo.

Comparando os diferentes sistemas com escarificação periódica do solo (SPDE1 e SPDE3), observa-se que há um incremento nos valores de RP, na camada de 0,10-0,20 m, em função do aumento do tempo entre as escarificações de um para três anos. No SPDE1, observa-se que, para um conteúdo de água de $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, tem-se uma RP de 6 MPa, já o SPDE3, apresenta uma RP de 7,5 MPa. Esta diferença podem ser de pequena magnitude, apenas de 1,5 MPa, porém, a diferença entre o período de revolvimento destes dois sistemas é curto, indicando que este período sem mobilização do solo, já foi suficiente para elevar a RP no SPDE3 em relação ao SPDE1, para uma mesma D_s e θ .

Os efeitos da alteração da estrutura do solo são detectados pela CRP mesmo na camada de 0,20-0,30 m (Figura 2c). Nesta camada, há comprovação da mesma tendência das camadas superficiais. Há incrementos da RP em função do tempo de adoção do SPD. Nesta camada, os efeitos da “cimentação” dos agregados do solo são mais pronunciados, pois em um umidade de $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o SPDC24, apresenta uma RP de 14 MPa, contrastado com uma RP de 6 MPa com o SPDC11.

Na camada de 0,20-0,30 m, considerando uma mesma D_s e θ , o SPDE3 novamente apresentou valores de RP superiores aos observados no SPDE1. Assim, mesmo em subsuperfície (0,20-0,30 m), há incrementos da RP do solo, para uma mesma D_s , em função do tempo após a realização da ruptura dos agregados pelas hastes do escarificador. Nesta camada, em um θ de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o SPDE1 apresentou RP de 4,5 MPa, enquanto que, no SPDE3, a RP foi de 7,3 MPa.

O SPC, na camada de 0,20-0,30 m, apresenta valores de RP superiores aos demais sistemas de manejo do solo, em uma mesma D_s e θ , com exceção ao SPDC24. No SPC com utilização de grade pesada todo ano, a atuação dos discos ocorre somente até a profundidade de 0,15 m. Assim, com relação ao tempo com ausência de revolvimento do solo, o SPC e o SPDC24 são idênticos (24 anos), então se esperava que a RP, em uma mesma D_s e θ , fossem semelhantes. Porém, para a D_s de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, e θ abaixo de $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, isso não ocorreu. Observa-se, na camada de 0,20-0,30 m, em um θ de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a RP foi de 7 MPa no SPC, e de 11,5 MPa no SPDC24. Isso indica que não foi apenas a ausência de revolvimento do solo que causou elevação dos valores de RP no SPDC24. Uma hipótese destas diferenças entre o SPDC24 e o SPC, é que no SPC há uma formação de um “pé de grade” com ausência de bioporos, poros contínuos e crescimento radicular das plantas e, isso, contribuiu para alterar o nível de agregação do solo na camada de 0,20-0,30 m. Assim, no SPC, não houve aumentos

de resistência da estrutura do solo de igual magnitude como observado no SPDC24 em função de que as ligações entre os agregados do solo, no SPC, são fracas, e há menor estabilidade estrutural dos agregados. A ausência de condições adequadas para o crescimento radicular no SPC pode ter causado redução da atividade microbiana na camada de 0,20-0,30 m, reduzindo os complexos associados à formação e ligação dos agregados do solo. Portanto, elevações do nível de compactação no SPC são causadas por transmissões de carga aplicada na superfície pela atuação da grade pesada, favorecendo que o solo seja compacto, e haja modificações na formação dos agregados do solo, alterando a resistência da estrutura do solo em uma mesma Ds observada no SPDC24.

Uma possibilidade é que o aumento da resistência da estrutura do solo no SPDC24 em relação aos demais tratamentos pode estar ligado ao aumento do estoque de carbono do solo, o que poderá ter aumentado a cimentação e estabilização dos agregados no SPDC24. Assim, sistemas com altos valores de RP podem não ser limitantes ao desenvolvimento das plantas, tendo em vista que os mesmos podem refletir uma alta resistência da estrutura do solo ao cone e não necessariamente uma redução no espaço poroso. Além disso, em sistemas sem revolvimento do solo, o crescimento radicular pode ocorrer através de bioporos ou zonas de menor resistência no perfil do solo. A definição de limites críticos ao desenvolvimento radicular das culturas depende das características da estrutura do solo, tais como a presença de rachaduras, bioporos e regiões inter e intra-agregados com diferentes resistências que são percebidas pelas raízes, mas não discriminadas pela haste de penetração (GUBIANI, 2012). Neste sentido, seria necessário estipular valores críticos de RP diferenciados em função dos sistemas de manejos do solo. Valores considerados como críticos em um sistema de manejo que não tenha a presença de bioporos e poros contínuos podem não ser críticos em outros manejos com adequada estruturação de agregados bem desenvolvidos, com maior facilidade para a penetração das raízes das plantas.

Este fenômeno de incremento da RP pela estruturação do solo foi definido por Dexter (1988) como sendo o processo de “age-hardening” ou “recuperação da resistência”. Este processo é um aumento da resistência da estrutura em função do tempo sem perturbação do solo. Também pode ser considerado como uma recuperação da resistência do solo em função do tempo, tendo como base o fato de que as ligações entre as partículas do solo que foram quebradas em decorrência da escarificação tendem a ser reconstituídas com o tempo (TORMENA et al., 2008). Processos associados com a degradação física, através da mobilização do solo, reduzem a agregação e o endurecimento do solo (VEIGA et al., 2007). Os mecanismos envolvidos no fenômeno de endurecimento do solo relacionam-se com o

rearranjo das partículas do solo via processos de flocculação das partículas de argila, com as modificações na distribuição do tamanho de poros e com a recuperação das ligações cimentantes entre as partículas do solo, refletindo em aumento da resistência tênsil (TORMENA et al., 2008).

Este processo de incremento da resistência da estrutura, foi observado por Debiasi et al. (2008), os quais avaliaram efeitos de plantas de cobertura de inverno e do tráfego de rodados de trator sobre a capacidade de suporte de carga e compressibilidade de um Argissolo. Estes autores observaram aumentos nos valores de capacidade de suporte de carga, na camada de 0,03-0,06 m, em função da época de amostragem do solo. Aumentos na pressão de pré-consolidação não foram atribuídas à D_s , à porosidade total e à macroporosidade do solo, pois essas propriedades não foram afetadas pela época de amostragem (DEBIASI et al., 2008). Portanto, houve um processo de recuperação da resistência na camada superficial do Argissolo em função do tempo sem mobilização.

Destaca-se que o incremento dos valores de RP, observados no SPDC24, em relação aos demais manejos do solo, não reduziu a produtividade de grãos de soja e trigo em relação aos sistemas com escarificação do solo, além de incrementar a produtividade de soja em relação ao SPC (Artigo 4), demonstrando que há a necessidade de ampliação dos valores considerados como limitantes em função do sistema de manejo utilizado. O incremento de RP pode estar ligado a alguns fatores relacionados ao solo, pois a RP é dependente da D_s , umidade, densidade de partículas, distribuição do tamanho de partículas, distribuição do tamanho de poros. Evidencia-se que a D_s , distribuição do tamanho de partículas e densidade de partículas constantes para todos os sistemas de manejos. Para verificar se o aumento da RP foi influenciado pela modificação do tamanho de poros foi observada a relação da macroporosidade do solo (calculada e por saturação) com a D_s para todas as camadas (Figura 3).

Observa-se que a macroporosidade apresentou relação exponencial negativa com a D_s . Este decréscimo nos valores de macroporosidade ocorre na mesma magnitude independente do sistema de manejo do solo. Assim, a macroporosidade do solo não foi a variável responsável pela modificação da estrutura do solo para um acréscimo ou redução dos valores de RP em uma mesma D_s . Secco et al. (2004), avaliando um Latossolo Vermelho Distroférrico argiloso, observaram relações lineares negativas entre a macroporosidade e a D_s , relações semelhantes as observadas neste estudo, porém, o modelo pode não ter sido exponencial negativa em função da menor amplitude dos valores de D_s e de macroporosidade em relação aos observados neste estudo. Estes autores observaram maiores riscos de

limitações ao crescimento radicular em valores de D_s maiores do que $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$. Suzuki et al. (2007) observaram relações lineares entre a macroporosidade e o grau de compactação do solo, e identificaram que a macroporosidade limitante de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, é atingida com um grau de compactação de 76 % em um Latossolo. Porém, destacaram que o grau de compactação ótimo para a cultura da soja foi de 86 %. Portanto, os níveis de aeração do solo considerados como limitantes de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, não foram adequados para identificar reduções de produtividade de grãos.

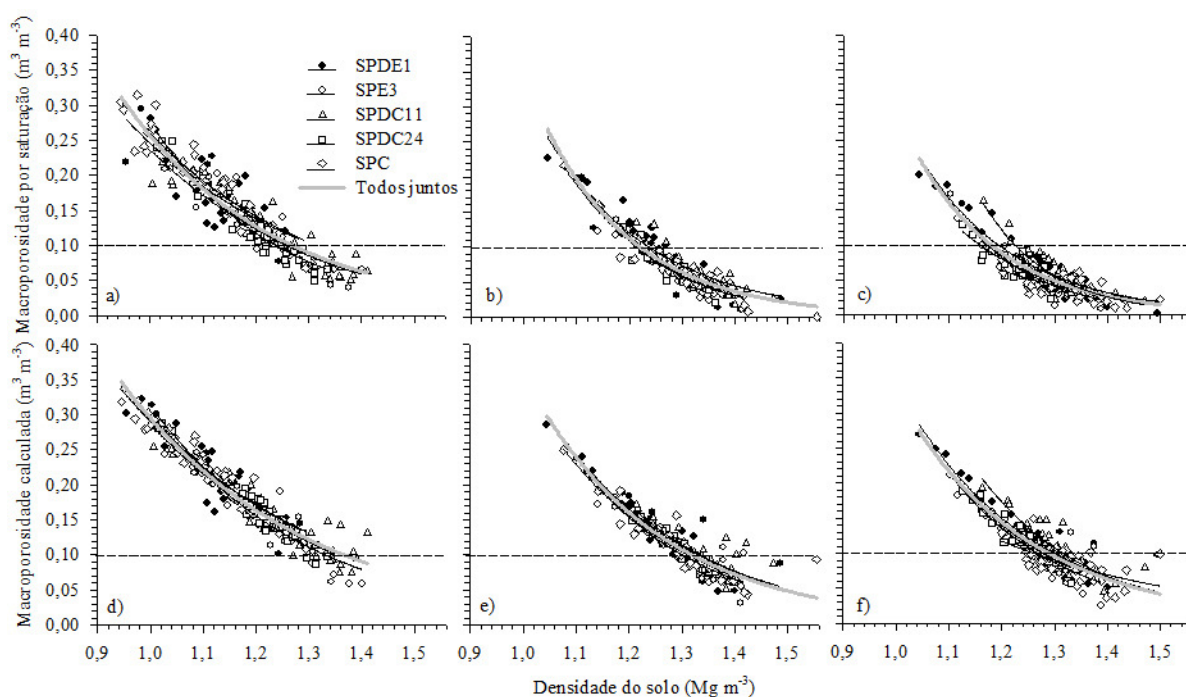


Figura 3 - Relação da macroporosidade determinada por saturação (a,b,c) e da macroporosidade calculada (e,f,g) com a densidade do solo, em função de sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0,0-0,10 m (a,d) 0,10-0,20 m (b,e) e 0,20-0,30 m (c,f) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Utilizando a macroporosidade por saturação, na camada de 0,0-0,10 m (Figura 3a), a D_s que resulta na porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, é de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$. Já quando se utiliza a macroporosidade calculada (Figura 3d), nesta mesma camada, os valores de D_s crítica são de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, demonstrando assim uma grande alteração nos valores considerados como críticos ou limitantes de D_s ao crescimento das culturas em função de artifícios matemáticos utilizados para a sua determinação.

Na camada de 0,10-0,20 m, utilizando a macroporosidade por saturação, a porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é atingida com uma D_s de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$. Já para a macroporosidade calculada, o valor crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foi atingido com uma D_s de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$. Acima destes valores de D_s , é possível que haja problemas relacionados com trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, possibilitando acúmulos de CO_2 e déficit de O_2 para a respiração radicular das culturas.

Na camada de 0,20-0,30 m, a macroporosidade por saturação indica uma D_s de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ para que já seja atingidos limites de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de aeração do solo. Porém, se for utilizado os valores de macroporosidade calculada, os mesmos limites de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de aeração são obtidos com uma D_s de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$. Esta diferença de $0,13 \text{ Mg m}^{-3}$ pode conduzir a erros na tomada de decisão, por exemplo, uma indicação para escarificar o solo sem necessidade. A utilização de práticas de manejo que são dispensáveis aumenta os custos de produção, e pode levar à degradação do solo. Em alguns casos, pode ser responsável pela redução de produtividade de grãos das culturas, ou seja, a escarificação nem sempre resulta em benefícios ao desenvolvimento das culturas (Franchini et al., 2011).

Outra relação para verificar a influência da distribuição de poros nos resultados de RP foi realizada utilizando a relação entre D_s e a microporosidade do solo (Figura 4). Observa-se que em todas as camadas, os sistemas de manejo apresentaram relação quadrática entre a microporosidade e a D_s . Não houve alterações em função dos sistemas de manejos, na quantidade de microporos em uma mesma D_s . Para uma D_s de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, há valores de microporosidade de $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Isso comprova que a mudança de distribuição do tamanho de poros não é o fator que explica o aumento nos valores de RP em função do tempo de adoção do SPD, considerando uma mesma D_s e θ . Portanto, a alteração da RP em uma mesma D_s e θ , em função do tempo de adoção do SPD, está vinculada diretamente ao aumento da força de ligação dos agregados do solo.

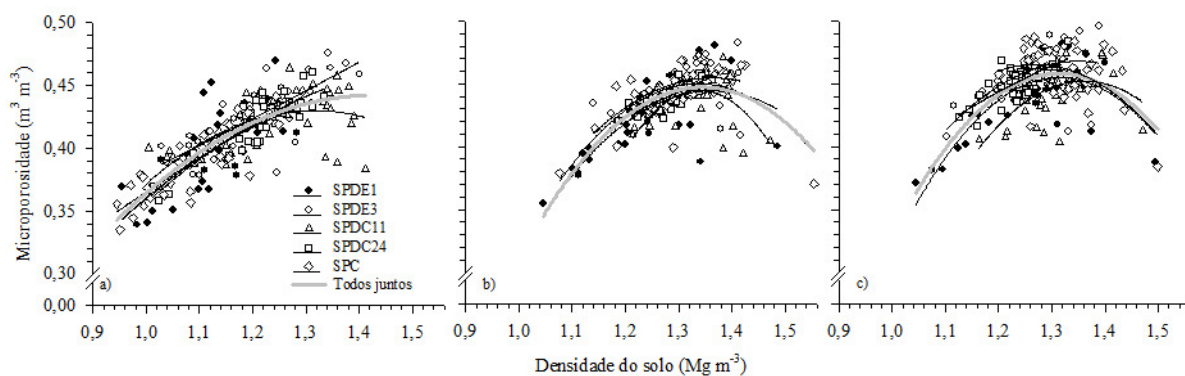


Figura 4 - Relação da microporosidade com a densidade do solo, em função de sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0,0-0,10 m (a) 0,10-0,20 m (b) e 0,20-0,30 m (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

7.6. Conclusões

O processo de recuperação da resistência, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, foi comprovado entre os tempos de adoção do SPD (SPDC24 e SPDC11) e também em função do tempo após a escarificação do solo (SPDE1 e SPDE3).

O processo de recuperação da resistência da estrutura de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso é influenciado pelo tempo em que o mesmo permanece sem revolvimento do solo, e pela associação de processos físicos químicos e biológicos, relacionados com a formação e estabilização dos agregados do solo.

O aumento da resistência do solo à penetração no SPDC24, em relação aos demais manejos do solo (SPC, SPDE1, SPDE3 e SPDC11), neste Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não foi restritiva à produtividade de grãos de soja e trigo.

Em uma mesma situação de densidade do solo e de conteúdo volumétrico de água do solo, os valores de resistência do solo à penetração são incrementados em função do tempo de adoção do SPD, e pelo tempo de ausência de revolvimento do solo, indicando que quanto mais consolidado for o sistema plantio direto, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, maiores serão os valores de resistência do solo à penetração.

Os resultados de resistência do solo à penetração e da curva de resistência do solo à penetração indicam a necessidade de estabelecer limites distintos de resistência do solo à penetração, em função do manejo do solo e tempo de adoção do SPD.

7.7. Referências

- 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**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F.; B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 681-691, 2010.
- BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, 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**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.
- BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 79-87, 2012.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.
- CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; 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**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2629-2637, 2008.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, 2 ed., 1997, 212p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, p.1316-1322, 2007.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

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**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 845-855, 2009.

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**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, 2006.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1395-1406, 2012.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1515-1526, 2010.

PICCININ, J. L. **Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenções mecânicas sob sucessão e rotação de culturas**. 2005. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

REICHERT, J. M.; SUZUKY, 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: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134, 2007.

SAS LEARNING EDITION. **Getting started with the SAS Learning Edition**. Cary, 2002. 200p.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 794-804, 2004.

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

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMNHOF, S. funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008.

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

SILVA, V.R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097-1104, 2009.

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

SUZUKI, L. E. A. S; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

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

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**, Viçosa, v.22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. E.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A. P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p.943-952, 2008.

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

8. ARTIGO 4: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA E TRIGO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB SISTEMAS DE MANEJO E MODELO DE PRODUÇÃO

8.1. Resumo

A utilização de indicadores da qualidade física do solo vem sendo cada vez mais frequente e recebendo mais importância para qualificar os sistemas produtivos, dentre os mais utilizados, destaca-se o intervalo hídrico ótimo (IHO). Porém, já se passaram quase duas décadas desde a proposição do IHO, mas poucos estudos tem relacionado este indicador com a produtividade de grãos de culturas. O objetivo desse trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso em diferentes sistemas de manejos do solo e modelo de produção de longo prazo, utilizando o IHO, e relacionar este indicador com a produtividade de grãos das culturas de soja e trigo. O experimento foi conduzido em um delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5x2 (manejos do solo x modelos de produção), com quatro repetições. Os sistemas de manejo do solo foram: (i) sistema de preparo convencional (SPC); (ii) SPD escarificado a cada ano (SPDE1); (iii) SPD escarificado a cada três anos (SPDE3); (iv) SPD contínuo por 11 anos (SPDC11); (v) SPD contínuo por 24 anos (SPDC24). O fator modelo de produção foi composto por: (i) rotação e; (ii) sucessão de culturas. Nas camadas 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m foram coletadas amostras com estrutura preservada e deformadas, para determinação do IHO e dos atributos químicos do solo, respectivamente. A lâmina de água acumulada na camada de 0,0-0,30 m determinada pelo IHO foi relacionada com as variáveis morfológicas e produtivas de soja e de trigo. Os resultados de produtividade de grãos da soja e trigo e o peso de mil grãos e altura de planta e de inserção da primeira vagem da soja, teor de clorofila e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foram avaliados entre os manejos do solo e modelos de produção. Os atributos químicos não foram limitantes a produtividade de grãos de soja e trigo, pois estiveram em níveis altos no solo. Não houve diferenças na produtividade de grãos de soja e milho entre os modelos de produção. A produtividade de grãos de soja no SPDC24 foi maior do que no SPC e não se observou diferenças produtivas de soja e trigo entre os tempos de adoção do SPD. O SPDE1 e SPDE3 não favoreceram aumentos de produtividade de grãos de soja e de trigo em relação ao SPD. O limite crítico de RP de 2 MPa indicou um IHO nulo abaixo de 0,10 m em todos os sistemas de manejo do solo e modelo de produção, com exceção do SPDE1 até 0,20 m. A lâmina de água determinada pelo IHO com RP de 2 MPa apresentou uma relação quadrática as variáveis morfológicas e produtivas de soja e trigo. O IHO com limite de 3,5 MPa não apresentou relação entre a lâmina de água e as variáveis morfológicas e produtivas de soja e trigo. A escarificação do solo demonstrou ser uma prática de manejo dispensável. O aumento do tempo de adoção do SPD favorece melhorias na qualidade física do solo. Independente do manejo do solo, modelo de produção ou limites de resistência do solo à penetração de 2 ou 3,5 MPa o IHO não é um bom indicador da qualidade física do solo.

Palavras-chaves: Sistema plantio direto. Escarificação do solo. Indicadores físicos.

LEAST LIMITING WATER RANGE AND SOYBEAN AND WHEAT YIELD IN A RHODIC EUTRUDOX UNDER DIFFERENT CROPPING AND TILLAGE SYSTEMS

8.2. Abstract

The use of soil physical quality indicators has been of great importance to classify the various soil management and cropping systems. Among the most widely used is the least limiting water range (LLWR). It is almost two decades since the proposition of this concept, however few studies have related this indicator with grain yield. The objective of this study was to evaluate the physical quality of a clayey Rhodic Eutrudox under different cropping and tillage systems of long-term, using the LLWR, and relate this indicator on the performance of soybeans and wheat. The experiment was a 5x2 factorial (tillage systems vs cropping systems), laid out in a complete randomized block design with four replications. The tillage systems include: (i) conventional tillage by disk harrow (CT); (ii) NT with chiseling every year (NTC1); (iii) NT with chiseling every three years (NTC3); (iv) NT for 11 consecutive years (NT11) and; (v) NT for consecutive 24 years (NT24) while the cropping factors were: (i) crop rotation and (ii) crop succession. Both preserved and disturbed soil samples were collected in soil layers, 0.0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m to determine the LLWR (with a critical limit of soil penetration resistance (SPR) of 2 and 3.5 MPa) and soil chemical attributes, respectively. The depth of water accumulated in the layer, 0.0-0.30 m determined by LLWR was related with the morphological and productivity variables of soybean and wheat. Growth and yield parameters evaluated were: plant height, first pod insertion, chlorophyll, 1000-grain weight, yield and normalized difference vegetation index (NDVI). The chemical attributes did not limit the yield of soybeans and wheat, because they were at optimum level in the soil. There were no significant differences between yields under the cropping systems. Soybeans yield in NT24 was higher than in the CT, and no significant difference was observed in soybean and wheat production between the times of adoption of the NT. The NTC1 and NTC3 treatments did not increase the yield of soybeans and wheat compared to NT. The critical limit of SPR of 2 MPa indicated a null LLWR below 0.10 m depth in all cropping and tillage systems, with the exception of NTC1 to 0.20 m. The water depth determined by the LLWR with SPR of 2 MPa showed a quadratic relationship with the morphological and productivity variables of the crops. Conversely, the LLWR with the SPR limit of 3.5 MPa did not show any relationship between water depth and the morphological and productivity variables of these crops. Soil chiseling proved to be a management practice dispensable and increasing the time of adoption of the NT favored improvements in soil physical quality. Independent of cropping and tillage systems or limits of SPR, 2 or 3.5 MPa, the LLWR is not a good indicator of soil physical quality.

Key word: No-tillage. Soil chiseling. Physical index.

8.3. Introdução

A utilização do sistema plantio direto (SPD) vem sendo uma prática que visa a sustentabilidade do sistema produtivo, desde o início da sua utilização nos anos 70. Este sistema tem bases na utilização de um conjunto de tecnologias para evitar o revolvimento do solo, na manutenção permanente da superfície do solo com resíduos culturais, além de práticas baseadas em rotação de culturas. O cultivo intensivo para produção de grãos tem reduzido as práticas culturais de rotação de culturas no SPD, aumentando as áreas sob sucessão de culturas e favorecendo o surgimento de uma camada com maior grau de compactação entre 0,10-0,20 m (FRANCHINI et al., 2011).

A evolução da produtividade de grãos, especialmente de trigo, milho, soja, ao longo do tempo, demonstra a existência de uma fase de estabilização do SPD, que dura cerca de seis anos (FRANCHINI et al., 2012). Conforme estes autores, até o sexto ano da implantação do SPD, a produtividade das culturas sob SPD tende a ser menor ou igual à observada no sistema de preparo convencional. Na fase de estabilização do SPD, há incrementos nos estoques de carbono orgânico do solo (BABUJIA et al., 2010) de tal maneira que a qualidade do solo seja melhorada consideravelmente em comparação com o sistema convencional (FRANCHINI et al., 2012). O acúmulo de carbono orgânico no solo, favorece melhorias para os processos e atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que são correlacionados direta e indiretamente com o crescimento das plantas (FRANCHINI et al., 2012).

A falta de resultados mais claros a respeito do potencial da rotação de culturas em preservar e/ou melhorar a qualidade física do solo no SPD ao longo do tempo constitui-se em uma barreira à adoção da tecnologia pelos produtores que, muitas vezes, optam por métodos mecânicos de controle da compactação. A escarificação periódica do solo está se difundindo como prática comum do controle de possíveis problemas relacionados com a formação de camadas com maior grau de restrição ao crescimento radicular das culturas (CAMARA; KLEIN, 2005; KLEIN; CAMARA, 2007; KLEIN et al., 2009). Portanto, a avaliação da evolução das propriedades físicas e químicas do solo sob SPD ao longo do tempo torna-se fundamental para o entendimento dos processos de reconsolidação e estabilização da estrutura do solo sob diferentes sistemas de manejos.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) vem sendo utilizado como indicador da qualidade do solo para a produtividade das culturas, principalmente por integrar fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas (LAPEN et al., 2004; BETIOLI JUNIOR et al., 2012;

LIMA, V. M. P. et al., 2012b). Para ser um bom indicador de qualidade física, é considerado que o IHO tem relação positiva com a resposta das culturas (BLAINSKI et al., 2012; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). Os vários estudos com o IHO demonstram que os valores deste indicador diminuem com o aumento da densidade do solo (Ds) (SILVA, A. P. et al., 1994; TORMENA et al., 2007; PETEAN et al., 2010; LIMA, C. L. R. et al., 2012; LIMA, V. M. P. et al., 2012) podendo atingir o valor zero quando ocorre a intersecção dos limites superior e inferior, ou seja, quando a Ds é denominada de densidade do solo crítica (Dsc) ao desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994; LEÃO et al. 2004; TORMENA et al., 2007). Cavalieri et al. (2006) afirmam que valores de Ds maiores que a Dsc indicam condições físicas severamente restritivas para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, para a produtividade das culturas, demonstrando a importância deste índice de qualidade física do solo. Em solos argilosos, é grande a frequência de valores do IHO próximos a zero em SPD. A escarificação do solo é capaz de aumentar imediatamente a amplitude do IHO (KLEIN et al., 2009; CALONEGO; ROSOLEM, 2011), porém nem sempre há incrementos de produtividade de grãos (KLEIN; CAMARA, 2007; FRANCHINI et al., 2011; FRANCHINI et al., 2012). Portanto, há necessidade de identificar a relação do IHO com a produtividade de grãos em sistemas de manejo do solo de longo prazo.

Neste trabalho as seguintes hipóteses foram consideradas: (i) A utilização de modelos de produção baseados em rotação de culturas preserva e/ou melhora a qualidade física do solo sob SPD ao longo do tempo, não necessitando intervenções mecânicas para controle da compactação do solo; (ii) A produtividade de soja e trigo em SPD escarificado não é alterada em relação ao SPD contínuo, demonstrando que a escarificação periódica do solo é uma prática de manejo desnecessária; (iii) O aumento do tempo de adoção do SPD favorece melhorias nas condições físicas do solo, incrementando a produtividade de grãos de soja e de trigo em relação ao sistema de preparo convencional do solo; (iv) O IHO é um bom indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, em sistemas de manejo do solo de longo prazo, pois se relaciona com a produtividade de grãos de soja e trigo. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de manejo do solo e modelos de produções de longo prazo, utilizando o IHO, e relacionar este indicador com a produtividade de grãos de soja e trigo.

8.4. Materiais e Métodos

8.4.1. Caracterização da área experimental e tratamentos

A caracterização detalhada da área experimental e tratamentos está descrita nos materiais e métodos gerais no item 4 desta dissertação.

8.4.2. Balanço hídrico sequencial

Os dados de temperatura e precipitação foram coletados na estação meteorológica da Embrapa Soja, Londrina - PR, localizada a 23°11' S, 51°11' W e 630 m de altitude, durante o período de outubro de 2011 a setembro de 2012. O balanço hídrico foi efetuado para determinar as entradas e saídas de água no solo, através da metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), seriado por decêndio (CUNHA et al., 1992). Para o cálculo do balanço hídrico, foi utilizada uma planilha do Microsoft ExcelTM desenvolvida por Rolim et al. (1998), na qual dados de temperatura média e precipitação total decendiais, latitude do local e capacidade de armazenamento de água (CAD) no solo são inseridos. Neste trabalho, a CAD utilizada foi de 75 mm.

8.4.3. Amostragem de solo para propriedades físicas

A amostragem do solo foi realizada nas entrelinhas de cultivo durante o ciclo vegetativo da soja, utilizando anéis metálicos (diâmetro e altura de 0,05m). Foram coletadas cinco amostras por parcela e camada (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), sendo vinte amostras por tratamento em cada camada, totalizando 600 amostras indeformadas de solo. A coleta foi realizada com o conteúdo de água do solo próximo da capacidade de campo, com auxílio de um dispositivo amostrador de solo acoplado ao pára-choques de um trator agrícola, de modo que os anéis foram inseridos verticalmente no solo, de forma sequencial no centro

das camadas avaliadas. Esse método de amostragem garantiu a integridade das amostras, evitando alterações na estrutura do solo. Imediatamente depois de retiradas, as amostras foram revestidas na parte superior e inferior com uma tampa plástica, e acondicionadas em caixas com estrutura de proteção para o transporte. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de Física do Solo da Embrapa Soja, onde permaneceram sob refrigeração ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) para inibir a atividade biológica e a ocorrência de eventos que modificam a estrutura do solo, como a germinação de sementes ou a atividade de insetos e minhocas, até a sua preparação para análise.

8.4.4. Amostragem de solo para propriedades químicas

As amostras de solo foram coletadas no final do cultivo do trigo em setembro de 2012. Em cada parcela, foram abertas três trincheiras com pá de corte, onde foi coletado o solo nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As subamostras das três trincheiras em cada parcela foram misturadas para compor a amostra da respectiva camada. Logo após a coleta, o solo foi seco em estufa de circulação forçada de ar $\pm 60^{\circ}\text{C}$, peneirado em malha de 2 mm e armazenado para as análises.

8.4.5. Determinação das propriedades físicas do solo

No laboratório, as amostras foram preparadas com a retirada do excesso de solo. Em seguida, as mesmas foram saturadas em recipientes por meio da manutenção de uma lâmina de água máxima de dois terços da altura dos anéis metálicos por aproximadamente 72 horas, até a completa saturação do solo. Após a saturação, para a determinação da curva de resistência do solo à penetração (CRP) e da curva de retenção de água no solo (CRA), foi utilizado o procedimento descrito em Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998) e Blainski et al. (2008), no qual a RP foi medida em uma ampla variação de conteúdo volumétrico de água do solo (θ) e sob diferentes valores de D_s . A variação de θ foi possível devido aos diferentes potenciais em que as amostras foram submetidas, enquanto que a variação de D_s foi

proporcionada pela variabilidade horizontal das condições físicas do solo dentro das áreas amostradas.

As 600 amostras indeformadas de solo coletadas foram divididas em cinco grupos de 120, sendo oito por sistema de manejo e camada avaliada. Todas as amostras foram submetidas aos potenciais matriciais (Ψ) -3 e -6 kPa utilizando mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Posteriormente, cada grupo de amostras foi submetido às tensões equivalentes a um dos seguintes Ψ : -10; -33; -100; -500 kPa por meio de pressões aplicadas em câmaras de Richards com placas porosas. Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ (-6; -10; -33; -100 e -500 kPa), as amostras foram pesadas e determinada a RP utilizando um penetrógrafo estático de bancada similar ao descrito por Tormena et al. (1998). O penetrógrafo, modelo MA-933 da marca Marconi, é constituído de uma haste metálica com um cone na sua extremidade com semi-ângulo de 30°, diâmetro de 4 mm e área da base de 0,1256 cm², ligado a um medidor composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kgf. A velocidade de penetração foi de 20 mm min⁻¹, desta forma, em cada amostra, foram realizadas 120 leituras de RP até a profundidade de 0,040 m. A RP foi calculada considerando a média das leituras entre 0,005 e 0,04 m de profundidade. As demais leituras foram desconsideradas, pois o cone do penetrômetro não estava completamente inserido na amostra. Logo após, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ por 24h. O θ foi quantificado pelo quociente da massa de água retida na amostra em cada Ψ e o volume do solo de cada amostra. A D_s foi obtida conforme metodologia descrita em Embrapa (1997).

Na determinação do conteúdo de água retido nos Ψ de -1.000 e -1.500 kPa, foi empregado o psicrômetro modelo WP4, utilizando amostras deformadas (KLEIN et al., 2006). Assim, obteve-se o conteúdo gravimétrico de água que, multiplicado pelo valor médio de D_s em cada repetição de campo dos tratamentos, resultou no θ no Ψ de -1.000 e -1.500 kPa.

8.4.6. Determinação das propriedades químicas do solo

O teor de carbono orgânico total (C) e nitrogênio total (N) foi determinado pelo método da combustão a seco, utilizando um analisador elementar orgânico de C e N (modelo Flash 2000). As amostras foram moídas após secagem por 24 h a 60°C. Em seguida, as

amostras foram pesadas em balança analítica específica, utilizando-se 40 mg de amostras para a análise. Os resultados foram obtidos em porcentagem de cada elemento.

Os demais atributos químicos do solo foram quantificados de acordo com a metodologia de Pavan et al. (1992). Foram determinados os valores do potencial hidrogeniônico (pH) em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na relação 1:2,5 (solo:solução); cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1} na relação 1:10 (solo:solução), sendo Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e Al por titulação com NaOH $0,015 \text{ N}$, utilizando o indicador azul de bromotimol; acidez potencial (H + Al) pelo pH em SMP, a partir da curva de calibração do pH SMP versus H + Al para os solos do Paraná; fósforo (P) e potássio (K) foram extraídos com solução de Mehlich⁻¹ (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$), e determinados por colorimetria (espectofotômetro a 630 nm) e fotometria de chama, respectivamente (FRANCHINI et al., 2000).

Os valores de soma de bases (SB) foram obtidos através da soma dos valores dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). A capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) foi determinada pela soma dos valores de SB com os valores de H+Al. A saturação de bases (V%) foi quantificada pela relação percentual da SB com o valor de T.

8.4.7. Determinação do intervalo hídrico ótimo

Foi determinado um IHO para cada sistema de manejo e camada avaliada neste Latossolo Vermelho Distroférico. Para determinação do IHO, é necessário descrever matematicamente a CRA e a CRP. A CRA expressa pela relação entre Ψ e o θ , foi ajustada utilizando a função empregada por Silva, A. P. et al. (1994), descrita na equação 1.

$$\theta = a|\Psi|^b \quad (1)$$

Onde, θ = conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $|\Psi|$ = módulo do potencial matricial da água no solo (kPa); a, b = Parâmetros do ajuste do modelo.

Para quantificar o IHO foi incorporada a D_s na descrição matemática da CRA, uma vez que ela permite descrever a variabilidade da estrutura do solo e estimar o conteúdo de água em potenciais específicos. Desta forma, a equação 1 toma a forma da equação 2, e foi

descrita matematicamente por meio de uma função não linear, incorporando a variação da D_s entre as amostras (TORMENA et al., 1998; LEÃO et al., 2005).

$$\theta = \exp(a + bD_s) |\Psi|^c \quad (2)$$

Onde, θ = conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); $|\Psi|$ = módulo do potencial matricial da água no solo (kPa); a, b, c = parâmetros obtidos no ajuste do modelo aos dados de θ (Ψ , D_s).

A CRP foi ajustada em relação ao θ e à D_s , para cada sistema de manejo do solo e camada avaliada, por meio de um modelo não-linear conforme Busscher (1990) e Silva, A. P. et al. (1994), descrito no artigo 3 desta dissertação, utilizando a equação 3. O coeficiente de determinação (r^2) do modelo não linear foi calculado pela equação 4, conforme Kaiser et al. (2009).

$$RP = dD_s^e \theta^f \quad (3)$$

Onde, RP = resistência do solo à penetração, MPa; D_s = densidade do solo, Mg m^{-3} ; d, e, f = parâmetros obtidos por meio do ajuste dos modelos.

$$r^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{\text{resíduo}}}{SQ_{\text{regressão}}} \right) \quad (4)$$

Onde, r^2 = coeficiente de determinação; $SQ_{\text{resíduo}}$ = soma dos quadrados dos resíduos; $SQ_{\text{regressão}}$ = soma dos quadrados de regressão.

O IHO foi determinado conforme Silva, A. P. et al. (1994), calculando um valor para cada amostra. Os valores de θ na capacidade de campo (θ_{cc}), no Ψ de -10 kPa, e de θ no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), em Ψ de -1.500 kPa, foram calculados por meio das equações 5 e 6, respectivamente.

$$\theta_{cc} = \exp(a + bD_s) |100|^c \quad (5)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(a + bD_s) |1.500|^c \quad (6)$$

Rearranjando-se a equação 3, e assumindo o valor de RP de 2 (TAYLOR et al., 1966; SILVA, A. P. et al., 1994; TORMENA et al., 1998; BLAINSKI et al., 2009; BENGOUGH et

al., 2011) e 3,5 MPa (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JUNIOR et al., 2012) como limitantes ao crescimento de plantas, obtém-se a equação 7, que determina, para diferentes valores de D_s , o θ em que a RP atinge o valor de 2 ($\theta_{rp2 \text{ MPa}}$) ou 3,5 MPa ($\theta_{rp3,5 \text{ MPa}}$).

$$\theta = \left[\frac{\theta_{rp}}{(dD_s)^e} \right]^{\frac{1}{f}} \quad (7)$$

Onde, θ_{rp} = conteúdo volumétrico de água no solo em que a RP é de 2 ou 3,5 MPa; d , e , f = parâmetros obtidos por meio do ajuste dos modelos.

O θ que corresponde a uma porosidade livre para aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{ar}), foi determinado para cada amostra utilizando a D_s e a densidade de partículas, através da equação 8, conforme Tormena et al. (2007); Peatan et al. (2010). Para a densidade de partículas, utilizou um valor médio de $2,90 \text{ Mg m}^{-3}$, em todas os sistemas de manejo e camadas avaliadas (Artigo 1)

$$\theta_{ar} = \left[1 - \frac{D_s}{D_p} \right] - 0,10 \quad (8)$$

Onde, θ_{ar} = conteúdo volumétrico de água no solo com porosidade livre de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; D_s = Densidade do solo, Mg m^{-3} ; D_p = densidade de partículas, Mg m^{-3} .

Na determinação do IHO, foram utilizadas as equações 5, 6, 7 e 8. Desta forma, a única variável independente em todos os modelos foi a D_s , possibilitando assim, identificar a diferença de θ entre o limite superior (θ_{cc} ou a θ_{ar}) e o limite inferior (θ_{rp} ou a θ_{PMP}) do IHO. A determinação do limite superior se dá através do menor valor, já para o limite inferior, utiliza-se sempre o maior valor de θ . O valor de D_s , em que ocorre a intersecção das linhas relativas ao limite superior e inferior, torna o IHO igual a zero, é denominado de D_{sc} .

8.4.8. Produtividade de grãos, altura de plantas, inserção do primeiro legume, e massa de mil grãos e peso hectolitro

A produtividade de grãos da soja foi determinada pela colheita mecânica de 25 m das oito linhas centrais de cada parcela. A produtividade de grãos de trigo foi determinada pela colheita mecânica de 25 m das 20 linhas centrais em cada parcela. Os grãos foram limpos e

pesados, e os valores obtidos foram corrigidos para uma umidade de 13%. Nos grãos obtidos da cultura do trigo, foi determinado o peso hectolitro (PH), sendo que é uma análise física do grão, e é a massa de 100 litros de trigo expressa em kg hl^{-1} . Na ocasião da colheita da soja, foram avaliadas as seguintes características na área útil: altura da planta, dada pela distância do colo da planta até a extremidade da haste principal, em cm, medida em cinco plantas aleatoriamente; altura de inserção do primeiro legume dada pela distância do colo da planta até a extremidade inferior do primeiro legume, em cm, de cinco plantas tomadas aleatoriamente; massa de mil grãos foi determinada segundo metodologias descritas nas Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2009).

8.4.9. Teor de Clorofila e NDVI da soja

No estágio fenológico R5.3 da soja, foi determinado o NDVI (*normalized difference vegetation index*), para tanto, foi utilizado um sensor ótico ativo conhecido como GreenSeeker Hand Held. É um sensor portátil, com dois tipos de LED (*light emitting diodes*), que emitem radiação ativa em dois comprimentos de onda centralizados no vermelho (660 nm) e no infravermelho próximo (770 nm), com largura de banda de aproximadamente 25 nm (POVH et al., 2008). Os dados foram coletados dinamicamente à distância de 1 m entre o sensor e o alvo. O NDVI envolve uma relação entre a diferença e a soma da refletância no comprimento de onda correspondente ao infra-vermelho próximo (0,76 a 0,90 μm) e o vermelho (0,63 a 0,69 μm) (MENESE; ALMEIDA, 2012). O NDVI apresenta relação com a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área, quanto maior este índice de vegetação, mais densa é a fitomassa verde (GRAY et al., 2010).

8.4.10. Análise estatística

A análise estatística foi realizada isoladamente para cada camada amostrada (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). A análise das distribuições das variáveis estudadas foi realizada inicialmente por meio da estatística descritiva. Os resultados foram submetidos à análise de variância (Teste F, $p < 0,05$). Quando o efeito dos tratamentos foi significativo ($p < 0,05$), as

diferenças entre as médias dos modelos de produção e ou manejo do solo em cada uma das camadas avaliadas foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro. Os ajustes da CRA e CRP foram realizados através da rotina “PROC NLIN”, do módulo de estatística do programa computacional SAS LEARNING EDITION (2002). Relações da produtividade de grãos com a massa de mil grãos, altura de planta, inserção do primeiro legume, IHO, teor de clorofila, NDVI e Ds, além das relações do teor de clorofila e NDVI com o IHO, foram submetidos à análise de variância (Teste F, $p < 0,05$). Os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®10.0 (Systat software, Inc.).

8.5. Resultados e Discussão

Durante todo o ciclo de desenvolvimento da soja safra 2011/12 observou-se, através do balanço hídrico sequencial, que houve vários períodos com deficiência hídrica (Figura 1). A necessidade total de água na cultura da soja varia de 450 a 800 mm por ciclo, a qual aumenta em função do desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração e enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período (TECNOLOGIAS..., 2011). A distribuição média durante todo o ciclo da soja foi de 3,66 mm dia⁻¹. A disponibilidade hídrica no período vegetativo da soja foi suficiente, porém, no estágio fenológico de florescimento da soja, houve um curto período com deficiência hídrica, onde os valores de evapotranspiração potencial superaram o saldo acumulado de precipitação. Desde o terceiro decêndio de dezembro até o final de janeiro, houve regularização nos índices pluviométricos, de forma que a demanda hídrica da cultura foi adequadamente atendida. Porém, iniciou no estado fenológico de enchimento de grãos (R5.3) um longo período com deficiência hídrica até o final do ciclo da soja. Portanto, o armazenamento de água no solo, em um longo período, ficou muito baixo, prejudicando o enchimento de grãos da soja e, assim, reduzindo a produtividade da cultura. Nesta região em estudo, as chuvas no período de dezembro de 2011 a março de 2012 foram inferiores às esperadas em função das médias históricas (1976-2011), caracterizando um período de déficit hídrico (IAPAR, 2013).

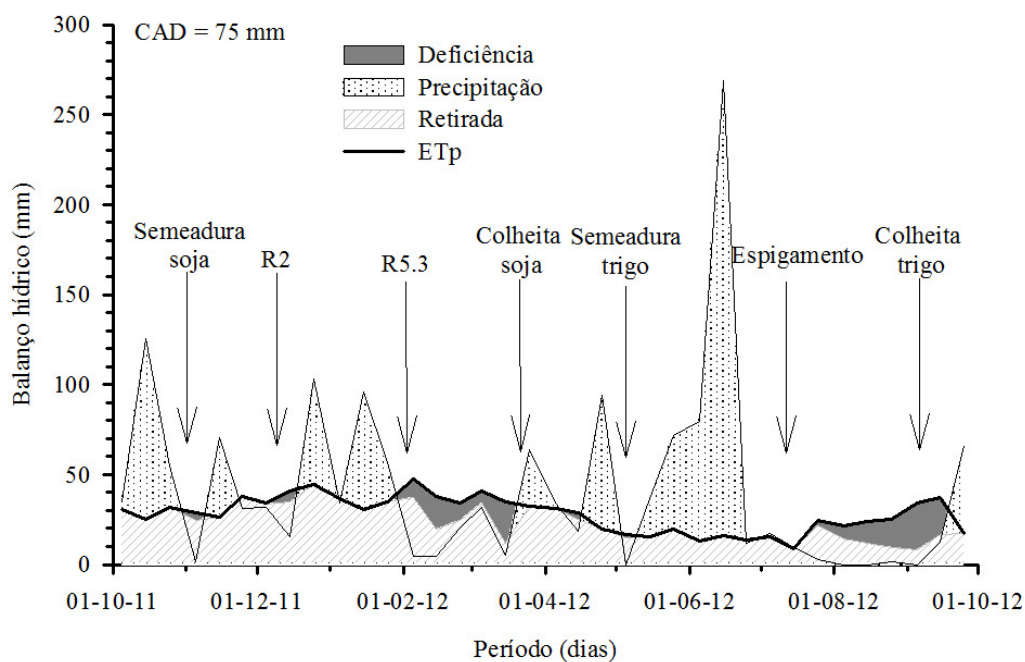


Figura 1 - Balanço hídrico sequencial conforme Thornthwaite e Mather (1955), por decêndio, no período de outubro de 2011 à setembro de 2012, durante o ciclo das culturas da soja e trigo. Londrina, PR, 2013.

CAD: capacidade de água disponível; ETP: Evapotranspiração potencial.

No período de maio e junho, os acumulados das precipitações foram muito superiores a evapotranspiração potencial, demonstrando que houve disponibilidade hídrica adequada para o crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo. No mês de julho, houve redução nos volumes precipitados, iniciando um longo período de deficiência hídrica. Este período de déficit hídrico coincidiu com o estágio de maior necessidade hídrica da cultura (enchimento de grãos) (LIBARDI; COSTA, 1997), resultando em redução da produtividade do trigo. O efeito da seca sobre a produtividade das culturas depende da intensidade, da duração, da época de ocorrência e da interação da deficiência hídrica com outros fatores determinantes da expressão do potencial de produtividade (CUNHA; BERGAMASCHI, 1992).

A análise de variância para todos os atributos químicos e físicos avaliados nas três camadas (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) não demonstrou interação entre os fatores manejo do solo e modelos de produção (Apêndice A, B, C). Desta forma, foi realizado comparação de médias para cada fator (manejo do solo e modelo de produção) de forma isolada.

Os atributos químicos para os modelos de produção são apresentados na figura 2. Os atributos químicos relacionados com a acidificação do solo (pH, H+Al, Al, Ca, Mg, SB e V%) demonstram que não houve diferenças entre a rotação e sucessão de culturas nas três camadas

avaliadas, com exceção do teor de Mg, na camada de 0,20-0,30 m, que houve valores maiores na sucessão do que na rotação de culturas. Nas três camadas (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), sob rotação e sucessão de culturas, os teores de Al são classificados como médios ($0,02-1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os teores de H+Al (acidez potencial), nas três camadas e ambos os modelos de produção, são considerados médios ($2,51-5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os teores de V% indicam que em todas as camadas (até 0,30 m de profundidade), independente do modelo de produção, não há necessidade de realização da calagem, pois os valores de V% são superiores a 60 % (TECNOLOGIAS..., 2011). Os teores de Ca indicam valores altos ($>4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em solos com $T \geq 8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na camada de 0,0-0,10 m, e médios ($2-4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em solos com $T \geq 8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m independente do modelo de produção, utilizando os critérios descritos em TECNOLOGIAS... (2011).

Nas três camadas de solo avaliadas os teores de Mg são considerados altos ($> 0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (TECNOLOGIAS..., 2011). Portanto, a diferença entre os modelos de sucessão e rotação, na camada de 0,20-0,30 m, tem pouca influência direta sobre o teor deste nutriente para as culturas. Porém, o que poderá ser afetado é a disponibilidade de outros nutrientes, em função das relações Ca:Mg; Mg:K e Ca+Mg:K (SANTI et al., 2012). As alterações na relação Ca+Mg:K não foram observadas entre os modelos de produção, e houve um incremento nos valores desta relação, em ambos os modelos de produção, em função do aumento da profundidade de amostragem. Na camada de 0,0-0,10 m, foi possível observar relação Ca+Mg:K de 8:1, contrastando com um aumento nesta relação para 18:1. Em todas as três camadas a relação Mg:K foi superior ao crítico (2,30) estabelecido por Nogara Neto et al. (2011), indicando que neste experimento não houve limitações químicas para a produtividade de grãos das culturas de soja e trigo. Hernandez e Silveira (1998) concluíram que as relações Ca:Mg maiores que 3:1 causaram quedas no crescimento e na produção das plantas de milho, em razão do efeito antagônico do Ca na absorção de Mg, esta relação passa a ser importante quando um dos nutrientes esteja em deficiência (CQFS-RS/SC, 2004). Independente do modelo de produção e camada avaliada, a relação Ca:Mg foi inferior à 3:1, indicando que esta relação está em equilíbrio independente do modelo de produção, além disso, ambos os nutrientes estão acima dos teores críticos de deficiência no solo.

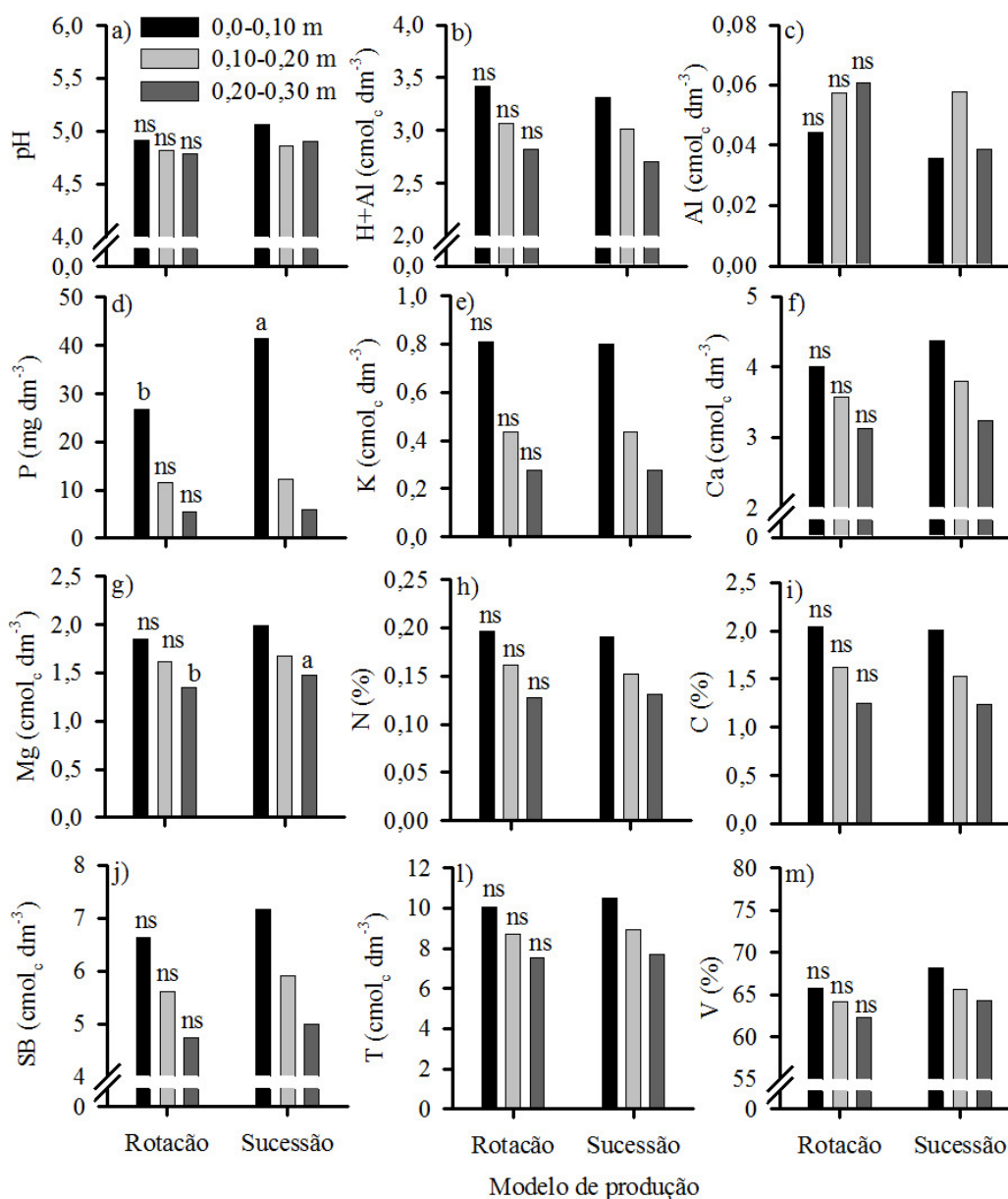


Figura 2 - Atributos químicos sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores de P, na camada de 0,0-0,10 m, apresentaram alterações em função dos modelos de produção (Figura 2d). Observa-se que houve uma maior disponibilidade de P no modelo baseado em sucessão de culturas, mas destaca-se que os teores de P no solo estão muito acima dos valores considerados como o nível “muito bom” ($12,0 \text{ mg dm}^{-3}$) para solos com teor de argila $> 60 \%$ (TECNOLOGIAS..., 2011). Esta diferença no teor de P nos modelos de produção se deve, principalmente, à cultura do milho, utilizada na rotação de

culturas, que é uma cultura altamente exigente em P, e a maior parte de P absorvida (87 %, em média) são exportadas pelos grãos (RESENDE et al., 2006). Na camada de 0,10-0,20 m, o teor de P é considerado como “bom” em ambos os tratamentos. Já na camada de 0,20-0,30 m, para ambos os modelos de produções, o teor de P é “médio”. Portanto, o P não foi fator determinante para definição da produtividade das culturas, pois em ambos os modelos os teores deste nutriente foi adequado. A elevação dos níveis de P, em todas as camadas, em relação ao observado na implantação deste experimento em 1988 ($<1 \text{ mg dm}^{-3}$) (PICCININ, 2005) se deve, basicamente, ao fato de as quantidades adicionadas como fertilizantes serem superiores às exportadas pelos grãos (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001). Houve um acúmulo de P na camada superficial (0,0-0,10 m) em relação às mais profundas (0,10-0,30 m), corroborando com Costa et al. (2009), os quais afirmam que este acúmulo de P nas camadas superficiais, são resultados da baixa mobilidade do P no solo e decomposição da parte aérea das plantas na superfície do solo. As maiores reduções dos teores de P em profundidade foram observadas no modelo com sucessão de culturas.

Os teores de K não foram influenciados pelos modelos de produção, corroborando com Spera et al. (2011), os quais avaliaram o efeito nas propriedades químicas do solo após 22 anos de utilização de calcário em um Latossolo Vermelho Distrófico sob três sistemas de manejos e três modelos de produção. Estes autores observaram teores de K na classe muito alto ($> 120 \text{ mg dm}^{-3}$) até a profundidade de 0,20 m. Conforme os critérios descritos em TECNOLGIAS... (2011), os teores de K, nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, se enquadram na classe “muito bom”. Na camada de 0,20-0,30 m, o teor de K é reduzido para o nível “bom”, porém, mesmo assim, indicando suficiente disponibilidade deste nutriente no solo, pois está acima dos limites considerados como críticos. Houve acúmulo de K na camada superficial do solo (0,0-0,10 m) em relação às demais profundidades, corroborando com Spera et al. (2011), os quais observaram que, independente do sistema de rotação de culturas, houve concentração de K na camada superficial do solo (0,0-0,07 m).

Os teores de C e N não foram alterados em função dos modelos de produção. Observa-se que o C e o N apresentam maiores valores na superfície do solo, e houve reduções com o incremento da profundidade. Em todo o perfil, houve manutenção de uma relação 10:1 para os valores de C:N, ou seja, aumentos no conteúdo de C estão também relacionados a aumentos nos teores de N do solo (STEINER et al., 2011). A utilização de modelos de rotação de culturas com frequentes aportes de resíduos vegetais, associada a sistemas sem revolvimento do solo, favorece melhorias na agregação do solo, sendo que a proteção da matéria orgânica é um importante fator na qualidade física de solos tropicais e subtropicais

brasileiros (BRAIDA et al., 2011). Zotarelli et al. (2012) destacaram que em rotações de cultura onde o tremoço foi cultivado frequentemente, seguido da cultura do milho sem aplicação de N, ocorre perdas significativas de C e N do solo, resultando em saldo muito negativo de N para o sistema. Isto pode justificar o fato de, neste trabalho, os teores de C e N terem sido similares na rotação comparativamente à sucessão de culturas. Zotarelli et al. (2012) destacam a importância do SPD para melhorar a fixação biológica de N para o sistema, além, da necessidade de reconhecer o balanço de N como um fator-chave de mudanças nos estoques de C no solo. Além disso, o SPD evitou perdas de C ao longo do tempo, porém, não foi eficiente no incremento dos estoques de C do solo.

Os resultados dos atributos químicos do solo para os sistemas de manejo do solo, nas três camadas de solo avaliadas, estão apresentados na figura 3. Entre os sistemas de manejo, não foram observadas diferenças para os valores de pH, H+Al, Al, Ca, Mg, SB e V% do solo, com exceção dos valores de H+Al (acidez potencial) na camada de 0,0-0,10 m, os quais apresentaram diferenças entre os manejos do solo. No SPC, na camada de 0,0-0,10 m, foi possível observar incrementos dos valores de H+Al (acidez potencial) em relação ao SPDC24. No SPD, as aplicações de calcário sempre foram realizadas na superfície do solo. Mesmo assim, não houve indícios de aumento da acidez do solo nas camadas subsuperficiais (abaixo de 0,10 m). Observa-se que os valores de V% estiveram acima dos limites para realização da correção da acidez do solo (60 %). Mesmo no SPDC24 somente com aplicação superficial de calcário, a cada três anos, não houve reduções dos valores de V%, na camada de 0,20-0,30 m, aos limites de reaplicação de calcário (V<60%) para correção do solo. Isto indica que a acidez do solo em SPD tende a se estabilizar ao longo do tempo apenas com aplicações superficiais de calcário, desta forma, não há necessidade de revolvimento do solo para incorporação do calcário em subsuperfície. Conforme Pöttker e Ben (1998), não há inconveniência no uso de calcário sem incorporação ao solo, no SPD, em áreas que tenham sido anteriormente calcariadas pelo método convencional e que apresentem bom nível de nutrientes.

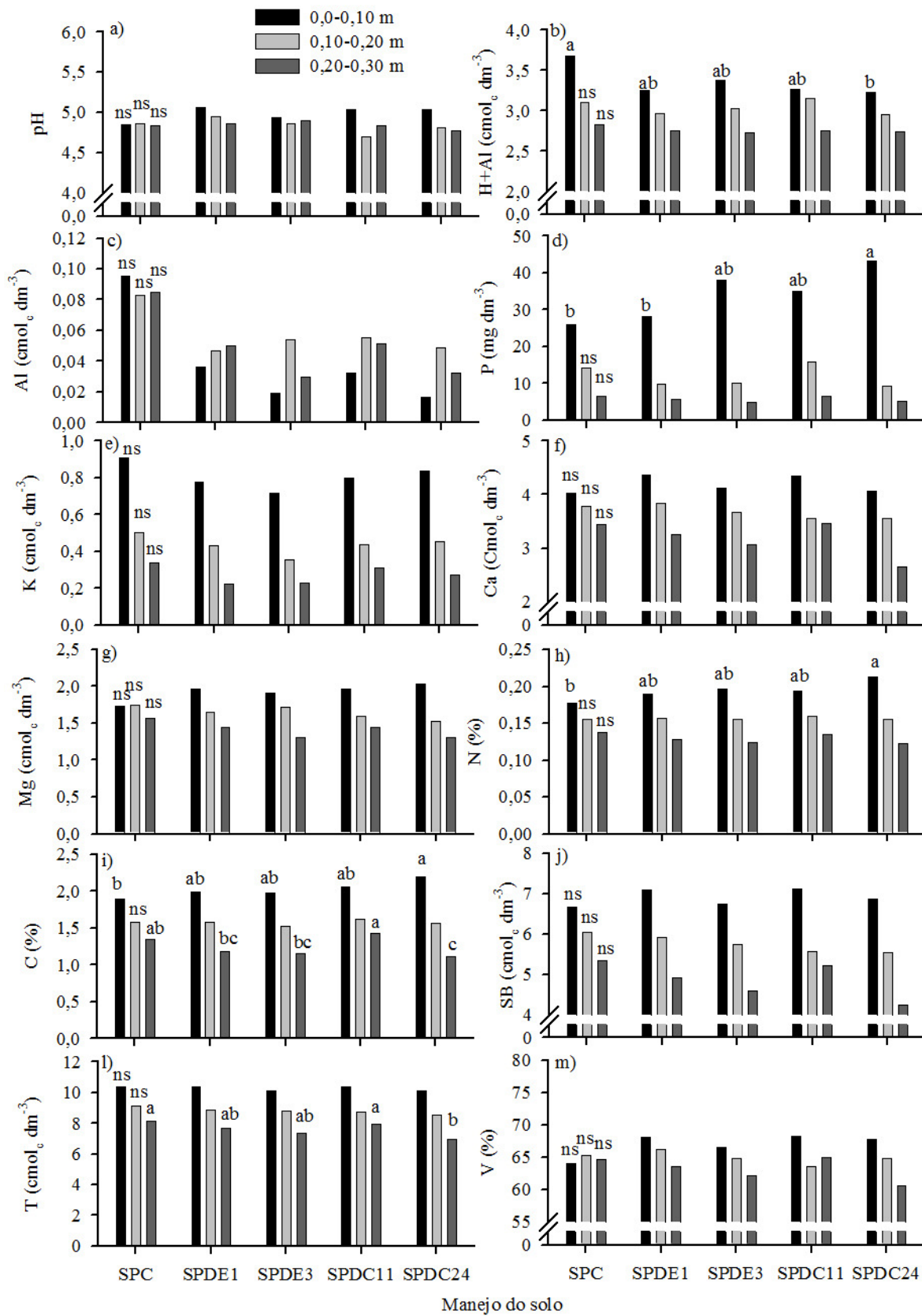


Figura 3 - Atributos químicos sob sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

ns Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados da capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T) não foi alterada em função dos sistemas de manejo do solo nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Na camada de 0,20-0,30 m, os valores de T no SPDC24 foram inferiores aos observados no SPDC11 e SPC. Estas diferenças podem estar relacionadas com o maior teor de C do solo observado no SPDC11 e SPC. Observa-se que, em todos os manejos, os valores de T são considerados como médios. O valor de T de um solo, de uma argila ou do húmus representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável (RONQUIM, 2010).

Os teores de P e K apresentaram maiores concentrações na camada superficial (0,0-0,10 m) em relação às demais camadas. Para os teores de K, nas camadas avaliadas, não houve diferenças entre os manejos do solo. Os critérios de classificação dos teores de P e K em níveis de disponibilidade são descritos em Tecnologias... (2011). Nas três camadas, os teores médios de K dos manejos do solo, foram considerados como “muito bom” ($>0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Observou-se que os teores de P, na camada de 0,0-0,10 m, no SPDC24 foram superiores aos observados no SPC e SPDE1, entretanto, em todos os manejos do solo, os teores de P são considerados como “muito bom”, pois estão acima de $12,0 \text{ mg dm}^{-3}$. Nas camadas abaixo de 0,10 m, não houve diferenças nos teores de P entre os manejos do solo. Na camada de 0,10-0,20 m, os teores de P, dos manejos do solo, foram classificados como “bom” ($8,0-12,0 \text{ mg dm}^{-3}$), e na camada de 0,20-0,30 m, foram classificados como médios ($5,4-8,0 \text{ mg dm}^{-3}$).

Em relação ao teor de C e N, observa-se que houve incrementos no SPDC24 em relação ao SPC na camada de 0,0-0,10 m. Nesta camada, os tratamentos SPDE1, SPDE3 e SPDC11 não diferiram entre si e em relação ao SPDC24 e SPC. Na camada de 0,10-0,20 m, não houve diferenças no teor de C e N entre os manejos do solo. Na camada de 0,20-0,30 m, não houve alteração no teor de N em função dos manejos do solo, porém, o teor de C foi influenciado pelo manejo do solo. O teor de C, na camada de 0,20-0,30 m, foi maior no SPC e SPDC11 em relação ao SPDC24. Isso está relacionado ao acúmulo dos resíduos vegetais nessa camada, em função da incorporação dos mesmos no solo. Pois, antes da implantação do SPDC11 (entre 1988 a 2001) o manejo do solo era realizado com utilização de arado de aivecas, com atuação até 0,32 m, e este equipamento mobilizava as camadas do solo de forma que estas fossem invertidas, ou seja, houve por um período de 13 anos, incorporação profunda (até 0,32 m) da camada superficial que apresentava presença de resíduos vegetais. Este incremento nos teores de C, na camada de 0,20-0,30 m, pode ser o responsável pelo maior valor de T no SPC e SPDC11 em relação ao SPDC24.

O maior teor de C no SPDC24 em relação ao SPC na camada de 0,0-0,10 m, demonstra que, em sistemas sem revolvimento do solo, há proteção do C no interior dos agregados do solo, corroborando com resultados de Castro Filho et al. (1998), que compararam o SPD com 14 anos de implantação e o SPC, e observaram que na camada de 0,0-0,10 m, houve incrementos significativos de C no SPD. Estes autores observaram também que, na camada de 0,10-0,20 m, não houve diferenças entre os sistemas de manejo do solo no que se refere ao teor de C, indicando que houve acúmulos principalmente na superfície do solo em SPD ao longo do tempo. A presença de resíduos na superfície tem sido um dos principais fatores a proporcionar incremento da matéria orgânica e melhoria das condições edáficas em SPD (CASTRO FILHO et al., 1998). Além de formar e estabilizar agregados, a matéria orgânica do solo (MOS) aumenta a abundância e a diversidade da macro e mesofauna do solo (LIMA, S. S. et al., 2010), o que também resulta na formação de bioporos (LIMA, H. V. et al., 2005). Da mesma forma, a MOS aumenta a capacidade de suporte de carga proveniente dos tráfegos de máquinas agrícolas e/ou animais (BRAIDA et al., 2006).

A altura de planta e altura de inserção da 1ª vagem não foram influenciadas pelos modelos de produção (Figura 4a e 4b). Os dois modelos de produção proporcionaram ambiente adequado para o crescimento das plantas de soja (Figura 4a). Observa-se que as plantas obtiveram altura de 0,85 m com inserção do primeiro legume aos 0,20 m de altura. A obtenção de plantas com altura compatível com a colheita mecanizada é um importante fator de produção. Na ausência de limitações para o crescimento durante o período vegetativo (emergência-floração), o ideal é que as plantas tenham altura acima de 0,60 m, para que assim seja compatível com a colheita mecanizada (TECNOLOGIAS..., 2011).

A massa de mil grãos (Figura 4c) e produtividade de grãos (Figura 4d) da soja, não foram influenciadas pelos modelos de rotação e sucessão de culturas. As diferenças entre os dois modelos de produção não foram suficientes para caracterizar aumentos de produtividade de grãos no modelo baseado na rotação de culturas. Porém, cabe ressaltar, que esta avaliação foi realizada no terceiro ano do ciclo de rotação de culturas (tremoço/milho-aveia/soja-trigo/soja-trigo/soja), onde as culturas utilizadas na rotação de culturas são iguais à sucessão de culturas. Conforme Franchini et al. (2011) a soja apresenta respostas positivas à rotação de culturas, particularmente quando cultivada no verão subsequente ao cultivo de milho de verão. Estes autores observaram um incremento de 17 % na produtividade média da soja, em sistema de rotação com milho em relação à observada na sucessão com trigo. Possivelmente em sistema de rotação de culturas mais intensificado, seria possível identificar alterações na produtividade de grãos e massa de mil grãos, tal como observado por Santos et al. (2006),

utilizando rotação de trigo/soja-ervilhaca/milho ou sorgo. Estes autores relataram que as maiores produtividade de grãos em sistemas de rotação de culturas, em relação ao modelo com sucessão de trigo/soja, estiveram relacionadas, em parte, à população final de plantas, à massa de grãos por planta, à massa de mil grãos e à estatura de plantas de soja.

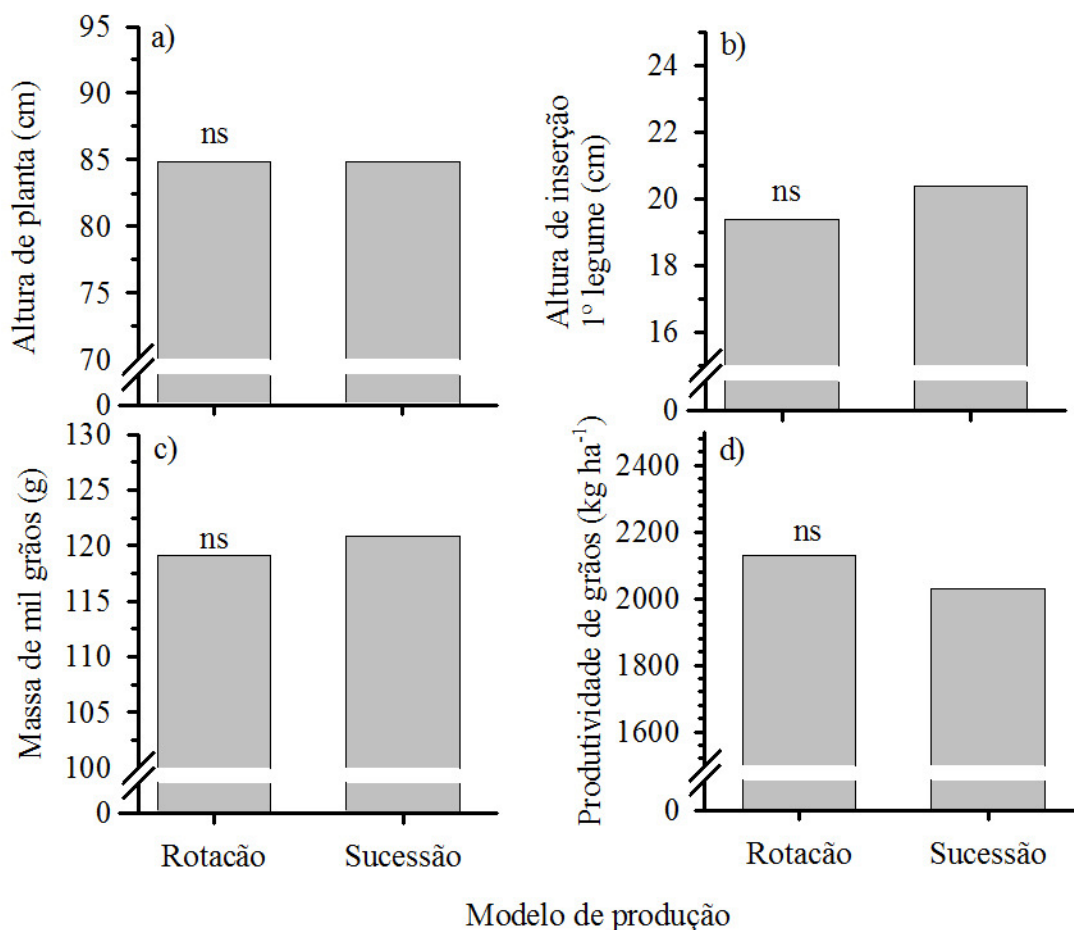


Figura 4 - Altura de planta, altura de inserção do primeiro legume, massa de mil grãos e produtividade da soja sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Os sistemas de manejo do solo alteraram de forma significativa a altura de plantas, massa de mil grãos e produtividade de grãos, e não influenciaram a altura de inserção do primeiro legume (Figura 5). A altura de plantas de soja no SPDE3 foi superior à observada no SPC, sem diferir dos demais tratamentos (Figura 5a). Não houve diferenças na altura de planta em função do tempo de adoção do SPD (SPDC11 e SPDC24). A utilização da

escarificação periódica do solo não se mostrou uma prática eficiente para melhorar o ambiente para crescimento e desenvolvimento das plantas de soja.

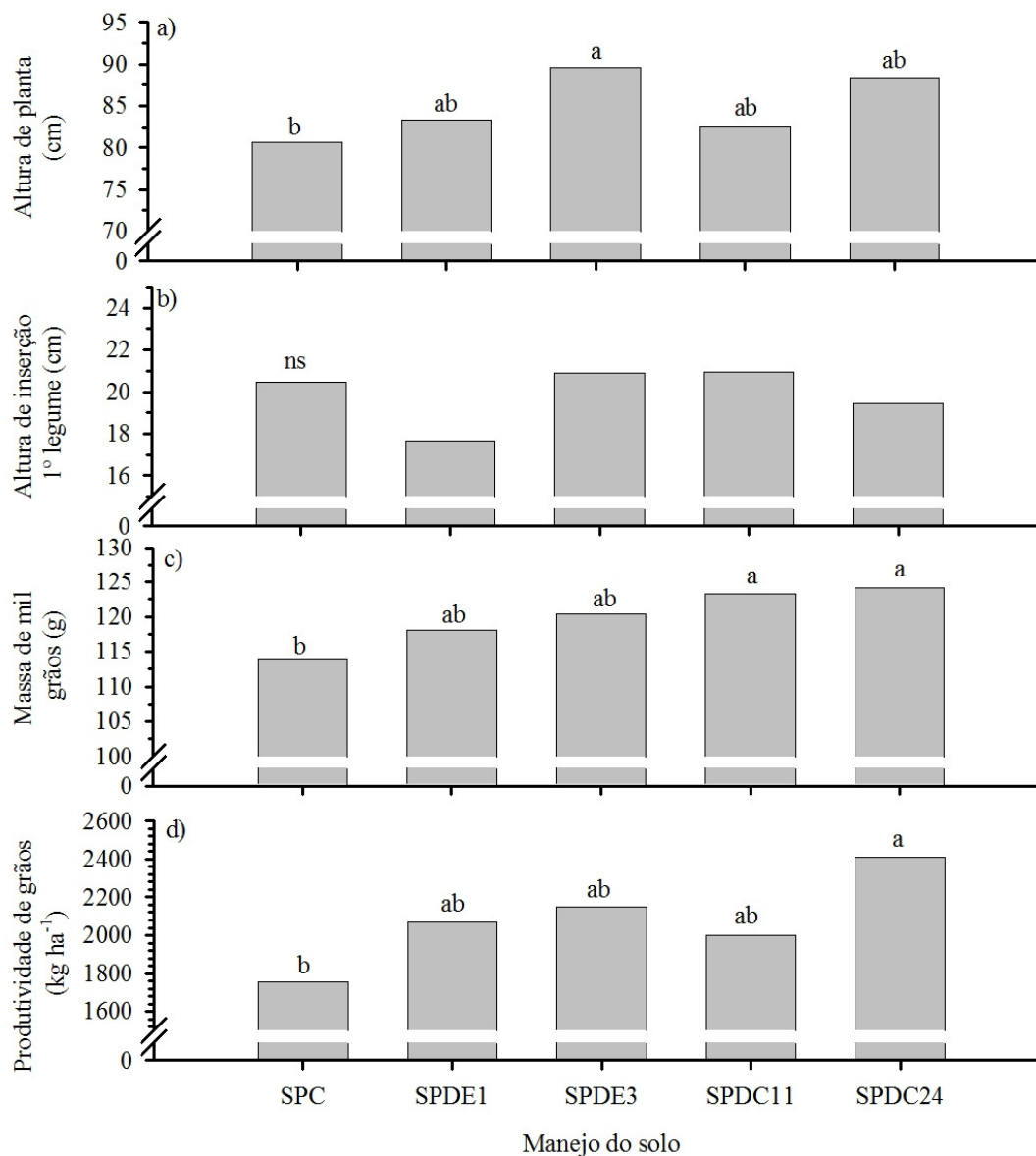


Figura 5 - Altura de planta (a), altura de inserção do 1º legume (b), massa de mil grãos (c) e produtividade (d) da soja sob diferentes sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$). *médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A massa de mil grãos e a produtividade de grãos da soja foram alteradas em função dos sistemas de manejo do solo (Figura 5c,d). O SPDC24 e SPDC11 resultaram em uma

maior massa de mil grãos em relação ao SPC, o qual não diferiu dos demais tratamentos. Não houve diferenças de produtividade de grãos e massa de mil grãos de soja entre os tempos de adoção do SPD. Houve uma redução significativa da produtividade de grãos de soja no SPC em relação ao SPDC24. O revolvimento intenso do solo, no SPC, indica que houve degradação dos atributos físicos químicos e biológicos do solo, pois esta prática afetou negativamente a estrutura do solo, continuidade de poros, o teor de C do solo, reduzindo a produtividade de grãos das culturas. Neste sentido, as alterações causadas pelo SPC no solo não se limitam aos atributos físicos, pois, a mobilização do solo favorece reduções na capacidade de imobilização de C pela biomassa microbiana (SILVA, R. R. et al., 2010), e as melhorias da qualidade do solo sob SPD provavelmente estão relacionadas com uma alteração na estrutura da comunidade microbiana do solo (HUNGRIA et al., 2009).

Por outro lado, não houve diferenças de produtividade de grãos e massa de mil grãos entre os sistemas com escarificação periódica do solo (SPDE1 e SPDE3) em relação aos demais tratamentos. Portanto, a prática da escarificação esporádica do solo é dispensável, pois além de romper a estrutura dos agregados estáveis do solo, não favorece incrementos de produtividade de grãos de soja em relação aos sistemas sem revolvimento do solo, muito menos em relação ao SPC. Conforme Franchini et al. (2011), a escarificação nem sempre resulta em benefícios ao desenvolvimento das culturas, e a escarificação periódica do SPD a cada três anos, associada à rotação de culturas, aumentou significativamente a produtividade da soja em relação ao SPD contínuo em apenas uma de 21 safras avaliadas. Estes mesmos autores observaram reduções de até 600 kg ha^{-1} quando foi utilizado a escarificação do solo juntamente com a sucessão de culturas.

A produtividade de grãos da soja teve relação linear positiva com a massa de mil grãos e a altura de plantas (Figura 6a,b). Houve uma correlação de 60 % entre o aumento de produtividade de grãos da soja com o incremento da massa de mil grãos e/ou da altura de plantas. Esta correlação entre produtividade de grãos e massa de mil grãos demonstra a importância da massa de mil grãos na manutenção da produtividade de grãos, especialmente em períodos com deficiência hídrica, tais como ocorrido durante o enchimento de grãos da soja. Isso demonstra a importância do SPD em aumentar a tolerância da soja a deficiências hídricas, pela melhor estrutura do solo que permite um maior armazenamento de água disponível, fluxo ascendente de água das camadas mais profundas até as camadas mais superficiais de água e aumento do enraizamento das culturas, concordando com Franchini et al. (2007). Santos et al. (2006) observaram que, independente de sistemas de rotação de culturas, a soja cultivada sob SPD apresentou maior produtividade de grãos, maior massa de

mil grãos e maior estatura de plantas que a soja cultivada sob preparo convencional de solo com arado de discos ou com arado de aivecas, demonstrando assim que estas três variáveis têm relações entre si, e que parâmetros morfológicos podem indicar reduções na produtividade de grãos da soja. Entretanto, é importante destacar que 40 % dos resultados de produtividade de grãos não tiveram correlação com a massa de mil grãos e nem com a altura de plantas, demonstrando que há outros fatores interligados a produtividade de grãos da soja. Conforme Dalchiavon e Carvalho (2012), a produtividade de grãos da soja tem correlação direta com o número de vagens por planta, número de grãos por planta, massa de mil grãos, massa de grãos por planta.

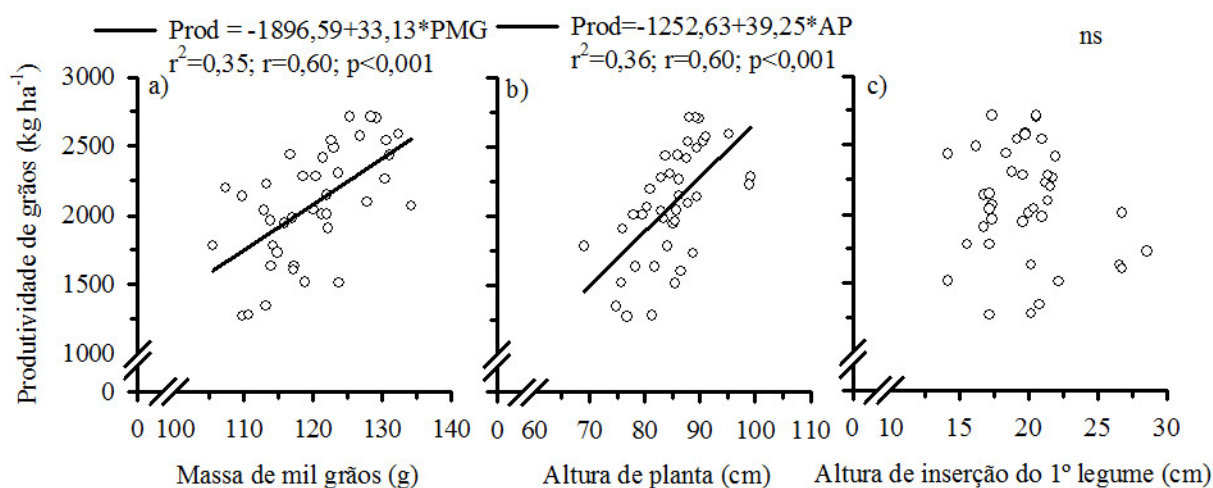


Figura 6 - Relação entre a produtividade de grãos de soja e a massa de mil grãos (a), a altura de planta (b) e a altura de inserção do primeiro legume (c) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Não houve relação entre a produtividade de grãos com a altura de inserção do primeiro legume da soja (Figura 6c). A altura de inserção do primeiro legume pode se relacionar indiretamente com a produtividade, pois se esta inserção foi abaixo de 0,10 m, poderá haver perdas no momento da colheita mecanizada das plantas (CARVALHO et al., 2010).

O peso hectolitro (PH) e a produtividade de grãos de trigo não foram influenciados pelos modelos de produção (Figura 7). Não houve diferenças de PH em função de sistemas baseados em rotação e ou sucessão de culturas (Figura 7a). Conforme Guarienti et al. (2005), a monocultura trigo/soja reduz o PH quando comparado com sistemas com rotação de

culturas, e esta redução do PH pode estar relacionada com a maior incidência de doenças no sistema radicular. É importante destacar que, neste ano de avaliação, o cultivo do trigo está em seu quarto ano após o início do sexto ciclo do esquema de rotação de culturas (tremoço-milho/aveia-soja/trigo-soja/trigo-soja). Conforme Franchini et al. (2011), as diferenças de produtividade de grãos da cultura do trigo entre sistemas de rotação e sucessão de culturas vão sendo reduzidas à medida que a cultura é repetida na área a cada inverno, até atingir o valor mínimo quando o trigo for cultivado todos os anos no inverno (sucessão de culturas). Neste sentido, os maiores ganhos de produtividade de grãos da cultura do trigo, em relação à sucessão trigo/soja, são obtidos na primeira safra de trigo dentro de cada ciclo de rotação.

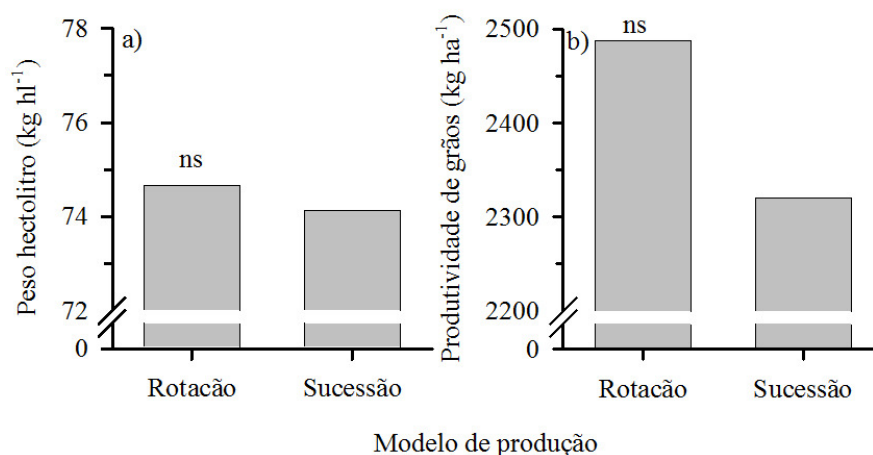


Figura 7 - Peso hectolitro (a) e produtividade de grãos (b) de trigo sob modelos de produção em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Os sistemas de manejo não alteraram o PH e a produtividade de grãos da cultura do trigo (Figura 8). A utilização da escarificação esporádica do solo a cada ano ou a cada três anos, não se mostrou como uma prática eficiente para aumentar a produtividade de grãos da cultura do trigo em relação ao SPDC11 e SPDC24. Portanto, o SPD contínuo sem revolvimento do solo apresenta potencial de manutenção de um ambiente favorável à cultura do trigo sem necessidade de intervenções mecânicas. Assim, a escarificação do solo é desnecessária, aumentando os custos de produção para o cultivo do trigo sem incrementos na produtividade de grãos nem no PH do trigo. Estes resultados discordam dos encontrados por Klein et al. (2008), os quais observaram um incremento de produtividade de grãos de trigo em

função do uso de escarificação do solo sob SPD quando comparado com o SPD contínuo com seis anos sob um Latossolo Vermelho distrófico típico.

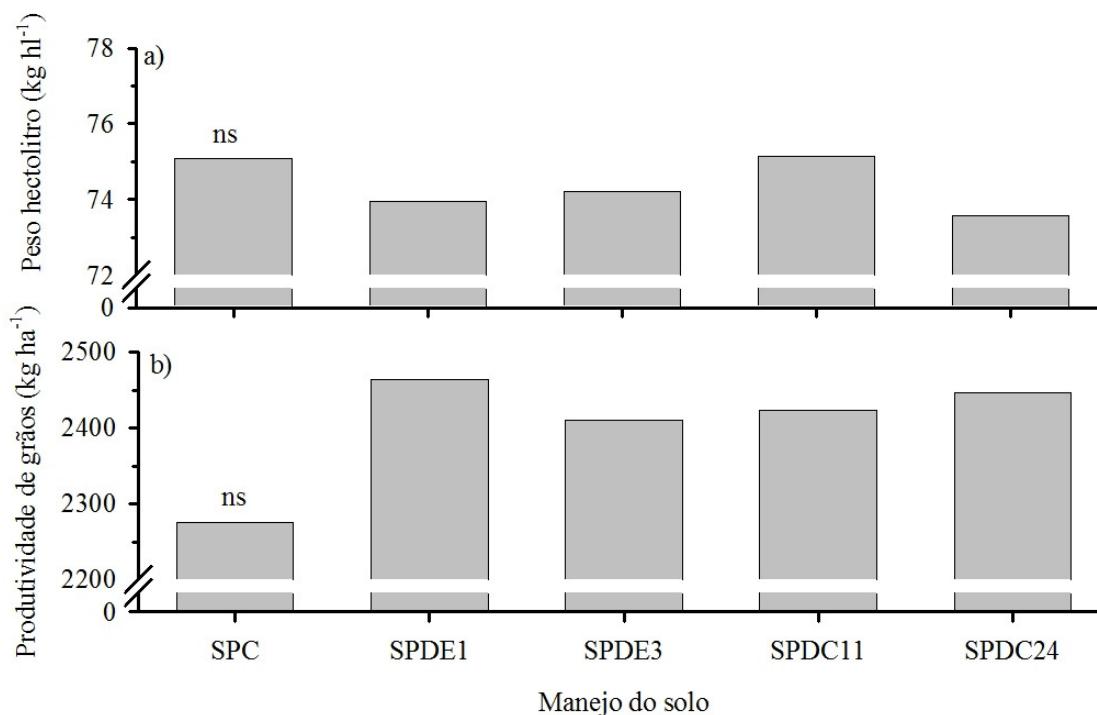


Figura 8 - O peso hectolitro (a) e produtividade de grãos (b) de trigo sob sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

A descrição estatística para as variáveis D_s , θ e RP para cada sistema de manejo do solo e modelo de produção é apresentada para as camadas de 0,0-0,10 m (Tabela 1) 0,10-0,20 m (Tabela 2) e 0,20-0,30 m (Tabela 3). Observa-se ampla faixa de valores dessas variáveis, necessária para ajustar os modelos da CRA e da CRP. A RP apresentou elevado coeficiente de variação, em concordância com resultados obtidos por Blainski et al. (2012). O elevado CV para a variável RP pode ser atribuído à determinação da RP em diferentes tensões de retenção de água no solo, além da variação de D_s entre as amostras de solo (TORMENA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2012). O aumento da D_s e a redução de θ aumentam a coesão e a fricção entre as partículas, elevando os valores de RP . Portanto, é esperado que os valores de coeficiente de variação da RP sejam altos, ou seja, quanto maior este coeficiente de variação maior será a amplitude dos valores para ajuste das equações aos dados, aumentando a precisão das estimativas dos parâmetros das equações de ajuste.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e sucessão de culturas, na camada de 0,0-0,10 m, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Modelo de produção	Variável	Mínimo	Média± desvio padrão	Máximo	CV (%)
----- SPC -----					
R	Ds	0,95	1,11±0,10	1,29	8,88
R	θ	0,25	0,34±0,05	0,42	14,58
R	RP	0,21	1,63±1,52	6,57	93,23
S	Ds	0,94	1,08±0,08	1,24	7,08
S	θ	0,26	0,33±0,05	0,42	14,33
S	RP	0,24	1,43±1,07	4,27	75,29
----- SPDE1 -----					
R	Ds	0,95	1,14±0,07	1,25	6,44
R	θ	0,29	0,35±0,04	0,43	12,42
R	RP	0,49	1,90±1,42	5,49	74,89
S	Ds	0,98	1,14±0,08	1,28	7,16
S	θ	0,25	0,34±0,05	0,47	15,42
S	RP	0,32	1,81±1,38	6,14	76,50
----- SPDE3 -----					
R	Ds	1,03	1,20±0,08	1,35	6,34
R	θ	0,32	0,38±0,04	0,45	11,10
R	RP	0,68	2,50±1,71	7,01	68,50
S	Ds	1,04	1,21±0,11	1,40	8,76
S	θ	0,28	0,37±0,04	0,43	11,44
S	RP	0,37	2,76±2,27	9,08	82,25
----- SPDC11 -----					
R	Ds	1,04	1,26±0,11	1,41	8,74
R	θ	0,31	0,38±0,04	0,46	10,99
R	RP	0,52	3,24±2,24	8,16	69,15
S	Ds	1,01	1,23±0,11	1,38	9,16
S	θ	0,30	0,38±0,04	0,46	9,71
S	RP	0,46	2,88±2,40	8,95	83,14
----- SPDC24 -----					
R	Ds	1,01	1,20±0,08	1,31	6,47
R	θ	0,29	0,38±0,05	0,45	12,49
R	RP	1,48	2,56±1,11	5,16	43,17
S	Ds	1,04	1,21±0,08	1,33	6,21
S	θ	0,32	0,38±0,03	0,44	8,81
S	RP	0,63	2,73±1,87	7,50	68,65

R: rotação de culturas; S: sucessão de culturas; Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); θ : conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração (MPa); CV: coeficiente de variação (%).

Na camada de 0,0-0,10 m, o modelo de produção com rotação de culturas apresenta-se com Ds entre 0,95 a 1,41 Mg m^{-3} (Tabela 1). Já no modelo com sucessão de culturas, a Ds variou entre 0,94 Mg m^{-3} a 1,38 Mg m^{-3} . O θ em que foi determinada a RP, nos modelos com

rotação e/ou sucessão de culturas, esteve entre 0,25 a 0,47 m³ m⁻³. A RP, na rotação de culturas, variou entre 0,21 a 8,16 MPa. Já no modelo com sucessão de culturas, a amplitude de RP foi de 0,24 a 9,08 MPa. Estes resultados indicam que houve grandes amplitudes para estas três variáveis que são utilizadas na determinação do IHO.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e sucessão de culturas, na camada de 0,10-0,20 m, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Modelo de produção	Variável	Mínimo	Média± desvio padrão	Máximo	CV (%)
----- SPC -----					
R	Ds	1,08	1,32±0,10	1,55	7,77
R	θ	0,35	0,40±0,03	0,45	8,33
R	RP	0,65	3,82±2,74	10,40	71,72
S	Ds	1,14	1,29±0,07	1,39	5,15
S	θ	0,30	0,40±0,04	0,46	10,83
S	RP	1,12	3,26±2,01	8,02	61,71
----- SPDE1 -----					
R	Ds	1,13	1,25±0,05	1,34	4,33
R	θ	0,33	0,39±0,03	0,45	8,80
R	RP	0,66	2,79±1,83	7,20	65,42
S	Ds	1,05	1,24±0,12	1,49	9,87
S	θ	0,30	0,38±0,05	0,48	13,50
S	RP	0,76	2,49±1,60	6,02	64,22
----- SPDE3 -----					
R	Ds	1,14	1,30±0,08	1,42	5,99
R	θ	0,35	0,41±0,03	0,47	8,48
R	RP	1,00	3,14±1,86	7,14	59,25
S	Ds	1,17	1,30±0,06	1,38	4,61
S	θ	0,32	0,40±0,05	0,47	11,23
S	RP	1,30	3,10±1,72	6,82	55,53
----- SPDC11 -----					
R	Ds	1,21	1,32±0,07	1,47	5,21
R	θ	0,32	0,40±0,04	0,46	9,71
R	RP	1,40	3,68±2,04	7,95	55,45
S	Ds	1,27	1,34±0,04	1,42	3,22
S	θ	0,33	0,40±0,04	0,47	10,04
S	RP	1,80	3,81±2,15	7,94	56,42
----- SPDC24 -----					
R	Ds	1,19	1,29±0,04	1,36	3,24
R	θ	0,34	0,41±0,04	0,46	8,97
R	RP	1,53	3,41±1,53	7,21	44,86
S	Ds	1,21	1,28±0,04	1,35	3,36
S	θ	0,35	0,40±0,03	0,45	7,16
S	RP	1,41	3,55±1,86	8,08	52,25

R: rotação de culturas; S: sucessão de culturas; Ds: densidade do solo (Mg m⁻³); θ: conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³); RP: resistência do solo à penetração (MPa); CV: coeficiente de variação (%).

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nos diferentes sistemas de manejo do solo sob rotação e sucessão de culturas, na camada de 0,20-0,30 m, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Modelo de produção	Variável	Mínimo	Média± desvio padrão	Máximo	CV (%)
----- SPC -----					
R	Ds	1,25	1,35±0,07	1,50	5,06
R	θ	0,36	0,42±0,04	0,48	8,39
R	RP	1,95	3,89±1,92	9,35	49,34
S	Ds	1,20	1,29±0,05	1,37	3,98
S	θ	0,35	0,43±0,03	0,48	7,77
S	RP	1,71	3,45±1,74	7,27	50,34
----- SPDE1 -----					
R	Ds	1,12	1,28±0,07	1,37	5,42
R	θ	0,35	0,41±0,03	0,47	8,09
R	RP	0,52	2,80±1,73	6,36	61,87
S	Ds	1,04	1,25±0,11	1,49	8,87
S	θ	0,31	0,40±0,05	0,48	12,66
S	RP	1,05	2,47±1,50	6,04	60,71
----- SPDE3 -----					
R	Ds	1,10	1,25±0,08	1,37	6,24
R	θ	0,35	0,43±0,04	0,49	9,18
R	RP	0,53	2,57±1,31	5,04	51,03
S	Ds	1,18	1,27±0,05	1,39	4,19
S	θ	0,36	0,42±0,04	0,49	8,98
S	RP	1,04	2,78±1,47	5,94	52,88
----- SPDC11 -----					
R	Ds	1,16	1,31±0,08	1,47	5,90
R	θ	0,32	0,40±0,04	0,45	9,74
R	RP	1,14	3,10±1,64	6,56	52,76
S	Ds	1,23	1,29±0,03	1,34	2,51
S	θ	0,32	0,41±0,04	0,47	9,73
S	RP	1,33	3,25±1,93	7,68	59,52
----- SPDC24 -----					
R	Ds	1,20	1,25±0,03	1,33	2,41
R	θ	0,36	0,42±0,03	0,46	7,61
R	RP	1,57	3,14±1,57	6,65	50,57
S	Ds	1,13	1,23±0,06	1,30	4,47
S	θ	0,34	0,41±0,03	0,46	8,34
S	RP	0,75	2,97±1,62	7,16	54,61

R: rotação de culturas; S: sucessão de culturas; Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); θ : conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração (MPa); CV: coeficiente de variação (%).

Na camada de 0,10-0,20 m, a Ds variou entre 1,08 a 1,55 Mg m^{-3} no modelo com rotação de culturas (Tabela 2). Já sob sucessão de culturas, a amplitude de Ds foi de 1,05 Mg m^{-3} a 1,49 Mg m^{-3} . O θ no momento da determinação da RP no modelo com rotação de culturas foi de 0,32 a 0,48 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. No modelo baseado em sucessão de culturas, a amplitude

de observação dos valores foi de 0,30 a 0,48 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. A RP, sob modelo de rotação de culturas, apresentou amplitude de 0,65 a 10,40 MPa. Sob modelo de sucessão de culturas, a RP foi obtida com uma amplitude entre 0,76 a 8,08 MPa. Portanto, há amplitude suficiente para a realização dos ajustes dos modelos aos dados experimentais.

Na camada de 0,20-0,30 m, a Ds, sob rotação de culturas, apresentou amplitude de 1,10 a 1,50 Mg m^{-3} (Tabela 3). Já no modelo sob sucessão de culturas, a amplitude de variação foi de 1,04 a 1,49 Mg m^{-3} . O θ apresentou amplitude de 0,32 a 0,48 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ sob rotação de culturas, e de 0,31 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ sob sucessão de culturas. A RP teve sua maior amplitude sob rotação de cultura, variando de 0,53 a 9,35 MPa. Sob sucessão de culturas, a RP foi de 0,75 a 7,68 MPa.

Os parâmetros de ajuste da CRA para as camadas de 0,0-0,10 m (Tabela 4) 0,10-0,20 m (Tabela 5) e 0,20-0,30 m (Tabela 6) demonstram a influência dos sistemas de manejo do solo na CRA. Através do ajuste da CRA em relação ao Ψ e a Ds, foi possível determinar o θ em cada Ds dos sistemas de manejo do solo e modelo de produção.

Tabela 4 - Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,0-0,10 m. Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r^2
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	-1,4523	0,0597	-1,5700	-1,3346	0,99*
b	0,6462	0,0535	0,5407	0,7517	
c	-0,0838	0,0019	-0,0875	-0,0800	
-----SPDE1-----					
a	-1,5288	0,0681	-1,6631	-1,3445	0,99*
b	0,6944	0,0590	0,5780	0,8108	
c	-0,0785	0,0018	-0,0821	-0,0750	
-----SPDE3-----					
a	-1,3503	0,0545	-1,4579	-1,2427	0,99*
b	0,5414	0,0447	0,4533	0,6295	
c	-0,0748	0,0017	-0,0780	-0,0715	
-----SPDC11-----					
a	-1,2028	0,0481	-1,2976	-1,1080	0,99*
b	0,3814	0,0381	0,3064	0,4565	
c	-0,0658	0,0016	-0,0691	-0,0626	
-----SPDC24-----					
a	-1,4548	0,0456	-1,5448	-1,3649	0,99*
b	0,6096	0,0374	0,5358	0,6834	
c	-0,0707	0,0011	-0,0728	-0,0686	

θ é conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ é o potencial matricial de água no solo (kPa); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa); $r^2 = [1 - (\text{SQresíduo}/\text{SQregressão})]$; *significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

A alteração da CRA em função da Ds ocorre em função de uma redistribuição do tamanho de poros e função com aumento na proporção de poros de menor diâmetro de modo a se tornarem mais eficientes na retenção de água em elevados potenciais (BLAINSKI et al., 2012). Em baixos potenciais, a influência da Ds sobre a CRA pode ser atribuída à maior quantidade de partículas que favorece a adsorção, aumentando a quantidade de água retida no interior dos microagregados.

Tabela 5 - Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,10-0,20 m. Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r ²
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	-0,9672	0,0672	-10997	-0,8346	0,99*
b	0,2016	0,0511	0,1009	0,3024	
c	-0,0564	0,0017	-0,0597	-0,0531	
-----SPDE1-----					
a	-1,3844	0,0509	-1,4848	-1,2841	0,99*
b	0,5192	0,0402	0,4399	0,5985	
c	-0,0583	0,0015	-0,0612	-0,0554	
-----SPDE3-----					
a	-1,1575	0,0640	-1,2837	-1,0312	0,99*
b	0,3572	0,0489	0,2607	0,4538	
c	-0,0581	0,0013	-0,0601	-0,0556	
-----SPDC11-----					
a	-1,0315	0,0718	-1,1730	-0,8899	0,99*
b	0,2299	0,0538	0,1237	0,3361	
c	-0,0510	0,0012	-0,0533	-0,0487	
-----SPDC24-----					
a	-1,2821	0,0542	-1,3890	-1,1752	0,99*
b	0,4485	0,0420	0,3656	0,5314	
c	-0,0575	0,0007	-0,0588	-0,0561	

θ é conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ψ é o potencial matricial de água no solo (kPa); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa); $r^2 = [1 - (SQ_{resíduo}/SQ_{regressão})]$; *significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Os coeficientes de ajuste da CRP foram apresentados no Artigo 3 desta dissertação. As funções de CRA e CRP ajustadas para cada um dos sistemas de manejo do solo foram utilizadas para estimar θ_{cc} , θ_{pmp} , θ_{RP2MPa} e $\theta_{RP3,5MPa}$, os quais, juntamente com θ_{ar} determinam o IHO, o qual foi representado pela área em cinza nos gráficos (Figura 9), que

são apresentados separadamente para a camada de 0,0-0,10 m (Figura 9-I), 0,10-0,20 m (Figura 9-II) e 0,20-0,30 m, (Figura 9-III).

Tabela 6 - Estimativa dos coeficientes de ajuste para a curva de retenção de água do solo [$\theta = \exp(a+bDs) \Psi^c$] na camada de 0,20-0,30 m. Londrina, PR, 2013.

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança		r^2
			Limite inferior	Limite superior	
-----SPC-----					
a	-0,6516	0,0768	-0,8031	-0,5001	0,99*
b	-0,0154	0,0579	-0,1296	0,0988	
c	-0,0595	0,0015	-0,0624	-0,0566	
-----SPDE1-----					
a	-1,2670	0,0552	-1,3759	-1,1581	0,99*
b	0,4466	0,0433	0,3612	0,5320	
c	-0,0622	0,0016	-0,0653	-0,0591	
-----SPDE3-----					
a	-1,2441	0,0678	-1,3778	-1,1104	0,99*
b	0,4653	0,0534	0,3600	0,5706	
c	-0,0676	0,0014	-0,0703	-0,0648	
-----SPDC11-----					
a	-1,1646	0,0719	-1,3065	-1,0228	0,99*
b	0,3571	0,0549	0,2487	0,4654	
c	-0,0589	0,00128	-0,0614	-0,0563	
-----SPDC24-----					
a	-1,3016	0,0668	-1,4334	-1,1698	0,99*
b	0,5147	0,0536	0,4090	0,6204	
c	-0,0692	0,0009	-0,0711	-0,0674	

θ é conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ é o potencial matricial de água no solo (kPa); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa); $r^2 = [1 - (\text{SQresíduo}/\text{SQregressão})]$; *significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Em cada uma das camadas estudadas, foi determinado o IHO em separado para cada sistema de manejo do solo, para possibilitar a identificação das alterações causadas pela CRA e CRP no IHO. Na camada de 0,0-0,10 m (Figura 9-I), observa-se que, quando utilizada a $\theta_{\text{RP}2\text{MPa}}$, em todos os sistemas de manejo, independente da Ds, o limite inferior do IHO foi o $\theta_{\text{RP}2\text{MPa}}$. Quando o valor de RP foi ampliado para 3,5 MPa ($\theta_{\text{RP}3,5\text{MPa}}$), até valores de Ds de $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$, o limite inferior foi o θ_{pmp} . A partir deste valor de Ds, até a Dsc, o IHO teve como seu limite inferior o $\theta_{\text{RP}3,5\text{MPa}}$. Esta ampliação da faixa tolerável de RP para o crescimento das culturas vem sendo discutida na literatura (TORRES; SARAIVA, 1999; TORMENA et al., 2007; BETIOLI JUNIOR et al., 2012). O principal argumento é que em

solos sob SPD, a bioporosidade resultante da reduzida movimentação mecânica do solo pode oferecer caminhos alternativos para o crescimento das raízes, compensando a maior resistência da matriz do solo (BETIOLI JUNIOR et al., 2012). Torres e Saraiva (1999), avaliando experimentos sob um Latossolo Vermelho Distroférico, muito argiloso, observaram que, para a cultura da soja, valores de RP, medidos com penetrômetros de impacto, na faixa de 3,5 (baixo nível) a 6,5 MPa (alto nível), são os mais adequados para avaliação da formação de camadas de impedimento mecânico ao crescimento das raízes.

Independente do valor crítico de RP (2 ou 3,5 MPa) utilizado, com exceção do SPDC11 todos os demais tratamentos, na camada de 0,0-0,10 m, apresentaram o intervalo de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO (Figura 9-I). Portanto, na camada de 0,0-0,10 m, utilizando como critério θ_{RP2MPa} , o aumento do tempo de adoção do SPD favoreceu que a houvesse ampliação dos valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO. Quanto o limite foi o $\theta_{RP3,5MPa}$, não houve diferenças entre os tempos de adoção do SPD na frequência de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO. A escarificação periódica do solo não alterou a frequência de valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO em relação ao SPDC24. Na literatura foi possível observar indicativos de que 2 MPa não é um valor adequado para SPD consolidados com presença de bioporos e poros contínuos no perfil do solo (TORMENA et al., 2007; KAISER et al., 2009; BETIOLI JUNIOR et al., 2012). Neste sentido, o uso do θ_{RP2MPa} ou $\theta_{RP3,5MPa}$, principalmente visualizado no SPDC11, altera a frequência de valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO, indicando que os limites considerados críticos para o desenvolvimento das culturas foram atingidos, necessitando de intervenção para com práticas de manejos de controle da compactação do solo, porém, observando a produtividade de grãos, não houve diferenças do SPDC11 em relação aos demais tratamentos (Figura 5d,7b). Além disso, é importante destacar que os limites do IHO foram alterados em função dos sistemas de manejos. Caso as avaliações físicas sejam realizadas utilizando valores fixos, de 2 MPa, como limite em todos os sistemas de manejo, sendo este um valor a partir do qual a RP afeta o crescimento de plantas (SILVA, A. P. et al., 2008, 2010), poderá estar inferindo-se que o SPD está apresentando uma RP muito elevada para o desenvolvimento das culturas, indicando assim uma afirmação errônea de compactação do solo.

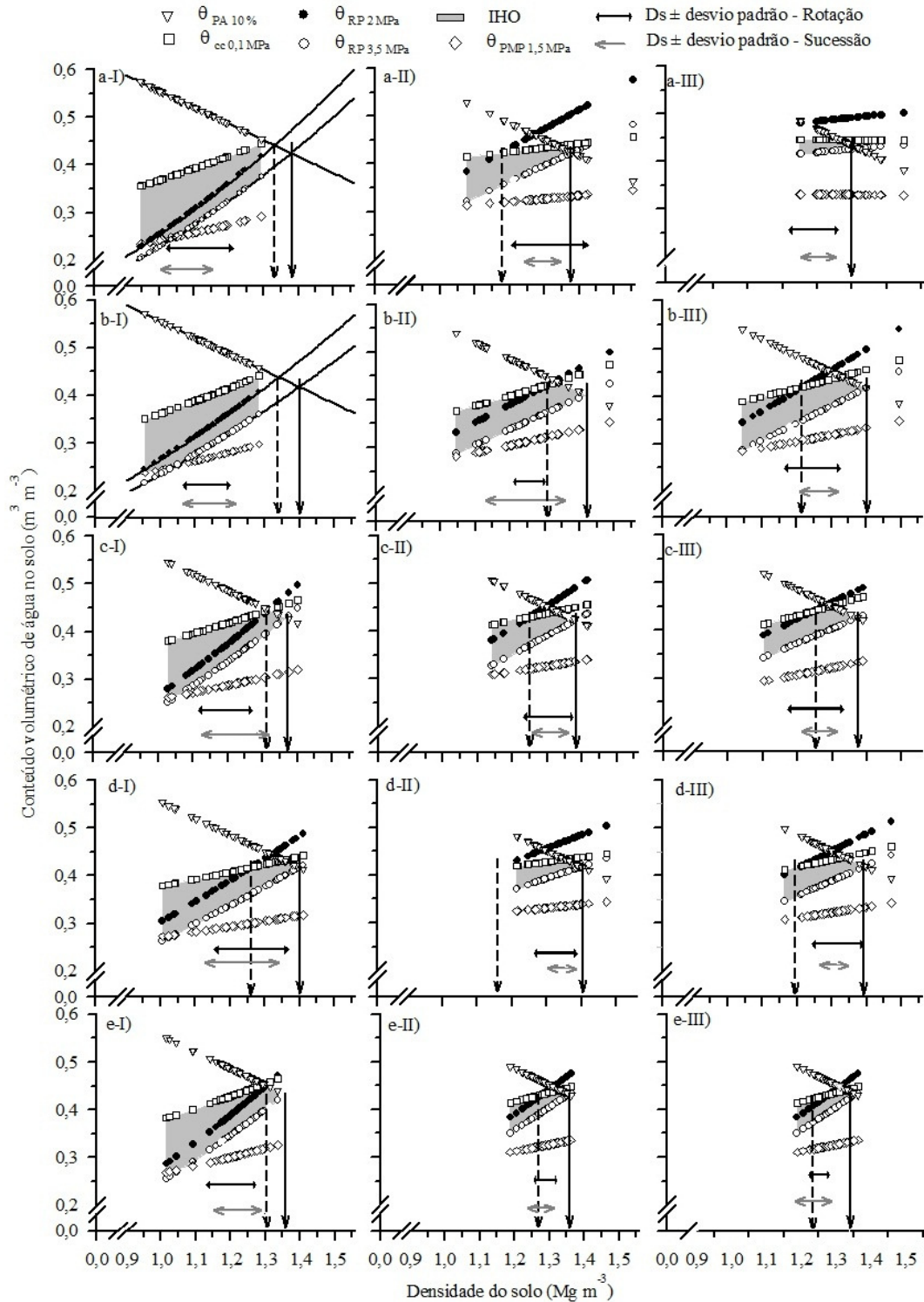


Figura 9 - Intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Latossolo Vermelho Distroférico, na camada de 0,0-0,10 m (I) 0,10-0,20 (II) e 0,20-0,30 m (III), em função de sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), determinado pela variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($|\Psi| = 0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($|\Psi| = 1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 2 MPa e 3,5 MPa. Londrina, PR, 2013.

*As setas verticais correspondem à densidade do solo crítica (D_{sc}) para uma RP de 2 MPa (seta pontilhada) e 3,5 MPa (seta contínua).

Na camada de 0,10-0,20 m, o comportamento da CRA e CRP no IHO foi alterado em função do manejo do solo (Figura 9-II). Em todos os manejos do solo, na camada de 0,10-0,20 m, utilizando como limite inferior a θ_{RP2MPa} , apresentaram valores de $D_s \pm$ desvio padrão fora do IHO, com exceção do SPDE1 sob rotação de culturas, no qual mesmo utilizando este critério de RP (2 MPa) houve condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento das culturas. Os comportamento do IHO com θ_{RP2MPa} , demonstra que o efeito residual da escarificação do solo foi ampliado com utilização de rotação de culturas, pois após 10 meses da escarificação do solo todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão estão dentro do IHO, porém, quanto foi utilizado modelo de sucessão de culturas, mesmo no SPDE1, foram observados parte dos valores de $D_s \pm$ desvio padrão fora do IHO, indicando condições de restrição ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Após 22 meses da escarificação do solo (SPDE3), independente do modelo de produção, observa que todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão estão fora do IHO. Sob critério de θ_{RP2MPa} , o aumento do tempo de adoção do SPD alterou o comportamento da CRP na camada de 0,10-0,20 m, porém, não possibilitou que os valores de $D_s \pm$ desvio padrão ficassem dentro do IHO.

Utilizando o critério de θ_{RP2MPa} , os tempos de adoção do SPD demonstram que todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão ficaram fora do IHO. Contradizendo os resultados associados com o desempenho das culturas de soja (Figura 5d) e de trigo (Figura 7b). Pois as plantas foram submetidas a um período de deficiência hídrica (Figura 1), e mesmo assim no SPD houve adequadas condições para o crescimento e desenvolvimento da parte aérea (altura de planta) (Figura 5a) e enchimento de grãos da soja (massa de mil grãos) (Figura 5c), além de alta produtividade de grãos de soja e trigo. Isto indica que o valor de RP de 2 MPa não foi adequado para caracterizar a qualidade física de solos sob SPD de longo prazo sob Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso.

Utilizando a $\theta_{RP3,5MPa}$, na camada de 0,10-0,20 m, todos os manejo do solo apresentaram os valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO. Ampliando o limite de RP crítica de 2 para 3,5 MPa observa que o IHO foi menos sensível para detectar valores de D_s fora do IHO, pois a maior parte dos valores de D_s amostrados, independente do manejo do solo, foram inferiores à D_{sc} . A ampliação do nível de RP em termos práticos significa ampliar o secamento do solo sem que haja restrições mecânicas às plantas devido à maior incidência de bioporos no solo com o uso de rotação de culturas (BETIOLI JUNIOR et al., 2012), condição necessária para justificar o crescimento das raízes das culturas nas camadas abaixo de 0,10 m. Para que haja crescimento das raízes abaixo de 0,10 m, portanto, seria necessário que os limites de RP fossem maiores do que 2 MPa, pois, considerando o balanço hídrico

durante o ciclo da soja e do trigo, dificilmente haveria condições de armazenamento de água suficiente para o completo desenvolvimento da planta em apenas 0,10 m de solo.

Na camada de 0,20-0,30 m, utilizando o θ_{RP2MPa} , no IHO grande parte dos valores de D_s de todos os manejo do solo foram superiores aos considerados como críticos (Figura 9-III). No SPC não foi possível identificar o valor da D_{sc} , pois para toda a amplitude de D_s , o θ no limite inferior foi maior do que o θ limite superior do IHO. Indicando que, na camada de 0,20-0,30 m, considerando estes critérios para o IHO, houve severas restrições físicas no SPC.

Na camada de 0,20-0,30 m, os tempos de adoção do SPD demonstram que houve melhorias nas condições físicas do solo no SPDC24 em relação ao SPDC11. Utilizando o limite de θ_{RP2MPa} , o IHO foi maior no SPDC24 do que o SPDC11, sendo que no SPDC11, todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão foram superiores ao valor de D_{sc} , no SPDC24 sob sucessão de culturas, parte dos valores de $D_s \pm$ desvio padrão foram inferiores à D_{sc} . A ampliação do limite para $\theta_{RP3,5MPa}$ indica um maior aumento na amplitude do IHO no SPDC11 em relação ao SPDC24 influenciada pela CRP, porém, todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão, independente do tempo de adoção do SPD estiveram dentro do IHO.

A escarificação do solo (SPDE1 e SPDE3) em relação ao SPDC24, na camada de 0,20-0,30 m, não favoreceu o aumento da frequência de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO utilizando θ_{RP2MPa} . Houve alteração do IHO entre os tempos de escarificação do solo, após 22 meses da escarificação (SPDE3) foi constatada uma redução da amplitude do IHO em cada D_s , influenciada principalmente pela CRP. Na camada de 0,20-0,30 do SPDE3 sob rotação de culturas, houve uma ampliação da frequência de valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO com o θ_{RP2MPa} em relação ao SPDE1. Indicando que as plantas de rotação de culturas podem ter favorecido a melhoria da qualidade física do solo. Utilizando o limite de $\theta_{RP3,5MPa}$, na camada de 0,20-0,30 m, todos os valores de $D_s \pm$ desvio padrão nos sistemas com escarificação do solo ficaram dentro do IHO.

Após dez meses da escarificação do solo (SPDE1), utilizando como limite inferior do IHO o θ_{RP2MPa} , a D_s média sob sucessão e ou rotação de culturas esteve acima dos níveis considerados como críticos. Blainski (2010), afirma que práticas mecânicas podem promover a redução da D_s por meio da escarificação e/ou aração do solo e, conseqüentemente, reduzir a RP. Porém, quando se mantém a utilização do critério de θ_{RP2MPa} como limitante ao crescimento das culturas, não há prática de manejo neste solo que resulte na ampliação e manutenção do limite inferior e, conseqüentemente, do IHO. Constata-se que a utilização do valor de RP de 2 MPa foi inadequado como indicador da qualidade física neste Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso.

Considerando como crítico o valor de $\theta_{RP3,5MPa}$, na camada de 0,20-0,30 m, foi constatado que os sistemas de manejo do solo apresentaram condições adequadas de IHO para o crescimento e desenvolvimento das plantas, com exceção do SPC sob rotação de culturas, onde parte das densidades médias deste modelo de produção ficaram acima dos valores de Dsc (seta contínua vertical) (Figura 9-III). A escarificação do solo (SPDE1 e SPDE3), quando comparada com o SPDC11 e SPDC24, não foi eficiente para a ampliação do IHO no intervalo da $D_s \pm$ desvio padrão. Em outros estudos, de maneira geral, o efeito benéfico da escarificação do solo foi temporário e o solo após o revolvimento retorna rapidamente ao estado anterior à escarificação (BUSSCHER et al., 2002; BLAINSKI et al., 2009), ou eleva-se o risco de compactação das camadas subsuperficiais (abaixo de 0,10 m) (SILVA, S. G. C. et al., 2012) em função da redução do efeito amortecedor (VEIGA et al., 2007) e da capacidade de suporte de carga (SILVA, V. R. et al., 2002) das camadas superficiais, exigindo a repetição da operação regularmente (BLAINSKI et al., 2009). Tavares-Filho et al. (2006) observaram que o efeito residual da escarificação em um Latossolo Vermelho não foi superior a um ano, enquanto que Silva, S. G. C. et al. (2012) observaram efeito residual da escarificação inferior a seis meses em um Latossolo Vermelho Distroférrico.

O perfil de variação do IHO (Figura 10) demonstra que a utilização, no limite inferior, do θ_{RP2MPa} , somente permite visualizar, em todos os sistemas de manejo do solo, uma faixa de IHO na camada de 0,0-0,10 m, com exceção do SPDE1, no qual foi possível observar um pequeno IHO até a camada de 0,10-0,20 m (Figura 10b). A ampliação do limite inferior para o $\theta_{RP3,5MPa}$, demonstra que todos os sistemas de manejo do solo apresentaram IHO no perfil do solo até 0,30 m. A escarificação do solo (SPDE1), nas camadas de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, independente do limite de RP, possibilitou incrementos na amplitude do IHO em relação ao SPDC11 e SPDC24, porém, isso não se refletiu em aumento de altura de planta de soja (Figura 5a), massa de mil grãos (Figura 5c) e produtividade de grãos de soja (Figura 5d) e de trigo (Figura 7b).

Independente do limite de θ_{RP2MPa} ou $\theta_{RP3,5MPa}$, houve incrementos no IHO em função do aumento do tempo de adoção do SPD na camada de 0,0-0,10 m, pois o IHO no SPDC24 foi maior do que o observado no SPDC11. Porém, nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, independente do limite de RP, não houve diferenças entre os tempos de adoção do SPD. Foi constatado que os efeitos da escarificação do solo são reduzidos em função do aumento do tempo após a escarificação, e que após 22 meses da escarificação (SPDE3) o IHO, nas três camadas, foi igual ao observado no SPDC24.

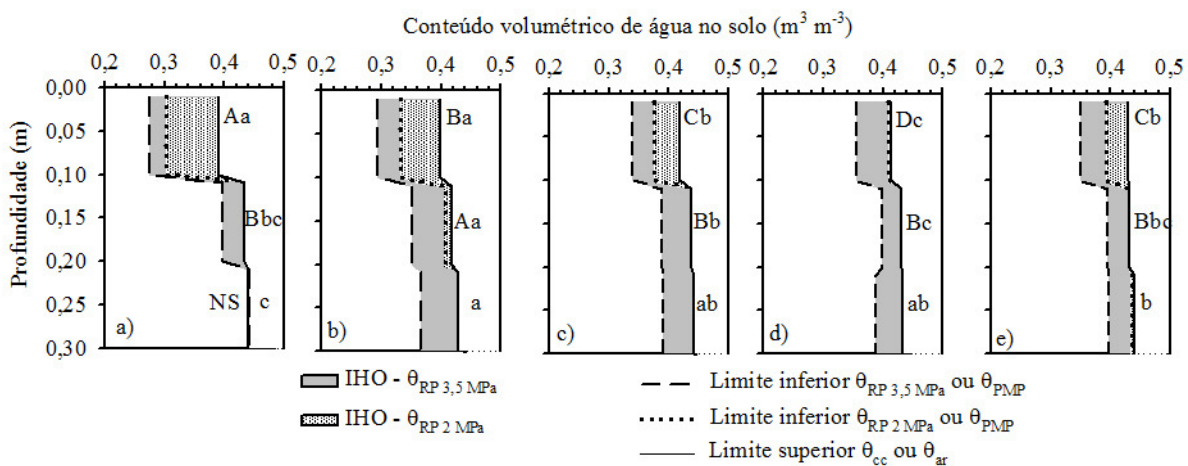


Figura 10 - Perfil da variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho Distroférico, sob sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), determinado pela umidade volumétrica do limite superior (porosidade de aeração ou capacidade de campo) e do limite inferior (ponto de murcha permanente ou a resistência a penetração de 2 e 3,5 MPa). Londrina, PR, 2013.

*média em mesma camada seguidas pela mesma letra, maiúscula para o conteúdo volumétrico de água na RP de 2 MPa e minúscula para o conteúdo de água na RP de 3,5 MPa, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Não houve alteração do IHO em função do modelo de produção. Observa-se que independente do modelo de produção, a utilização do θ_{RP2MPa} como limite crítico ao desenvolvimento das plantas foi equivocada, pois, com exceção do SPDE1 em todos os demais manejos do solo as plantas estariam restritas à camada de 0,0-0,10 m para desenvolver seus sistemas radiculares, reduzindo assim a absorção de água e nutrientes e, por consequência, apresentariam severas reduções de produtividade de grãos. No entanto, verifica-se que o SPDC24 apresentou produtividade de grãos de soja (Figura 5d) semelhante aos valores médios de produtividade do Estado do Paraná para o ano agrícola de 2011/12 (2429 kg ha^{-1}) (CONAB, 2012). Os demais tratamentos apresentaram produtividades de grãos superiores a 1750 kg ha^{-1} (SPC). Conforme a Conab (2012), na safra de 2011/12, houve reduções de 27,7 % na produtividade de grãos de soja em relação à safra de 2010/11. As principais causas dessa redução foram as condições climáticas adversas causadas pelo fenômeno “La Niña”.

A Dsc foi influenciada pelo critério utilizado para determinação do IHO e pelos sistemas de manejo do solo (Figura 11). Utilizando como limite o θ_{RP2MPa} , a Dsc variou nas três camadas avaliadas. Na camada de 0,0-0,10 m, o maior valor de Dsc foi observado no SPDE1 ($1,34 \text{ Mg m}^{-3}$) (Figura 11a). Em contraste, a menor Dsc foi obtida no SPDC11 ($1,26$

Mg m^{-3}). Entre os tempos de adoção do SPD, foi possível observar um aumento na Dsc, na camada de 0,0-0,10 m, no SPDC24 em relação ao SPDC11. Houve uma redução na Dsc no SPDE3 em relação ao SPDE1. A principal causa desta alteração dos valores de Dsc está relacionada com a CRP. A CRP pode ser utilizada para estabelecer tanto θ como a Ds, em que a RP seria impeditiva para o crescimento radicular das plantas (BLAINSKI et al., 2008). No SPDC11 houve aumento mais acentuado no $\theta_{\text{RP}2\text{MPa}}$ do que no SPDE1. Reichert et al. (2003) afirmam que o uso do IHO, para estabelecer a Dsc para o desenvolvimento de plantas foi um grande avanço na área de biofísica do solo.

Na camada de 0,0-0,10 m, o aumento do $\theta_{\text{RP}2\text{MPa}}$ para $\theta_{\text{RP}3,5\text{MPa}}$, diminuiu as diferenças na Dsc entre os sistemas de manejo do solo (Figura 11b). Houve variações de Dsc entre os tempos de adoção do SPD e entre os tempos de escarificação do solo. A Dsc foi reduzida no SPDC24 ($1,36 \text{ Mg m}^{-3}$) em relação ao SPDC11 ($1,40 \text{ Mg m}^{-3}$). O aumento de tempo sem escarificação do solo, também reduziu a Dsc, onde no SPDE3 ($1,37 \text{ Mg m}^{-3}$) foi inferior à Dsc no SPDE1 ($1,40 \text{ Mg m}^{-3}$). No SPC a Dsc ($1,38 \text{ Mg m}^{-3}$) foi intermediária aos demais manejos do solo. Em termos práticos, a ampliação do limite de RP no IHO, significa ampliar o secamento do solo sem que haja restrições mecânicas às plantas (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012).

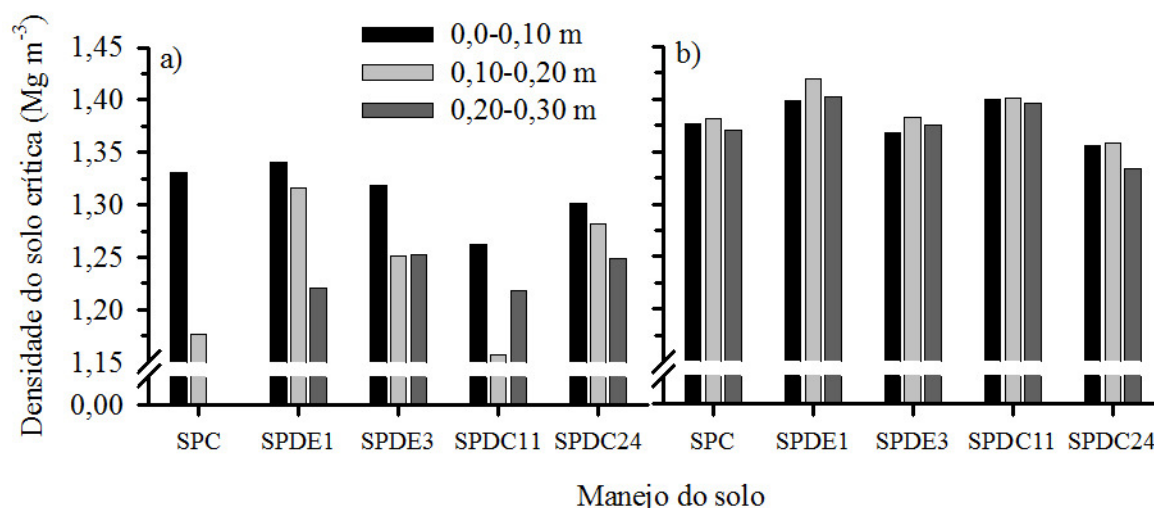


Figura 11 - Densidade do solo crítica em função do intervalo hídrico ótimo com limite inferior crítico de resistência a penetração de 2 MPa (a) e 3,5 MPa (b) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Na camada de 0,10-0,20 m a CRP resultou na redução do valor da Dsc para 1,16 Mg m⁻³ no tratamento SPDC11, valor este inferior ao observado no SPDE1 (1,32 Mg m⁻³) (Figura 11a). Esta variação indica que a utilização de valores de θ_{RP2MPa} não são adequados para determinação do IHO em SPD de longo prazo, pois reduz drasticamente os valores de Dsc. Em SPD, a bioporosidade resultante da reduzida movimentação mecânica do solo oferece caminhos alternativos para o crescimento das raízes (SILVA, A. P. et al., 2009; BENGOUGH et al., 2011), apesar de uma matriz do solo mais densa e com maior resistência mecânica (BETIOLI JUNIOR et al., 2012).

A ampliação do limite de θ_{RP2MPa} para $\theta_{RP3,5MPa}$ na camada de 0,10-0,20 m, influenciou em uma redução das diferenças de Dsc entre os manejo do solo (Figura 11b). A menor Ds, na camada de 0,10-0,20 m, entre os sistemas de manejo do solo, foi observada no SPDC24. O aumento do tempo de adoção do SPD influenciou na redução da Dsc, no SPDC24 foi de 1,35 Mg m⁻³, já no SPDC11 a Dsc foi de 1,40 Mg m⁻³. O aumento do tempo sem escarificação do solo também reduziu a Dsc, no SPDE3 (1,38 Mg m⁻³) em relação ao SPDE1 (1,42 Mg m⁻³).

Na camada de 0,20-0,30 m, não foi possível identificar o valor da Dsc no SPC (Figura 11a). Em toda a amplitude da Ds, no SPC, os valores de θ_{RP2MPa} foram superiores ao θ_{cc} , ou seja, o limite inferior foi maior do que o limite superior, caracterizando IHO nulo para toda a amplitude de Ds observada. Na camada de 0,20-0,30 m, observa-se pouca variação da Dsc, entre os sistemas de manejos. A menor Dsc foi observada no SPDC11 (1,22 Mg m⁻³) contrastando com a maior Dsc, nesta camada, determinada no SPDE3 (1,25 Mg m⁻³). Estes valores corroboram com os observados por Reichert et al. (2003) os quais indicam que para solos muito argiloso a Dsc varia de 1,25 a 1,30 Mg m⁻³.

Os efeitos da ampliação do θ_{RP2MPa} para $\theta_{RP3,5MPa}$, na camada de 0,20-0,30 m, demonstram que a Dsc foi dependente do manejo do solo (Figura 11b). A menor Dsc na camada de 0,20-0,30 m, em função dos sistemas de manejo do solo, foi observada no SPDC24 (1,33 Mg m⁻³), este valor de Dsc foi superior ao observado no SPDC11 (1,39 Mg m⁻³). Entre os tempos de escarificação do solo, foi constatado que houve redução da Dsc no SPDE3 (1,37 Mg m⁻³) em relação ao SPDE1 (1,40 Mg m⁻³). Isso indica que o aumento do tempo sem revolvimento do solo reduz a Dsc, influenciado principalmente pela CRP, isso demonstra que deve ser utilizado limites de RP diferentes em função do manejo do solo ou pelo tempo de adoção do SPD.

O percentual de amostras com Ds maior que a Dsc foi influenciada em função do limite de RP, e pelo manejo do solo (Figura 12). Na camada de 0,0-0,10 m, utilizando o θ_{RP2MPa} , somente o SPDE3, SPDC11 e SPDC24 apresentaram Ds maior do que a Dsc, com

10, 50 e 7,5%, respectivamente (Figura 12a). Isso indica que o aumento do tempo sob SPD reduziu a quantidade de amostras com D_s maior do que a D_{sc} . Porém, o aumento de tempo sem escarificação do solo, aumentou a quantidade de amostras com D_s maior que a D_{sc} . A ampliação do limite para θ_{RP2MPa} , indica que houve redução da quantidade do percentual de D_s maior que a D_{sc} em todos os sistemas de manejo do solo (Figura 12b). Na camada de 0,0-0,10 m, somente o SPDE3 (5%) e o SPDC11 (2,5%) apresentaram valores de D_s maior que a D_{sc} .

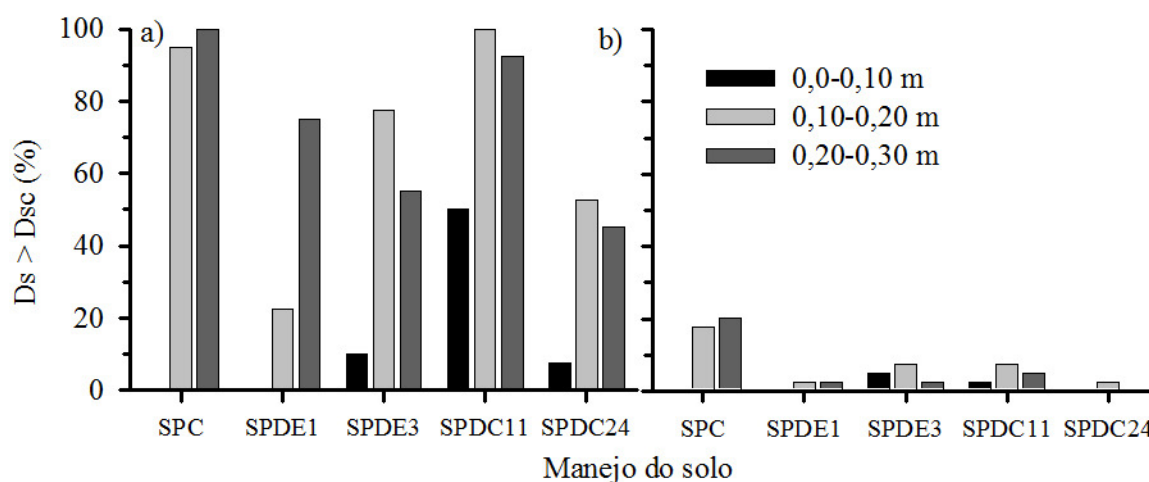


Figura 12 - Percentagem das amostras com densidade do solo (D_s) maior do que a densidade do solo crítica (D_{sc}), com RP de 2 MPa (a) e 3,5 MPa (b), nos diferentes sistemas de manejo em Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Na camada de 0,10-0,20 m, utilizando o limite de θ_{RP2MPa} , em todos os sistemas de manejo do solo houve restrições ao crescimento das plantas em função da presença de valores de D_s maior que a D_{sc} . O aumento do tempo sem escarificação do solo favoreceu o aumento de D_s maior que a D_{sc} de 22,5% (SPDE1) para 77,5% (SPDE3). Já o aumento no tempo sob SPD favoreceu a redução no percentual de amostras com D_s maior que a D_{sc} , sendo que no SPDC11 foi de 100%, e no SPDC24 este valor foi reduzido para 52,5%. No SPC, 95% das amostras apresentaram D_s maior que a D_{sc} . Estes altos percentuais de amostras com D_s maior que a D_{sc} , utilizando o limite de θ_{RP2MPa} , indica que nestas condições a restrição ao crescimento radicular das culturas poderia reduzir fortemente o potencial produtivo das culturas, porém isso não ocorreu, e a produtividade de soja e trigo, foi semelhante à média observada no Paraná para a safra de 2011/2012 (Figura 5d, 7b). A ampliação dos limites para o $\theta_{RP3,5MPa}$, indica que na camada de 0,10-0,20 m, o maior percentual de amostras com D_s

maior que a Dsc foi observado no SPC (17,5 %). Comparando os tempos de adoção do SPD, na camada de 0,10-0,20 m, quando o limite inferior foi $\theta_{RP3,5MPa}$, houve redução de 7,5% (SPDC11) para 2,5% (SPDC24) em função do aumento do tempo de implantação do SPD. Porém, houve aumento de 2,5% (SPDE1) para 7,5% (SPDE3) em função do aumento do período após a escarificação do solo. Portanto, o percentual de amostras com Ds maior que a Dsc no SPDE1 equivaleu ao observado no SPDC24. Indicando que não houve efeitos de redução do nível de compactação na camada de 0,10-0,20 m, em função da escarificação do solo.

Na camada de 0,20-0,30 m, utilizando o limite de θ_{RP2MPa} , 100% das amostras no SPC apresentaram valores de Ds maior que a Dsc (Figura 12a). Os sistemas com escarificação do solo indicaram que houve incremento no percentual de amostras com Ds maior que a Dsc no SPDE1 (75%) e no SPDE3 (55%) em relação ao SPDC24 (45%). Comparando os tempos de adoção do SPD, foi verificado que houve redução no percentual de amostras com Ds maior que a Dsc no SPDC24 (45%) em relação ao SPDC11 (92,5%), indicando melhoria das condições físicas do solo ao longo do tempo sob SPD.

A ampliação do limite de θ_{RP2MPa} para $\theta_{RP3,5MPa}$, na camada de 0,20-0,30 m, reduziu a percentagem de amostras com Ds maior que a Dsc (Figura 12b). O maior nível de compactação foi observado no SPC com 20% das amostras com Ds maior que a Dsc. Não houve diferenças entre os períodos após a escarificação do solo, o SPDE1 e SPDE3 apresentaram 2,5% de amostras com Ds maior que a Dsc. O aumento do tempo sob SPD favoreceu redução da compactação do solo na camada de 0,20-0,30 m, pois o SPDC11 teve 5% de amostras com Ds maior que a Dsc, já no SPDC24, nenhuma amostra apresentou valores acima da Dsc.

A fundamentação teórica do IHO estabelece que, quanto maior o IHO, mais favoráveis são as condições físicas que o solo oferece para o pleno desenvolvimento das plantas (SILVA, A. P. et al., 2009). Portanto, aumentos de produtividade são esperados em função de melhores condições para o desenvolvimento das culturas. Em todos os sistemas de manejo, foram observados aumentos lineares do IHO em função da redução dos valores de Ds a partir da Dsc (Figura 13). Na camada de 0,0-0,10 m, os maiores valores do IHO são observados no SPC em função das baixas Ds (Figura 13-I). Os sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma maior frequência de situações de stress por excesso ou falta de água (TORMENA et al., 1998). Estes autores afirmam ainda que estreitos valores do IHO indicam que as culturas podem ser submetidas a restrições por aeração deficiente ou excessiva impedância mecânica durante o seu crescimento.

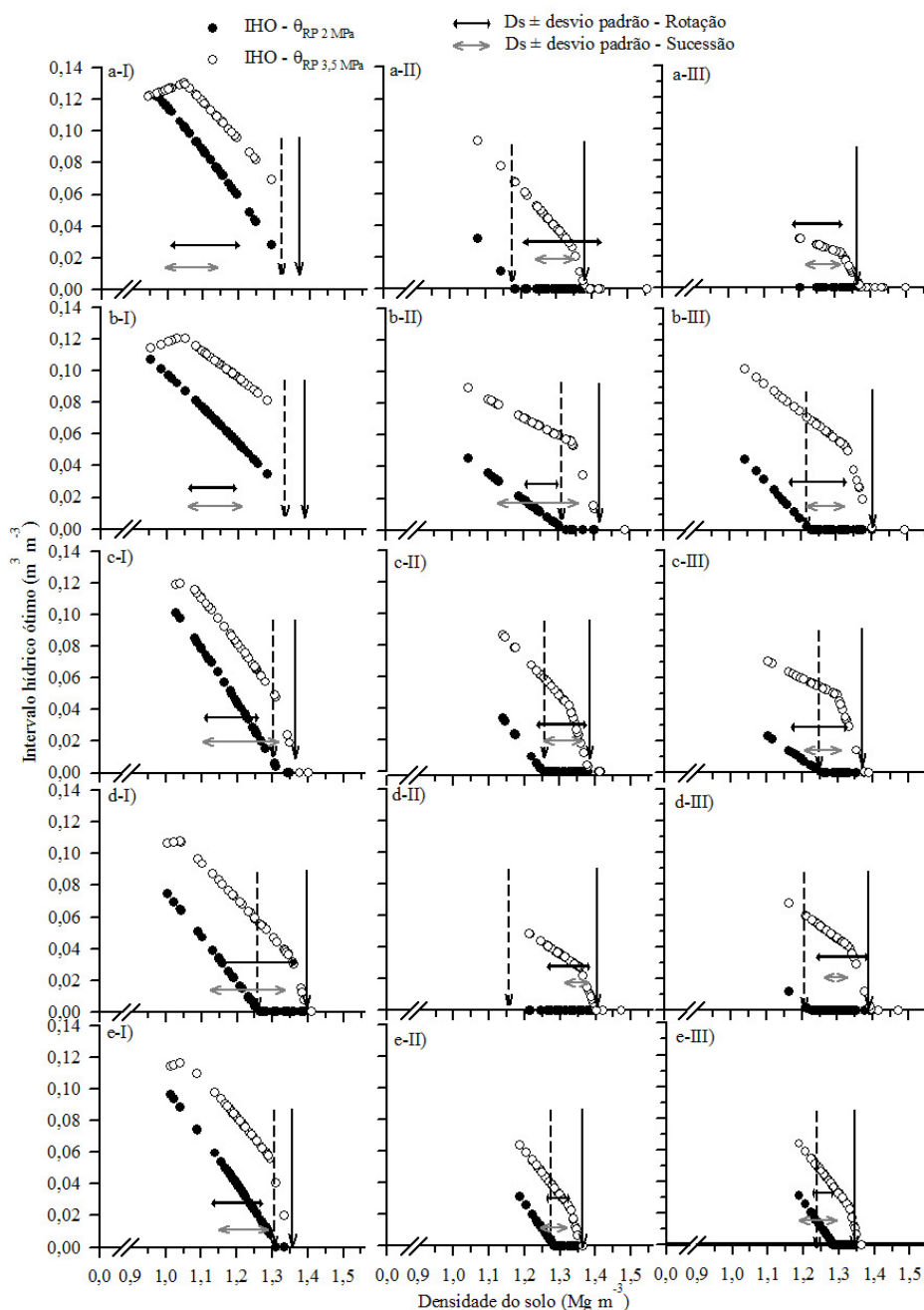


Figura 13 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo, na camada de 0,0-0,10 m, em função de sistemas de manejo do solo com uso de SPC (a); SPDE1 (b); SPDE3 (c); SPDC11 (d); SPDC24 (e), nas camadas de 0,0-0,10 m (I); 0,10-0,20 m (II) e 0,20-0,30 m (III), em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

*As setas verticais correspondem à densidade do solo crítica (D_{sc}) para uma RP de 2 MPa (seta pontilhada) e 3,5 MPa (seta contínua).

Na camada de 0,0-0,10 m, a relação entre IHO e D_s foi dependente do manejo do solo. No SPC e SPDE1, independente do limite de RP, não houve nenhuma amostra de solo com

IHO nulo. O aumento do tempo de escarificação do solo para 22 meses (SPDE3) indica que na camada de 0,0-0,10 m, houve amostras com D_s acima da D_{sc} , porém, a faixa de $D_s \pm$ desvio padrão permaneceu abaixo da D_{sc} . Analisando o SPDC24 em relação ao SPDC11, e observando os resultados de IHO na camada de 0,0-0,10 m, indica que houve melhorias nas condições físicas do solo em função do aumento do tempo de adoção do SPD, pois nesta camada independente do limite crítico de RP, a $D_s \pm$ desvio padrão permaneceram abaixo da D_{sc} .

Na camada de 0,10-0,20 m, utilizando o limite crítico θ_{RP2MPa} , foi possível observar que somente os valores de $D_s \pm$ desvio padrão do SPDE1 permaneceram abaixo da D_{sc} (Figura 13-II). Independente do tempo de adoção do SPD, na camada de 0,10-0,20 m, não houve melhorias nas condições físicas do solo quando o limite crítico foi θ_{RP2MPa} . O aumento do limite crítico para $\theta_{RP3,5MPa}$ indica que com exceção do SPC todos os demais sistemas de manejo do solo apresentaram $D_s \pm$ desvio padrão abaixo da D_{sc} . A amplitude do IHO e também da $D_s \pm$ desvio padrão, indica que houve maiores variabilidade horizontal de D_s do solo nos sistemas com escarificação do solo e no SPC. O SPD contínuo indica que houve redução da amplitude dos valores de $D_s \pm$ desvio padrão em relação aos sistemas com revolvimento do solo.

Na camada de 0,20-0,30 m, não foi possível observar que quando o limite inferior do IHO foi θ_{RP2MPa} , em todos os sistemas de manejo do solo grande parte da faixa de $D_s \pm$ desvio padrão ficou acima da D_{sc} . Quando o limite de RP foi 2 MPa, a utilização da escarificação do solo não favoreceu ampliação dos valores de $D_s \pm$ desvio padrão dentro do IHO. O aumento do tempo de adoção do SPD indica que, na camada de 0,20-0,30 m, o SPDC24 possibilitou aumento da quantidade de amostras de solo com D_s inferior a D_{sc} do IHO com θ_{RP2MPa} . A ampliação do limite crítico para $\theta_{RP3,5MPa}$, indica que em todos os sistemas de manejo do solo a $D_s \pm$ desvio padrão apresentou valores acima da D_{sc} , possibilitando quantificar valores de IHO.

A principal justificativa da utilização do IHO é de que há relação positiva entre o IHO e respostas das culturas, tornando assim um indicador de qualidade física do solo robusto (SHARMA; BHUSHAN, 2001; BENJAMIN et al., 2003; BEUTLER et al., 2005; TORMENA et al., 2007; CALONEGO; ROSOLEM, 2011; BLAINSKI et al., 2012; LIMA, C. L. R. et al., 2012; LIMA, V. M. P. et al., 2012; BETIOLI JUNIOR et al., 2012). Quanto maior o IHO, mais favoráveis é as condições físicas que o solo oferece para o pleno desenvolvimento das plantas (SILVA, A. P. et al., 2009).

Práticas de manejo do solo para maximizar o IHO têm sido indicadas para aumentos de produtividade das culturas (BENJAMIN et al., 2003; KLEIN; CAMARA, 2007; KLEIN et al., 2009). Porém, Gubiani (2012) não obteve relações entre a produtividade de grãos de milho com o IHO quando utilizou como limite inferior de θ_{RP2MPa} no IHO. Este autor apresentou uma tentativa de melhoria da associação entre produtividade de grãos de milho e IHO, através do aumento da RP do limite inferior do IHO. Porém, esta alteração consistiu numa evidência equivocada para justificar o aumento da RP de 2 para 4 MPa, pois a relação entre produtividade de grãos de milho e IHO com RP de 4 MPa não foi clara estatisticamente. Outros autores já demonstraram que não houve relação entre o IHO e a produtividade de outras culturas, tais como trigo (BENJAMIN et al., 2003) e soja (KLEIN; CÂMARA, 2007). Olibone et al. (2010), avaliando sistema de rotação de culturas (soja/aveia preta e milho/milho) por 5 anos sob SPD em um Alfisol, em São Paulo, não conseguiram estabelecer relações entre o IHO e a produtividade de grão de soja, nem com a produção de massa seca de plantas de cobertura do solo. Estes autores destacaram que o IHO foi inadequado para antecipar efeitos sobre a produtividade agrícola em condições de déficit hídrico.

A relação entre o IHO com a produtividade de grão de soja e trigo é observada na figura 14. Esta relação foi demonstrada utilizando o somatório das lâminas de água nas três camadas utilizando os limites críticos do IHO de θ_{RP2MPa} (Figura 14a,c) e $\theta_{RP3,5MPa}$ (Figura 14b,d). Utilizando o limite de θ_{RP2MPa} , foi constatado uma relação quadrática entre a produtividade de grãos de soja e de trigo com a lâmina de água acumulada no perfil até 0,30 m de profundidade. A ampliação do limite para $\theta_{RP3,5MPa}$, demonstra que não houve qualquer relação entre a produtividade de grãos de soja e trigo com a lâmina de água acumulada neste perfil até 0,30 m de profundidade. Isto demonstra as dificuldades de relação entre o desempenho produtivo das culturas e o IHO. Porém, em nenhuma das relações houve uma correlação linear positiva da produtividade de grãos e o IHO, pressuposto básico para classificar o IHO como um indicador adequado da qualidade física do solo. Utilizando θ_{RP2MPa} ainda foi possível observar que quando a lâmina de água acumulada foi maior do que 5 mm na camada de solo de 0,0-0,30 m, houve reduções de produtividade de soja e de trigo para níveis mais críticos do que observados quando houve ausência da lâmina de água (IHO = 0). Utilizando o critério de θ_{RP2MPa} , foi possível observar uma produtividade de grãos de soja de 2019 kg ha⁻¹ e de trigo de 2310 kg ha⁻¹, indicando que este limite inferior do θ_{RP2MPa} no IHO foi inadequado.

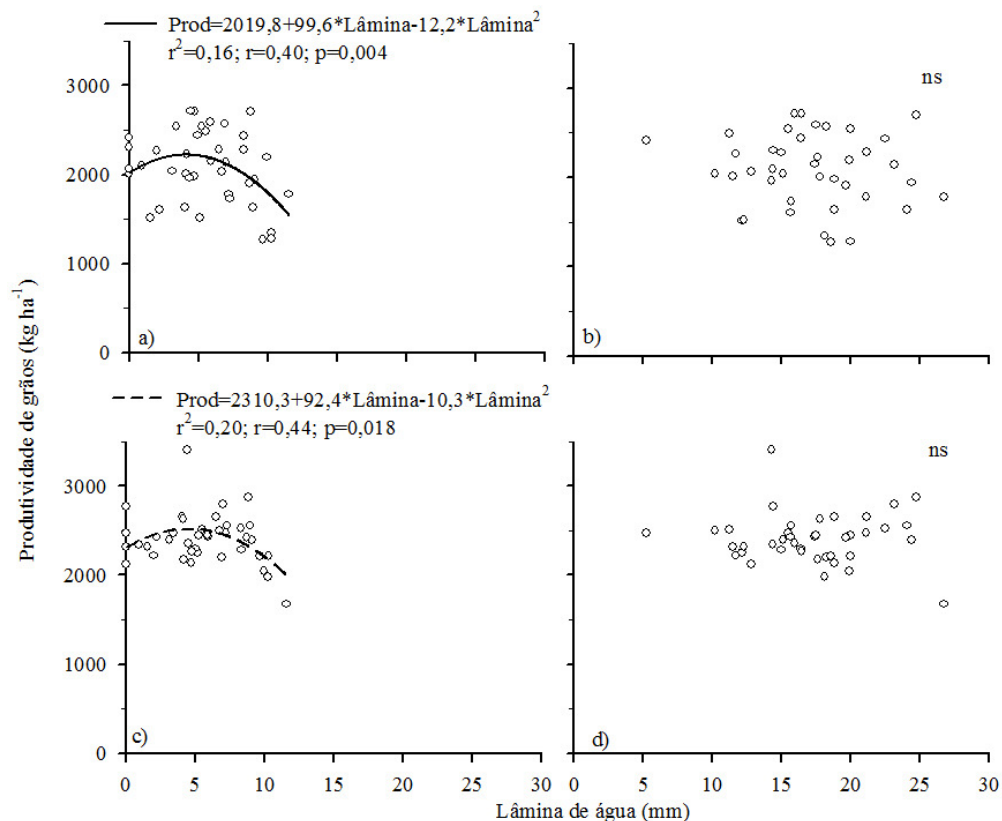


Figura 14 - Relação entre a produtividade de grãos de soja (a,b) e trigo (c,d) com a lâmina de água acumulada na camada de 0,0-0,30 m, determinada pelo intervalo hídrico ótimo, utilizando uma resistência à penetração de 2 MPa (a,c) ou 3,5 MPa (b,d) em um Latossolo Vermelho Distroférrico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, pelo teste F ($p<0,05$).

As duas relações (Figura 14a,c) foram altamente significativas, e demonstram que baixos e altos valores do IHO, representados pela lâmina de água no solo, reduzem a produtividade de grãos de soja e trigo neste Latossolo Vermelho Distroférrico. Esta relação quadrática entre a produtividade de grãos e o IHO demonstra que houve uma faixa de valores de IHO que são adequados a produtividade de grãos destas culturas. Estes resultados contrariam estudos que afirmam que houve uma relação linear do IHO com a produtividade das culturas (BENJAMIN et al., 2003; VERMA; SHARMA, 2008; CAVALIERI et al., 2012). Asgarzadeh et al. (2010) afirmam que os valores críticos do IHO para a máxima produtividade das culturas ainda não foram definidos.

Portanto, através destes resultados, podem ser destacadas duas hipóteses. A primeira é de que a intersecção que determina a Dsc é adequada como sinalizador de restrições físicas do

solo, a partir da qual é reduzida a produtividade de soja e trigo, porém, é necessário ajustar o valor crítico de RP. A segunda hipótese é de que haveria a necessidade de determinar limites críticos em função de um elevado valor do IHO, principalmente em função da redução da D_s , com aumento da macroporosidade e redução da condutividade hidráulica não saturada do solo e da retenção de água. Quando o solo torna-se não saturado, há substituição da água dos poros pelo ar, diminuindo a área da secção transversal do solo utilizada para o fluxo de água (HILLEL, 1970) e transporte de solutos em meios porosos (GHANBARIAN-ALAVIJEH; HUNT, 2012). À medida que a sucção se desenvolve, os poros maiores são os que primeiro se esvaziam, exatamente estes são os de maior condutibilidade, deixando a água apenas nos poros menores, que são os que apresentam maior resistência hidráulica e maior tortuosidade (HILLEL, 1970).

Os primeiros estudos com o IHO foram justificados em função de se obter alta correlação positiva entre a taxa de crescimento radicular de milho e o IHO (SILVA; KAY, 1996). Estes autores afirmaram que, na época, havia a necessidade de mais estudos para determinar se a produtividade da cultura pode ser relacionada ao IHO em diferentes solos e condições climáticas. Passadas quase duas décadas desde a sua definição (SILVA et al., 1994), resultados de pesquisas que possibilitem avaliar a relação entre produtividade de grãos e IHO são escassos na literatura, e as curvas de produtividade de grãos carecem de mais dados com comprovação estatística (GUBIANI, 2012). Alguns trabalhos, com análise de regressão, são encontrados nos Estados Unidos (BENJAMIN et al., 2003), no Brasil (CAVALIERI et al., 2012; GUBIANI, 2012) e na Índia (SHARMA; BHUSHAN, 2001; VERMA; SHARMA, 2008). Porém, nestes dois estudos realizados na Índia (SHARMA; BHUSHAN, 2001; VERMA; SHARMA, 2008) foram utilizando o conceito anterior do IHO, idealizado por Letey (1985), descrito como “Non limiting water range” (NLWR). Neste o IHO foi definido como sendo a diferença entre o θ para uma porosidade de aeração de 10 % e o θ para uma RP crítica de 2 MPa. Incrementos lineares da produtividade de grãos em função do IHO foram observados por Verma e Sharma (2008) avaliando a cultura do trigo em um Typic Hapludalf, em solos drenados que também são utilizados para o cultivo de arroz. No entanto, estes autores afirmam que experimentos adicionais são necessários para estabelecer os valores críticos do IHO em relação à produtividade das culturas. Muitas vezes os autores que avaliaram a qualidade física do solo através do IHO, apresentam relações da produtividade de grãos com a D_s e/ou RP, mas não demonstram relações com o IHO (SILVA, A. P. et al., 2004; BEUTLER et al., 2004, 2005, 2007; FREDDI et al., 2007).

Outras relações com o IHO podem ser observadas em Yoo et al. (2006), os quais relacionaram o IHO com a taxa de mineralização de carbono, através da respiração microbiana, e encontraram relações lineares positivas. Medeiros et al. (2011) observaram relações lineares positivas entre o IHO e emissões de C-CO₂. Yoo et al. (2006) afirmam que a atividade microbiana foi influenciada negativamente por reduções no volume dos macroporos pequenos (15-150 µm), explicando assim a relação linear positiva entre o IHO e a respiração microbiana, pois quanto maior o IHO menor será a Ds e maior a quantidade de poros deste diâmetro. Portanto, os esforços para desenvolver limites para o controle físico sobre a mineralização de carbono do solo poderiam se concentrar sobre a faixa do macroporos pequenos (15-150 µm) em vez de utilizar a Ds ou a porosidade total (YOU et al., 2006). Portanto, outros índices tradicionais, por exemplo, a macroporosidade do solo, teriam as mesmas relações obtidas pelo IHO, reduzindo assim as dificuldades de obtenção deste parâmetro físico. Neste sentido, Gubiani (2012) afirma que o IHO não teve desempenho melhor que o uso da RP individualmente.

A utilização do IHO foi relacionado com métodos semi quantitativos de avaliação visual da estrutura do solo (VESS) (GUIMARÃES et al., 2013). Estes autores observaram relações lineares negativas entre o IHO e o VESS. Quando o VESS apresentou escore 3 (mudança de manejo, conforme o VESS), o IHO foi nulo, indicando condições de restrições físicas para as plantas (GUIMARÃES et al., 2013). Giarola et al. (2013) relacionaram o VESS com produtividade de grãos de soja, e observaram relações lineares negativas ($p=0,11$), indicando o uso eficiente desta metodologia semi quantitativa para avaliação da qualidade física de Latossolos sob SPD no Brasil.

O IHO tem levado a muitas discussões sobre sua eficiência como indicador de qualidade física do solo (GUBIANI, 2012), pois na maioria dos casos não tem se relacionado com o crescimento radicular (KAISER et al., 2009) nem com a produtividade de grãos das culturas (KLEIN; CAMARA, 2007). Com isso, mudanças nos seus limites inferiores (TORMENA et al., 2007; BETIOLI JUNIOR et al., 2012) e superiores (COLLARES et al., 2006; MOHAMMADI et al., 2010) têm sido sugeridas. As principais sugestões são direcionadas ao conteúdo de água limitante pela RP, onde tem se estudado valores desde 0,85 MPa (BEUTLER et al., 2005) até 4,6 MPa (TORMENA et al., 2007). Porém, mais recentemente, houve necessidade de valores específicos de IHO para cada situação agrônômica (combinação de solos, clima e cultivo) (PILATTI et al., 2012). Estes mesmos autores propõem novos valores para os limites inferior e superior do IHO, para utilização nos solos do norte da Região Pampeana da Argentina. O limite superior seria o menor valor entre

o θ_{cc} , e ou, considerando um θ_{ar} entre 15% a 25 %. Já para o limite inferior definido pelo θ_{PMP} seria substituído pelo θ facilmente utilizável (potencial de -0,17 MPa), e o θ onde a RP é limitante seria variável com o teor de argila (<15 % = 6 MPa; entre 15 e 25 % = 4 MPa; entre 25 e 40 % = 3 MPa; e > 40 % = 2,5 MPa). Porém, isso somente reforça mais uma vez que ainda há controvérsia em função da utilização do IHO como indicador da qualidade física do solo, onde artifícios matemáticos tem mais influência do que a qualidade do solo.

A existência de relação significativa entre o IHO e os parâmetros de vegetação da soja dependeu do limite inferior utilizado (Figura 15). Quando o limite inferior do IHO foi o θ_{RP2MPa} (Figura 15a,c), houve relação quadrática entre a lâmina de água acumulada no perfil do solo até 0,30 m (determinada pelo IHO), com o teor de clorofila, ou com o NDVI (“normalized difference vegetation index”) da soja. A ampliação do limite inferior de θ_{RP2MPa} para $\theta_{RP3,5MPa}$, resultou em ausência de relação entre a lâmina de água acumulada no perfil até 0,30 m, com o teor de clorofila (Figura 15b) e com o NDVI (Figura 15d). Grohs et al. (2009) utilizaram o NDVI para identificação do potencial produtivo de cereais, descrevendo como um índice prático para avaliação no campo. A utilização do comportamento espectral de culturas está sendo difundida em função de haver relações com a quantidade de nitrogênio nas folhas (POHV et al., 2008), apresentando assim relação com a produtividade de grãos (FERRI et al., 2004; GROHS et al., 2009). As relações quadráticas entre o IHO e estes parâmetros de vegetação indicam que o aumento dos valores de IHO podem não refletir positivamente sobre o desenvolvimento das culturas. A utilização do IHO como indicador de qualidade física do solo, na teoria, estabelece uma relação linear positiva com os atributos morfo-fisiológicos das plantas, porém, estas relações não se confirmaram neste estudo.

A lâmina de água armazenada até 0,30 m determinada pelo IHO foi relacionada com a altura da cultura da soja (Figura 16) utilizando o valor de θ_{RP2MPa} (Figura 16a) e $\theta_{RP3,5MPa}$ (Figura 16b). Foi constatado que houve relação entre a altura de planta e a lâmina de água armazenada até 0,30 m do perfil solo quando o limite inferior do IHO foi θ_{RP2MPa} . Quando foi ampliado o limite inferior do IHO para $\theta_{RP3,5MPa}$, nenhuma relação foi detectada entre este indicador e a altura de plantas de soja. Gubiani (2012) observaram variações na correlação entre o IHO (utilizando RP de 2 MPa), na camada de 0,07 m, com a altura relativa de plantas de milho, onde os valores de correlação variaram de zero a 0,64 em oito cultivos de milho sob um Latossolo Vermelho com diferentes níveis de compactação. Este autor, quando ampliou o nível crítico de RP para 4 MPa, observou alta dispersão e baixo coeficiente de determinação na relação linear positiva ($r^2=0,12$) do IHO e a altura relativa de plantas de milho.

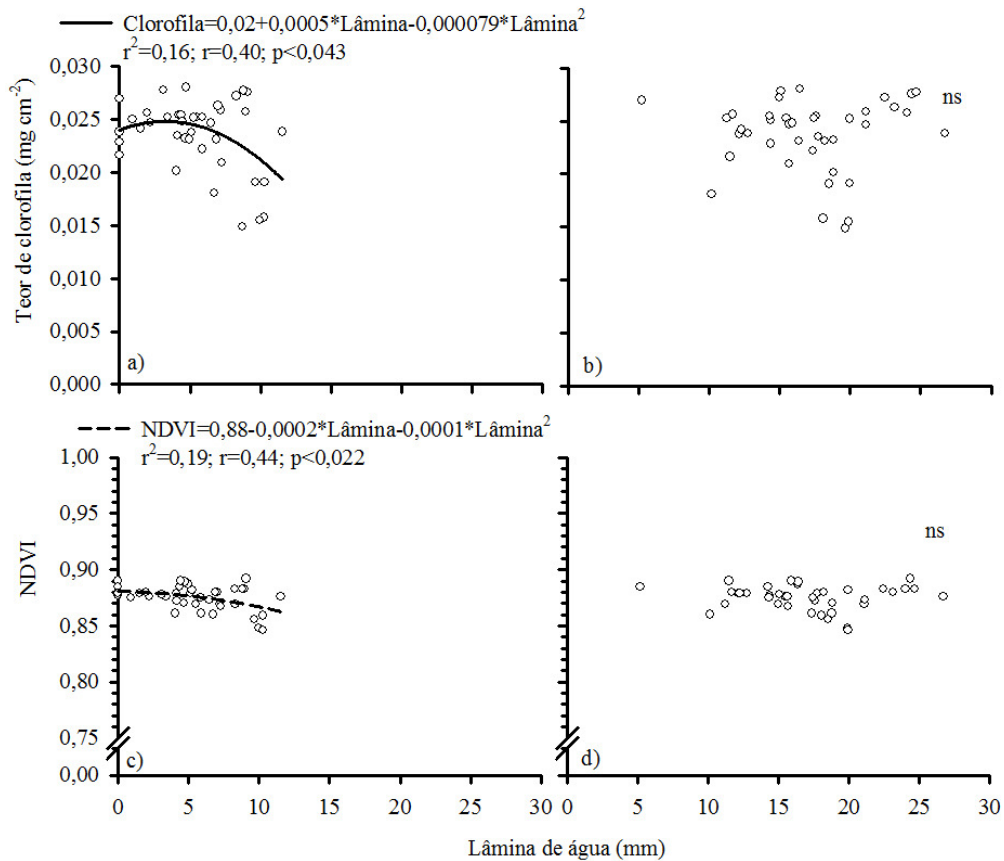


Figura 15 - Relação do intervalo hídrico ótimo utilizando resistência à penetração de 2 MPa (a,c) ou 3,5 MPa (b,d) com o teor de clorofila (a,b) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (c,d) da cultura da soja no estágio reprodutivo R5.3, em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

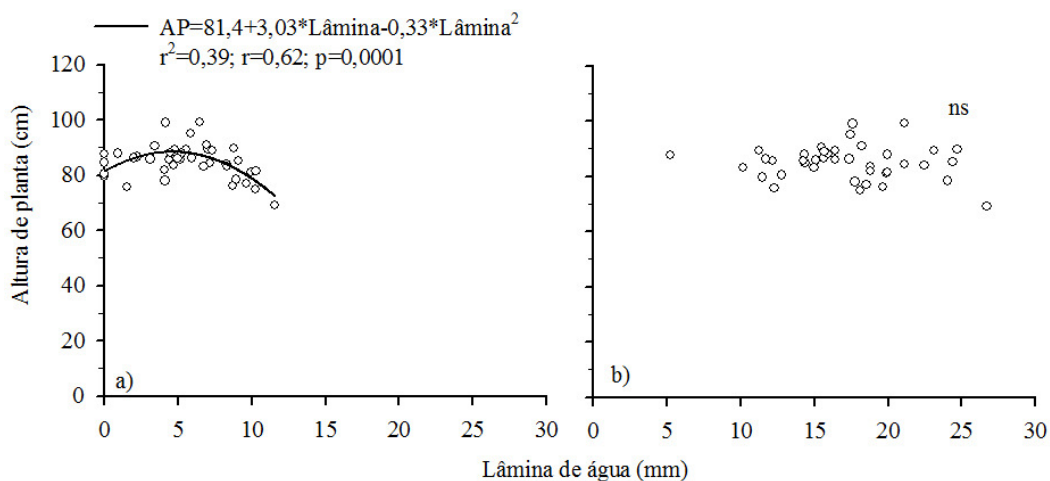


Figura 16 - Relação entre a altura de planta de soja e a lâmina de água acumulada de 0,0-0,30 m, determinada pelo intervalo hídrico ótimo, utilizando uma resistência à penetração de 2 MPa (a) ou 3,5 MPa (b) de um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

^{ns} Não significativo, em cada camada, pelo teste F ($p < 0,05$).

Relações lineares da produtividade de grãos de soja foram observadas em relação ao teor de clorofila (Figura 17a) e ao NDVI (Figura 17b). Assim, a produtividade de grãos da soja aumentou com o incremento dos valores de clorofila e NDVI. Araujo et al. (2005) avaliaram o potencial de estimativa da produtividade de grãos através de leituras de NDVI. Estes autores observaram uma relação linear significativa entre o NDVI e a produtividade de grãos de soja, com coeficiente de determinação (0,539) semelhante ao deste estudo. Grohs et al. (2009) demonstraram classes de NDVI para estimar o potencial produtivo de cereais. Assim, são válidas relações deste índice com respostas das culturas, e ou com outros parâmetros que tentam relacionar-se com a produtividade de grãos, tal como observado nas relações do NDVI com o IHO.

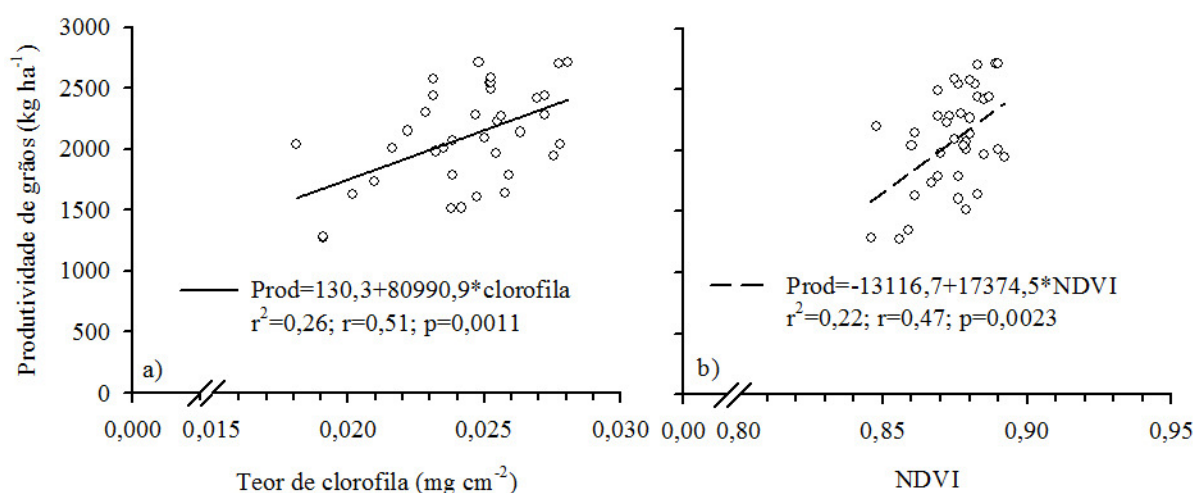


Figura 17 - Relação entre produtividade de grãos de soja com o teor de clorofila (a) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (b) no estágio reprodutivo R5.3. Londrina, PR, 2013.

A produtividade de grãos das culturas foi relacionada com a Ds (Figura 18). Observa-se que para a soja (Figura 18a) e trigo (Figura 18b), as respostas da produtividade de grãos foram quadráticas. Conforme esperado, em baixo e alto nível de compactação do solo, houve reduções na produtividade de grãos, corroborando com Beutler et al. (2008). Estes autores observaram que, em solo solto (baixa Ds), não foi obtida uma produtividade máxima, possivelmente em função do menor contato raiz/solo, o que reduz a absorção de água e nutrientes. Além disso, juntamente com a redução da Ds, houve uma redução da

condutividade hidráulica não saturada (RICHARD et al., 2001), e consequentemente do fluxo de água no perfil do solo (SORACCO et al., 2012). Santos et al. (2006) observaram reduções na produtividade de grãos de soja cultivada sob preparo convencional com arado de discos ou com arado de aivecas em relação ao SPD. Klein et al. (2007) observaram que a escarificação do solo foi eficiente para redução da Ds, em um Latossolo Vermelho sob SPD, porém, não houve incrementos na produtividade de grãos. A Ds apresentou correlação com a produtividade de grãos de soja (25 %) e trigo (20 %), demonstrando que o estudo do nível de compactação do solo se relaciona com as variáveis produtivas das culturas.

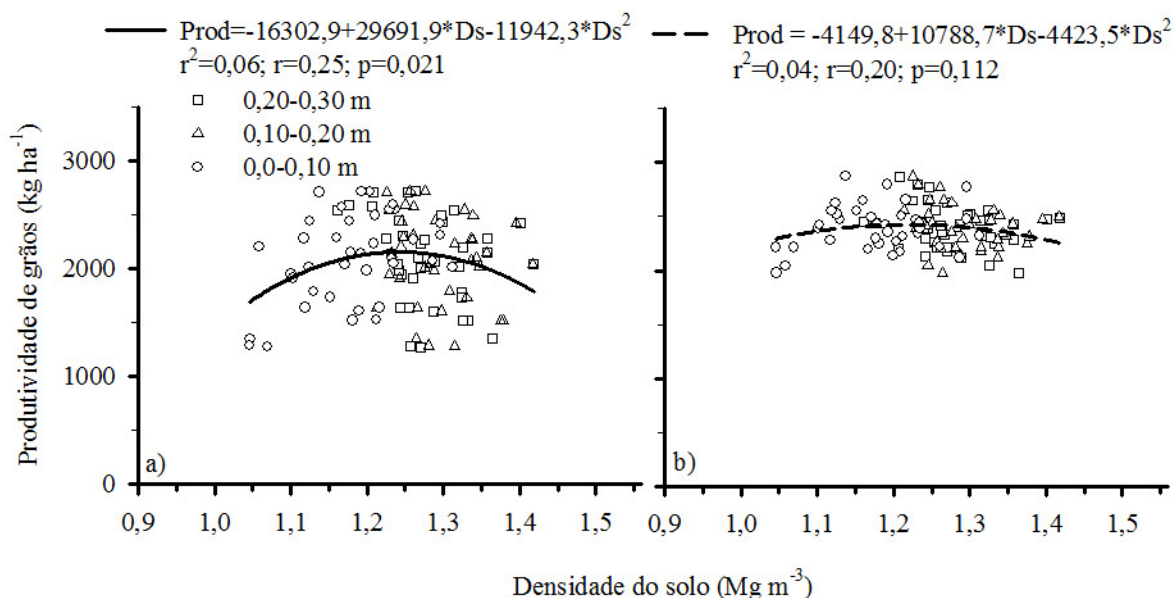


Figura 18 - Relação entre a produtividade de grãos de soja (a) e trigo (b) com a densidade do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Diante destes resultados, refuta-se a hipótese de que o IHO é um indicador adequado da qualidade física deste Latossolo Vermelho Distroférico, para relacionar-se com o desempenho produtivo da soja e do trigo. Estes resultados concordam com Gubiani (2012), onde avaliou o desempenho produtivo de milho sob um Latossolo Vermelho Distroférico, o qual afirma que o IHO não se confirmou como um indicador adequado de qualidade física do solo para produção de milho.

8.6. Conclusões

A qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob sistema plantio direto contínuo ao longo do tempo é preservada, e independente do modelo de produção baseado em sucessão de cultura [trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja (*Glicine max* L.)] ou rotação de culturas [tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja], e não necessitam de intervenções mecânicas para a redução do nível de compactação do solo.

A escarificação anual do solo ou a cada três anos em sistema plantio direto, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, é uma prática desnecessária e não melhora a qualidade física do solo, nem aumenta a produtividade de grãos de soja e de trigo em relação ao sistema plantio direto contínuo com 11 ou 24 anos.

O aumento do tempo de adoção do sistema plantio direto de 11 para 24 anos, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, melhora a qualidade física do solo, e incrementa a produtividade de grãos de soja em relação ao sistema de preparo convencional com grade pesada.

O intervalo hídrico ótimo não é um indicador adequado da qualidade física em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, independente do sistema de manejo do solo (sistema de preparo convencional, sistema plantio direto escarificado a cada ano ou a cada três anos, sistema plantio direto contínuo com 11 e ou 24 anos), do modelo de produção (rotação ou sucessão de culturas) e dos limites críticos de resistência do solo à penetração de 2 e 3,5 MPa.

O intervalo hídrico ótimo, independente do limite crítico de resistência do solo à penetração, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não tem relação direta com a produtividade de grãos de soja e de trigo.

8.7. Referências

- ARAÚJO, J. C.; VETTORAZZI, C. A.; MOLIN, J. P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 3, p. 437-447, 2005.
- ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A. R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, n. 1, p. 229-244, 2010.
- BABUJIA, L.C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian Oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, n. 12, p. 2174-2181, 2010.
- BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; McKENNA, S.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.
- BENGOUGH, A. G.; McCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.
- BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1-2, p. 137-148, 2003.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F.; B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 181-192, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; SÃO JOÃO, A. C. G.; 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**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, 2007.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a Haplustox from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 48, n. 6, p. 863-871, 2005.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, 2008.

BLAINSKI, É. **Indicadores de qualidade física em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 2010. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

BLAINSKI, É.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho Distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 273-281, 2009.

BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, 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**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.

BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 79-87, 2012.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.7, p.222-227, 2011.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 399p, 2009.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J. & FREDERICK, J. R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 49-57, 2002.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 759-771, 2011.

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

CARVALHO, E. R.; REZENDE, P. M.; OGOSHI, F. G. A.; BOTREL, E. P.; ALCANTRA, E. P.; SANTOS, J. P. Desempenho de cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] em cultivo de verão no sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 892-899, 2010.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3 p. 527-538, 1998.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S. Intervalo hídrico ótimo versus produção de mandioca sob diferentes sistemas de preparo num Latossolo Vermelho Distrófico. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2012, 19. Lages-RS. **Anais...** Lages: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 1 CD-ROM.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; 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**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira: Grãos 2011/2012, Oitavo levantamento**. Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012. http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_05_10_08_49_52_boletim_maior_2012.pdf. Acesso em: 07 jan. 2013.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; CAO, E. G.; HOLZSCHUH, M. J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1234-1247, 2009.

CUNHA, G. R. Balanço hídrico climático. In: BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universitária/UFRGS, 1992, 125p.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universitária/UFRGS, 1992, 125p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, 2012.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

FERRI, C. P.; FORMAGGIO, A. R.; SCHAVINATO, M. A. Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 16, n. 3, p. 131-136, 2004.

FRANCHINI, J. C.; BORKERT, C. M.; FERRERA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 459-467, 2000.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARANTANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, 2007.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; HUNT, A. G. Unsaturated hydraulic conductivity in porous media: Percolation theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 187-188, p.77-84, 2012.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. On the visual evaluation of soil structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 60-64, 2013.

GRAY, S. B.; DERMODY, O.; DELUCIA, E. H. Spectral reflectance from a soybean canopy exposed to elevated CO₂ and O₃. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 15, p. 1-10, 2010.

GROHS, D. S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M.; POLETO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 101-112, 2009.

GUARIENTI, E. M.; SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B. Efeito de sistemas de rotação de culturas sobre características de qualidade tecnológica de trigo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 11, n. 1-2, p. 31-37, 2005.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 92-99, 2012.

HERNANDEZ, R. J. M.; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 79-85, 1998.

HILLEL, D. **Solo e água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970, 231p.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 42, n. 3, p. 288-296, 2009.

IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná. **Desvios de precipitação**, Londrina, 2013. <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=984>> . Acesso em: 07 de jan. 2013.

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**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 845-855, 2009.

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

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**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, 2006.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, 2009.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNO, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, 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**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 4, p. 1210-1215, 2005.

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

LIBARDI, V. C. M.; COSTA, M. B. Consumo d'água da cultura do trigo (*Triticum aestivum*, L.) **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 4, n. 1, p. 16-23. 1997

LIMA, C. L. R.; MIOLA, E. C. C.; TIMM, L. C.; PAULETTO, E. A.; SILVA, A. P. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 190-195, 2012.

LIMA, H. C.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5 p. 667-684, 2005.

LIMA, S. S. de; AQUINO, A. M. de; LEITE, L. F. C. Relação entre macrofauna edáfica e atributos químicos do solo em diferentes agroecossistemas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p.322-331, 2010.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 71-78, 2012.

MEDEIROS, J. C.; SILVA, A. P.; CERRI, C. E. P.; GIAROLA, N. F. B.; FIGUEIREDO, G. C.; FRACETTO, F. J. C. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 338, n. 1 p. 5-15, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Aritmética de Bandas. In: MENESES, P. R. (org.); ALMEIDA, T. (org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. 1. ed. v.1. Brasília: CNPq, 2012. p. 138-152.

MOHAMMADI, M. H; ASADZADEH, F.; VANCLOOSTER, M. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 334, n. 1-2, p. 221-234, 2010.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, Perth, v. 26, n. 4, p. 485-493, 2010.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. D.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 40p. (IAPAR. Circular, 76)

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1515-1526, 2010.

PILATTI, M. A.; ORELLANA, J.; IMHOFF, S. D. C.; SILVA, A. P. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. **Ciencia Del Suelo**, Argentina, v. 30, n. 1, p. 9-21, 2012.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 675-684, 1998.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R. SALVI J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075-1083, 2008.

REICHERT, J. M., REINERT, J. D., BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 29-48, 2003.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N. FAQUIN, V.; KIMPORA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 453-466, 2006.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, n. 1, p. 49-58, 2001.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.8).

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J.; DELLA FLORA, L. P.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T. Infiltração de água no solo, determinada por diferentes métodos, como indicador do potencial produtivo em dois Latossolos manejados com agricultura de precisão. **Interciência**, Caracas, v. 37, n. 3, p. 2004-2008, 2012.

SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B.; SPERA, S. T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 21-29, 2006.

SAS LEARNING EDITION. Getting started with the SAS Learning Edition. Cary, 2002. 200p.

SHARMA, P. K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v. 60, n. 3-4, p. 143-152, 2001.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; KAY, K. Plant response to mechanical resistance and airfilled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 451-456, 2004.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, n. 2, p. 323-329, 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Org.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2010, p. 241-281.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008.

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. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. M. B. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 6, p. 1-30, 2009.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 547-555, 2012.

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

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; BALBUENA, R.; RESSIA, J. M.; FILGUEIRA, R. R. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1149-1155, 2012.

SPERA, S. T.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; DENARDIN, J. E.; KLEIN, V. A.; SANTOS, H. P. Atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Revista Agrária**, Dourados, v. 4, n. 14, p. 324-334, 2011.

STEINER, F.; PIVETTA, L. A.; CASTOLDI, G.; COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M. Carbono orgânico e carbono residual do solo em sistema de plantio direto, submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 3, p. 401-408, 2011.

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

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

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA. **Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2011. 255 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 15).

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, New Jersey: Drexel Institute of technology, vol. VIII, n. 1, 1955, 104p.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, 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**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

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

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

VERMA, S.; SHARMA, P. K. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, p. 1-10, 2008.

YOO, G.; NISSEN, T. M.; WANDER, M. M. Use of physical properties to predict the effects of tillage practices on organic matter dynamics in three Illinois soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1576-1583, 2006.

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVES, B.J.R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.132, p. 185-195, 2012.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos dos sistemas de manejo do solo e modelos de produção, para todas as variáveis físicas do solo (distribuição do tamanho de partículas, densidade de partículas, densidade do solo, porosidade total calculada e por saturação, macroporosidade calculada e por saturação, microporosidade, poros bloqueados, infiltração tridimensional de água no solo, condutividade hidráulica do solo saturado no campo, resistência do solo à penetração e conteúdo volumétrico de água no solo e determinada nos potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100 e -500 kPa, potencial de água no solo em que a resistência do solo a penetração atinge 2 e 3,5 MPa, resistência do solo a penetração na fração de água disponível as plantas de 0,7, intervalo hídrico ótimo), químicas do solo (pH, acidez potencial, alumínio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio, carbono, soma de bases, capacidade de troca de cátions em pH 7,0, saturação de bases), relacionadas com as culturas de soja (altura de planta, altura de inserção do primeiro legume, massa de mil grãos, produtividade de grãos, teor de clorofila, NDVI) e de trigo (produtividade de grãos, peso do hectolitro), não apresentaram interações significativas.

A utilização de modelos de produção baseados em sucessão de cultura [trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja (*Glicine max* L.)] ou com rotação de culturas [tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja], não alteraram, na camada de 0,0-0,30 m, as propriedades físicas (distribuição do tamanho de partículas, densidade de partículas, porosidade total por saturação, macroporosidade por saturação, microporosidade, infiltração tridimensional de água no solo, condutividade hidráulica do solo saturado no campo, resistência do solo à penetração determinada nos potenciais matriciais de -10, -100 e -500 kPa, conteúdo volumétrico de água no solo nos potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100, -500 kPa, potencial de água no solo em que a resistência do solo a penetração atinge 2 e 3,5 MPa, resistência do solo a penetração na fração de água disponível as plantas de 0,7, intervalo hídrico ótimo) e na camada de 0,0-0,20 m (densidade do solo, porosidade total calculada, macroporosidade calculada, poros bloqueados, resistência do solo à penetração determinada nos potenciais matriciais de -6 e -33 kPa) de um Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso em diferentes sistemas de manejo do solo implantados à 24 anos.

A ausência de diferenças químicas e físicas do solo (densidade do solo, porosidade total, infiltração tridimensional de água no solo, resistência do solo à penetração) em função

de diferentes modelos produção, baseados em rotação (tremoço ou nabo forrageiro/milho-aveia/soja-trigo/soja-trigo/soja) e sucessão (trigo/soja) de culturas, pode ter ocorrido devido ao próprio modelo de produção, que a partir do segundo ano no ciclo de cultivo, são semelhantes entre si. Isto reduz a expressão das modificações físicas no perfil do solo, proporcionadas pelos diferentes sistemas radiculares das culturas utilizadas na rotação e sucessão de culturas.

A prática de escarificação periódica do solo, em sistema plantio direto (SPD), demonstrou ser um manejo dispensável, pois independente do modelo de produção, não melhorou as condições físicas, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, a partir de 10 meses da sua realização, além de não apresentar incrementos de produtividade de grãos em relação ao SPD contínuo por 11 (SPDC11) ou 24 anos (SPDC24).

Os efeitos residuais da escarificação de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, mesmo em rotação de culturas, não foram ampliados, mais do que 10 meses, em relação aos sistemas contínuos sob SPD.

O limite crítico de resistência do solo à penetração (RP) de 2 MPa, demonstraram ser inadequados para avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob SPD com ou sem escarificação do solo. Este limite de RP deve ser ampliado em função do manejo do solo para que, assim, seja justificada a produtividade de grãos observada nestes sistemas de manejo do solo. Em sistemas de preparo convencional do solo com grade pesada, deve ser mantido este limite de RP em 2 MPa. Em sistemas com escarificação periódica do solo anual ou a cada três anos, o limite de RP deve ser ampliado para 3 MPa. Em sistemas contínuos com SPD, o limite de RP deve ser ampliado para 3,5 MPa.

O incremento de tempo sem revolvimento do solo, em uma mesma faixa de densidade do solo (D_s) e conteúdo de água do solo, favorece incrementos nos valores de RP, isso ocorre em função do aumento da força de resistência da estrutura em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso. Porém, o aumento de resistência da estrutura observada no SPDC24 em relação aos demais sistemas de manejo do solo, não acarretaram perdas produtivas de soja e de trigo.

O aumento do tempo de adoção do SPD, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, favorece melhorias nas condições físicas do solo, em todas as camadas intermediárias avaliadas de 0,0-0,30 m, e incrementa a produtividade de grãos de soja em relação ao sistema de preparo convencional.

A utilização do intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso é inadequado como indicador da qualidade física do solo,

independente do manejo do solo, modelo de produção, e do limite crítico de RP utilizado (2 ou 3,5 MPa), além de não apresentar relação direta com a produtividade de grãos de soja e de trigo.

10. CONCLUSÕES FINAIS

A avaliação da qualidade do solo através dos atributos físicos não possibilitou identificar mudanças significativas na qualidade do solo entre estes dois modelos de produção (rotação e sucessão de culturas) de longo prazo testados sob um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso.

A qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, sob SPD melhorou ao longo do tempo, e mesmo após 24 anos sem revolvimento o solo oferece condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento das culturas de soja e de trigo.

A utilização de escarificação periódica do solo, no SPD de longo prazo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, é dispensável independente do modelo de produção, pois seus efeitos residuais persistem no solo por um período inferior ou igual a 10 meses.

A utilização do valor de resistência do solo à penetração limitante de 2 MPa em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob sistema plantio direto, independente do modelo de produção utilizado é inadequado, e o valor desse limite crítico de RP deve ser diferente para cada sistema de manejo do solo utilizado.

Em sistema plantio direto contínuo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, o limite de resistência do solo à penetração deverá ser ampliado para 3,5 MPa.

No sistema plantio direto com intervenção mecânica a cada ano ou a cada três anos, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, o valor de resistência do solo à penetração limitante deverá ser ampliado do usual 2 MPa para 3 MPa.

Em sistemas de preparo convencional do solo utilizando anualmente grade pesada em cada cultivo, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, deve ser mantido o valor de resistência do solo à penetração crítica de 2 MPa.

A resistência do solo à penetração, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não é alterada em função do modelo de produção, sucessão de cultura [trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja (*Glycine max* L.)] ou de um sistema de rotação de culturas [tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) /milho (*Zea mays* L.) -aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) /soja-trigo/soja-trigo/soja].

A escarificação do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso influencia positivamente nos valores de resistência do solo à penetração por um período inferior a 22 meses em relação ao sistema plantio direto contínuo.

O processo de recuperação da resistência, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, foi comprovado entre os tempos de adoção do SPD (SPDC24 e SPDC11) e também em função do tempo após a escarificação do solo (SPDE1 e SPDE3).

O processo de recuperação da resistência da estrutura de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso é influenciado pelo tempo em que o mesmo permanece sem revolvimento do solo, e pela associação de processos físicos químicos e biológicos, relacionados com a formação e estabilização dos agregados do solo.

O aumento da resistência do solo à penetração no SPDC24, em relação aos demais manejos do solo (SPC, SPDE1, SPDE3 e SPDC11), neste Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não foi restritiva à produtividade de grãos de soja e trigo.

Em uma mesma situação de densidade do solo e de conteúdo volumétrico de água do solo, os valores de resistência do solo à penetração são incrementados em função do tempo de adoção do SPD, e pelo tempo de ausência de revolvimento do solo, indicando que quanto mais consolidado for o sistema plantio direto, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, maiores serão os valores de resistência do solo à penetração.

Os resultados de resistência do solo à penetração e da curva de resistência do solo à penetração indicam a necessidade de estabelecer limites distintos de resistência do solo à penetração, em função do manejo do solo e tempo de adoção do SPD.

A qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso sob sistema plantio direto contínuo ao longo do tempo é preservada, e independente do modelo de produção baseado em sucessão de cultura [trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja (*Glicine max* L.)] ou rotação de culturas [tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)]/milho (*Zea mays* L.)-aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)/soja-trigo/soja-trigo/soja], e não necessitam de intervenções mecânicas para a redução do nível de compactação do solo.

A escarificação anual do solo ou a cada três anos em sistema plantio direto, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, é uma prática desnecessária e não melhora a qualidade física do solo, nem aumenta a produtividade de grãos de soja e de trigo em relação ao sistema plantio direto contínuo com 11 ou 24 anos.

O aumento do tempo de adoção do sistema plantio direto de 11 para 24 anos, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, melhora a qualidade física do solo, e incrementa a produtividade de grãos de soja em relação ao sistema de preparo convencional com grade pesada.

O intervalo hídrico ótimo não é um indicador adequado da qualidade física em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, independente do sistema de manejo do solo (sistema de preparo convencional, sistema plantio direto escarificado a cada ano ou a cada três anos, sistema plantio direto contínuo com 11 e ou 24 anos), do modelo de produção (rotação ou sucessão de culturas) e dos limites críticos de resistência do solo à penetração de 2 e 3,5 MPa.

O intervalo hídrico ótimo, independente do limite crítico de resistência do solo à penetração, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso, não tem relação direta com a produtividade de grãos de soja e de trigo.

REFERÊNCIAS

- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soyabean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, 2008.
- BLAINSKI, É.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATT I, M. V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho Distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 273-281, 2009.
- BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, 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**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.
- BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 79-87, 2012.
- BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação permanente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 637-645, 2007.
- FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).
- GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

GOOGLE EARTH – **Imagem de satélite**. (imagem 13 out. 2009), 2012. Acesso em: 23 dez. 2012 (Programa Computacional).

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 9, p. 2475-2481, 2009.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R.B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física de solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 39-45, 2009.

PICCININ, J. L. **Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenções mecânicas sob sucessão e rotação de culturas**. 2005. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2005.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

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. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. M. B. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 6, p. 1-30, 2009.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11. ed. Washington, DC: USDA/NRCS, 2010. 338 p.

APÊNDICES

Apêndice A - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,0-0,10 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Variável	Manejo	Modelo	Interação	Erro	CV(%)
Argila	11,1220 ^{ns}	9,6605 ^{ns}	1,6208 ^{ns}	4,4080	2,86
Silte	7,0834 ^{ns}	4,0051 ^{ns}	2,3391 ^{ns}	3,4125	9,43
Areia	0,6798 ^{ns}	1,2251 ^{ns}	0,2029 ^{ns}	0,7879	12,24
Densidade de partículas	0,0025 ^{ns}	0,00002 ^{ns}	0,0012 ^{ns}	0,0008	1,00
Densidade do solo	0,1419*	0,1419 ^{ns}	0,0047 ^{ns}	0,0080	7,58
Porosidade total saturada	0,0220*	0,0009 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0010	5,74
Porosidade total calculada	0,0169*	0,0001 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0010	5,18
Macroporosidade saturada	0,0558*	0,0020 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0027	35,19
Macroporosidade calculada	0,0485*	0,0484 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0028	29,21
Microporosidade	0,0087*	0,0002 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0007	6,41
Poros bloqueados	0,0012*	0,0004 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002	43,28
RP -6 kPa	1,4062*	2,2848*	0,1127 ^{ns}	0,2167	40,42
RP -10 kPa	1,2624*	0,4431 ^{ns}	0,2882 ^{ns}	0,4309	52,98
RP -33 kPa	2,6016*	0,2117 ^{ns}	0,8004 ^{ns}	0,7204	44,07
RP -100 kPa	2,5618 ^{ns}	0,0020 ^{ns}	0,3639 ^{ns}	0,9403	37,93
RP -500 kPa	18,5692*	1,0304 ^{ns}	2,9705 ^{ns}	3,3212	37,60
θ -6 kPa	0,0026*	0,0010 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0006	6,08
θ -10 kPa	0,0016*	0,0010 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0006	6,12
θ -33 kPa	0,0052*	0,0002 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0006	6,73
θ -100kPa	0,0041*	0,0002 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0007	7,51
θ -500 kPa	0,0053*	0,0001 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0006	7,96
pH	0,0650 ^{ns}	0,2496 ^{ns}	0,0609 ^{ns}	0,0660	5,15
H+Al	0,2862*	0,1103 ^{ns}	0,0218 ^{ns}	0,0967	9,24
Alumínio	0,0083 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0013 ^{ns}	0,0044	168,32
Fósforo	207,9882 ^{ns}	2574,7411*	106,083 ^{ns}	101,7833	29,57
Potássio	0,0410 ^{ns}	0,0023 ^{ns}	0,0087 ^{ns}	0,0294	21,66
Cálcio	0,1969 ^{ns}	1,4175 ^{ns}	0,1863 ^{ns}	0,5362	17,48
Magnésio	0,1060 ^{ns}	0,1863 ^{ns}	0,0648 ^{ns}	0,0728	14,05
Enxofre	0,3268 ^{ns}	2,7773 ^{ns}	0,5199 ^{ns}	1,0449	14,81
T	0,1552 ^{ns}	1,7892 ^{ns}	0,4421 ^{ns}	0,6806	8,03
V%	24,7270 ^{ns}	60,8362 ^{ns}	8,8986 ^{ns}	25,8110	7,59
Nitrogênio	0,0021*	0,0006 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0005	9,56
Carbono	0,1037*	0,0087 ^{ns}	0,0092 ^{ns}	0,0378	9,60

RP: resistência do solo à penetração; Ψ: potencial matricial de água no solo; θ: conteúdo volumétrico de água no solo; H+Al: acidez potencial; T: capacidade de troca de cátions a pH7,0; V%: saturação de bases.

Apêndice B - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,10-0,20 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Variável	Manejo	Modelo	Interação	Erro	CV(%)
Argila	6,6623 ^{ns}	0,1445 ^{ns}	0,7298 ^{ns}	3,4031	2,43
Silte	29,9423 ^{ns}	13,4480 ^{ns}	8,4426 ^{ns}	14,618	21,89
Areia	10,0111 ^{ns}	10,8045 ^{ns}	11,7751 ^{ns}	11,172	49,48
Densidade de partículas	0,0010 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,00013 ^{ns}	0,0005	0,77
Densidade do solo	0,0378*	0,0008 ^{ns}	0,0030 ^{ns}	0,0039	4,85
Porosidade total saturada	0,0051*	0,00003 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0006	4,95
Porosidade total calculada	0,0045*	0,0001 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0005	3,90
Macroporosidade saturada	0,0134*	0,0006 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0011	45,31
Macroporosidade calculada	0,0128*	0,0011 ^{ns}	0,0011 ^{ns}	0,0013	30,32
Microporosidade	0,0034*	0,0005 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0004	4,50
Poros bloqueados	0,0003 ^{ns}	0,00001 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002	33,23
RP no Ψ -6 kPa	1,5662*	0,1562 ^{ns}	0,0625 ^{ns}	0,2196	26,96
RP no Ψ -10 kPa	0,5277*	0,0004 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0004	20,96
RP no Ψ -33 kPa	1,1623 ^{ns}	0,1288 ^{ns}	0,3896 ^{ns}	0,7631	29,97
RP no Ψ -100 kPa	1,6999*	0,4389 ^{ns}	0,7034 ^{ns}	0,3482	16,83
RP no Ψ -500 kPa	7,2402*	1,7978 ^{ns}	1,7869 ^{ns}	1,1640	16,63
θ no Ψ -6 kPa	0,0008 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0004	4,38
θ no Ψ -10 kPa	0,0005 ^{ns}	0,00001 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0003	4,13
θ no Ψ -33 kPa	0,0018*	0,0001 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0004	5,42
θ no Ψ -100kPa	0,0002 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0005	5,61
θ no Ψ -500 kPa	0,0012*	0,0013 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0003	5,14
pH	0,0659 ^{ns}	0,0189 ^{ns}	0,3237 ^{ns}	0,0899	6,20
H+Al	0,0574 ^{ns}	0,0276 ^{ns}	0,1791 ^{ns}	0,09209	9,98
Alumínio	0,0018 ^{ns}	0,000002 ^{ns}	0,0046 ^{ns}	0,0042	114,75
Fósforo	112,706 ^{ns}	54,4288 ^{ns}	10,2026 ^{ns}	66,125	59,30
Potássio	0,0234 ^{ns}	0,00001 ^{ns}	0,0075 ^{ns}	0,0106	23,64
Cálcio	0,1352 ^{ns}	0,5313 ^{ns}	1,0149 ^{ns}	0,6089	21,20
Magnésio	0,0622 ^{ns}	0,0403 ^{ns}	0,0628 ^{ns}	0,1070	19,87
Enxofre	0,3491 ^{ns}	0,8556 ^{ns}	1,5718 ^{ns}	1,1883	18,92
T	0,4127 ^{ns}	0,5905 ^{ns}	0,8114 ^{ns}	0,8367	10,39
V%	6,9471 ^{ns}	21,5062 ^{ns}	72,7134 ^{ns}	34,5055	9,04
Nitrogênio	0,00005 ^{ns}	0,0013 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0004	9,77
Carbono	0,0106 ^{ns}	0,0825 ^{ns}	0,0211 ^{ns}	0,0286	10,75

RP: resistência do solo à penetração; Ψ : potencial matricial de água no solo; θ : conteúdo volumétrico de água no solo; H+Al: acidez potencial; T: capacidade de troca de cátions a pH7,0; V%: saturação de bases.

Apêndice C - Resultados do quadrado médio da análise da variância para os atributos físicos e químicos do solo na camada de 0,20-0,30 m em um Latossolo Vermelho Distroférico. Londrina, PR, 2013.

Variável	Manejo	Modelo	Interação	Erro	CV(%)
Argila	3,7939 ^{ns}	2,2781 ^{ns}	1,1290 ^{ns}	2,8533	2,18
Silte	2,8934 ^{ns}	1,2751 ^{ns}	1,4911 ^{ns}	1,3850	7,53
Areia	1,6302 ^{ns}	0,1445 ^{ns}	0,8523 ^{ns}	0,7741	12,69
Densidade de partículas	0,0002 ^{ns}	0,0011 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0003	0,57
Densidade do solo	0,0438*	0,0256*	0,00625 ^{ns}	0,0033	4,49
Porosidade total saturada	0,0034*	0,0006 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0005	4,26
Porosidade total calculada	0,0052*	0,0030*	0,0008 ^{ns}	0,0004	3,53
Macroporosidade saturada	0,0072*	0,0023 ^{ns}	0,0012 ^{ns}	0,0008	46,68
Macroporosidade calculada	0,0090*	0,0062*	0,0014 ^{ns}	0,0011	30,68
Microporosidade	0,0032*	0,0005 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0005	4,86
Poros bloqueados	0,0004 ^{ns}	0,0009*	0,0001 ^{ns}	0,0002	30,47
RP -6 kPa	0,8925*	0,2418 ^{ns}	0,0296 ^{ns}	0,1550	23,27
RP -10 kPa	0,8157*	0,0270 ^{ns}	0,0276 ^{ns}	0,1970	24,43
RP -33 kPa	1,3275*	1,0857*	0,2628 ^{ns}	0,2370	18,58
RP -100 kPa	1,4988*	0,0456 ^{ns}	0,4885 ^{ns}	0,2425	14,89
RP -500 kPa	4,3296*	0,3534 ^{ns}	1,5462 ^{ns}	1,0508	17,77
θ -6 kPa	0,0013*	0,0006 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0005	4,83
θ -10 kPa	0,0008 ^{ns}	0,00003 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0005	4,87
θ -33 kPa	0,0009 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,0004	4,76
θ -100kPa	0,0007 ^{ns}	0,0016 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0004	4,83
θ -500 kPa	0,0013 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0005	5,96
pH	0,0136 ^{ns}	0,1525 ^{ns}	0,0790 ^{ns}	0,0840	5,98
H+Al	0,0128 ^{ns}	0,1254 ^{ns}	0,1278 ^{ns}	0,0769	10,04
Alumínio	0,0039 ^{ns}	0,0048 ^{ns}	0,0092 ^{ns}	0,00520	147,19
Fósforo	22,1120 ^{ns}	44,2261 ^{ns}	42,7231 ^{ns}	31,3339	77,25
Potássio	0,0214*	0,00002 ^{ns}	0,0021 ^{ns}	0,0046	24,60
Cálcio	0,8614 ^{ns}	0,1613 ^{ns}	0,0253 ^{ns}	0,4066	20,07
Magnésio	0,0948 ^{ns}	0,1836*	0,0182 ^{ns}	0,0182	14,78
Enxofre	1,6077 ^{ns}	0,6917 ^{ns}	0,0485 ^{ns}	0,6764	16,92
T	1,8521*	0,2205 ^{ns}	0,0908 ^{ns}	0,4589	8,88
V%	26,7319 ^{ns}	41,3106 ^{ns}	13,1012 ^{ns}	30,6006	8,74
Nitrogênio	0,0005 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0002	9,63
Carbono	0,1456*	0,0028 ^{ns}	0,0199 ^{ns}	0,0260	12,93

RP: resistência do solo à penetração; Ψ : potencial matricial de água no solo; θ : conteúdo volumétrico de água no solo; H+Al: acidez potencial; T: capacidade de troca de cátions a pH7,0; V%: saturação de bases.