

ÉVERTON BLAINSKI

**INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE USO E MANEJO**

**MARINGÁ
PARANÁ - BRASIL
JUNHO - 2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ÉVERTON BLAINSKI

**INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE USO E MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção de título de Doutor.


**MARINGÁ
PARANÁ - BRASIL
JUNHO - 2010**

ÉVERTON BLAINSKI

**INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE USO E MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 25 de junho de 2010.




Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves



Prof^a. Dr^a. Karina Mafia Vieira Cavaliere



Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller



Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni



Prof. Dr. Cassio Antonio Tormena
(Orientador)

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

B634i Blainski, Éverton

Indicadores de qualidade física em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo [tese] / Éverton Blainski ; orientador Cássio Antonio Tormena; co-orientador Antônio Carlos Andrade Gonçalves. – Maringá, PR, 2010.

88 p. : Grafts. Tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2010.

Inclui bibliografia

1. Física do solo – Qualidade – Indicadores. 2. Irrigação. 3. Solo adequado para Agricultura. 4. Sistema de plantio direto. I. Tormena, Cássio Antonio. II. Gonçalves, Antônio Carlos Andrade. III. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU:631

Aos meus pais Miroslau Blainski e Ana Dutra Blainski

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente na minha vida, e tornar tudo possível.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade concedida.

Ao Professor-orientador Dr. Cássio Antonio Tormena, pela orientação, incentivo, confiança e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em agronomia, em especial ao professor Antônio Carlos Andrade Gonçalves, pelo aprendizado.

Aos amigos de Pós-Graduação Rachel Muylaert Locks Guimarães e Leonardo Pim Petean, pelo convívio e por toda ajuda prestados.

À COCAMAR, pela parceria e disponibilização de área experimental de plantio direto.

Ao engenheiro Agrônomo Marcio Ricardo Pinto Mendes, da UDT-Cocamar, pela colaboração.

Aos servidores Érika C.T. Sato e Reinaldo Bernardo, pela atenção e amizade.

Aos meus pais Miroslau Blainski e Ana Dutra Blainski, pelo apoio, principalmente nos momentos mais difíceis.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ÉVERTON BLAINSKI, filho de Miroslau Blainski e Ana Dutra Blainski, nascido na cidade de Assis Chateaubriand, Estado do Paraná, no dia 01 de junho de 1981. Em dezembro de 2004, graduou-se em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Em fevereiro de 2007, concluiu o Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, na UEM. Em março de 2007, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UEM, em Nível de Doutorado, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas. Atualmente trabalha como pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), vinculado ao Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM).

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1 – QUANTIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DO SOLO POR MEIO DA CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO...	4
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	6
1.1 INTRODUÇÃO.....	7
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
1.2.1 Caracterização da área experimental.....	10
1.2.2 Amostragem de solo.....	11
1.2.3 Determinação das propriedades físicas de solo.....	11
1.2.4 Modelagem da CRP.....	12
1.2.5 Modelagem da CRA.....	13
1.2.6 Determinação da Dsc.....	14
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
1.4 CONCLUSÕES.....	23
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24
CAPÍTULO 2 – INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM UM NITOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO IRRIGADO.....	28
RESUMO.....	28
ABSTRACT.....	29
2.1 INTRODUÇÃO.....	30
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
2.2.1 Caracterização da área experimental.....	34
2.2.2 Amostragem de solo.....	34
2.2.3 Determinação das propriedades físicas de solo.....	35
2.2.4 Modelagem da CRA.....	35
2.2.5 Modelagem da CRP.....	36
2.2.6 Determinação do IHO.....	36
2.2.7 Frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO.....	37
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
2.3.1 Intervalo hídrico ótimo.....	39
2.3.2 Análise da variação temporal do θ	42
2.3.3 Manejo da irrigação para o controle da RP.....	44
2.4 CONCLUSÕES.....	48
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
CAPÍTULO 3 – INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL NO CONTROLE DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO.....	54
RESUMO.....	54

ABSTRACT.....	56
3.1 INTRODUÇÃO.....	57
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
3.2.1 Caracterização da área experimental.....	62
3.2.2 Avaliação temporal do θ	63
3.2.3 Amostragem do solo.....	64
3.2.4 Determinação das propriedades físicas do solo.....	65
3.2.5 Modelagem da CRA.....	65
3.2.6 Modelagem da CRP.....	66
3.2.7 Determinação do IHO.....	67
3.2.8 Determinação da F_{dentro}	68
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
3.3.1 Análise da CRA e CRP.....	70
3.3.2 Intervalo hídrico ótimo.....	72
3.3.3 Frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro})..	75
3.4 CONCLUSÕES.....	82
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

Quadro 1 -	Estatística descritiva das variáveis: densidade do solo ($D_s - \text{Mg m}^{-3}$); resistência do solo à penetração (RP - MPa); porosidade de aeração na capacidade de campo ($PA_{CC} - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ na capacidade de campo ($\theta_{CC} - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ no Ψ de -800hPa ($\theta_{TEN} - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e θ no ponto de murcha permanente ($\theta_{PMP} - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).....	15
Quadro 2 -	Estimativa dos coeficientes da curva de resistência do solo à penetração ($RP = a D_s^b \theta^c$) para os diferentes sistemas de uso.....	16
Quadro 3 -	Frequência relativa de amostras de solo com D_s maior que a D_{sc} nos potenciais equivalentes à capacidade de campo ($\Psi_{CC} = -100\text{hPa}$); limite de funcionamento de tensiômetros ($\Psi_{TEN} = -800\text{hPa}$) e ponto de murcha permanente ($\Psi_{PMP} = -15.000\text{hPa}$).....	17

CAPÍTULO 2

Quadro 1 -	Estatística descritiva das propriedades físicas: densidade do solo ($D_s - \text{Mg m}^{-3}$); teor de água no solo ($\theta - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e resistência do solo à penetração (RP - MPa), determinadas nas amostras indeformadas, coletadas na área experimental.....	38
Quadro 2 -	Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRA no solo ($\theta = a \psi^b D_s^c$) e para a CRP ($RP = d \theta^e D_s^f$). θ é teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ψ é o potencial de água no solo (hPa); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa).....	38

CAPÍTULO 3

Quadro 1 -	Massa resíduos de aveia distribuída uniformemente sobre a superfície do solo em cada tratamento.....	62
Quadro 2 -	Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo ($D_s - \text{Mg m}^{-3}$), teor de água no solo ($\theta - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e resistência do solo à penetração (RP - MPa). CV: coeficiente de variação (%).....	69
Quadro 3 -	Estimativas dos coeficientes de regressão para a CRA ($\theta = a \psi^b D_s^c$) e para CRP ($RP = d \theta^e D_s^f$). θ é teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa).....	71
Quadro 4 -	Análise da frequência de θ dentro dos limites do intervalo hídrico ótimo (F_{dentro}) com base no efeito da cobertura do solo e posição de amostragem para diferentes valores de D_s	76

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1** - Variação da RP em função da Ds para diferentes θ nos potenciais equivalentes à capacidade de campo (Ψ_{CC}), limite de funcionamento de tensiômetros (Ψ_{TEN}) e ponto de murcha permanente (Ψ_{PMP}). As linhas horizontais correspondem à RP crítica (RP = 2,0MPa) e as linhas verticais correspondem à Dsc no Ψ associado à capacidade de campo..... 18
- Figura 2** - Variação da RP em função do θ para diferentes valores de Ds para os tratamentos mata nativa; pastagem; citros e culturas anuais. As linhas horizontais correspondem à RP = 2,0MPa e as linhas verticais correspondem ao θ em que a RP torna-se maior que 2,0MPa..... 21

CAPÍTULO 2

- Figura 1** - Lâminas de irrigação e precipitação registradas durante o período experimental..... 33
- Figura 2** - Variação do θ com a Ds em relação à capacidade de campo (θ_{CC}), porosidade de aeração (θ_{PA}), resistência do solo à penetração (θ_{RP}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e no Ψ de -800hPa (θ_{TEN}) adotado para controle de irrigação..... 40
- Figura 3** - Distribuição normal acumulada para a densidade do solo (Ds). As linhas verticais pontilhadas apontam para os valores de Ds correspondentes, respectivamente, ao: IHO_{Max} ; $IHO_{80\%}$; $IHO_{70\%}$; $IHO_{50\%}$; $IHO_{25\%}$ e IHO_{nulo} 43
- Figura 4** - Variação temporal do θ em relação aos limites críticos IHO, para o período de monitoramento. LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO..... 44
- Figura 5** - Variação temporal do Ψ (valores de Ψ em módulo) em relação ao limite crítico de RP (Ψ_{RP}) para o período de monitoramento..... 46
- Figura 6** - Variação do Ψ (valores de Ψ em módulo) em que a RP = 2,0MPa em função da Ds..... 47

CAPÍTULO 3

- Figura 1** - Distribuição de precipitação registrada durante o período experimental (12/2006 a 02/2007)..... 61
- Figura 2** - Esquema de amostragem de solo utilizando um atuador hidráulico apoiado ao pára-choques de um trator agrícola. A) anel metálico utilizado para a coleta de solo; B) anel metálico, similar ao anel A, utilizado com base para o atuador hidráulico 64

Figura 3 -	Distribuição da densidade do solo nas posições de amostragem linha e entrelinha nas profundidades de 0-0,10m e 0,10-0,20m.....	70
Figura 4 -	Variação do teor de água com a densidade do solo em relação à capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração (θ_{RP}). A área hachurada indica o IHO.....	73
Figura 5 -	Variação da resistência do solo à penetração (RP) nas posições linha e entrelinha, para as densidades equivalentes à 5; 25 e 50% da distribuição acumulada de Ds. As linhas horizontais pontilhadas indicam a RP = 3,5MPa.....	75
Figura 6 -	Distribuição normal acumulada para a densidade do solo (Ds) nas posições de amostragem entrelinha e linha. A linha vertical pontilhada indica a densidade do solo crítica (Dsc) e as linhas pontilhadas horizontais representam a distribuição acumulada correspondente à Dsc em cada posição de amostragem.....	77
Figura 7 -	Distribuição temporal do θ médio nas posições: (a) entrelinha e (b) linha, para diferentes taxas de cobertura do solo. As linhas horizontais representam os limites superior (LS) e inferior (LI) do IHO.....	78
Figura 8 -	Variação temporal do θ , na ENTRELINHA, em relação aos limites críticos IHO, para o período monitorado, para as densidades do solo de 1,20; 1,29 e 1,35 Mg m ⁻³ . LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO.....	80
Figura 9 -	Variação temporal do θ , na LINHA, em relação aos limites críticos IHO, para o período monitorado, para as densidades do solo de 1,06; 1,18 e 1,26 Mg m ⁻³ . LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

AD	-	Água disponível
CRA	-	Curva de retenção de água no solo
CRP	-	Curva de resistência do solo à penetração
Dp	-	Densidade de partícula de solo
Ds	-	Densidade do solo
Dsc	-	Densidade do solo crítica
θ	-	Teor de água no solo
IHO	-	Intervalo hídrico ótimo
θ_{CC}	-	θ associado à capacidade de campo
θ_{PMP}	-	θ associado ao ponto de murcha permanente
θ_{TEN}	-	θ associado ao limite de funcionamento dos tensiômetros
F_{dentro}	-	Frequência com que θ ocorre dentro dos limites do IHO
PA	-	Porosidade de aeração
QFS	-	Qualidade física do solo
RP	-	Resistência do solo à penetração
TDO	-	Taxa de difusão de oxigênio
SPC	-	Sistema de plantio convencional
SPD	-	Sistema de plantio direto
UA	-	Unidade animal com peso vivo de 450 kg por hectare
Ψ	-	Potencial matricial
Ψ_{CC}	-	Ψ associado à capacidade de campo
Ψ_{PMP}	-	Ψ associado ao ponto de murcha permanente
Ψ_{TEN}	-	Ψ associado ao limite de funcionamento dos tensiômetros

RESUMO

BLAINSKI, Éverton, Dr. Universidade Estadual de Maringá, junho de 2010. **Indicadores de qualidade física em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo.** Professor Orientador: Dr. Cássio Antonio Tormena. Professor Co-orientador: Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

RESUMO. O solo é um recurso natural finito básico para os agroecossistemas. A substituição das paisagens naturais pelos sistemas agrícolas tem ocasionado grandes impactos ao ambiente, principalmente devido à degradação física dos solos. Neste sentido, a compreensão e a quantificação desses impactos são fundamentais para a sustentabilidade da agricultura moderna e manutenção da qualidade física dos solos agrícolas (QFS). A influência da QFS na produtividade agrícola pode ser atribuída à estreita relação entre desenvolvimento vegetal e os fatores físicos fundamentais para o crescimento das plantas. A QFS pode ser expressa por meio de indicadores como a curva de resistência do solo à penetração (CRP) e o intervalo hídrico ótimo (IHO). A CRP integra a resistência do solo à penetração (RP) em função da densidade do solo (D_s) e do teor de água no solo (θ) e pode ser utilizada para estabelecer tanto o θ como a densidade do solo crítica (D_{sc}), em que a RP passa a ser restritiva para o crescimento radicular das plantas. Neste estudo, a CRP foi utilizada como um indicador de degradação física em um Latossolo Vermelho distrófico sob quatro sistemas de uso e manejo: mata nativa, pastagem, citros e culturas anuais. Constatou-se que CRP foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, com dependência da D_s e do θ . Os resultados demonstraram a necessidade de maior θ para manter os valores de RP abaixo da RP crítica para o cultivo de citros e culturas anuais quando comparados à mata nativa e pastagem, indicando degradação física dessas áreas. O θ foi a variável que apresentou maior influência sobre a RP, principalmente nos solos com estrutura degradada, sendo uma das estratégias para a manutenção da RP abaixo do limite restritivo ao desenvolvimento das plantas. Para a avaliação do efeito do manejo de θ no controle das restrições físicas do solo, principalmente

da RP, utilizou-se o IHO, uma vez que este integra a CRP e as variáveis relacionadas com o θ e com a aeração do solo (PA). O IHO foi determinado em um Nitossolo Vermelho distroférico irrigado e sua utilização foi proposta para o manejo de água em área irrigada. Os resultados demonstraram que a adoção do potencial de água no solo (Ψ) igual a -800hPa como limite para a aplicação de água estabelece restrições físicas às plantas devido à RP restritiva em áreas com elevados valores de Ds. Neste caso, o mapeamento de áreas com Ds homogêneas poderia ser utilizado para o manejo regionalizado do Ψ com vistas na manutenção da RP abaixo da RP crítica. Nas áreas com menores Ds, pode ocorrer um maior secamento do solo sem que a RP ultrapasse o valor crítico adotado. Para as áreas com Ds maiores que Dsc, o aumento de θ não se traduziu em diminuição das restrições físicas do solo, sendo necessária a adoção de medidas que visem à redução da Ds. Além da irrigação, o manejo de θ para controle da QFS pode ser realizado em sistemas de plantio direto (SPD), por meio da manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo, reduzindo a evaporação e aumentando o θ disponível. Neste sentido, foi determinado o IHO em um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja, em SPD, e monitorado o θ sob diferentes massas de resíduos de aveia como cobertura do solo: 0, 3, 6, 9 e 12Mg de matéria seca por hectare e, a partir disso, foi determinada a frequência com que θ manteve-se dentro do IHO (F_{dentro}). A redução do IHO resultou em uma menor F_{dentro} , independente da cobertura do solo. Por outro lado, o incremento da cobertura vegetal proporcionou maiores F_{dentro} , porém, condicionadas à Ds. Para valores de Ds próximos à Dsc o incremento do θ proporcionado pela cobertura vegetal não se traduziu em redução das restrições físicas, devido à reduzida amplitude do IHO. Nesses casos, a redução da Ds pode proporcionar aumento F_{dentro} em função da ampliação do IHO. Com isso, a redução de Ds associada à manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo pode garantir condições físicas adequadas para o crescimento de plantas em solos sob SPD.

Palavras-chave: qualidade física do solo, curva de resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo, irrigação, sistema de plantio direto.

ABSTRACT

BLAINSKI, Éverton, Dr. State University of Maringá, June, 2010. **Physical quality indicators in soils under different use and management.** Adviser: Dr. Cássio Antonio Tormena. Co-adviser: Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves.

ABSTRACT. Soil is a natural basic finite resource to agroecosystems. The substitution of natural landscape by agricultural systems has caused huge impacts, mainly due to soil physical degradation. This way, the comprehension and quantification of these impacts are primal to modern agriculture sustainability and maintenance of soil physical quality (QFS). The influence of QFS on crops yield can be related to a straight relationship between crop development and fundamental physics factors for plants growth. QFS can be expressed through soil indicators as the soil resistance to penetration curve (CRP) and least limiting water range (IHO). The CRP integrates soil resistance to penetration (RP) as a function of soil bulk density (Ds) and water content (θ) and can be used to establish both θ and critical soil bulk density (Dsc), in which RP is restrictive for root growth. At this study, the CRP was used as an indicator of physical degradation in an Oxisol under four use and management systems: native forest, pasture, citrus and annual crops. Results showed that CRP was modified by use and management systems and dependent on Ds and θ . An increase on θ is needed to keep RP less than critical RP for soils under annual crops and citrus when compared with native forest and pasture, pointing to physical degradation of these areas. θ was the variable that mostly presented influence on RP, mainly on soils with degraded structure, being one of the strategies to keep RP lower than the restrictive limit for plants growth. To evaluate the effect of θ management in controlling the soil physics restriction, mainly RP, the IHO was used, since it integrates the CRP and variables related to θ and aeration (PA). IHO was determinate on an irrigated Rhodic Kandic and its use was proposed for irrigation management. The results showed that the adoption of soil water potential (Ψ) at -800hPa as a limit to start irrigation

establishes limitations to plants due to RP restrictions on areas with high values of D_s . At this case, mapping the area with homogeneous D_s could be used to regionalized management of Ψ in order to keep RP less than critical RP. On areas with lower values of D_s , can occur a major soil drought without RP being over the critical assumed value. For areas with D_s greater than D_{sc} , an increase of θ did not decrease soil physics restrictions, being necessary to adopt actions in order to provide D_s reduction. Besides the irrigation, θ management to control QFS can be done, under no-tillage systems (SPD), through keeping mulching on soil surface, with decreased evaporation and increased θ availability. For this, IHO was determined to an Oxisol, cropped with soil beans, on SPD, and θ was measured under different oat mulching rates: 0, 3, 6, 9 and 12Mg of dry matter per hectare and from this on, the frequency of θ inside the IHO (F_{dentro}) was determined. The IHO reduction resulted on less F_{dentro} , independently of soil mulching. On the other hand, the mulching rate increase provided more F_{dentro} , although dependent on D_s . When D_s levels were close to D_{sc} , θ increasing provided by mulching, did not reduce the soil physical restrictions, due to reduced IHO amplitude. On this case, the reduction of D_s levels can provide an increase of F_{dentro} due to the extension of IHO. The reduction of D_s associated with the mulching maintenance on soil surface could guarantee adequate physical conditions for plant growth on soils under SPD.

Key words: soil physical quality, soil resistance to penetration curve, least limiting water range, irrigation, no-tillage systems.

INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um recurso natural finito básico para os agroecossistemas, em que alguns de seus componentes podem requerer períodos de tempo prolongados para serem renovados, razão pela qual a manutenção da qualidade física do solo (QFS) tem se tornado objeto de diversos estudos.

A substituição das paisagens naturais pelos sistemas agrícolas pode ocasionar grandes impactos negativos sobre a QFS. Neste sentido, a compreensão e a quantificação desses impactos são fundamentais para a sustentabilidade das atividades agrícolas e para alavancar pesquisas voltadas à recuperação e manutenção da QFS.

A perda da QFS, oriunda dos usos agrícolas, tem se destacado como um problema de abrangência mundial, representando uma ameaça à produção de alimentos e ao meio ambiente, sendo que, os problemas relacionados à degradação física dos solos tornam-se mais evidentes em períodos de adversidades climáticas, podendo ocasionar prejuízos de grandes proporções.

O conceito de qualidade refere-se ao desempenho adequado de determinada função. Neste sentido, a qualidade física de um solo deve ser relacionada às suas funções específicas, que em termos agronômicos podem ser definidas como a capacidade de proporcionar um ambiente físico adequado para o crescimento e desenvolvimento das culturas.

A compactação do solo pode ser considerada um dos principais indicadores de perda da QFS e é ocasionada pela redução de volume do solo quando uma pressão externa é aplicada, culminando no aumento de densidade do solo (D_s) com diminuição da porosidade total e alterações na distribuição do tamanho de poros, redução da capacidade de infiltração e aumento da resistência do solo à penetração das raízes (RP).

Em sistemas agrícolas, as pressões externas às quais o solo é submetido são ocasionadas pelo tráfego intenso de animais, máquinas e equipamentos. A extensão e natureza das modificações nos atributos do solo dependem da intensidade e do teor de água no solo (θ) durante o tráfego, de características edafoclimáticas, do tipo de cultura e do manejo empregado.

Apesar da importância da QFS para a sustentabilidade das atividades agrícolas, os trabalhos relacionados ao tema ainda são relativamente recentes em relação as outras áreas do conhecimento. Diante disso, há necessidade da busca por indicadores de qualidade que possam contribuir para o manejo e recuperação das áreas destinadas à agricultura.

A importância da QFS para a manutenção da produtividade agrícola pode ser atribuída à estreita relação entre desenvolvimento vegetal e quatro fatores físicos fundamentais: disponibilidade hídrica, oxigênio disponível no solo, temperatura e RP. Tais fatores podem variar temporalmente e espacialmente em função das fortes interrelações existentes. Isso possibilita a determinação das possíveis restrições físicas a que as plantas podem ser submetidas durante seu ciclo de desenvolvimento. Neste sentido, o manejo de quaisquer dessas propriedades pode ocasionar alterações físicas nos solos, fundamentais para a manutenção da QFS.

Inúmeros indicadores de QFS têm sido utilizados, tais como: Ds, RP, indicadores relacionados à porosidade do solo, disponibilidade hídrica, entre outros. Entretanto, há um consenso de que independentemente do indicador utilizado, esse deve ser facilmente mensurável.

A curva de resistência do solo à penetração (CRP) é um indicador de QFS que integra a RP em função da Ds e do θ . A CRP pode ser utilizada para estabelecer tanto o θ como a densidade do solo crítica (Dsc), em que a RP passaria a ser restritiva para o crescimento radicular das plantas e, portanto, ser utilizada para o manejo da RP com vistas na manutenção da QFS.

O intervalo hídrico ótimo (IHO), além de integrar a CRP, incorpora as variáveis relacionadas com o θ e com a aeração, ou seja, integra os fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento das plantas, tendo como variável independente a Ds. Diante da perda da QFS, ocorre simultaneamente redução do intervalo em que são mínimas as restrições físicas e aumento da frequência do θ além dos limites estabelecidos para as propriedades físicas integradas pelo IHO.

Diante disso, a hipótese geral do trabalho foi de que esses indicadores de QFS podem ser utilizados como ferramentas de tomada de decisão quanto ao tipo de manejo a ser adotado, com vistas na manutenção da QFS dentro de

limites que possibilitem às culturas expressarem todo seu potencial genético de produtividade. Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar os indicadores de qualidade física do solo (curva de resistência do solo à penetração e intervalo hídrico ótimo) em resposta a diferentes estratégias de uso e manejo.

CAPÍTULO 1

QUANTIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DO SOLO POR MEIO DA CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

RESUMO. A resistência do solo à penetração (RP) é uma das propriedades físicas que frequentemente impõe restrições ao crescimento das raízes das plantas. A RP varia diretamente com a densidade do solo (D_s) e inversamente com o teor de água do solo (θ), e a descrição matemática das relações da RP com D_s e θ estabelece a curva de resistência do solo à penetração (CRP). O objetivo deste trabalho foi quantificar a CRP em um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo e utilizá-la na descrição da degradação física do solo. Foram selecionadas quatro áreas distintas: (a) solo sob mata nativa; (b) solo sob pastagem cultivada com *Brachiaria humidicola* por mais de 20 anos; (c) solo de uma área cultivada com citros por mais de 10 anos; e (d) solo cultivado com culturas anuais por mais de 15 anos em sistema de preparo convencional. Em cada sistema de uso e manejo, foram coletadas 48 amostras indeformadas de solo no centro da camada de 0-0,10m de profundidade. Conjuntos de 16 amostras (quatro amostras por tratamento) foram submetidos a potenciais matriciais (Ψ) entre -10 e -15.000hPa. Nessas amostras, determinou-se a RP, a D_s e o θ . A CRP foi ajustada por um modelo não-linear ($RP = a D_s^b \theta^c$), no qual a , b e c são coeficientes de ajuste do modelo. O modelo ajustado explicou acima de 83% da variabilidade da RP em todos os sistemas de uso e manejo. A CRP foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, com dependência da D_s e do θ . As amplitudes de D_s impostas pelo uso e manejo resultaram na necessidade de maior θ para manter os valores de RP, na camada de 0-0,10m, iguais ou menores que o valor crítico de 2,0MPa para o cultivo de citros e culturas anuais quando comparados à mata nativa e à pastagem. O θ foi a variável que apresentou maior influência sobre a RP, principalmente nos solos com estrutura degradada, sendo uma das estratégias para a manutenção da RP

abaixo do limite restritivo ao desenvolvimento das plantas. Sob os sistemas de uso do solo com citros e culturas anuais, verificaram-se elevados valores de RP, na camada 0-0,10m, com θ equivalente ou próximo à capacidade de campo ($\Psi = -100\text{hPa}$), caracterizando elevada degradação da qualidade física do solo. Nestes solos, para a manutenção da RP em valores não-impeditivos às plantas ($RP < 2,0\text{MPa}$), torna-se necessária a manutenção de maiores valores de θ , ou ainda, a adoção de técnicas que promovam a descompactação do solo por meio da redução da Ds.

Palavras-chave: densidade do solo, compactação, qualidade física, teor de água do solo.

QUANTIFYING SOIL PHYSICAL DEGRADATION THROUGH THE SOIL PENETRATION RESISTANCE CURVE

ABSTRACT. Soil resistance to penetration (RP) frequently reduces plant root growth. RP increases with soil bulk density (Ds) and decreases with soil moisture (θ), and the mathematical description of the relationships of RP with Ds and θ determines the soil penetration resistance curve (CRP). The objective of this study was to quantify the CRP of an Oxisol under different land use practices and to use it to describe soil physical degradation. Four areas were selected: (a) native forest; (b) pasture cultivated with *Brachiaria humidicola* for over 20 years; (c) area cultivated with citrus plants for 10 years; and (d) soil cultivated with annual crops for 15 years. In each treatment, 48 undisturbed soil samples were collected in the 0-0.10m layer. Matric potential (Ψ) values from -10 to -15,000hPa were applied to sets of 16 samples (four per treatment) to simulate soil drying. The variables RP, Ds and θ of these samples were determined. A non-linear equation was fit to the experimental data to describe CRP ($RP = a Ds^b \theta^c$), in which a , b and c are coefficients of the fitted model. The fitted model explained more than 83% of the RP variability in all treatments. The CRP was modified by use and management, dependent on Ds and θ . The amplitudes of Ds imposed by use and tillage resulted on the need of higher θ to maintain RP values at 0-0.10m layer, equal or lower than the critic value of 2.0MPa, for citrus and annual crops soil when compared to native forest and pasture. θ was the variable that presented more influence on RP, mainly in soils with degraded structure, being one of the strategies to maintain RP lower than the restrictive limit for plants growth. At citrus and annual crops soils, high values of RP were verified, on 0-0.10m layer, with θ near or equal to field capacity ($\Psi = -100\text{hPa}$), pointing to high degradation of soil physical quality. On these soils, is needed to keep RP on levels that aren't impeditive to plants growth ($RP < 2.0\text{MPa}$), being necessary to keep θ on high levels, or the option of techniques that can promote the reduction of soil compactness.

Key works: soil bulk density, compaction, soil physical quality, soil water.

1.1 INTRODUÇÃO

Em termos agronômicos, os sistemas de uso e manejo devem manter a capacidade do solo de exercer as funções físicas para o crescimento e ancoragem das raízes bem como de suprimento de água, nutrientes e oxigênio às plantas. A perda de solo por erosão, a redução da matéria orgânica e a compactação são alguns dos fatores que concorrem para a degradação física do solo, com conseqüente perda de uma ou mais destas funções.

Segundo Dexter e Youngs (1992), a quantificação e a compreensão das alterações físicas do solo devidas ao seu uso e manejo são fundamentais para o estabelecimento de sistemas agrícolas sustentáveis. As avaliações destas alterações deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação nativa às explorações agrícolas desejadas (uso e manejo) e analisando suas propriedades físicas periodicamente. Alternativamente, esses estudos podem ser realizados comparando-se as propriedades físicas de solos cultivados e sob vegetação nativa, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados aos fatores e processos de formação dos solos.

As propriedades físicas do solo que influenciam diretamente no desenvolvimento das plantas são: a temperatura, o potencial matricial da água no solo (Ψ) (disponibilidade de água), a aeração e a resistência do solo à penetração (RP) (LETEY, 1985). As condições físicas do solo às plantas variam rapidamente em função da forte interrelação que existe entre tais propriedades e, da magnitude destas interrelações, estabelece-se a qualidade física do solo (GRANATSTEIN e BEZDICEK, 1992). Com base nas condições estruturais do solo, pode-se determinar os diferentes tipos de restrições físicas a que as plantas são submetidas. Neste sentido, resultados experimentais mostram que em solos fisicamente degradados, a RP é uma das propriedades físicas que frequentemente restringem o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (TORMENA et al., 1999; LAPEN et al., 2004; COLLARES et al., 2006). Isto se deve a estreita dependência da RP em relação à condição estrutural do solo, expressa pela densidade do solo (D_s), e pelo teor de água do solo (θ) (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001) e desta dependência

pode-se determinar a curva de resistência do solo à penetração (CRP). A CRP pode ser utilizada para estabelecer tanto θ como a densidade do solo crítica (Dsc) em que a RP passaria a ser impeditiva para o crescimento radicular das plantas.

A RP pode ser definida como o impedimento mecânico que o solo oferece às raízes e é uma importante propriedade física adotada como indicativo da compactação do solo (IMHOFF et al., 2000), por apresentar relação direta com o crescimento das plantas (LETEY, 1985) e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à Ds. A RP e a Ds apresentam uma relação direta, enquanto que o θ influencia inversamente na RP (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

A Ds e o θ são variáveis importantes para determinação da RP. A coleta de dados para a determinação desta variável deve ser realizada com o controle do θ , permitindo, dessa forma, evidenciar os efeitos do manejo sobre a estrutura do solo, uma vez que os efeitos dos sistemas de manejo podem ser confundidos com os efeitos do θ sobre a RP.

O crescimento radicular das plantas pode ser inversamente correlacionado com a RP (TAYLOR et al. 1966; TAYLOR e RATLIFF, 1969; LOGSDON et al., 1992; ROSOLEM et al., 1999; COLLARES et al., 2006). Valores de RP entre 1,0 e 3,5MPa são considerados restritivos ao desenvolvimento das raízes (BENGOUGH e MULLINS, 1990; MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999; BEUTLER et al. 2004). Entretanto, RP = 2,0MPa tem sido frequentemente utilizada como crítica para o crescimento das plantas (LAPEN et al., 2004), em especial para definir um limite inferior de água no solo na quantificação do intervalo hídrico ótimo (IHO) (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998), ainda que 2,5MPa tem sido utilizado em solos sob pastagem (LEÃO et al., 2004) e 3,0MPa em solos sob florestas (ZOU et al., 2000). O valor de 3,5MPa foi utilizado por Tormena et al. (2007) em solo cultivado em longo prazo sob plantio direto, justificado pela presença de bioporos contínuos e efetivos no solo neste sistema de cultivo.

A RP pode ser determinada por meio de penetrômetros, os quais apresentam como principais vantagens a facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados (BENGOUGH e MULLINS, 1990). No entanto, a dependência

da RP em relação à D_s e ao θ (BUSSCHER, 1990) dificulta a interpretação e a utilização adequada da RP isoladamente sem essas variáveis. Busscher (1990) e Busscher et al. (1997) demonstraram a utilização de funções matemáticas para descrever a RP em uma função não linear de D_s e do θ do solo. Tal relação estabelece a CRP.

A CRP tem sido utilizada por diferentes pesquisadores (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2000; LEÃO e SILVA, 2006) para quantificação da RP em diferentes solos. A CRP pode ser utilizada para estabelecer tanto θ como a D_{sc} em que a RP seria impeditiva para o crescimento radicular das plantas.

A CRP pode ser determinada em amostras indeformadas ou diretamente no campo obtendo-se medidas da RP durante o secamento de um solo em distintos valores de D_s . Desta forma, na quantificação e descrição da CRP são incorporados diferentes fatores associados com a degradação física do solo, permitindo estabelecer os valores críticos de D_s ou do θ associados com valores limitantes de RP.

Com base no exposto, a hipótese testada no presente trabalho foi de que, por meio da CRP, pode-se determinar limites tanto de θ quanto de D_s a partir dos quais as plantas passariam a ser prejudicadas em função das restrições físicas do solo.

O objetivo do trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de uso do solo sobre a CRP de um Latossolo Vermelho distrófico e utilizá-la na identificação e descrição da degradação física do solo.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado num Latossolo Vermelho distrófico, textura média (EMBRAPA, 2006), com 790g kg⁻¹ de areia, 40g kg⁻¹ de silte e 170g kg⁻¹ de argila, com declividade média de 8%, desenvolvido a partir do arenito da Formação Caiuá, localizado no município de Paranavaí, região noroeste do Estado do Paraná. O clima é classificado como subtropical (Cfa) de acordo com Köppen, apresentando precipitação anual média de 1.500mm e estação das chuvas entre outubro a março, entretanto, sem a ocorrência de estação seca definida (IAPAR, 2000).

1.2.1 Caracterização da área experimental

Foram selecionadas três áreas sob diferentes modalidades de uso e manejo do solo (pastagem, citros e culturas anuais) e uma área como referência composta por mata nativa, totalizando quatro tratamentos:

Mata nativa – solo sob vegetação primária composta por mata nativa (floresta estacional semidecidual) sem interferência antrópica. Este tipo de vegetação ocorre em locais sem período seco definido, entretanto apresenta a seca fisiológica provocada pelo frio ocorrido no inverno, com temperaturas inferiores a 15°C. Nesta vegetação, a porcentagem das árvores caducifólias, no conjunto florestal, situa-se entre 20 e 50%. As principais espécies encontradas nesta vegetação são: Perobas (*Aspidosperma polyneurom*), Figueiras (*Ficus* spp.), Ipês (*Tabebuia* spp.), Cedros (*Cedrella fissilis*), Louro pardo (*Cordia trichotoma*) e Cabreúvas (*Myrocarpus frondosus*).

Pastagem – solo sob pastagem com *Brachiaria humidicola* em pastejo extensivo de bovinos por mais de 20 anos com lotação média de 1,5 unidades animais por hectare (UA ha⁻¹), uma UA = um animal com peso vivo de 450 kg.

Citros – solo sob cultivo de laranja (*Citrus sinensis*) por mais de 10 anos, em sistema de manejo com herbicidas para o controle das plantas daninhas nas linhas das plantas e roçadas mecânicas nas entrelinhas. O espaçamento

adotado foi de sete metros entre as linhas de cultivo e quatro metros entre plantas de uma mesma linha.

Culturas anuais – solo sob culturas anuais de milho (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor*) e aveia preta (*Avena stringosa*) por mais de 15 anos, implantadas sob sistema de preparo convencional do solo (aração + gradagem) sendo também ocupado com pastagens antes das culturas anuais. Esta área, na época da amostragem, estava cultivada com a cultura de mandioca (*Manihot esculenta*), implantada por meio do preparo convencional do solo com aração e gradagem.

1.2.2 Amostragem de solo

Foram coletadas aleatoriamente, em cada tratamento, 48 amostras indeformadas de solo no centro da camada de 0-0,10m, totalizando 192 amostras de solo com estrutura preservada. A coleta foi realizada cerca de 48 horas após precipitação, utilizando anéis metálicos de $10^{-4}m^3$ (0,05m de altura e diâmetro). Inicialmente foi retirada a camada superficial de solo (0-0,025m) e, em seguida, os anéis metálicos foram cravados verticalmente no solo por meio de um amostrador por impacto. Imediatamente após a retirada das amostras, estas foram envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos até serem preparadas para as análises.

1.2.3 Determinação das propriedades físicas do solo

No laboratório, realizou-se a preparação das amostras com a retirada do excesso de material. Em seguida, procedeu-se a saturação das mesmas em recipientes por meio da manutenção de uma lâmina de água máxima de dois terços da altura dos anéis metálicos por aproximadamente 72 horas.

Após a saturação, deu-se início ao processo de determinação da CRP adotando-se o procedimento descrito em Silva et al. (1994), no qual a RP foi medida numa ampla variação de 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 espacial das condições físicas do solo dentro das áreas amostradas.

As 192 amostras de solo foram divididas em 12 grupos contendo 16 amostras cada. Cada grupo foi composto por quatro amostras de cada tratamento. Posteriormente, cada grupo de amostras foi submetido às tensões equivalentes a um dos seguintes potenciais matriciais (Ψ): -10; -20; -40; -60; -80 e -100hPa utilizando mesa de tensão; -300; -500; -700; -5.000; -10.000 e -15.000hPa por meio de pressões aplicadas em câmaras de Richards com placas porosas (KLUTE, 1986). Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ , as amostras foram pesadas e determinada a RP utilizando um penetrômetro estático similar ao descrito por Tormena et al. (1998). O penetrômetro utilizado é constituído de uma haste metálica com um cone na sua extremidade com semi-ângulo de 30° e área da base de $0,1075\text{cm}^2$, ligado a um medidor composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20kg. A velocidade de penetração foi de $0,01\text{m min}^{-1}$, desta forma, em cada amostra, foram realizadas 257 leituras de RP até a profundidade de 0,043m, das quais a RP foi calculada considerando a média das leituras entre 0,01 e 0,043m de profundidade. As demais leituras foram desconsideradas, pois o cone do penetrômetro não estava completamente inserido na amostra.

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 Dane e Topp (2002).

1.2.4 Determinação da CRP

A CRP foi determinada pelo modelo não linear proposto por Busscher (1990), descrito na equação 1.

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

Em que RP: é a resistência do solo à penetração (MPa); D_s : é a densidade do solo (Mg m^{-3}); θ : é o teor de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); e a , b e c : são coeficientes de ajuste do modelo.

A equação 1 foi linearizada por meio da aplicação da função logaritmo, descrita na equação 2:

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

O ajuste do modelo da CRP foi realizado por meio do procedimento PROC REG (SAS INSTITUTE, 1999). Após o ajuste dos dados à equação 2, tomaram-se os coeficientes estimados e procedeu-se a transformação da equação 2 para a equação 1.

A partir da CRP, foram feitas as estimativas de RP em função da D_s para valores de θ estimados em determinados limites de Ψ : a) capacidade de campo ou Ψ de -100hPa, comumente adotado como limite superior de disponibilidade de água no solo (REICHARDT, 1988; ARAUJO et al., 2004; BEUTLER et al., 2004); b) θ no Ψ limite de funcionamento de tensiômetros em manejo de irrigação (-800hPa); e c) θ no Ψ de -15.000hPa, equivalente ao ponto de murcha permanente (SAVAGE et al., 1996), geralmente utilizado como limite inferior de disponibilidade de água no solo.

1.2.5 Determinação da CRA

A CRA foi utilizada para determinação do θ nos diferentes potenciais. Foi adotado o modelo proposto por Genuchten (1980), ajustado da hipótese de Mualem (1976), conforme equação 3:

$$\theta = \theta_r + \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \dots \dots \dots (3)$$

Em que θ : é o teor de água do solo ($m^3 m^{-3}$); θ_r : é o teor de água residual ($m^3 m^{-3}$); θ_s : é o teor de água na saturação obtido por $\theta_s = (1 - D_s / D_p)$, assumindo a densidade de partículas igual a $2,65 Mg m^{-3}$; Ψ : é potencial matricial (hPa); e α e n : são os coeficientes do modelo.

Os coeficientes α , n e θ_r foram determinados utilizando a abordagem proposta por Silva e Kay (1997) e Tormena e Silva (2002), em que o modelo é ajustado para avaliar os efeitos individuais dos tratamentos e incorpora a variação da D_s entre as amostras.

O ajuste do modelo aos dados experimentais indicou uma equação geral (equação 4), em função de não ser constatado efeito significativo ($p < 0,05$) entre tratamentos, nos coeficientes da função de Genutchen (1980). O parâmetro n do modelo foi estimado como função linear da D_s , conforme equação 4:

$$\theta = 0,0853 + \left(\frac{(\theta_s - 0,0853)}{(1 + (0,0518\psi)^n)} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \dots\dots\dots(4)$$

$$n = (3,7234 - 1,3102 D_s)$$

$$R^2 = 0,87; F = 441,13; P > F < 0,00001$$

1.2.6 Determinação da D_{sc}

A D_{sc} , definida neste estudo como a D_s em que a RP atinge 2,0MPa, foi determinada considerando diferentes θ associados aos potenciais entre a capacidade de campo (-100hPa) e ponto de murcha permanente (-15.000hPa) utilizando a equação 4. As estimativas de RP em função do θ para diferentes valores de D_s foram feitas utilizando os valores médios ± 1 desvio padrão de D_s .

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das variáveis Ds, RP, porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}), θ nos potenciais de -100, -800 e -15.000hPa, correspondentes à capacidade de campo, limite de funcionamento dos tensiômetros e ponto de murcha permanente é mostrada no Quadro 1.

Quadro 1 – Estatística descritiva das variáveis: densidade do solo (Ds - $Mg\ m^{-3}$); resistência do solo à penetração (RP - MPa); porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC} - $m^3\ m^{-3}$); θ na capacidade de campo (θ_{CC} - $m^3\ m^{-3}$); θ no Ψ de -800hPa (θ_{TEN} - $m^3\ m^{-3}$) e θ no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} - $m^3\ m^{-3}$)

Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	CV(%)
Mata nativa						
Ds	48	1,50	1,36	1,61	0,049	3,31
RP	48	1,49	0,03	4,99	1,345	90,31
PA_{CC}	48	0,260	0,205	0,329	0,024	9,37
θ_{CC}	48	0,183	0,169	0,195	0,005	2,77
θ_{TEN}	48	0,106	0,097	0,117	0,004	3,55
θ_{PMP}	48	0,088	0,086	0,091	0,001	0,96
Pastagem						
Ds	48	1,62	1,53	1,69	0,038	2,36
RP	48	1,98	0,64	8,66	1,646	82,93
PA_{CC}	48	0,203	0,165	0,245	0,019	9,31
θ_{CC}	48	0,195	0,186	0,202	0,004	1,93
θ_{TEN}	48	0,118	0,109	0,127	0,004	3,76
θ_{PMP}	48	0,091	0,088	0,095	0,002	1,75
Citros						
Ds	48	1,72	1,56	1,82	0,049	2,82
RP	48	3,67	0,66	14,21	3,327	90,71
PA_{CC}	48	0,151	0,107	0,229	0,024	15,63
θ_{CC}	48	0,205	0,189	0,212	0,004	2,08
θ_{TEN}	48	0,133	0,116	0,149	0,008	5,71
θ_{PMP}	48	0,098	0,089	0,108	0,004	4,23
Culturas anuais						
Ds	48	1,75	1,63	1,90	0,057	3,29
RP	48	3,03	0,44	12,94	2,553	84,22
PA_{CC}	48	0,141	0,100	0,196	0,024	17,72
θ_{CC}	48	0,207	0,197	0,217	0,005	2,23
θ_{TEN}	48	0,137	0,119	0,168	0,010	7,41
θ_{PMP}	48	0,101	0,091	0,127	0,007	6,79

A variável Ds apresentou aumento com a intensificação do uso do solo (culturas anuais > citros > pastagem > mata nativa). Maiores valores de Ds implicam em maiores valores de θ para os potenciais analisados. Isso pode estar associado à redistribuição do tamanho de poros e/ou a maior quantidade de sólidos por unidade de volume (KLEIN e LIBARDI, 2002).

Os ajustes dos modelos aos dados de RP em função da Ds e θ são apresentados no Quadro 2. Os modelos explicaram acima de 83% ($R^2 \geq 0,83$) da variabilidade da RP. Os coeficientes do modelo foram significativos pelo teste t ($P \leq 0,0009$) e os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, indicando que o mesmo ajustou os dados adequadamente. O sinal dos coeficientes indica que a RP variou diretamente com a Ds e inversamente com θ , em concordância com diversos trabalhos realizados no Brasil e no exterior (BOONE e VEEN, 1994; SILVA et al., 1994; HAKANSSON e LIPIEC, 2000; IMHOFF et al., 2000; ARAUJO et al., 2004).

Quadro 2 – Estimativa dos coeficientes da curva de resistência do solo à penetração ($RP = a Ds^b \theta^c$) para os diferentes sistemas de uso

Coeficiente	Estimativa	Erro Padrão	t	P > t
Mata nativa: $RP = 0,0165 Ds^{4,8411} \theta^{-1,1108}$ ($P > 0,001$; $R^2 = 0,84$)				
a	0,0165	0,5406	-7,59	0,0001
b	4,8411	1,2883	3,76	0,0005
c	-1,1108	0,0715	-15,54	0,0001
Pastagem: $RP = 0,0175 Ds^{5,2816} \theta^{-1,1710}$ ($P > 0,001$; $R^2 = 0,83$)				
a	0,0175	0,7693	-5,26	0,0001
b	5,2816	1,4925	3,54	0,0009
c	-1,1710	0,0738	-15,85	0,0001
Citros: $RP = 0,0006 Ds^{9,2205} \theta^{-1,8406}$ ($P > 0,001$; $R^2 = 0,89$)				
a	0,0006	0,8327	-8,86	0,0001
b	9,2205	1,5171	6,08	0,0001
c	-1,8406	0,1113	-16,54	0,0001
Culturas anuais: $RP = 0,0006 Ds^{8,7763} \theta^{-1,9048}$ ($P > 0,001$; $R^2 = 0,88$)				
a	0,0006	0,6867	-10,81	0,0001
b	8,7763	1,2368	7,10	0,0001
c	-1,9048	0,1192	-15,99	0,0001

RP é a resistência do solo à penetração (MPa); Ds, é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); e θ é teor de água do solo ($m^3\ m^{-3}$)

Os maiores valores absolutos dos coeficientes a , b e c nos solos cultivados com culturas anuais e citros (Quadro 2) indicam que, para os mesmos valores de θ e D_s , serão obtidos maiores valores de RP, ou seja, esses tratamentos são mais vulneráveis a alterações do meio (θ e D_s) do que os tratamentos com mata nativa e pastagem.

O coeficiente b associado à D_s é numericamente maior nos solos cultivados com citros e culturas anuais comparado com os solos com pastagem e mata nativa, sugerindo que o aumento de D_s nestes solos alterou a porosidade do solo bem como a distribuição do tamanho dos poros para menores tamanhos refletindo no incremento da RP. Com o incremento da D_s , a maior fricção entre as partículas e o aumento da coesão no solo atuam como principais mecanismos para o aumento da RP (VEPRASKAS, 1984). O maior valor de “ t ” associado ao θ em relação à D_s indica que, neste solo, a RP é mais facilmente modificada pela variação de θ do que de D_s , independente dos tratamentos. Dessa forma, é possível constatar a importância do efeito lubrificante causado pela água para o controle da RP.

A combinação de elevadas D_s e menores θ determinaram valores de RP restritivos para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Quadro 3). No solo sob mata nativa, cerca de 16% das amostras apresentaram D_s acima de $1,54 \text{Mg m}^{-3}$ e $RP > 2,0 \text{MPa}$, na condição de θ equivalente ao ponto de murcha permanente - θ_{PMP} (Quadro 3). Estes resultados são similares aos obtidos por Klein et al. (1998) e Araujo et al. (2004), os quais indicam que nos solos sob mata nativa não há condições restritivas de RP dentro dos limites de disponibilidade de água de interesse agrônômico.

Quadro 3 – Frequência relativa de amostras de solo com D_s maior que a D_{sc} nos potenciais equivalentes à capacidade de campo ($\Psi_{\text{CC}} = -100 \text{hPa}$); limite de funcionamento de tensiômetros ($\Psi_{\text{TEN}} = -800 \text{hPa}$) e ponto de murcha permanente ($\Psi_{\text{PMP}} = -15.000 \text{hPa}$)

Tratamento	N	Ψ		
		-100hPa	-800hPa	-15.000hPa
		Ds > Dsc (%)		
Mata nativa	48	0	0	16
Pastagem	48	0	100	100
Citros	48	33	98	100
Culturas anuais	48	28	98	100

No solo sob pastagem, não foi constatada a ocorrência de valores de RP > 2,0MPa sob θ equivalentes à capacidade de campo (θ_{CC}). Para valores de θ equivalente ao Ψ de -800hPa, a redução da Ds para valores inferiores a 1,53Mg m⁻³ mantém a RP < 2,0MPa, condição que não restringe o desenvolvimento radicular das plantas. Estes resultados indicam que a utilização da pastagem, conduzidas sob sistema de pastejo contínuo, com *Brachiaria humidicola* por longo período, não foi capaz de restabelecer totalmente a qualidade estrutural deste solo comparado à mata nativa, mesmo considerando a sua capacidade de promover melhor qualidade física em comparação aos citros e culturas anuais (Figura 1).

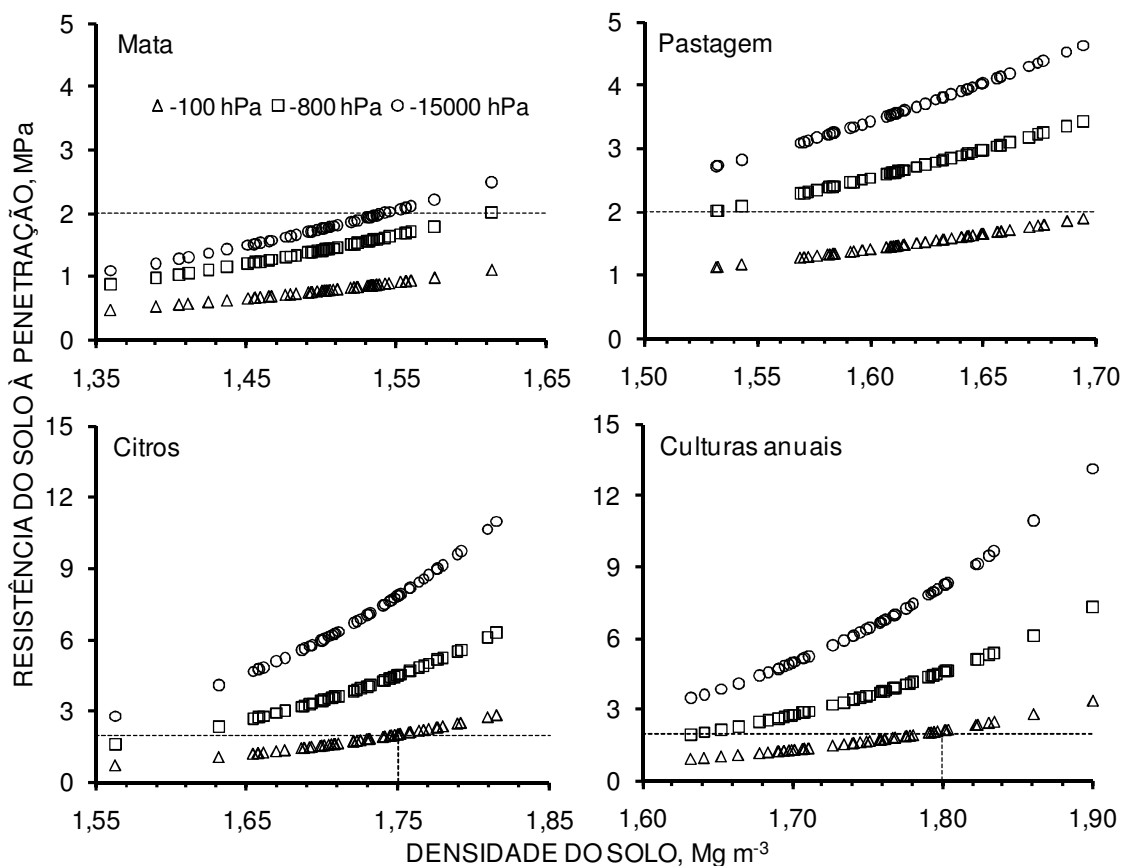


Figura 1 - Variação da RP em função da Ds para diferentes θ nos potenciais equivalentes à capacidade de campo (Ψ_{CC}), limite de funcionamento de tensiômetros (Ψ_{TEN}) e ponto de murcha permanente (Ψ_{PMP}). As linhas horizontais correspondem à RP crítica (RP = 2,0MPa) e as linhas verticais correspondem à Dsc no Ψ associado à capacidade de campo.

Com a intensificação no uso do solo, verificou-se que mesmo em condições de elevada disponibilidade hídrica, correspondentes θ_{CC} , a RP constitui-se numa limitação às plantas para D_s superior a $1,75\text{Mg m}^{-3}$ nos solos sob citros e $1,80\text{Mg m}^{-3}$ nos solos sob culturas anuais (Figura 1). A partir destes valores de D_s , mesmo na capacidade de campo, o solo apresenta valores de $RP > 2,0\text{MPa}$, considerados restritivos para o crescimento das raízes das plantas. Estes resultados são similares aos de Cavalieri et al. (2006) que, em solo de textura similar, demonstraram que para $D_s > 1,74\text{Mg m}^{-3}$ é necessário que θ seja maior do que na capacidade de campo para manter a $RP = 2,5\text{MPa}$. Com isso, o controle de θ mantendo-se elevados valores no solo constitui-se numa estratégia de manejo para redução da RP desde que a D_s esteja aquém dos valores mencionados.

Entretanto, o incremento do θ no solo pode afetar outras propriedades físicas do solo, pois a manutenção de maiores θ com vistas no controle da RP implica na diminuição do espaço poroso preenchido por ar. Dexter (1988) sugere o valor de porosidade com ar (PA) de $0,1\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ como limite mínimo a partir do qual as raízes começam a reduzir seu crescimento por reduzida aeração. Os resultados deste trabalho mostram que na capacidade de campo a PA manteve-se acima do valor considerado restritivo às plantas (Quadro 1).

Os resultados de Cotching e Belbin (2007) mostraram que o manejo da água no solo é importante no controle da RP e que, em solos com estrutura degradada, a taxa de aumento da RP com o secamento do solo é maior do que em solos bem estruturados. Com isso, solos bem estruturados suportam um maior secamento sem que a RP atinja valores restritivos para o desenvolvimento radicular das plantas. Além disso, a presença de bioporos estáveis e contínuos no solo pode contribuir para a formação de rotas alternativas de baixa RP, possibilitando o crescimento das raízes numa matriz de solo mais densa. O crescimento de raízes em bioporos foi sugerido por Ehlers et al. (1983) e confirmado recentemente por Williams e Weil (2004). Por outro lado, técnicas de manejo que incrementem a porosidade por meio da redução da D_s poderiam ser eficientemente utilizadas também para manter a RP em níveis não impeditivos às plantas, como sugerem Busscher et al. (1997). Vários autores têm demonstrado a eficiência de práticas como a

escarificação e subsolagem na redução da RP (CÂMARA e KLEIN, 2005; KLEIN e CÂMARA, 2007), em geral associada à redução da Ds, apesar do efeito temporário destas práticas.

Além disso, a implantação de culturas com sistema radicular abundante pode constituir-se em uma estratégia benéfica para a redução de Ds, principalmente em sistemas agrícolas em que o revolvimento do solo é impossibilitado em função do tipo de cultura implantada, a exemplo da citricultura. Em solo similar cultivado com citros, Fidalski (2004) demonstrou que a manutenção da gramínea mato-grosso ou batatais (*Paspalum notatum*) nas entrelinhas da cultura resulta em redução da RP, constituindo-se numa estratégia de manejo para o controle da qualidade física do solo.

No solo sob mata nativa, não houve ocorrência de valores de Ds > Dsc para valores de θ superiores ao limite crítico de funcionamento dos tensiômetros (Ψ_{TEN}). No Ψ_{PMP} , 16% das amostras apresentaram Ds > Dsc (Quadro 3). Para os demais tratamentos, neste mesmo Ψ , 100% das amostras apresentam Ds > Dsc. Para valores de θ associadas ao Ψ_{TEN} , 100, 98 e 98% das amostras apresentam Ds > Dsc para os solos com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente. Para os solos cultivados com citros e culturas anuais, mesmo em condições de elevada disponibilidade hídrica (capacidade de campo), 33 e 28% das amostras, respectivamente, apresentam Ds > Dsc (Quadro 3). Essas constatações evidenciam a degradação estrutural do solo com a intensificação do uso. Com isso, a manutenção de um maior θ no solo pode proporcionar uma diminuição do percentual de valores de Ds > Dsc, principalmente em solos com estrutura degradada, garantindo um ambiente com menores restrições físicas para o desenvolvimento radicular das plantas. Portanto, para fins de manejo, a partir do manejo de θ pode-se estabelecer o limite crítico da Dsc e vice versa.

Com o aumento da Ds, ocorreu um aumento expressivo na RP com a redução do θ (Figura 2). No solo sob mata, com estrutura preservada (Figura 2), pode ocorrer um maior secamento do solo sem que a RP apresente valores impeditivos às plantas quando comparados às áreas com solos fisicamente degradados (Figuras 2).

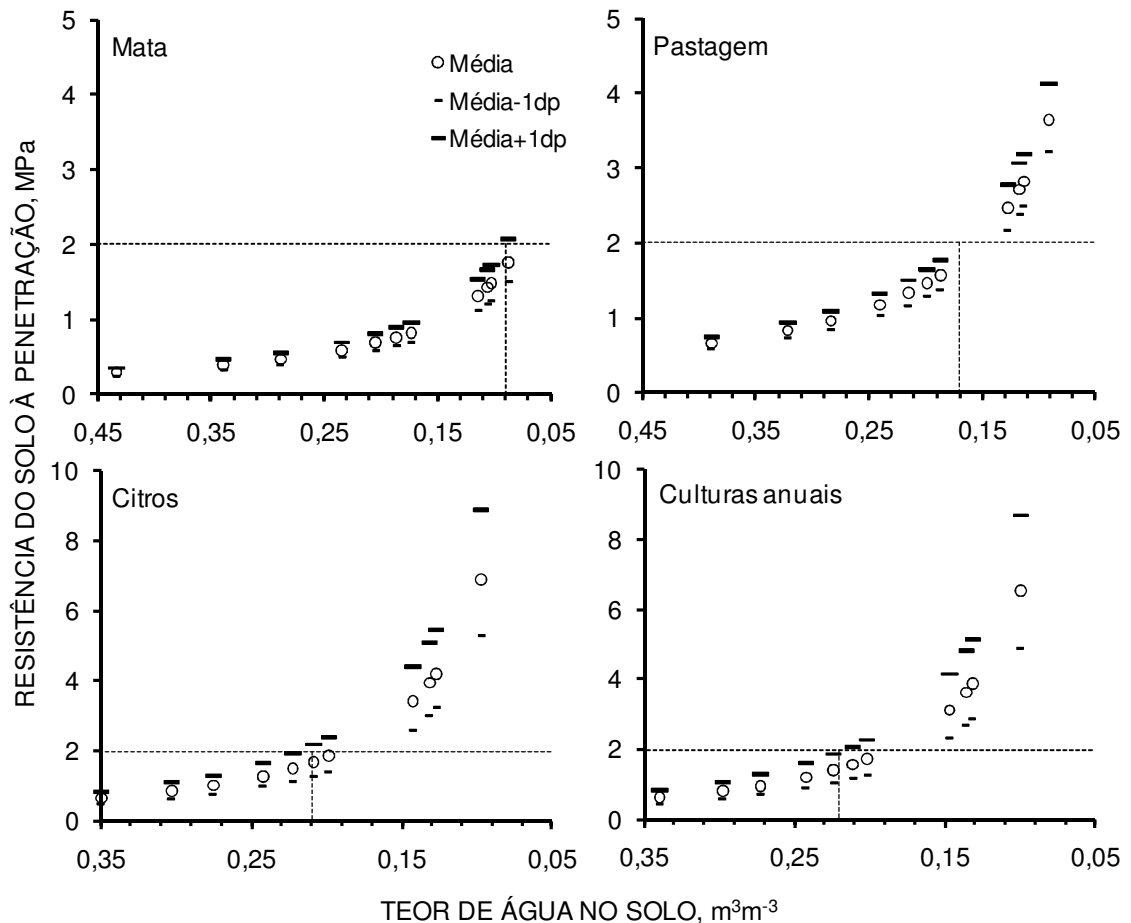


Figura 2 - Variação da RP em função do θ para diferentes valores de D_s para os tratamentos mata nativa; pastagem; citros e culturas anuais. As linhas horizontais correspondem à $RP = 2,0\text{MPa}$ e as linhas verticais correspondem ao θ em que a RP torna-se maior que $2,0\text{MPa}$.

Com o aumento da D_s , há necessidade de manter maiores θ com vistas no controle da RP ou da qualidade física do solo, evidenciando a degradação física do solo. No solo sob mata nativa, um valor de θ de $0,09\text{m}^3\text{m}^{-3}$ é suficiente para garantir a $RP \leq 2,0\text{MPa}$, enquanto que nos solos cultivados com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente, θ não deve ser inferior a $0,17$; $0,21$ e $0,22\text{m}^3\text{m}^{-3}$ para manter $RP \leq 2,0\text{MPa}$. Os resultados deste trabalho sugerem que possivelmente, a utilização de pastagens em sistema planejado de rotação com agricultura (integração lavoura-pecuária) poderia constituir-se numa alternativa tecnicamente viável para o restabelecimento da qualidade física do solo. Além disso, os resultados deste trabalho confirmam que em solos compactados, o controle da qualidade

física é dependente da disponibilidade hídrica e que a redução de RP por métodos que incrementem a porosidade via redução da D_s constitui-se numa alternativa para manter a RP em níveis não impeditivos às plantas.

A manutenção de θ acima dos níveis críticos determinados pode ser uma alternativa para controle da RP, principalmente em sistemas onde as ações mecânicas são impossibilitadas em função da cultura implantada. Os resultados deste trabalho sugerem que a degradação física do solo pode ser amenizada por meio do controle do θ e da D_s , individualmente ou utilizados de maneira simultânea.

1.4 CONCLUSÕES

1. A hipótese do trabalho foi corroborada. Nos solos com citros e culturas anuais a D_s deve ser inferior a 1,75 e 1,80 Mg m^{-3} , respectivamente, para θ na capacidade de campo, a fim de garantir a RP abaixo de 2,0MPa. Para os solos com mata e pastagem, pode ocorrer um maior secamento do solo sem que a RP ultrapasse o valor crítico adotado;

2. A CRP foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, com dependência da D_s e do θ , cujos modelos explicaram acima de 83% ($R^2 \geq 0,83$) da variação da RP em função destas variáveis;

3. As amplitudes de D_s impostas pelo uso e manejo resultaram na necessidade de maior θ para manter os valores de RP, na camada de 0-0,10m, igual ou menor ao valor crítico de 2,0MPa para o cultivo de citros e culturas anuais comparados a mata nativa e pastagem;

4. O θ foi a variável que apresentou maior influência sobre a RP, principalmente nos solos com estrutura degradada, sendo uma das estratégias para a manutenção da RP abaixo do limite restritivo ao desenvolvimento das plantas;

5. Sob os sistemas de uso do solo com citros e culturas anuais, verificaram-se elevados valores de RP, na camada 0-0,10m, com θ equivalente ou próximo à capacidade de campo ($\Psi = -100\text{hPa}$), caracterizando elevada degradação da qualidade física do solo.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, n.3, p.341-358, 1990.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade do arroz sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.39, n.6, p.575-580, 2004.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, v.11, p.237-264, 1994.

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

BUSSCHER, W.J.; BAUER P.J.; CAMP C.R.; SOJKA R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research, Amsterdam**, v.43, n.3, p.205-217, 1997.

CÂMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.813-819, 2005.

CAVALIERI, K.M.; 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, n.30, v.1, p.137-147, 2006.

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

COTCHING, W.E.; BELBIN, K.C. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in north-west Tasmania. **Australian Journal of Soil Research**, Ottawa, v.45, n.2, p.147-152, 2007.

DANE, J.H.; TOPP, G.C. Methods of soil analysis. Part 4 – Physical Methods. 5.ed. Madison, **Soil Science Society of America**, 2002, 1692p.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.199-238, 1988.

DEXTER, A.R.; YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.2, p.101-106, 1992.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FIDALSKI, J. **Propriedades físico-hídricas de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico em diferentes sistemas de manejo das entrelinhas de citros**. 2004. 62p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.1, p.892-898, 1980.

GRANATSTEIN, D.; BEZDICEK, D.F. The need for a soil quality index: local and regional perspectives. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1, p.12-16, 1992.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, n.2, p.71-85, 2000.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. CD-ROM.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

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

KLEIN, V.A.; CÂMARA, 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.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, 1998.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods**. Madison, American Society of Agronomy, 1986, p.635-660.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, 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. Critérios estatísticos na seleção de parâmetros para avaliação da resistência do solo à penetração. **Scientia Agricola**, Piracicaba. v.63, n.6, p.552-557, 2006.

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.

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

LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; NELSON, W.W.; WOORHEES, W.B. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.23, n.1, p.95-100, 1992.

MEROTTO JR., A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v.12, n.3, p.513-522, 1976.

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

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

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5.ed. Cary, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.644-651, 1996.

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

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

TAYLOR, H.M.; RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, Baltimore, v.100, n.2, p.113-119, 1969.

TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.2, p.305-314, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo potencial de água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.86-292, 1999.

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

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.6, p.1220-1225, 1984.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.4, p.1403-1409, 2004.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Ottawa, v.28, n.5, p.947-958, 2000.

CAPÍTULO 2

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM UM NITOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO IRRIGADO

RESUMO. O manejo da irrigação tem-se baseado no controle do potencial da água no solo (Ψ) como fator limitante ao crescimento das plantas. Entretanto, outras variáveis podem afetar a cultura mesmo que o Ψ não seja limitante. O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um conceito de disponibilidade de água no solo que leva em consideração a porosidade de aeração e a resistência do solo à penetração, em adição ao Ψ . O objetivo deste estudo foi quantificar o IHO em um Nitossolo Vermelho distroférico irrigado e propor sua utilização no estabelecimento de critérios para o manejo de água e do solo em áreas irrigadas. O aumento da densidade do solo (D_s) ocasionou uma redução na frequência com que o teor de água no solo (θ) manteve-se dentro dos limites do IHO. A densidade do solo crítica (D_{sc}) foi de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, indicando severa degradação física do solo para $D_s > D_{sc}$. Para $D_s < 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, o Ψ de -800 hPa utilizado frequentemente para o controle da irrigação por meio de tensiômetros caracterizou o limite inferior do IHO. Para $1,26 < D_s \leq 1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, o limite inferior do IHO foi determinado pela RP e, nestas condições, a adoção de Ψ igual a -800 hPa como limite para a aplicação de água estabelece restrições físicas às plantas devido à elevada RP. Neste caso, o mapeamento de áreas com D_s homogêneas poderia ser utilizado para o manejo do Ψ com vistas à manutenção da $RP < 2,0 \text{ MPa}$. Nas áreas em que a $D_s < 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ pode ocorrer maior secamento do solo sem que a $RP > 2,0 \text{ MPa}$, porém, para locais em que $1,26 < D_s \leq 1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ deve-se manter $\Psi > -800 \text{ hPa}$ com vistas ao controle da RP. Enquanto que, para $D_s > D_{sc}$, medidas que visem a redução da D_s poderiam ser tomadas devido à severa degradação do solo.

Palavras-chave: irrigação, qualidade física, resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo.

LEAST LIMITING WATER RANGE OF AN IRRIGATED RHODIC KANDIUDALF

ABSTRACT. Irrigation management has been established taking into account soil water potential (Ψ) as a limiting factor for plants growth. However, other variables can affect crop in a condition in which the Ψ is not limiting. Least limiting water range (IHO) is a concept of available water that incorporates the effects of aeration and soil resistance to penetration (RP) in addition to Ψ . The objective of this study was to quantify the IHO in an irrigated Rhodic Kandiuudalf and to propose its use to establish criteria for being used on water management on irrigated areas. The increase of soil bulk density (D_s) caused reduction on the frequency that water content (θ) was inside the IHO limits. The critical bulk density (D_{sc}) was 1.40 Mg m^{-3} , pointing to severe soil physical degradation when $D_s > D_{sc}$. When $D_s < 1.26 \text{ Mg m}^{-3}$, the Ψ of -800 hPa , frequently used as a point to manage irrigation using tensiometers, characterized the IHO lower limit. When $1.26 < D_s \leq 1.40 \text{ Mg m}^{-3}$, the IHO lower limit was determinate by RP and under these conditions, the adoption of $\Psi = -800 \text{ hPa}$ as a limit for water management impose physics restrictions to plants, due to high RP. In this case, mapping the areas with homogeneous D_s could be used to manage the Ψ in order to keep $RP < 2.0 \text{ MPa}$. Areas where $D_s < 1.26 \text{ Mg m}^{-3}$ a major soil drying can happen even when $RP > 2.0 \text{ MPa}$. Although, areas where $1.26 < D_s \leq 1.40 \text{ Mg m}^{-3}$, the $\Psi > -800 \text{ hPa}$ should be kept in order to control the RP. Whereas for $D_s > D_{sc}$, actions to promote D_s reduction should be done due the severe soil degradation.

Key works: irrigation, physical quality, soil resistance to penetration, least limiting water range.

2.1 INTRODUÇÃO

O manejo da água em sistemas irrigados deve ser efetuado de forma a proporcionar o controle do potencial de água no solo (Ψ) a fim de possibilitar às culturas expressarem o seu potencial genético de produtividade. A definição do momento de irrigar deve ser baseada em técnicas que determinem a condição antes da qual as plantas passam a sofrer restrições hídricas.

Várias técnicas podem ser utilizadas para definir o momento de se proceder a irrigação e o controle do Ψ é um dos métodos mais difundidos e de maior simplicidade para a manutenção do teor de água no solo (θ) dentro de uma faixa adequada para o desenvolvimento das plantas (CAMPBELL, 1988; KRAMER e BOYER, 1995).

O aporte de água, além de estabelecer modificações no θ e no Ψ , acarreta alterações em propriedades físicas do solo como: porosidade de aeração (PA) e resistência do solo à penetração (RP), as quais influenciam nos processos fisiológicos das plantas (LETEY, 1985). Em solos bem estruturados, a faixa de θ em que as condições físicas do solo são adequadas às plantas é definida pelo intervalo compreendido entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), reconhecida como água disponível (AD) (REICHARDT e TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). Entretanto, a degradação física evidenciada pelo aumento na densidade do solo (D_s) resulta em modificações no sistema poroso com efeitos danosos às plantas. Isso decorre da redução na porosidade total do solo a expensas da macroporosidade, reduzindo as trocas de gases entre o solo e a atmosfera e aumentando a RP, as quais poderiam atuar como fatores limitantes ao crescimento das plantas dentro da faixa de AD (LETEY, 1985; TOPP et al., 1994).

Diversas propriedades físicas do solo têm sido empregadas para quantificar as mudanças causadas pelo manejo do solo. Geralmente, as propriedades físicas do solo são analisadas individualmente, não sendo consideradas as possíveis interações entre elas. Letey (1985), em uma tentativa para integrar várias propriedades físicas em um único parâmetro, desenvolveu o conceito do “non-limiting water range” (NLWR), que

posteriormente foi aprimorado por Silva et al. (1994) sendo renomeado para “least limiting water range” (LLWR). No Brasil, o “LLWR” foi utilizado pela primeira vez por Tormena et al. (1998) e foi traduzido para “intervalo hídrico ótimo” (IHO). O IHO é um conceito que define uma faixa de θ em que são mínimas as restrições físicas ao crescimento das plantas, representando um avanço em relação à AD por incluir as limitações devidas à RP e PA em adição ao efeito do Ψ (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 2007). A maior parte dos resultados de pesquisas mostra que o IHO sofre redução com a compactação do solo, isto é, com o aumento da D_s (SILVA e KAY, 1997; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; CAVALIERI et al., 2006). A D_s em que o IHO = 0 é definida como densidade do solo crítica (D_{sc}) e quando $D_s > D_{sc}$, há indicações de severa degradação estrutural do solo. Assim, sistemas de manejo que proporcionem redução no IHO expõem as culturas a uma maior frequência de estresses por excessiva RP ou reduzida PA (SILVA e KAY, 1997; KLEIN e CÂMARA, 2007) em função da variação temporal e espacial de θ .

A RP ganha destaque entre as propriedades físicas do solo diretamente ligadas ao crescimento das plantas devido à frequência com que restringe o IHO (TORMENA et al., 1999, 2007; ZOU et al., 2000; IMHOFF et al., 2001; BEUTLER et al., 2007). Diversos autores têm adotado como restritivos ao crescimento dos sistemas radiculares os valores de RP de 2,0MPa para lavouras anuais e pomares de citros (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; ARAUJO et al., 2004; BLAINSKI, et al., 2008), 2,5MPa para pastagens (IMHOFF et al., 2000), 3,0MPa para solos de florestas (ZOU et al., 2000) e 3,5MPa em solos cultivados por período maior que 12 anos sob plantio direto (TORMENA et al., 2007).

Em condições de elevado θ , a reduzida PA pode acarretar restrições ao IHO (LAPEN et al., 2004), ocasionando prejuízos ao desenvolvimento vegetal devido à baixa taxa de difusão de oxigênio (TDO). O valor de PA = 10%, ou seja, $0,1\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ da porosidade total do solo, livre de água, tem sido adotado como o valor mínimo para garantir uma TDO adequada para o desenvolvimento vegetal satisfatório (GRABLE e SIEMER, 1968; SILVA et al., 1994; ZOU et al., 2000).

A degradação física do solo ocasiona redução na amplitude do IHO e de acordo com Kay (1990), quanto maior a degradação física do solo maior será a probabilidade de ocorrência de estresses físicos devido à reduzida TDO no solo ou pela elevada RP.

Silva e Kay (1997) associaram medidas temporais de θ com os limites do IHO para quantificar a frequência com que θ ocorre dentro dos limites estabelecidos no IHO (F_{dentro}). Eles demonstraram que há uma relação direta entre a magnitude do IHO e a F_{dentro} . Neste sentido, Bengough et al. (2006) ressaltam que o IHO em associação com as variações espaciais e temporais do θ é a melhor estratégia para indicar as possíveis restrições físicas às plantas, sugerindo que a variação do θ pode ser utilizada para a obtenção de condições físicas favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Portanto, o IHO pode ser utilizado para definir estratégias de aplicação e manejo de água em áreas irrigadas. Além disso, por meio do IHO pode-se determinar a Dsc e utilizá-la como critério para o controle da qualidade física do solo.

Neste sentido, a hipótese testada no presente trabalho foi de que o IHO pode ser utilizado como uma ferramenta de gerenciamento de água no manejo de áreas irrigadas com vistas ao controle das restrições físicas do solo impostas às culturas durante seu ciclo.

O objetivo do trabalho foi quantificar o IHO em um Nitossolo Vermelho distroférico irrigado e propor sua utilização como critério para o manejo de água e do solo em áreas irrigadas e para o monitoramento da qualidade física do solo.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental utilizada neste trabalho pertence à Universidade Estadual de Maringá, localizada no município de Maringá-PR (23°23'56"S 51°57'04"O), com altitude média de 540 metros. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), apresentando precipitação anual média de 1.500mm (IAPAR, 2000), e estação das chuvas entre outubro a março, sem a ocorrência de estação seca definida e temperatura média do ar no mês mais quente $\geq 22^{\circ}\text{C}$. A distribuição de precipitação e o cronograma de irrigação realizado durante o período experimental são mostrados na Figura 1.

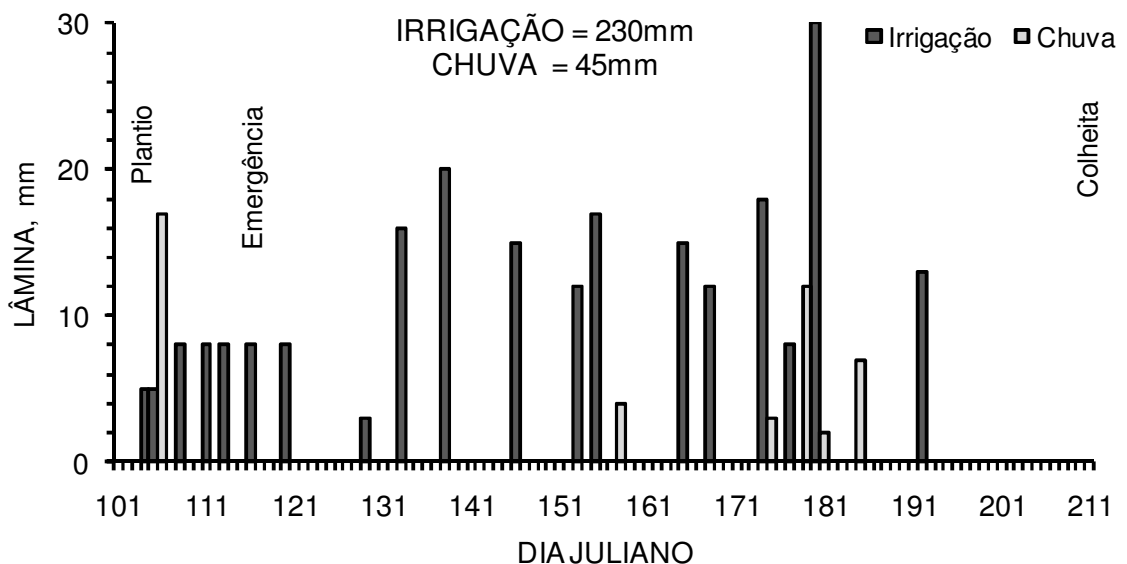


Figura 1 - Lâminas de irrigação e precipitação registradas durante o período experimental.

O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2006) com declividade média de 8%. A análise granulométrica na camada de 0-0,20m, realizada conforme metodologia descrita em Embrapa (1997), indicou valores médios de 175g kg^{-1} de areia, 90g kg^{-1} de silte e 735g kg^{-1} de argila (classificação textural muito argilosa).

2.2.1 Caracterização da área experimental

O trabalho foi realizado em área sob irrigação por aspersão, com aspersores espaçados em 15 x 18m, com diâmetro de bocais de 5,6 x 3,2mm. Esse espaçamento proporcionou um coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 80%.

O preparo do solo foi realizado com um escarificador com cinco hastes estreitas espaçadas de 0,25m a uma profundidade média de 0,25m, seguido de uma gradagem niveladora. Na área experimental foi implantada a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. IAPAR 81) no dia 12 de abril de 2006, utilizando-se 15 sementes por metro linear e espaçamento entre linhas de 0,50m (população de 300.000 plantas ha⁻¹). A adubação foi realizada de acordo com a análise de solo e os demais tratamentos culturais realizados conforme recomendações para a cultura no Estado do Paraná (IAPAR, 1989).

Após o plantio, a área experimental foi dividida em 80 parcelas experimentais com dimensões de 3 x 3m (9m²). No centro de cada parcela experimental foi instalada verticalmente uma sonda de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) com 0,20m de comprimento para o monitoramento do θ . O monitoramento diário do θ da camada 0-0,20m iniciou-se na fase reprodutiva da cultura e estendeu-se até a maturação fisiológica, ou seja, entre os dias 131 e 191 do corrente ano.

O aporte de água via irrigação foi realizado antes que o θ atingisse o ponto de murcha permanente. Neste caso, foram realizados 19 eventos de irrigação (Figura 1) com lâminas aplicadas variando entre 3 e 30mm, totalizando 230mm aplicados durante o período experimental.

2.2.2 Amostragem de solo

Após a colheita, no dia 10 de agosto de 2006, procedeu-se a amostragem do solo no centro de cada parcela, na porção intermediária da camada de 0-0,20m utilizando anéis metálicos (diâmetro e altura de 0,05m), totalizando 80 amostras de solo indeformadas. A amostragem foi realizada removendo-se a camada superficial de solo (0-0,075m) e cravando-se os anéis

metálicos verticalmente no solo com o auxílio de um atuador hidráulico apoiado ao pára-choques de um trator agrícola. Esse método de amostragem garantiu a integridade das amostras evitando alterações na estrutura do solo. Imediatamente depois de retiradas, as amostras foram envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos até serem preparadas para as análises.

2.2.3 Determinação das propriedades físicas do solo

No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de material, deixando, dessa forma, o volume de solo correspondente ao volume dos anéis metálicos. Após a preparação, as amostras foram saturadas mantendo-se uma lâmina de água de até dois terços da altura dos anéis.

Para determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) e da curva de resistência do solo à penetração (CRP), as amostras foram divididas em 10 grupos de oito amostras e cada grupo foi submetido a um dos seguintes potenciais: -10, -20, -40, -60, -80 e -100hPa (hPa é igual a cm de coluna de água), estabelecidos por meio da diferença de nível em uma coluna de água utilizando uma mesa de tensão (ROMANO et al., 2002) e aos potenciais de -500, -1.000, -8.000 e -15.000hPa aplicados por meio de pressões em placas porosas (DANE e HOPMANS, 2002).

Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ , as amostras foram pesadas e, em seguida, foi determinada a RP utilizando um penetrômetro eletrônico idêntico ao descrito por Tormena et al. (1999). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ por 24 horas para determinação do θ e da D_s (BLAKE e HARTGE, 1986).

2.2.4 Determinação da CRA

A CRA foi expressa pela relação entre θ e Ψ conforme Ross et al. (1991). A D_s foi incorporada ao modelo seguindo o procedimento descrito por Leão et al. (2005), conforme equação 1:

$$\theta = a \psi^b Ds^c \dots\dots\dots(1)$$

Em que θ : é o teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ψ : é o potencial da água no solo (hPa); Ds : densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e a , b e c : são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

2.2.5 Determinação da CRP

Os dados de RP foram ajustados em função de θ e da Ds utilizando a função não linear proposta por Busscher (1990), descrita na equação 2:

$$RP = d \theta^e Ds^f \dots\dots\dots(2)$$

Em que RP: é a resistência do solo à penetração (MPa) e d , e e f : são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

Os ajustes das equações 1 e 2 foram feitos pela rotina PROC NLIN empregando o programa estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

2.2.6 Determinação do IHO

O IHO foi determinado conforme Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Os limites superior e inferior de Ψ de -60hPa e de -15.000hPa definiram respectivamente o θ_{CC} (REICHARDT, 1988; BLAINSKI et al., 2004) e o θ_{PMP} (SAVAGE et al., 1996), ambos obtidos a partir da equação 1. A capacidade de campo, aceita como limite superior do IHO, deve ser considerada um conceito arbitrário por ser resultado de um comportamento dinâmico da água no solo e não uma característica intrínseca da matriz do solo (REICHARDT, 1988). Com isso, o Ψ associado à θ_{CC} pode variar em função das características do perfil e do volume de drenagem aceito como desprezível. O Ψ de -60hPa adotado como Ψ correspondente ao θ_{CC} foi previamente determinado por meio do método do perfil instantâneo, seguindo procedimento descrito por Libardi (2005).

Em cada amostra, foi calculado um valor de θ em que a PA corresponde a 10% - θ_{PA} (GRABLE e SIEMER, 1968) utilizando-se a expressão

$[(1-D_s/D_p)-0,1]$, sendo D_p a densidade média de partículas. Foi utilizado um valor médio de $D_p = 3,17\text{Mg m}^{-3}$, determinado previamente para o solo da área experimental conforme Embrapa (1997).

Para a determinação do θ em que a RP atinge o valor considerado crítico de $2,0\text{MPa}$ (θ_{RP}), foi utilizada a equação 2 reescrita conforme a equação 3:

$$\theta_{RP} = \left[\left(\frac{RP}{d D_s^f} \right)^{\frac{1}{e}} \right] \dots\dots\dots(3)$$

O IHO foi determinado considerando como o limite superior o menor valor de entre θ_{CC} e θ_{PA} e como limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} . Dessa forma, são quatro as possibilidades para a determinação do IHO (WU et al., 2003):

- 1) $IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$: ocorre quando $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$;
- 2) $IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$: ocorre quando $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$;
- 3) $IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$: ocorre quando $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$;
- 4) $IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$: ocorre quando $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$.

2.2.7 Frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro})

A partir da quantificação do IHO e das medidas de θ foi determinada a frequência com que θ manteve-se dentro dos limites do IHO (F_{dentro}). A F_{dentro} foi determinada para os locais que apresentaram as condições físicas equivalentes ao: maior IHO (IHO_{Max}); IHO correspondente a: 80, 70, 50 e 25% do IHO_{Max} ($IHO_{80\%}$; $IHO_{70\%}$; $IHO_{50\%}$ e $IHO_{25\%}$ respectivamente) e ainda, $IHO = 0$ (IHO_{nulo}).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das variáveis Ds, θ e RP é mostrada no Quadro 1. A variável RP apresentou coeficiente de variação (CV) maior que as demais variáveis, em função das medidas terem sido realizadas numa ampla variação de θ e Ds. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999), Imhoff et al. (2001) e Tormena et al. (2007).

Quadro 1 – Estatística descritiva das propriedades físicas: densidade do solo (Ds - Mg m⁻³); teor de água no solo (θ - m³ m⁻³) e resistência do solo à penetração (RP - MPa), determinadas nas amostras indeformadas, coletadas na área experimental

Variável	Mínimo	Média	Máximo	Desvio-padrão	CV (%)
Ds	1,11	1,36	1,47	0,0694	5,11
θ	0,28	0,44	0,53	0,0643	14,68
RP	0,29	3,16	12,66	3,2920	104,3

As equações 1 e 2 explicaram 95% da variabilidade de θ e 91% da variabilidade de RP, respectivamente (Quadro 2).

Quadro 2 – Estimativa dos coeficientes de regressão para a CRA no solo ($\theta = a \psi^b Ds^c$) e para a CRP ($RP = d \theta^e Ds^f$). θ é teor de água no solo (m³ m⁻³); ψ é o potencial de água no solo (hPa); Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³) e RP é a resistência do solo à penetração (MPa)

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
Curva de retenção de água no solo - CRA ($P > F = 0,001$; $R^2 = 0,95$)				
<i>a</i>	0,5343	0,0052	0,5239	0,5451
<i>b</i>	-0,0565	0,0005	-0,0575	-0,0556
<i>c</i>	0,2997	0,0341	0,2401	0,3594
Curva de resistência do solo à penetração - CRP ($P > F = 0,001$; $R^2 = 0,91$)				
<i>d</i>	0,0013	0,0006	0,0003	0,0023
<i>e</i>	-5,7425	0,2963	-6,2374	-5,2477
<i>f</i>	8,5011	0,7409	7,2636	9,7385

O intervalo de confiança dos coeficientes não incluiu o valor igual a zero (Quadro 2), possibilitando afirmar que os coeficientes de ajuste dos modelos foram significativos (GLANTZ e SLINKER, 1990). Os resíduos apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, indicando que os mesmos ajustaram-se aos dados adequadamente.

A RP foi diretamente correlacionada com D_s e inversamente correlacionada com θ (Quadro 2), também verificado por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999), Imhoff et al. (2001). O aumento da RP com o decréscimo de θ pode ser associado à maior coesão entre as partículas minerais particularmente em solos de textura argilosa (KAY e ANGERS, 1999). Com o incremento da D_s , tanto a maior fricção entre as partículas como a maior coesão atuam como os principais mecanismos para o aumento da RP (VEPRASKAS, 1984). A influência direta da D_s sobre a CRA pode ser atribuída à redistribuição do tamanho de poros com aumento na proporção de poros de menor diâmetro de modo a se tornarem mais eficientes na retenção de água em elevados potenciais. Em baixos potenciais, a influência da D_s sobre a CRA pode ser atribuída à maior massa de sólidos com elevada superfície de adsorção, uma vez que a compactação geralmente não afeta a microporosidade dentro dos agregados. Esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999), Imhoff et al. (2001), Leão et al. (2004).

2.3.1 Intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) está representado pela área hachurada da Figura 2 e apresentou uma relação inversa com a D_s em concordância com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Leão et al. (2005) e Cavalieri et al. (2006). O limite superior do IHO foi determinado por θ_{CC} para $D_s < 1,35 \text{Mg m}^{-3}$, a partir desta D_s o limite superior do IHO passa a ser determinado pelo θ_{PA} (Figura 2). O limite inferior do IHO foi determinado por θ_{RP} em toda extensão de D_s . Resultados similares foram verificados por Imhoff et al. (2001), Klein e Câmara (2007) e Tormena et al. (2007), apesar das diferenças nos valores de D_s . Além das variáveis convencionais integradas pelo IHO, o θ associado ao Ψ

de -800hPa (θ_{TEN}), largamente utilizado para o manejo de irrigação é mostrado na Figura 2. O θ_{RP} foi maior θ_{TEN} para $D_s > 1,26\text{Mg m}^{-3}$.

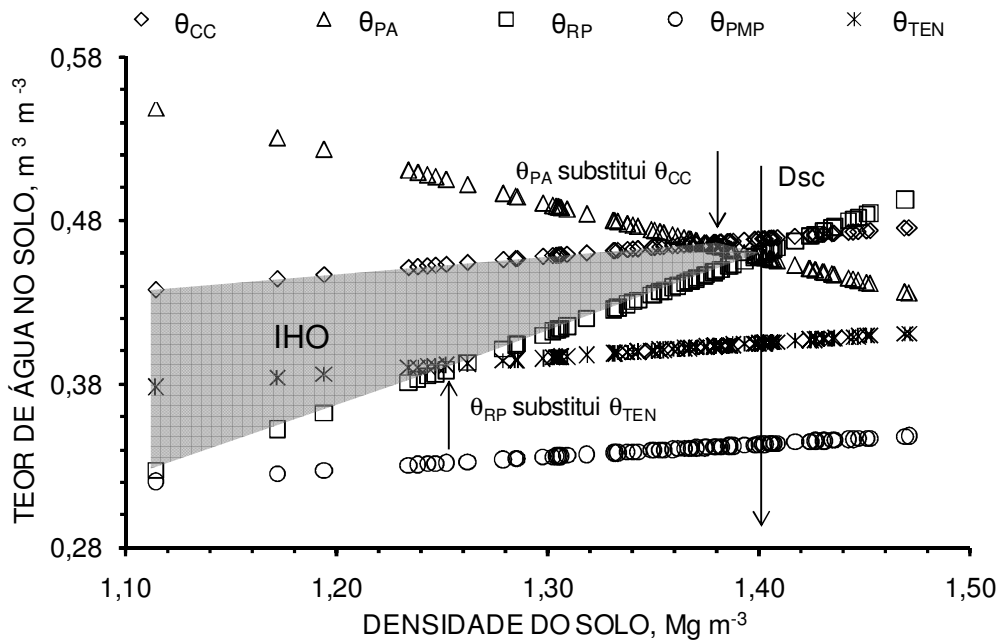


Figura 2 – Variação do θ com a D_s em relação à capacidade de campo (θ_{CC}), porosidade de aeração (θ_{PA}), resistência do solo à penetração (θ_{RP}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e no Ψ de -800hPa (θ_{TEN}) adotado para controle de irrigação.

O θ_{RP} foi a variável que mais frequentemente reduziu o IHO com o aumento da D_s , assim como verificado por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998, 1999). Portanto, práticas de manejo que possibilitem a redução da RP poderiam ser empregadas a fim de aumentar o IHO.

A redução de RP pode ocorrer mediante a adoção de práticas mecânicas ou culturais. Como práticas mecânicas, pode-se promover a redução da D_s por meio da escarificação e/ou aração do solo e, conseqüentemente, reduzir a RP. Essas práticas são comuns em sistemas de preparo do solo convencional. Entretanto, de maneira geral, o efeito benéfico do revolvimento do solo é temporário e o solo revolvido tende a se reconsolidar, retornando em pouco tempo à sua condição original (BUSSCHER et al., 2002), exigindo a repetição da operação regularmente. Secco e Reinert (1997) observaram que o efeito residual da escarificação em um Latossolo Vermelho não foi superior a 10 meses, enquanto que Nicoloso et al. (2008)

observaram efeito residual da escarificação inferior a nove meses em um Latossolo Vermelho distroférico.

No sistema de preparo do solo convencional, tem-se constatado a compactação sub superficial em virtude da mobilização e descompactação mecânica da camada mobilizada, ao mesmo tempo em que a carga aplicada apresenta efeito cumulativo em sub superfície ao longo dos anos (HAKANSSON et al., 1988). Já em sistemas de plantio direto, a compactação é mais superficial, oriunda da não-mobilização do solo e concentração das cargas, cumulativas ao longo dos anos, na camada superficial dos solos. Entretanto, solos sob sistema de plantio direto apresentam maior estabilidade de agregados e formação de bioporos estáveis verticais (LAL e VANDOREN, 1990), que facilitam a penetração das raízes das plantas através de rotas alternativas, com reduzida RP.

Dessa forma, sistemas de manejo como o plantio direto, associado à rotação de culturas, podem propiciar melhorias na qualidade física do solo e o surgimento de bioporos estáveis que serviriam como rotas alternativas para o crescimento das raízes em condições de $RP > 2,0\text{MPa}$ (WILLIAMS e WEIL, 2004). Ehlers et al. (1983) relatam que é possível o crescimento prolífico de raízes com $RP > 3,5\text{MPa}$ associado à presença dos bioporos. Em solos tropicais, $RP = 3,5\text{MPa}$ tem sido utilizado como crítico na quantificação do IHO em sistema de plantio direto (TORMENA et al., 2007). Além disso, o incremento da matéria orgânica poderia reduzir a vulnerabilidade do solo em aumentar a RP em função do aumento da Ds ou do secamento do solo (KAY et al., 1997).

As práticas culturais, como a rotação de culturas, com a inserção de plantas de cobertura com sistema radicular pivotante e bem desenvolvido como o Nabo Forrageiro (*Raphanus sativus* L.), com capacidade de crescer em camadas compactadas e formar bioporos estáveis, trazem melhorias à qualidade física do solo (CUBILLA et al., 2002). Entretanto, a eficiência desta prática depende do estado inicial de compactação do solo. Mesmo espécies indicadas para esta finalidade têm o desenvolvimento radicular limitado quando o solo apresenta valores muito elevados de Ds e RP (CUBILLA et al., 2002). Materechera et al. (1991) avaliaram a capacidade do sistema radicular de Nabo

Forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e observaram redução média de 90% no comprimento de raízes quando cultivadas em solo com $RP = 4,2\text{MPa}$.

Além das práticas mecânicas e culturais, o manejo de água em áreas irrigadas pode ser utilizado para a manutenção da RP abaixo dos níveis críticos. Nestes casos, o manejo da irrigação deve ser realizado mantendo-se θ acima do nível crítico determinado (θ_{RP}), em concordância com os resultados obtidos por Imhoff et al. (2001).

Para os casos em que a $D_s > D_{sc}$, que sinaliza para a degradação física do solo, as condições físicas são altamente restritivas independente do θ , seja pela reduzida PA ou pela excessiva RP. Nesta condição, a escarificação do solo deve ser utilizada para promover a redução imediata da D_s e da RP com o mínimo possível de movimentação do solo. Para compensar o efeito temporário desta prática associado à reconsolidação do solo sob influência do clima e do tráfego de máquinas (BUSSCHER et al., 1995, 2002), deve-se implementar um programa de rotação de culturas, com a inserção de espécies com sistema radicular abundante e a manutenção dos restos culturais na superfície do solo.

2.3.2 Análise da variação temporal do θ

A análise da variação temporal do θ em relação ao IHO foi realizada para diferentes valores de D_s . Os valores de D_s analisados foram: 1,11; 1,19; 1,23; 1,30; 1,36; 1,40 Mg m^{-3} e correspondem, respectivamente, ao: IHO_{Max} ; $IHO_{80\%}$; $IHO_{70\%}$; $IHO_{50\%}$; $IHO_{25\%}$ e IHO_{nulo} (Figura 3). A D_s em que o $IHO = 0$ (D_{sc}) foi de 1,40 Mg m^{-3} . A distribuição normal acumulada demonstra que 25% dos valores de D_s são maiores que a D_{sc} (Figura 3) o que sinaliza para condições físicas extremamente deletérias às plantas nessas condições. A variação temporal do θ e os limites críticos do IHO são mostrados na Figura 4.

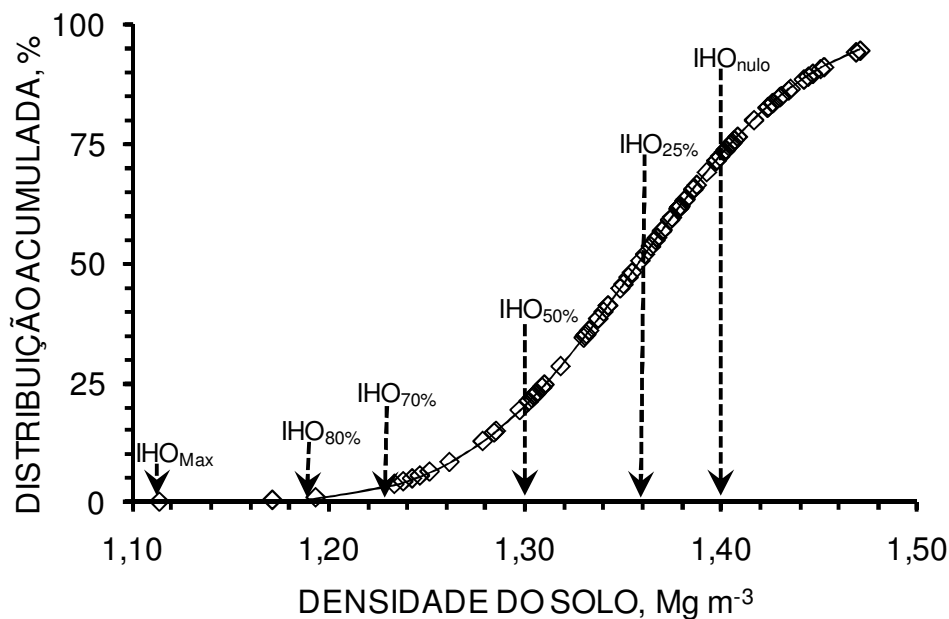


Figura 3 – Distribuição normal acumulada para a densidade do solo (D_s). As linhas verticais pontilhadas apontam para os valores de D_s correspondentes, respectivamente, ao: IHO_{Max} ; $IHO_{80\%}$; $IHO_{70\%}$; $IHO_{50\%}$; $IHO_{25\%}$ e IHO_{nulo} .

Os resultados mostrados na Figura 4 são compatíveis com aqueles de Silva e Kay (1997) e Klein e Câmara (2007) que mostram que, com o aumento da D_s ou redução do IHO ocorre uma maior proporção de θ fora dos limites do IHO, como foi sugerido por Kay (1990). O limite superior do IHO pouco influenciou na F_{dentro} , mesmo com elevadas D_s . Nos dias 138 e 180, foram aplicadas as maiores lâminas de irrigação (20 e 30mm, respectivamente), e os valores de θ medidos imediatamente após as aplicações de água apresentaram valores acima do limite superior do IHO (Figura 4). No entanto, poucas horas depois θ atingiu valores menores que o limite superior do IHO, indicando mínimas restrições de aeração neste solo. Com a diminuição do IHO ocorreu uma menor F_{dentro} , ou seja, aumentou a probabilidade das plantas sofrerem estresse por elevada RP. Para $D_s = 1,11 \text{ Mg m}^{-3}$ (IHO_{Max}), θ manteve-se praticamente todo o tempo dentro dos limites do IHO ($F_{dentro} = 98\%$). Com o aumento da D_s e consequente diminuição do IHO, a F_{dentro} atinge 80% para $D_s = 1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ ($IHO_{80\%}$). Para $D_s = 1,23$; $1,30$ e $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, a F_{dentro} reduziu para 50; 17 e 2%, respectivamente ($IHO_{70\%}$, $IHO_{50\%}$ e $IHO_{25\%}$). Na condição em que o IHO = 0 (IHO_{nulo}), ou seja, $D_s \geq D_{sc}$ ($1,40 \text{ Mg m}^{-3}$), as condições físicas

do solo podem ser consideradas extremamente restritivas às plantas principalmente pela elevada RP (Figura 4).

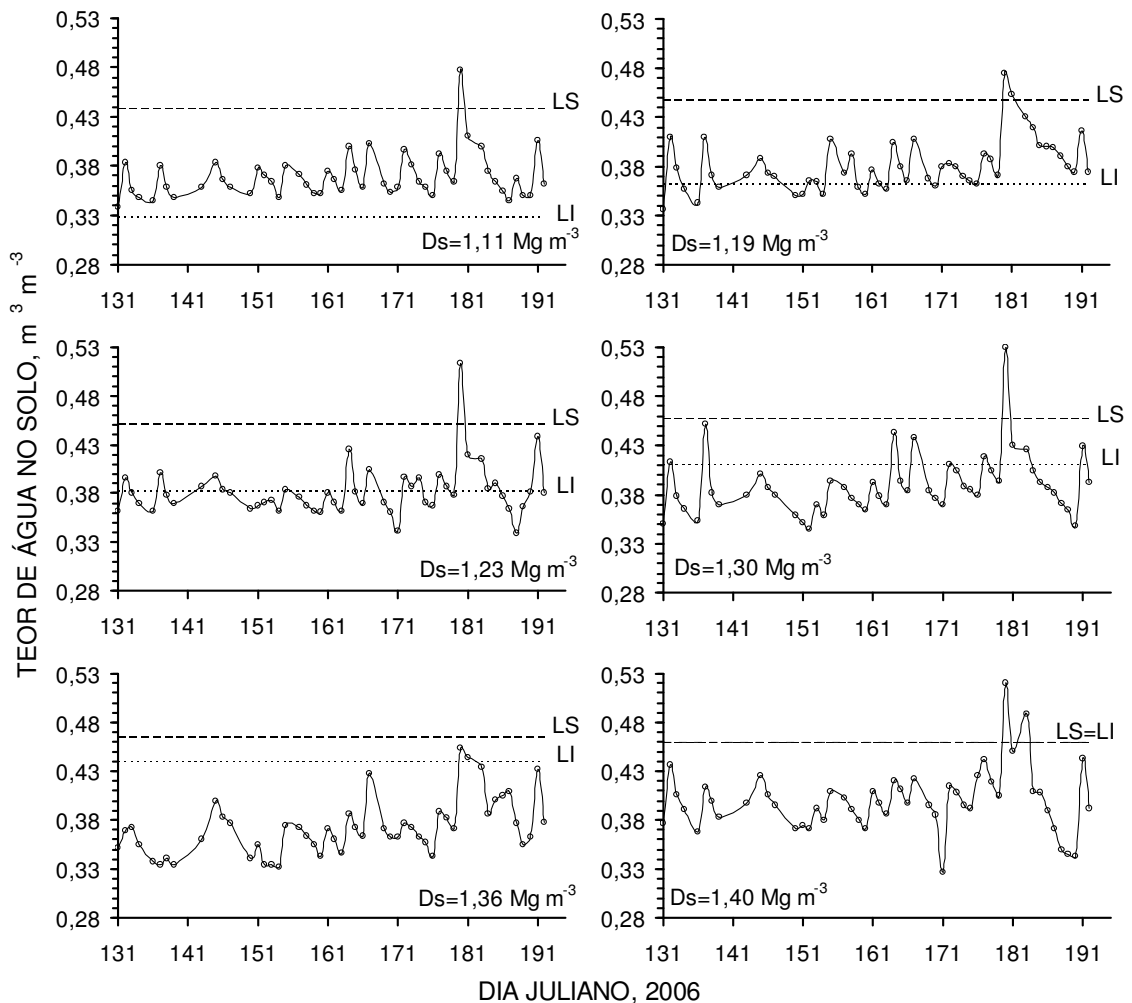


Figura 4 – Variação temporal do θ em relação aos limites críticos IHO, para o período de monitoramento. LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO.

2.3.3 Manejo da irrigação para controle da RP

Uma estratégia para aumentar a F_{dentro} pode ser fundamentada na utilização de tensiômetros para o controle do Ψ em sistemas irrigados (LOPES et al., 2004), com o limite inferior de θ associado ao $\Psi = -800\text{hPa}$ (θ_{TEN}). Entretanto, os resultados mostram que, para $D_s \geq 1,26\text{Mg m}^{-3}$, o θ_{RP} substitui o θ_{TEN} como limite inferior do IHO (Figura 2). Essa condição ocorreu em cerca de 88% das amostras coletadas, ou seja, a adoção do $\Psi = -800\text{hPa}$ como limite

para manejo de irrigação expôs a cultura à $RP > 2,0\text{MPa}$ em 88% da área irrigada. Isso sugere que a utilização de um Ψ fixo para o manejo da irrigação pode prejudicar o desenvolvimento da cultura em função da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo.

A estreita relação entre Ψ , θ , Ds e RP permite que, a partir de θ_{RP} obtido por meio da CRP (equação 3), seja estimado o Ψ em que a RP atinge o valor crítico estabelecido (Ψ_{RP}) por meio da equação 4, reescrita a partir da CRA (equação 1):

$$\Psi_{RP} = \left[\left(\frac{\theta_{RP}}{a Ds^c} \right)^{\frac{1}{b}} \right] \dots\dots\dots(4)$$

Em que Ψ_{RP} : é o potencial de água no solo (hPa) em que $RP = 2,0\text{MPa}$.

Assim, o Ψ_{RP} pode ser utilizado como limite para a aplicação de água no solo antes que a RP limite o crescimento radicular das plantas.

A variação temporal do Ψ é mostrada na Figura 5. Os resultados indicam que, com o aumento da Ds , ocorreu um aumento do Ψ necessário para manter a $RP = 2,0\text{MPa}$ (Ψ_{RP}). Ou seja, para a $Ds = 1,11\text{Mg m}^{-3}$ pode haver um maior secamento do solo, em relação à maiores Ds , sem que a RP ultrapasse $2,0\text{MPa}$. Entretanto, com o aumento da Ds , a ocorrência de $\Psi < \Psi_{RP}$ aumentou (Figura 5) expondo a cultura a valores de RP restritiva em condições em que o Ψ não é limitante.

Portanto, o manejo regionalizado do Ψ , embasado na variabilidade espacial da Ds , pode ser utilizado para aplicação diferenciada de água. Neste caso, o mapeamento da qualidade física do solo e a delimitação de áreas com Ds homogêneas podem ser usados para definir o Ψ_{RP} para essas áreas e, conseqüentemente, para o manejo de água regionalizado, visando o controle da qualidade física do solo. Dessa forma, por meio da CRA, pode-se estimar o Ψ em que $RP = 2,0\text{MPa}$ para as áreas com diferentes Ds (Figura 6).

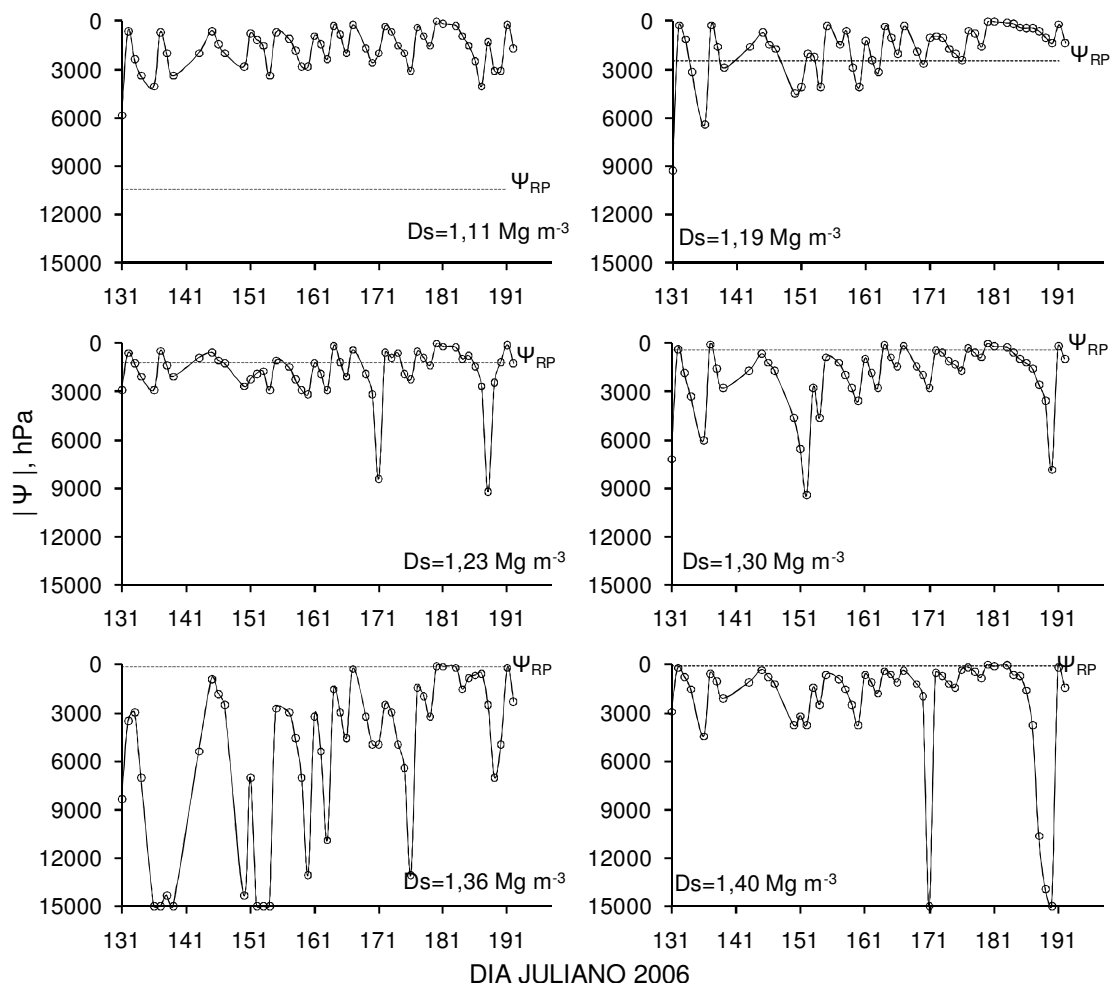


Figura 5 – Variação temporal do Ψ (valores de Ψ em módulo) em relação ao limite crítico de RP (Ψ_{RP}) para o período de monitoramento.

Neste sentido, nas áreas em que a $D_s < 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ pode ocorrer um maior secamento do solo sem que a $RP > 2,0 \text{ MPa}$, porém, para locais em que $1,26 < D_s \leq 1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ deve-se manter $\Psi > -800 \text{ hPa}$ com vistas ao controle da RP. Enquanto que, para $D_s > D_{sc}$, medidas que visem a redução da D_s deveriam ser tomadas em função da severa degradação do solo. Neste caso, a redução da D_s via escarificação associada à implantação do sistema plantio direto poderia ocasionar condições físicas favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

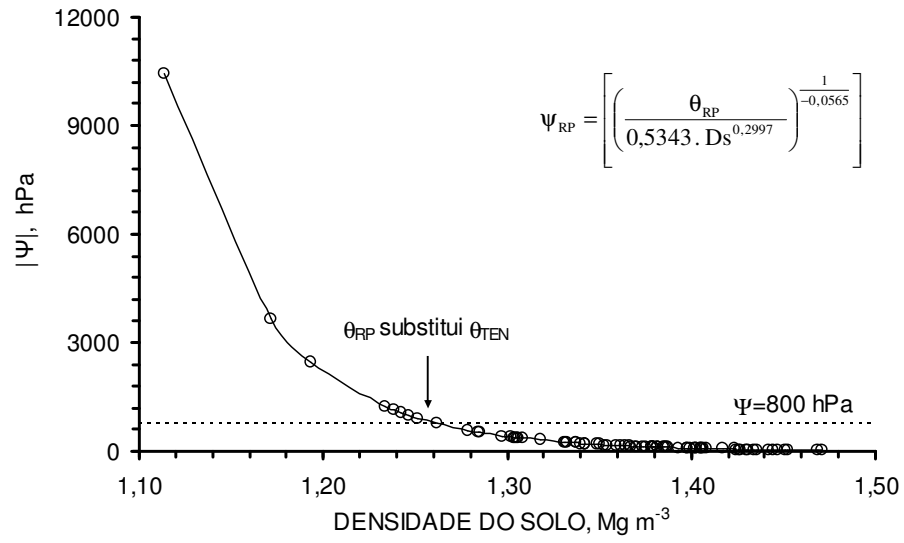


Figura 6 – Variação do Ψ (valores de Ψ em módulo) em que a $RP = 2,0\text{MPa}$ em função da Ds .

2.4 CONCLUSÕES

1. A hipótese do trabalho foi corroborada, ou seja, o IHO pode ser utilizado para o manejo de água em áreas irrigadas com vista ao controle das restrições físicas do solo, sendo que, com a redução do IHO deve-se aumentar a frequência de irrigação e manter maiores valores de θ , visando à manutenção da RP abaixo do valor crítico estabelecido;

2. O IHO apresentou redução com o aumento da D_s para toda a faixa de valores estudada. O limite superior do IHO foi determinado pelo θ_{CC} para $D_s < 1,35\text{Mg m}^{-3}$, a partir desta D_s o limite superior do IHO foi determinado pelo θ_{PA} . O limite inferior do IHO foi determinado por θ_{RP} em toda extensão de D_s . A densidade do solo crítica foi de $1,40\text{Mg m}^{-3}$;

3. A utilização do potencial de -800hPa como limite para manejo de irrigação, expõe a cultura à resistência à penetração restritiva para D_s entre $1,26$ e $1,40\text{Mg m}^{-3}$.

4. O manejo de água pode ser realizado de maneira diferenciada em áreas com D_s homogêneas com vistas ao controle da qualidade física do solo para locais com $D_s < D_{sc}$.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, 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.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.57, n.2, p.437-447, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.R.; CENTURION, M.A.P.C.; FREDDI, O.S.; NETO, E.L.S.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Traffic soil compaction of an Oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.64, n.6, p.608-615, 2007.

BLAINSKI, E.; SEGANFREDO, J.; FOLEGATTI, M.V.; PRINLE, F.B.; GONÇALVES, A.C.A.; TRINTINALHA, M.A. **Capacidade de campo e condutividade hidráulica de um Nitossolo Vermelho distroférico, em função da umidade do solo**. In: XIII Encontro Anual de Iniciação Científica, 2004, Londrina. Resumos... Londrina: EAIC, p.67-70, 2004.

BLAINSKI, E.; 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.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, Madison, v.1, p.363-375, 1986.

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

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recompaction 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.

BUSSCHER, W.J.; EDWARDS, J.H.; VEPRASKAS, M.J.; KARLEN, D.L. Residual effects of slit tillage and subsoiling in a hardpan soil. **Soil and Tillage Research**, v.35, n.3, p.115-123, 1995.

CAMPBELL, G.S. Soil water potential measurement: an overview. **Irrigation Science**, New York, v.9, n.4, p.265- 273, 1988.

CAVALIERI, K.M.; 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, n.30, v.1, p.137-147, 2006.

CUBILLA, M.; REINERT, D.J.; AITA, C.; REICHERT, J.M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.7, n.1, p.1:29-32, 2002.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.4, p.688-690, 2002.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

GLANTZ, S.A.; SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York, McGraw-Hill, 1990. 770p.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.32, n.2, p.180-186, 1968.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.239-282, 1988.

IAPAR. **O feijão no Paraná**. Londrina, 1989, 303p. (Circular Técnica, 63).

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD-ROM.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

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

- KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v.12, n.1, p.1-51, 1990.
- KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of Soil Science**. Boca Raton, CRC Press, p.229-276, 1999.
- KAY, B.D.; SILVA, A.P.; BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.77, n.4, p.655-667, 1997.
- KLEIN, V.A.; CÂMARA, 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.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press. 1995. 495p.
- LAL, R.; VANDOREN, D. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration of two soils in Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1, p.71-74, 1990.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, 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 soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 1.ed. São Paulo: EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 344 p.
- LOPES, A.S.; PAVANI, L.C.; CORÁ, J.E.; ZANINI, J.R.; MIRANDA, H.A. Manejo da irrigação (Tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.89-100, 2004.
- MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.135, n.1, p.31-41, 1991.

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.

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

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 477 p.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.4, p.692-698, 2002.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5.ed. Cary, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.644-651, 1996.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-escuro sob PD. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.1, p.52-61, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.884-888, 1997.

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

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program. Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical Report, 2).

TORMENA, C.A.; ARAUJO, 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.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo potencial de água no solo: um conceito para avaliação da

qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.86-292, 1999.

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

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.6, p.1220-1225, 1984.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.4, p.1403-1409, 2004.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the non-limiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3, p.401-414, 2003.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Ottawa, v.28, n.5, p.947-958, 2000.

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL NO CONTROLE DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

RESUMO. A manutenção das condições físicas do solo aquém dos níveis restritivos é fundamental para a sustentabilidade da produção agrícola. O intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido largamente empregado em estudos de qualidade física dos solos. O IHO integra diferentes propriedades físicas em função da condição estrutural do solo. A variação temporal do teor de água no solo (θ) estabelece as condições físicas para o desenvolvimento das culturas, por modificar os níveis de resistência do solo à penetração (RP) e de porosidade de aeração do solo (PA). A manutenção de resíduos culturais sobre a superfície do solo reduz as perdas de água por evaporação, aumenta a rugosidade do solo e proporciona maiores taxas de infiltração de água, contribuindo para o aumento da disponibilidade hídrica às plantas, bem como modifica a PA e a RP. Os objetivos deste trabalho foram determinar o IHO em um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja em sistema de plantio direto, medir temporalmente o θ sob diferentes massas de cobertura vegetal e avaliar as condições físicas do solo durante o ciclo da cultura. O θ foi medido diariamente em cada tratamento, nas posições entrelinha e linha de cultivo, na camada de 0-0,20m, por meio da técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo). Com base no monitoramento de θ e nos limites críticos estabelecidos no IHO, foi avaliada a frequência com que θ manteve-se dentro do IHO (F_{dentro}), para massas de resíduos de aveia equivalentes a 0, 3, 6, 9 e 12Mg ha⁻¹ de matéria seca. A redução do IHO resultou em uma menor F_{dentro} , independentemente da cobertura do solo. Por outro lado, o incremento da cobertura vegetal proporcionou maiores F_{dentro} . Entretanto, para valores de D_s próximas à D_s crítica (D_{sc}) o incremento do θ , proporcionado pela cobertura vegetal, não se traduziu em redução das restrições físicas do solo, uma vez que nessas condições o valor de θ manteve-se em grande parte do tempo abaixo do θ necessário para a manutenção da RP abaixo do valor crítico (θ_{RP})

e/ou acima do θ necessário para a manutenção da taxa de difusão de gases do solo adequada (θ_{PA}). Nestes casos, a redução da D_s poderia proporcionar uma redução das restrições físicas do solo devido à ampliação do IHO, aumentando a probabilidade de ocorrência de θ dentro do IHO (F_{dentro}).

Palavras-chave: intervalo hídrico ótimo, estrutura do solo, cobertura do solo, teor de água no solo.

MULCHING INFLUENCE ON THE CONTROL OF SOIL PHYSICAL QUALITY

ABSTRACT. The maintenance of soil physical conditions lower than restrictive levels is primal to support agricultural production. The least limiting water range (IHO) has been widely used on soil physical quality studies. The IHO combine different soil properties according to soil structural condition. The temporal variation of soil water content (θ) establishes the physical conditions to plants growth, due to modification on soil resistance to penetration levels (RP) and air porosity levels (PA). Mulching maintenance on soil surface decreases water losses by evaporation, increases soil surface roughness and increases water infiltration rates, contributing to increase water availability to plants, as well as modifies PA and RP. The aims of this work were to determine IHO on a Oxisol, cropped with soy beans, under no tillage system, temporally measure θ under different mulching rates and to evaluate the soil physical conditions during crop period. The θ was measured directly in each treatment, using the TDR (Time Domain Reflectometry) technique. Based on θ control and on critical limits established on IHO the frequency that θ was kept inside IHO (F_{dentro}). The IHO reduction resulted on lower F_{dentro} , independently on mulching rate. On the other hand, the mulching increasing caused more F_{dentro} . Although, on soil bulk density (Ds) levels near to soil critical bulk density (Dsc) the θ increase, proportionated by mulching, do not reduced the soil physical restriction, since on these conditions the θ values was kept most of the time lower than the θ necessary to keep RP lower than critical value (θ_{RP}) and/or higher of necessary θ to keep soil air diffusion rates (θ_{PA}). These results suggest that Ds reduction could decrease the soil physical restriction due to amplify the IHO, increasing the probability of θ being inside IHO (F_{dentro}).

Key works: least limiting water range, soil structure, mulching, soil water content.

3.1 INTRODUÇÃO

O termo qualidade física do solo (QFS) pode ser definido de diversas maneiras, entretanto, independentemente da sua definição, deve ser ressaltada a importância da QFS para a manutenção da produtividade das culturas e para a sustentabilidade das atividades agrícolas. A QFS é afetada pelos sistemas de manejo empregados nas atividades agrícolas (BERTOL et al., 2001). A magnitude dessas alterações depende de uma série de fatores, tais como: tempo e intensidade de uso, características edafoclimáticas, tipo de cultura e manejo empregado (REICHERT et al., 2003). A perda da QFS pode ser evidenciada pela compactação do solo com efeitos negativos sobre o tamanho e distribuição dos poros (DEXTER, 1988), aumento da densidade do solo (D_s), redução da capacidade de infiltração de água, aumento do escoamento superficial (BERTOL et al., 1997; SCHICK et al., 2000), redução da porosidade de aeração (PA) e aumento da resistência do solo à penetração das raízes (RP) (IMHOFF et al., 2000).

A adoção de manejos conservacionistas do solo, como o sistema de plantio direto (SPD), pode resultar na compactação superficial do solo (DE MARIA et al., 1999) com redução da porosidade total (DEFOSSEZ e RICHARDT, 2002) e alteração na distribuição do tamanho de poros (KLEIN e LIBARDI, 2002). A intensidade e a frequência da compactação dependem do manejo das culturas e do teor de água no solo (θ) por ocasião do tráfego de máquinas e implementos (BOIZARD et al., 2002).

Via de regra, o solo cultivado sob o sistema de preparo convencional (SPC) tem maior porosidade e menor densidade na camada superficial em comparação aos solos sob SPD (REICHERT et al., 2009). Entretanto, essas condições reduzem a sua resistência ao suporte de cargas (SILVA et al., 2002) e facilitam a reconsolidação natural, devido às variações do θ e pelo tráfego de máquinas. No SPD, a maior atividade biológica (MENDES et al., 2003) e a ciclagem de raízes dão origem a uma rede de poros no solo que facilita a infiltração de água e o crescimento de raízes, mesmo sob maiores valores de D_s (ABREU et al., 2004).

O SPD associado à rotação de culturas pode contribuir para a melhoria da QFS, primeiramente devido ao surgimento da bioporosidade, que possibilita o crescimento das raízes por meio de rotas alternativas (EHLERS et al., 1983), e pelo incremento do θ oriundo da maior taxa de infiltração de água no solo e redução da taxa de evaporação devido à manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo (SIDIRAS et al., 1984).

De acordo com Negi et al. (1981) e Gantzer e Blake (1978), o θ é geralmente maior em solos mantidos sob SPD do que sob sistemas de preparo convencional. Isso pode ser atribuído à redução da evaporação do solo e a maior capacidade de armazenamento de água, ocasionado pelo aumento no volume de poros de menor diâmetro (BLEVINS et al., 1971), mesmo sendo relatada a menor porosidade total em solos sob SPD (GANTZER e BLAKE, 1978).

Os poros do solo podem ser classificados como texturais e estruturais (RICHARD et al., 2001). A presença de poros estruturais ocorre devido aos efeitos do secamento e umedecimento do solo, atividade biológica e cultivo e são considerados bons indicadores de condição física, pois refletem o estado de compactação do solo. Por outro lado, os poros texturais, provenientes do arranjo das partículas de solo, não são afetados pelo processo de compactação (CURMI et al., 1994).

Os bioporos são poros estruturais originados da atividade biológica do solo (RINGROSE-VOASE, 1991). A permanência dos bioporos em áreas de cultivo é de grande relevância, pois a sua redução pode reduzir a condutividade hidráulica do solo (CURMI et al., 1994), reduzir o crescimento radicular e ocasionar queda de produtividade (VANDENBYGAART et al., 1999). Nos solos sob SPD, tais poros apresentam grande funcionalidade, pois favorecem o crescimento radicular apesar da maior RP da matriz do solo (GENRO JÚNIOR et al., 2004).

No SPD, o surgimento de bioporos estáveis com diâmetros variados é favorecido pela ausência de revolvimento do solo. Esses poros servem como vias alternativas para o crescimento de raízes (WILLIAMS e WEIL, 2004). Nessas condições, Ehlers et al. (1983) constataram que o crescimento

radicular com valores de RP superiores a 3,5MPa é favorecido pela presença da bioporosidade.

Além da presença dos bioporos, o acúmulo superficial dos resíduos vegetais no SPD contribui para o aumento da disponibilidade hídrica devido à redução da taxa de evaporação da superfície do solo (BOND e WILLIS, 1969). Assim, a cobertura vegetal pode contribuir com a permanência da água no solo dentro da faixa de potenciais que estabelece a disponibilidade de água às plantas.

Diversos indicadores têm sido utilizados para avaliar a qualidade física do solo, e entre esses se destaca o intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo. O IHO tem sido utilizado em estudos comparativos entre diferentes sistemas de uso e manejo em solos de diferentes texturas (TORMENA et al., 1999; ARAUJO et al., 2004; LAPEN, et al., 2004; LEÃO et al., 2004; COLLARES et al., 2006; KLEIN e CÂMARA, 2007). No entanto, sua utilização para o monitoramento contínuo das restrições físicas impostas às plantas durante seu ciclo de desenvolvimento ainda é pouco explorada em solos tropicais.

As propriedades físicas do solo integradas pelo IHO são expressas pela variação do θ em relação à Ds. Dessa forma, é possível controlar a QFS por meio do manejo do θ (BLAINSKI et al., 2009), com base na dinâmica do potencial de água no solo (Ψ), da RP e da PA. Neste sentido, a magnitude do IHO e a variação temporal do θ são considerados fatores que concorrem para a exposição das culturas às restrições físicas. Assim, sistemas de manejo que proporcionem redução do IHO associado a amplas variações de θ podem expor as culturas a uma maior frequência de estresses associados à reduzida taxa de difusão de gases sob elevados θ , ou à excessiva RP em função do progressivo secamento do solo (SILVA e KAY, 1997; BENGOUGH et al., 2006; KLEIN e CÂMARA, 2007).

A RP é a variável que mais restringe o desenvolvimento das culturas (TORMENA et al., 1999; LAPEN et al., 2004; COLLARES et al., 2006) e é bem conhecida a relação inversa entre RP e θ (ARAÚJO et al., 2004; TORMENA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2009). O manejo das áreas agrícolas, via de regra, acarreta alterações físicas no solo que afetam negativamente o desenvolvimento das culturas e a magnitude dessas alterações depende da

variabilidade temporal do θ . A frequência com que o θ ocorre dentro dos limites do IHO (F_{dentro}) é afetada diretamente pela variabilidade de θ e inversamente pela amplitude do IHO. O aumento da cobertura do solo pode contribuir para a diminuição das restrições físicas do solo em função da manutenção do θ nos limites do IHO, estabelecendo o controle da RP e da PA. Alterações na taxa de cobertura do solo afetam o θ (ZHAI et al., 1990) e conseqüentemente a F_{dentro} . Além disso, variações de D_s acarretam alterações na amplitude do IHO e na F_{dentro} . Dessa forma, práticas de manejo que ampliem a disponibilidade de θ podem compensar as alterações físicas deletérias oriundas dos sistemas de cultivo (SILVA e KAY, 1997).

Este trabalho foi desenvolvido para testar as hipóteses de que a redução IHO ocasiona diminuição da F_{dentro} ; e que o aumento da massa de resíduos sobre o solo proporciona uma maior ocorrência do θ dentro dos limites do IHO.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na unidade de difusão de tecnologias da cooperativa agroindustrial COCAMAR, localizada no município de Maringá, Paraná, (23°28'50"S e 52°00'08"W), com altitude média de 517 metros.

O clima da região foi classificado como subtropical úmido (Cfa), com precipitação média anual de 1.500mm (IAPAR, 2000). A estação chuvosa está compreendida entre os meses de outubro e março, porém, não há ocorrência de estação seca definida. A temperatura média do ar no mês mais quente é $\geq 22^{\circ}\text{C}$. A precipitação registrada na estação meteorológica pertencente à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada nas coordenadas 23°24'00"S e 51°55'00"W, durante o período experimental é mostrada na Figura 1.

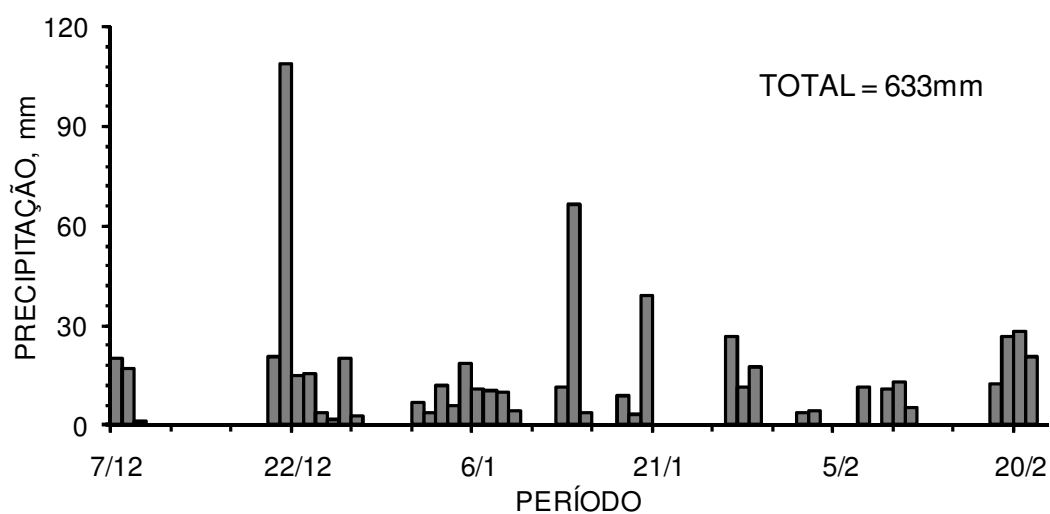


Figura 1 – Distribuição de precipitação registrada durante o período experimental (12/2006 a 02/2007).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (EMBRAPA, 2006). A análise granulométrica na camada de 0-0,20m, realizada conforme metodologia descrita em Embrapa (1997), indicou valores médios de 40g kg^{-1} de areia, 170g kg^{-1} de silte e 790g kg^{-1} de argila (classificação textural muito argilosa). O estudo do relevo local indicou declividade média de 5%, sendo classificado como suave ondulado (EMBRAPA, 1995).

3.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em área cultivada no SPD por cinco anos consecutivos (2002 a 2006). Durante esse período, foram utilizadas as seguintes culturas (verão/inverno): soja/trigo, milho/aveia, soja/trigo, soja/trigo e soja/aveia. Na última safra de inverno a área foi cultivada com a cultura de aveia (*Avena strigosa*) que foi dessecada na fase de antese plena com o objetivo de produzir resíduos vegetais para a cobertura do solo. Antes da instalação do experimento toda a cobertura vegetal remanescente do cultivo de aveia foi retirada manualmente e armazenada para ser posteriormente utilizada no experimento, deixando o solo completamente descoberto.

A área experimental foi dividida em cinco parcelas experimentais (Tratamentos) com dimensões de 7,2 x 22m cada (158m²). A massa de resíduos vegetais foi distribuída uniformemente sobre a superfície do solo, conforme tratamentos indicados no quadro 1.

Quadro 1 – Massa resíduos de aveia distribuída uniformemente sobre a superfície do solo em cada tratamento

Tratamento	Massa de resíduos ¹	
	Mg ha ⁻¹	Kg parcela ⁻¹
1	0	0
2	3	47,4
3	6	94,8
4	9	142,2
5	12	189,6

¹ matéria seca composta por restos culturais de aveia

Após a distribuição da massa de resíduos de aveia sobre a superfície do solo, procedeu-se a implantação da cultura da soja (*Glycine max* cv. Coodetec 214 RR), no dia 31 de outubro de 2006. A semeadura foi realizada com uma semeadora/adubadora equipada com discos de corte lisos com 16 polegadas de diâmetro, hastes escarificadoras com bicos sulcadores para incorporação de fertilizantes e discos duplos com diâmetro de 15 polegadas para distribuição das sementes.

Foram distribuídas 16 sementes por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,45m. A emergência das plântulas ocorreu no dia seis de

novembro de 2006 com um percentual médio de germinação de 88% (14 plantas por metro linear), proporcionando um estande com aproximadamente 311.000 plantas por hectare. A adubação de base foi calculada conforme análise de solo realizada previamente em amostra coletada na camada 0-0,20m de profundidade. A dosagem aplicada foi de 335kg ha⁻¹ do formulado 0-18-18, independente dos tratamentos. Os demais tratos culturais (controle de pragas, doenças e plantas daninhas) foram realizados conforme recomendações para a cultura da soja para o Estado do Paraná (EMBRAPA, 2007).

3.2.2 Avaliação temporal de θ

A avaliação temporal de θ iniciou-se no dia sete de dezembro de 2006 e estendeu-se até o dia 22 de fevereiro de 2007 (32° ao 109° dia após a emergência - DAE). Dessa forma, foi possível monitorar o θ desde a fase de crescimento vegetativo (V4) até a fase de maturação fisiológica (R7). Para a determinação do θ , foi utilizada a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), conforme Topp et al. (1980). A utilização da técnica da TDR deve ser realizada mediante a calibração prévia do equipamento, visto que diversas propriedades do solo influenciam nas estimativas de θ . Deste modo, a calibração das sondas de TDR foi realizada previamente conforme metodologia descrita em Trintinalha (2005).

Para as determinações de θ , foram instaladas, verticalmente, no solo sondas de TDR do tipo "*Buriable*" com duas hastes metálicas de 0,20m de comprimento e 3mm de diâmetro, possibilitando o monitoramento de θ na camada 0-0,20m.

Foram instaladas 12 sondas de TDR em cada tratamento, sendo seis nas linhas de cultivo e seis nas entrelinhas, totalizando 60 pontos de determinação distribuídos nos cinco tratamentos.

3.2.3 Amostragem de solo

Após a colheita da cultura, no dia dois de maio de 2007, procedeu-se a coleta das amostras indeformadas de solo para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) e curva de resistência do solo à penetração (CRP). As amostras de solo foram coletadas próximo às sondas de TDR e em duas profundidades, a primeira no centro na camada 0-0,10m e a segunda no centro da camada de 0,10-0,20m. Para isso, foram utilizados anéis metálicos com diâmetro e altura de 0,05m, totalizando 120 amostras indeformadas de solo.

Os anéis metálicos foram inseridos no solo por meio de um atuador hidráulico utilizando um trator agrícola como contrapeso (Figura 2). A fim de evitar alterações na estrutura do solo dentro das amostras, optou-se por não utilizar o amostrador de solo para a inserção dos anéis metálicos. Desta forma, os mesmos foram inseridos diretamente no solo, conforme demonstrado na Figura 2. Após a retirada das amostras, essas foram envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos e mantidas refrigeradas a 5°C até serem preparadas para análises.

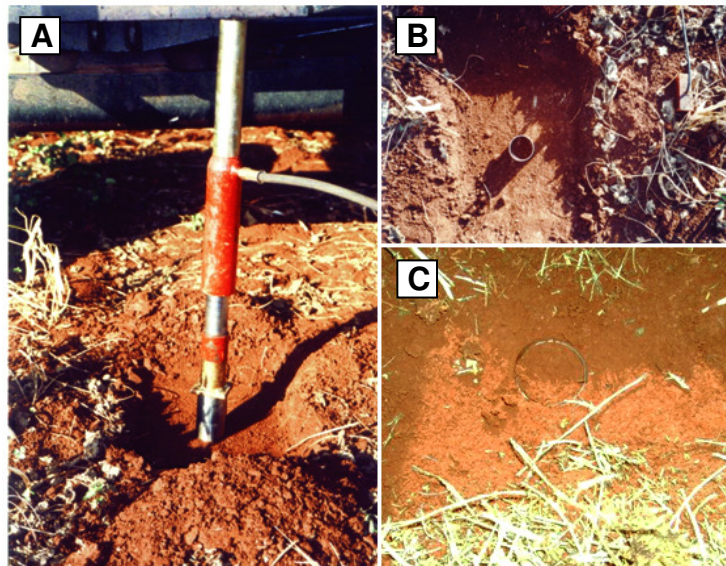


Figura 2 – Esquema de amostragem de solo utilizando um atuador hidráulico apoiado ao pára-choques de um trator agrícola. A) atuador apoiado diretamente sobre os anéis; B) anel metálico utilizado para a coleta de solo; C) anel metálico preenchido com solo.

3.2.4 Determinação das propriedades físicas do solo

No laboratório, a preparação das amostras para a determinação das propriedades físicas do solo consistiu, inicialmente, na retirada do excesso de material, deixando, dessa forma, o volume de solo correspondente ao volume dos anéis metálicos (aproximadamente 10^{-4}m^3). Após a preparação, as amostras foram saturadas mantendo-se uma lâmina de água de até dois terços da altura dos anéis. O período de saturação foi de aproximadamente 96 horas.

Entre as determinações físicas, a CRA e a CRP foram medidas dividindo-se o número total de amostras em 12 grupos, contendo 10 amostras por grupo (total 120 amostras). Cada grupo de amostras foi submetido a um Ψ , sendo que: -20, -40, -60, -80 e -100hPa (hPa é igual a centímetro de coluna de água), foram estabelecidos por meio da diferença de nível em uma coluna de água utilizando uma mesa de tensão (ROMANO et al., 2002); e -300, -500, -700, -1.000, -2.000, -4.000 e -15.000hPa, foram aplicados por meio de pressões em placas porosas (DANE e HOPMANS, 2002).

Após atingirem o equilíbrio em cada Ψ , as amostras foram pesadas, e em seguida, foi determinada a RP utilizando um penetrômetro eletrônico similar ao descrito por Tormena et al. (1999). A velocidade de penetração foi de $0,01\text{m min}^{-1}$, de modo que, em cada amostra, foram realizadas 257 leituras de RP até a profundidade de 0,043m. Um valor médio de RP foi calculado considerando as leituras entre 0,01 e 0,043m de profundidade. As demais leituras foram desconsideradas conforme Bradford (1986).

Em seguida, para a determinação do θ e da D_s , as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^\circ\text{C}$ por 24 horas, conforme metodologia descrita em Blake e Hartge (1986).

3.2.5 Modelagem da CRA

A CRA foi expressa pela relação entre Ψ e θ , tal relação foi descrita matematicamente por meio da função proposta por Ross et al. (1991), conforme equação 1:

$$\theta = a \psi^b \dots\dots\dots(1)$$

Em que θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ψ : potencial da água no solo (hPa); e a e b : são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

Para quantificação do IHO, foi incorporada a D_s na descrição matemática da CRA, de maneira que a equação 1 tomasse a forma da equação 2, similar à utilizada por diversos autores (SILVA et al., 1994; LEÃO et al., 2005; TORMENA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2009).

$$\theta = a \psi^b D_s^c \dots\dots\dots(2)$$

Em que D_s : densidade do solo ($Mg m^{-3}$); e a , b e c : são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

3.2.6 Modelagem da CRP

Os valores de RP foram ajustados ao modelo não linear proposto por Busscher (1990) e utilizado por diversos autores (SILVA et al., 1994; CAVALIERI et al., 2006; BLAINSKI et al., 2009), que define a RP como função de D_s e θ (equação 3).

$$RP = d \theta^e D_s^f \dots\dots\dots(3)$$

Em que RP: resistência do solo à penetração (MPa); e d , e , e f : são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 3.

Os ajustes das equações 2 e 3 foram feitos por meio do programa estatístico Statistica for Windows (STAT SOFT, 1993).

A partir da equação 3, foi determinado o θ em que a RP atinge o valor crítico. Neste estudo, foi adotado como valor crítico a $RP = 3,5MPa$, conforme sugerido por Ehlers et al. (1983) em função da presença da bioporosidade e utilizado por Tormena et al. (2007) em solo cultivado no SPD consolidado.

3.2.7 Determinação do IHO

O IHO foi determinado de acordo com os procedimentos descritos em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Os valores críticos de θ associados aos potenciais equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente foram o Ψ de -60hPa e -15.000hPa, obtidos por meio da equação 2 para cada amostra.

Também para cada amostra de solo, foi calculado o θ em que a PA atinge 10% (θ_{PA}), ou seja, θ em que o volume de poros livres de água corresponde a $0,1\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ (GRABLE e SIEMER, 1968). O θ_{PA} foi calculado de acordo com a equação 4.

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

Em que: θ_{PA} : é o θ associado à porosidade de aeração ($\text{m}^3\text{ m}^{-3}$); Ds : é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e Dp : é a densidade média de partículas ($2,85\text{Mg m}^{-3}$), determinada previamente para o solo da área experimental conforme metodologia descrita em Embrapa (1997).

Para a determinação do θ em que a RP atinge o valor considerado crítico de 3,5MPa (θ_{RP}) a equação 3 foi reescrita conforme a equação 5:

$$\theta_{RP} = \left[\left(\frac{RP}{d Ds^f} \right)^{\frac{1}{e}} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Desta forma, o IHO foi determinado por meio das equações 2, 4 e 5, tendo como limite superior o menor valor de entre θ na capacidade de campo (θ_{CC}) e θ_{PA} e, como limite inferior, o maior valor entre θ no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e θ_{RP} (SILVA et al., 1994).

3.2.8 Determinação da ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro})

Após a determinação do IHO, cada valor de θ medido no campo por meio da técnica da TDR foi comparado com os limites do IHO e calculado a frequência de dias (%) em que θ permaneceu dentro do IHO (F_{dentro}). A F_{dentro} foi determinada para diferentes valores de D_s , nas posições entrelinha e linha, e para as diferentes massas de resíduos de aveia dispostas sobre a superfície do solo. Os valores de D_s analisados foram definidos com base na distribuição normal acumulada de D_s , sendo utilizados os valores correspondentes a: 5; 10; 25; 50 e 75% da distribuição normal acumulada, e a D_s equivalente à D_{sc} (densidade do solo crítica – IHO=0).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva para as variáveis Ds, θ e RP é mostrada no Quadro 2. Os resultados demonstram uma faixa de valores medidos suficiente para a determinação da CRA e da CRP. A RP apresentou elevado coeficiente de variação (CV) em concordância com resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Imhoff et al. (2001), Tormena et al. (2007) e Blainski et al. (2009). O elevado CV para a variável RP pode ser atribuído à variação de Ds e θ entre as amostras de solo (TORMENA et al., 2007). A variação de Ds é resultante da heterogeneidade do solo, principalmente em função da coleta de amostras nas posições entrelinha e linha. Já a variação do θ foi atribuída aos potenciais aos quais as amostras de solo foram submetidas, compreendidos entre -20 e -15.000hPa.

A Ds, utilizada como variável independente para a determinação do IHO, apresentou o menor CV entre as variáveis estudadas (Quadro 2) e distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) em todos os tratamentos. Resultados similares foram obtidos por diversos autores. Nielsen et al. (1973) relataram CV = 10% para a Ds; Imhoff et al. (2000) obtiveram CV = 6,46%; Tormena et al. (1999) relatam CV = 5,22% e CV = 5,19% foi obtido por Klein e Câmara (2007).

Quadro 2 – Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (Ds - Mg m⁻³), teor de água no solo (θ - m³ m⁻³) e resistência do solo à penetração (RP - MPa). CV: coeficiente de variação (%)

Variável	Mínimo	Média	Máximo	Desvio-padrão	CV (%)
Ds	1,01	1,30	1,49	0,1156	8,86
θ	0,31	0,43	0,54	0,0539	12,54
RP	0,07	2,85	7,82	1,7733	62,15

Os resultados demonstraram que a Ds foi numericamente menor na posição linha e na camada 0-0,10m, em relação entrelinha (Figura 3), indicando o efeito benéfico residual da utilização de sulcadores para incorporação de fertilizantes no momento da semeadura. Dessa forma, a utilização destes mecanismos acoplados às semeadoras/adubadoras pode

contribuir para descompactação superficial do solo e melhoria da QFS, mesmo comprovado o efeito temporário desta prática (BUSSCHER et al., 2002).

Entretanto, os menores valores de D_s observados na camada 0-0,10m e na posição linha (Figura 3) podem favorecer o confinamento do sistema radicular das plantas próximo à superfície do solo (MULLER et al., 2001), principalmente devido ao aumento da D_s na camada subsuperficial (0,10-0,20m), tornando-as mais susceptíveis a déficits hídricos e com menor eficiência na absorção de nutrientes do solo (ROSOLEM et al., 1994).

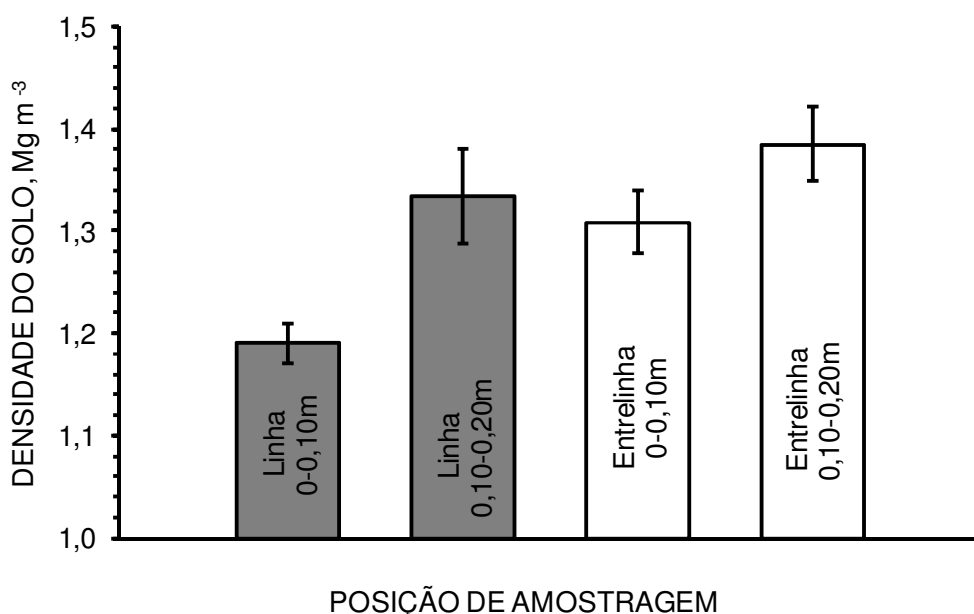


Figura 3 – Distribuição da densidade do solo nas posições de amostragem linha e entrelinha nas profundidades de 0-0,10m e 0,10-0,20m.

3.3.1 Análise da CRA e CRP

As equações 2 e 3 explicaram 80% da variabilidade de θ e 81% da variabilidade de RP, respectivamente (Quadro 3). O intervalo de confiança dos coeficientes não inclui o valor igual a zero, possibilitando afirmar que os modelos foram significativos (GLANTZ e SLINKER, 1990; IMHOFF et al., 2000) ao nível de significância de 1% de probabilidade. Os resíduos apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, indicando ajuste adequado aos dados experimentais. Resultados semelhantes estão descritos na literatura. Tormena et al. (2007) obtiveram R^2 acima de 0,90 para a mesma classe de

solo, utilizando os mesmos modelos. Blainski et al. (2009) obtiveram R^2 acima de 0,91 para Nitossolo Vermelho distroférico. Em um Latossolo Vermelho distrófico, Araujo et al. (2004) explicaram 78% da variação de θ e 84% da RP utilizando os modelos descritos nas equações 2 e 3.

Quadro 3 – Estimativas dos coeficientes de regressão para a CRA ($\theta = a \psi^b Ds^c$) e para CRP ($RP = d \theta^e Ds^f$). θ é teor 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)

Coeficiente	Estimativa	Erro-padrão	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
Curva de retenção de água no solo - CRA ($P > F = 0,001$; $R^2 = 0,80$)				
<i>a</i>	0,4671	0,012	0,456	0,503
<i>b</i>	-0,0466	0,003	-0,054	-0,042
<i>c</i>	0,6945	0,062	0,507	0,752
Curva de resistência do solo à penetração - CRP ($P > F = 0,001$; $R^2 = 0,81$)				
<i>d</i>	0,0036	0,001	0,001	0,006
<i>e</i>	-4,6601	0,345	-5,661	-4,294
<i>f</i>	9,4241	0,507	7,791	9,799

A retenção de água no solo, expressa pelo modelo ajustado aos dados experimentais, demonstra que o θ foi diretamente influenciado pela Ds , cujos resultados são similares aos verificados por Betz et al. (1998), Tormena et al. (1999), Araujo et al. (2004) e Blainski et al. (2009). Para elevados potenciais matriciais, esse comportamento deve-se à redistribuição do tamanho de poros com aumento na proporção de poros de menor diâmetro, que torna o solo mais eficiente no armazenamento de água nessas condições. Com o secamento do solo, a maior massa de sólidos por unidade de área, expressa pelo aumento de Ds , contribui para o aumento do θ em condições próximas ao ponto de murcha permanente (BLAINSKI et al., 2009).

A RP variou diretamente com Ds e inversamente com θ , em concordância com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Imhoff et al. (2001) e Leão et al. (2004). Segundo Vepraskas (1984), o aumento da RP com a Ds é atribuído à compactação do solo que resulta em

uma maior fricção entre as partículas de solo. No caso da redução da RP com o aumento do θ , deve-se ao efeito lubrificante de água, que reduz a coesão entre as partículas na matriz do solo.

3.3.2 Intervalo hídrico ótimo

Os teores de água associados aos limites críticos do IHO são mostrados na Figura 4. O θ associado aos potenciais matriciais de -60hPa (θ_{CC}) e -15.000hPa (θ_{PMP}) aumentaram com a Ds (Figura 4). Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Imhoff et al. (2001), Collares et al. (2006) e Blainski et al. (2009). Em Latossolos, o incremento de Ds altera a porosidade entre os agregados, diminuindo o diâmetro dos macroporos, tornando-os mais eficientes na retenção de água em potenciais elevados ou próximos à capacidade de campo (TORMENA et al., 1998). Em condições de baixa disponibilidade hídrica, próximo ao ponto de murcha permanente, a relação direta entre o θ e a Ds pode ser atribuída à maior massa de partículas com elevada superfície de adsorção (TORMENA et al., 2007).

A mesma relação direta foi observada entre a Ds e o θ em que a RP atinge o valor crítico adotado (θ_{RP}) (Figura 4). Entretanto, essa relação pode ser associada à fricção interpartículas da matriz do solo (VEPRASKAS, 1984). Neste caso, há a necessidade do aumento do θ para a manutenção da RP abaixo do limite crítico. O efeito lubrificante proporcionado pela água no solo ocasiona uma redução da coesão entre as partículas do solo e conseqüentemente redução da RP (TORMENA et al., 2007), que facilita o crescimento radicular das plantas.

No caso da θ_{PA} , este apresentou uma relação inversa com a Ds (Figura 4), assim como observado por diversos autores (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004). Isto indica a necessidade de diminuição de θ para adequada difusão de gases, que é resultante da redução dos poros de maior diâmetro.

O limite inferior do IHO foi determinado pelo θ_{RP} para $Ds > 1,22Mg\ m^{-3}$. A partir deste valor de Ds, o IHO torna-se menor que o conteúdo de água

disponível ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$), caracterizando o início do processo de degradação física do solo (Figura 4).

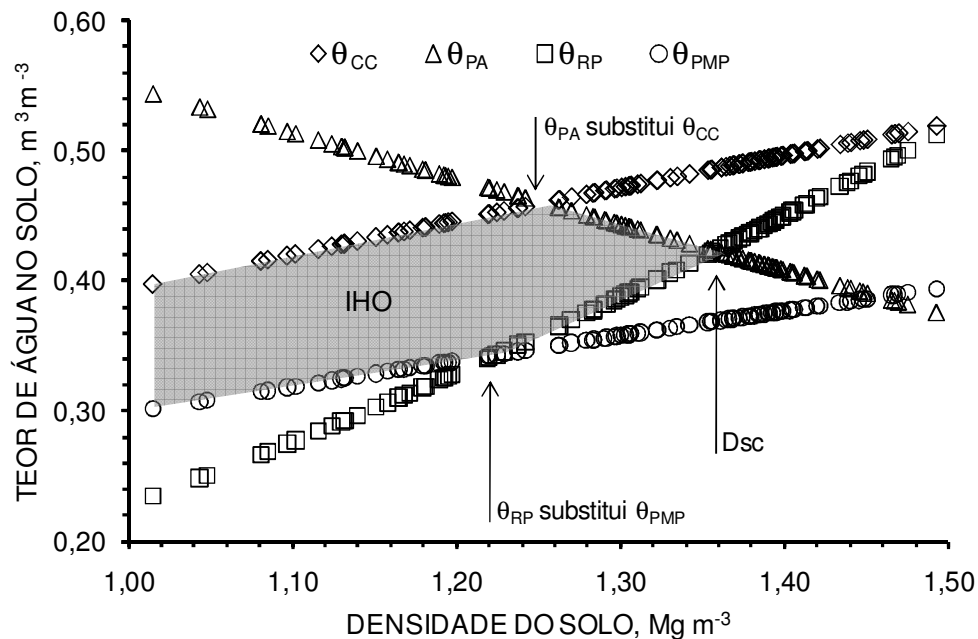


Figura 4 – Variação do teor de água com a densidade do solo em relação à capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração (θ_{RP}). A área hachurada indica o IHO.

O limite superior do IHO foi determinado pelo θ_{CC} para $D_s < 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$. A partir desta D_s , o limite superior do IHO foi determinado por θ_{PA} (Figura 4). Resultados semelhantes foram verificados por Silva et al. (1994), apesar das diferenças nos valores de D_s devido às distintas granulometrias dos solos estudados. A partir dos valores de D_s citados anteriormente, o IHO reduz até ficar nulo. A D_s em que o IHO = 0 foi definida como a densidade do solo crítica - D_{sc} (SILVA e KAY, 1997). Neste trabalho, a D_{sc} foi de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, a partir da qual as condições físicas do solo são altamente restritivas ao desenvolvimento vegetal, seja pela reduzida PA ou pela elevada RP.

O θ_{RP} foi a variável que mais contribuiu para a redução do IHO com o aumento da D_s , em concordância com Tormena et al. (1999), Collares et al. (2006) e Blainski et al. (2009). Para $D_s > 1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ medidas que promovam a redução da RP deveriam ser implementadas a fim de ampliar o IHO. Com esse objetivo, tanto práticas mecânicas quanto a adoção de sistemas de manejo que

proporcionem um incremento no θ poderiam ser adotadas a fim de manter a RP abaixo do limite crítico estabelecido. Nestes casos, a utilização de mecanismos sulcadores acoplados às semeadoras/adubadoras constitui uma alternativa eficiente para redução de D_s na camada superficial do solo, conforme mostrado na Figura 3, em função dos menores valores de D_s nesta profundidade. Essa tecnologia possibilita a descompactação do solo sem que haja a incorporação dos restos culturais, visto que a manutenção dos restos culturais na superfície do solo desempenha um papel importante no aumento do θ disponível, uma vez que além de reduzir a taxa de evaporação, atua como reservatório temporário de água das chuvas, que posteriormente é direcionada à superfície do solo.

A frequência de RP acima do valor crítico adotado (3,5MPa) é mostrada na Figura 5. Na linha de cultivo, para a $D_s = 1,06\text{Mg m}^{-3}$, não foi constatada a ocorrência de $RP > 3,5\text{MPa}$ independente da massa de cobertura do solo. Para $D_s = 1,26\text{Mg m}^{-3}$, somente para a massa de 12Mg ha^{-1} foi constatada $RP < 3,5\text{MPa}$, sugerindo condições físicas do solo deletérias as plantas. Na entrelinha, para as densidades do solo analisadas, a frequência de ocorrência de $RP > 3,5\text{MPa}$, foi maior do que na linha de cultivo. Entretanto, independente da posição, com o aumento da cobertura do solo foi constatado redução da ocorrência de $RP > 3,5\text{MPa}$.

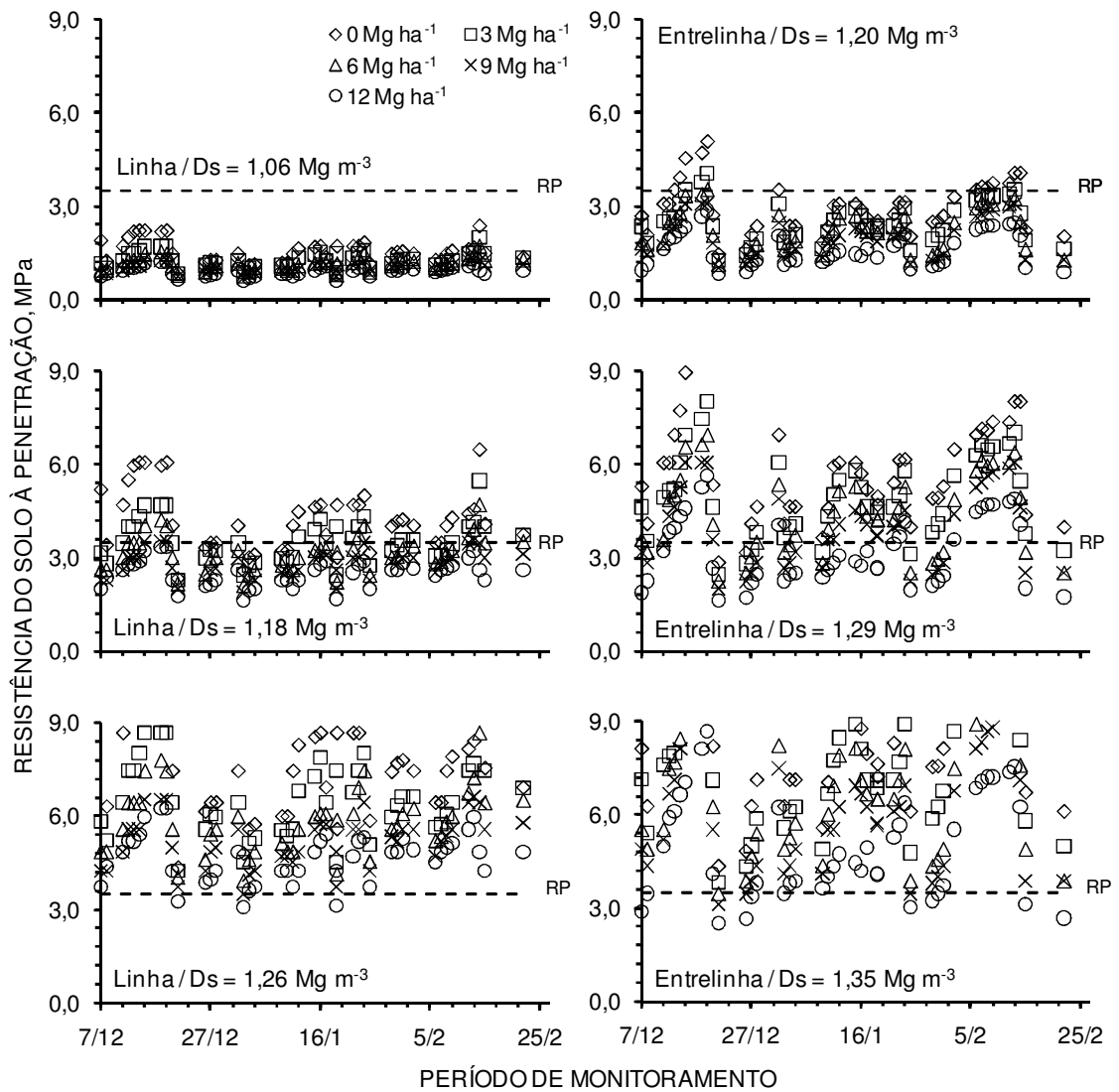


Figura 5 – Variação da resistência do solo à penetração (RP) nas posições linha e entrelinha, para as densidades equivalentes à 5; 25 e 50% da distribuição acumulada de Ds. As linhas horizontais pontilhadas indicam a $RP = 3,5\text{MPa}$.

3.3.3 Frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro})

A influência da massa de resíduos sobre solo e da posição de amostragem sobre a F_{dentro} pode ser observada no Quadro 4. O efeito benéfico ocasionado pela manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo ficou evidente, uma vez que a F_{dentro} aumentou com o incremento da massa de resíduos de aveia sobre a superfície do solo para diferentes Ds em cada posição de amostragem.

Quadro 4 – Análise da frequência de θ dentro dos limites do intervalo hídrico ótimo (F_{dentro}) com base no efeito da cobertura do solo e posição de amostragem para diferentes valores de D_s

Dist. _{acum} (%)	D_s (Mg m ⁻³)	IHO (m ³ m ⁻³)	F_{dentro} (%)				
			Massa de resíduos (Mg ha ⁻¹)				
			0	3	6	9	12
----- Entrelinha -----							
5	1,20	0,11	61,4	79,5	86,4	97,7	100
10	1,24	0,10	45,5	63,6	72,7	81,8	97,7
25	1,29	0,07	4,5	15,9	36,4	45,5	61,4
50	1,35	0,01	0	0	2,3	6,8	11,4
53 _(Dsc)	1,36	0	0	0	0	0	0
75	1,41	0	0	0	0	0	0
----- Linha -----							
5	1,06	0,10	50	81,8	95,5	100	100
10	1,10	0,10	31,8	54,5	79,5	90,9	100
25	1,18	0,11	9,1	25	45,5	77,3	90,9
50	1,26	0,09	0	0	0	6,8	18,2
75	1,34	0,02	0	0	0	0	0
79 _(Dsc)	1,36	0	0	0	0	0	0

Dist._{acum}: distribuição normal acumulada de D_s .

Para a $D_s = 1,20\text{Mg m}^{-3}$, no tratamento sem cobertura do solo, na posição entrelinha (Quadro 4), a F_{dentro} foi de 61,4%, ou seja, o θ permaneceu dentro dos limites do IHO em 61,4% do período avaliado. Para a mesma D_s ($1,20\text{Mg m}^{-3}$) com 12Mg ha^{-1} de matéria seca sobre a superfície do solo, a F_{dentro} foi de 100% (Quadro 4). Na posição linha, para a $D_s = 1,18\text{Mg m}^{-3}$, o efeito da cobertura do solo sobre o θ proporcionou valores de F_{dentro} de 9,1%; 25%; 45,5%; 77,3% e 90,9%, respectivamente, para as massas de cobertura do solo de 0; 3; 6; 9 e 12Mg ha^{-1} (Quadro 4). Entretanto, independentemente da posição de amostragem, para D_s próxima a D_{sc} , o efeito benéfico oriundo do aumento de θ não se traduziu em aumento da F_{dentro} , visto que nessas condições a amplitude do IHO é extremamente reduzida ou nula.

A distribuição normal acumulada de D_s (Figura 6) mostra que, apesar da similaridade dos valores citados anteriormente na entrelinha e linha de cultivo, estes correspondem a 5% e 25%, respectivamente, da distribuição acumulada de valores, ou seja, na entrelinha, somente 5% dos valores de D_s são menores ou iguais a $1,20\text{Mg m}^{-3}$, enquanto que na linha de cultivo, 25% da D_s é igual ou inferior a $1,18\text{Mg m}^{-3}$. Tais resultados sugerem que, independente

da massa de resíduos depositada sobre a superfície do solo, a F_{dentro} foi maior na linha de cultivo, devido aos menores valores de D_s , mesmo com os menores valores de θ medidos nesta posição, teoricamente ocasionados pela maior concentração de raízes. Resultados similares foram obtidos por Collares et al. (2006) que constataram uma maior vulnerabilidade à redução de produtividade das culturas em função da redução da amplitude do IHO, ocasionado pela maior frequência de valores de D_s superiores a $1,75\text{Mg m}^{-3}$ (D_{sc}).

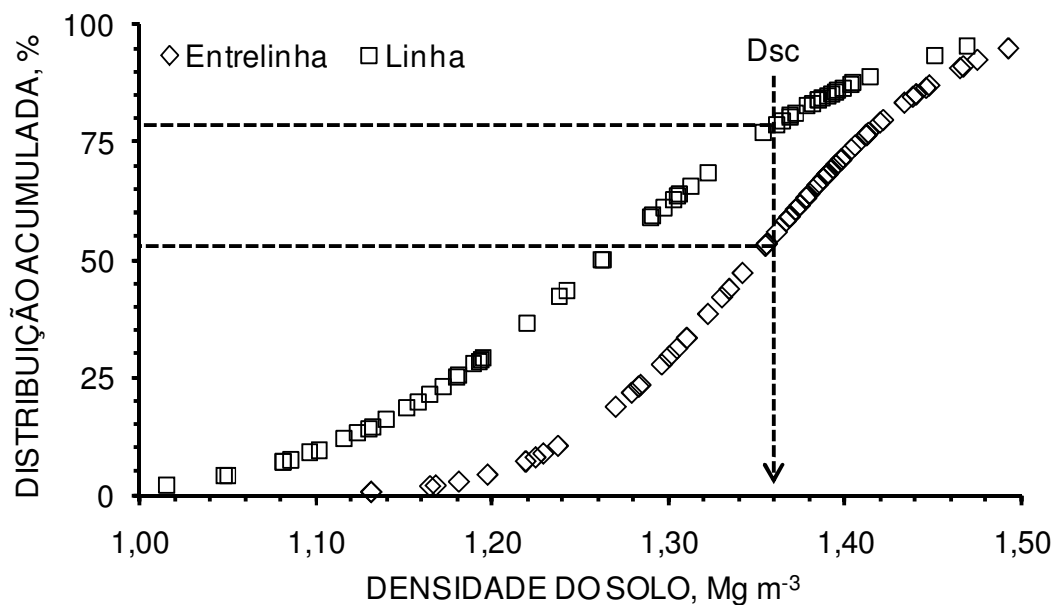


Figura 6 – Distribuição normal acumulada para a densidade do solo (D_s) nas posições de amostragem entrelinha e linha. A linha vertical pontilhada indica a densidade do solo crítica (D_{sc}) e as linhas pontilhadas horizontais representam a distribuição acumulada correspondente à D_{sc} em cada posição de amostragem.

A variação temporal do θ para as diferentes massas de resíduos na posição entrelinha ($D_s = 1,20\text{Mg m}^{-3}$) e na posição linha ($D_s = 1,18\text{Mg m}^{-3}$) é mostrada na Figura 7. Na linha de cultivo, os valores de θ foram menores em relação à entrelinha. Entretanto, independente da posição de amostragem, o aumento da massa de resíduos sobre o solo se traduziu em incremento do θ , assim como sugerido por Sidiras et al. (1984).

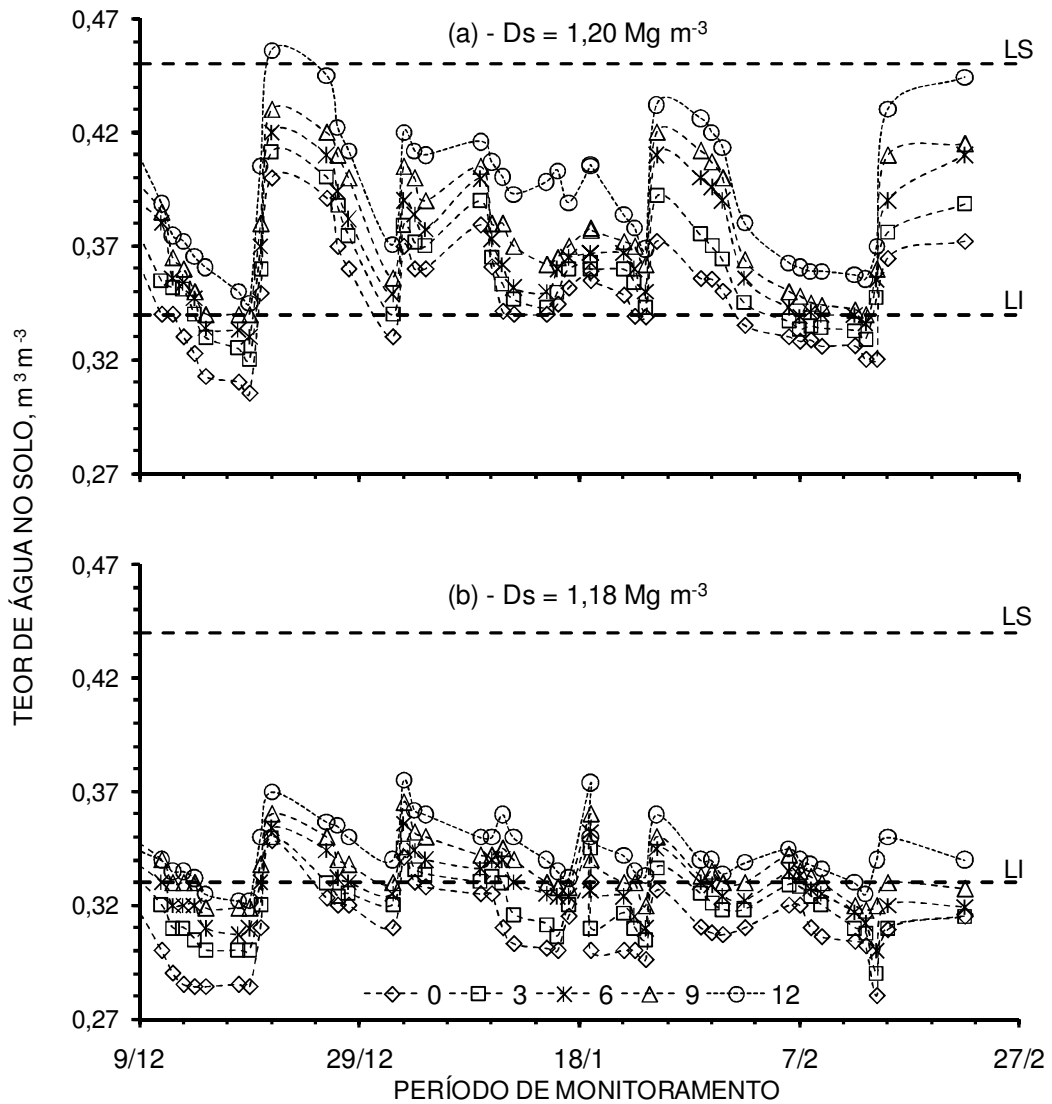


Figura 7 – Distribuição temporal do θ médio nas posições: (a) entrelinha e (b) linha para diferentes taxas de cobertura do solo. As linhas horizontais representam os limites superior (LS) e inferior (LI) do IHO.

A aeração do solo pouco influenciou na F_{dentro} . Somente na posição entrelinha, para a massa de resíduos de 12 Mg ha^{-1} e $D_s = 1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ foi constatada a ocorrência de $\theta > \theta_{PA}$ (Figura 8). Resultados similares foram obtidos por Blainski et al. (2008), que, contudo, constataram que a aeração do solo não prejudicou o desenvolvimento vegetal em Latossolo Vermelho distrófico.

A variação temporal de θ , em relação ao IHO para diferentes D_s e coberturas do solo, na entrelinha, é mostrada na figura 8. Os resultados

indicaram que com o aumento da D_s ocorreu redução da amplitude do IHO, sugerindo diminuição da F_{dentro} , em concordância com os resultados obtido por Silva e Kay (1997), Collares et al. (2006), Klein e Câmara (2007) e Kay (1990), este autor sugere uma relação inversa entre IHO e a probabilidade de ocorrência de θ fora dos limites do IHO (p_{out}).

A massa de resíduos de aveia disposta sobre a superfície do solo contribuiu para aumento da F_{dentro} para todos os valores de D_s , na entrelinha (Figura 8) e na linha de cultivo (Figura 9). Essa relação pode ser corroborada pelo aumento do θ , oriundo da redução da taxa de evaporação do solo ocasionado pela reflexão da energia radiante (BAVER et al., 1972), aumento da rugosidade do solo, aumento da taxa de infiltração de água e proteção contra o selamento superficial proporcionado pela cobertura do solo (DULEY, 1939).

Para a mesma D_s , a F_{dentro} aumentou com o aumento da cobertura do solo nas duas posições de amostragem (Figuras 8 e 9). Entretanto, para D_s próximas a D_{sc} , o aumento do θ não se traduziu em aumento da F_{dentro} em função da reduzida amplitude do IHO. Portanto, a relação direta entre F_{dentro} e cobertura do solo é condicionada à D_s e conseqüentemente à amplitude do IHO, assim como sugerido por Kay (1990).

Com a diminuição do IHO, ocorreu, independente da cobertura do solo, uma diminuição da F_{dentro} , ou seja, aumenta a probabilidade das plantas sofrerem estresse por elevada RP. Na entrelinha, para $D_s = 1,20\text{Mg m}^{-3}$ a F_{dentro} foi de 100% para a cobertura do solo superior a 9Mg ha^{-1} de resíduos de aveia dispostos sobre a superfície do solo. Com o aumento da D_s para $1,35\text{Mg ha}^{-1}$, para as coberturas de 0; 3 e 6Mg ha^{-1} a F_{dentro} foi igual zero, neste caso, $\theta < \theta_{RP}$ (Figura 8). Para a cobertura de 9Mg ha^{-1} , a F_{dentro} foi de 6,8% (Quadro 4), enquanto que para a cobertura de 12Mg ha^{-1} , a F_{dentro} foi de 11,4% e com restrições ocasionadas pela baixa taxa de difusão de oxigênio no solo, além da elevada RP (Figura 8).

Na linha de cultivo, a D_s foi inferior a entrelinha, entretanto, foram registrados os menores valores de θ . Dessa forma, mesmo com a maior amplitude do IHO, ocorreram, em grande parte do tempo, valores de θ abaixo do θ_{RP} , principalmente para as menores coberturas do solo (Figura 9). Para a $D_s = 1,06\text{Mg ha}^{-1}$, a F_{dentro} foi superior a 80% para as coberturas maiores de

3Mg ha⁻¹. Entretanto, para a Ds de 1,26Mg ha⁻¹, a F_{dentro} não foi superior a 18,2% para a cobertura do solo equivalente a 12Mg ha⁻¹ de resíduos de aveia sobre a superfície do solo (Quadro 4), mesmo com o IHO equivalente a 0,09m³ m⁻³.

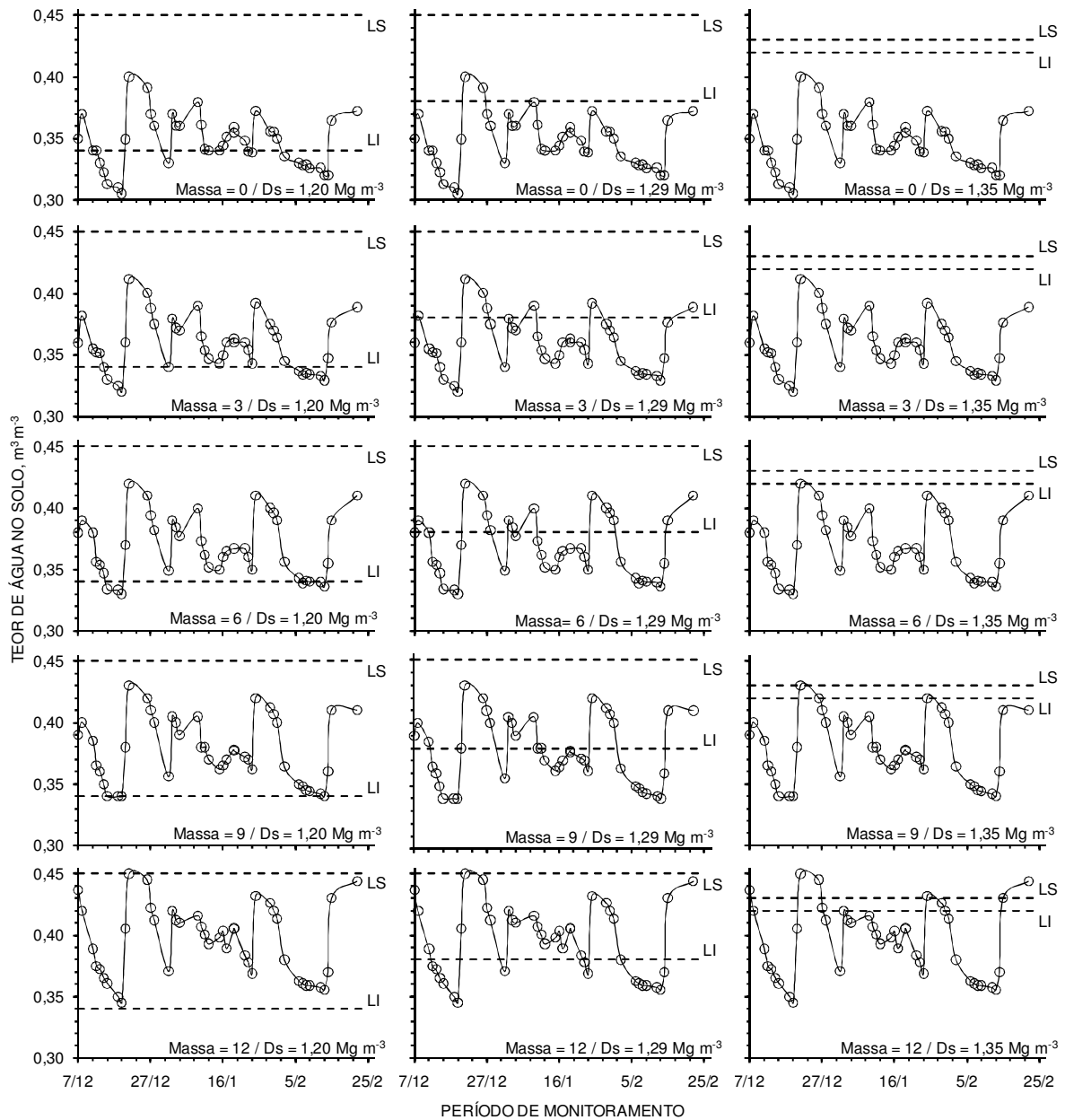


Figura 8 – Variação temporal do θ , na ENTRELINHA, em relação aos limites críticos IHO, para o período monitorado, para as densidades do solo de 1,20; 1,29 e 1,35Mg m⁻³. LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO.

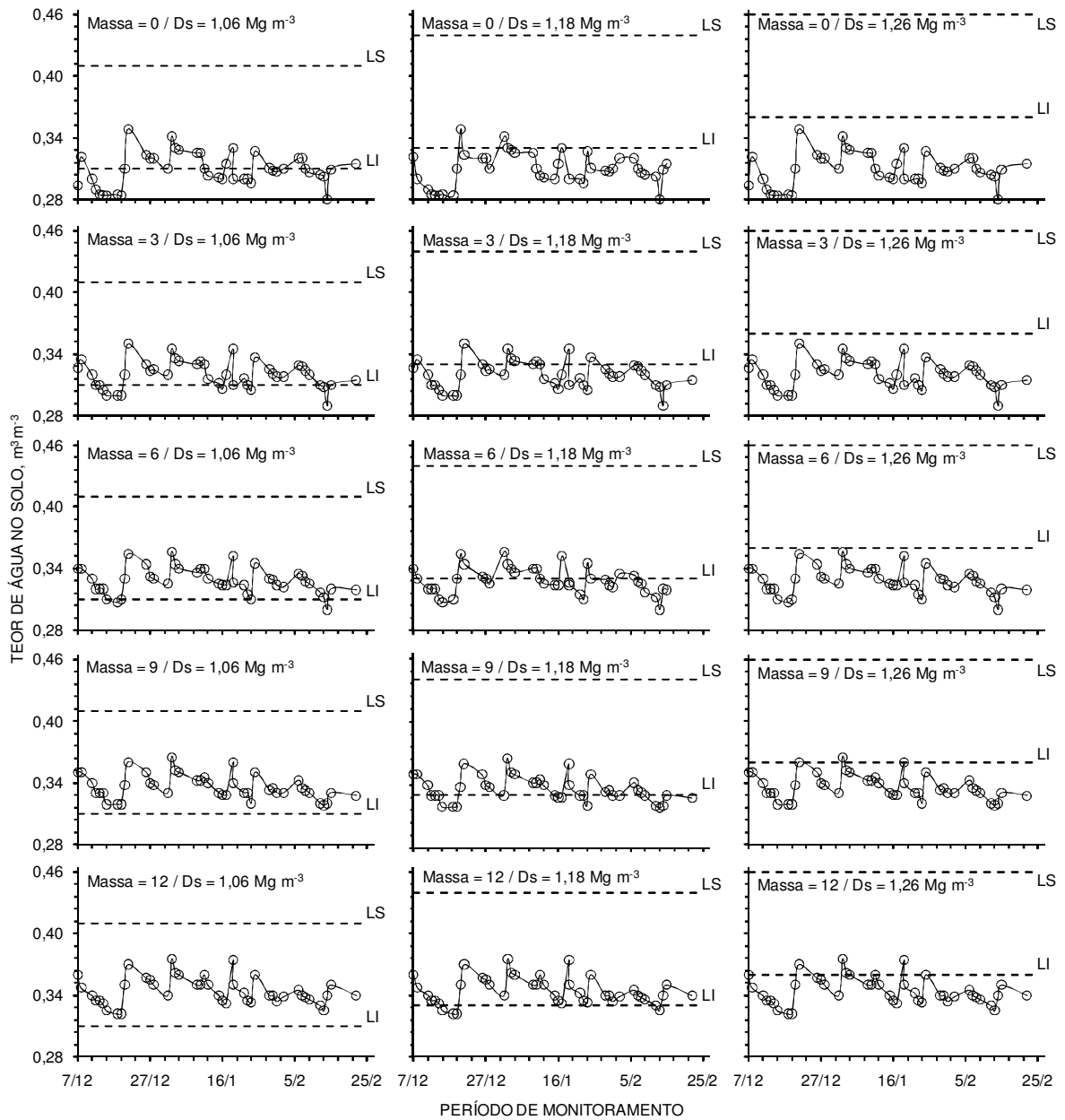


Figura 9 – Variação temporal do θ , na LINHA, em relação aos limites críticos IHO, para o período monitorado, para as densidades do solo de 1,06; 1,18 e 1,26 Mg m^{-3} . LS – limite superior e LI – limite inferior do IHO.

3.4 CONCLUSÕES

1. As hipóteses deste trabalho foram corroboradas, ou seja, a redução da amplitude do IHO proporcionou redução na frequência com que o teor de água no solo permaneceu dentro do IHO (F_{dentro}), assim como, o aumento da massa de resíduos de aveia dispostos sobre o solo acarretou aumento da F_{dentro} ;

2. Para a massa de resíduos de aveia disposta sobre o solo equivalente a 12Mg ha^{-1} foram registrados os maiores valores de F_{dentro} , independentemente da posição de amostragem;

3. Para uma mesma condição de D_s , a F_{dentro} foi maior na entrelinha do que na linha de cultivo, entretanto, a distribuição acumulada de D_s indica uma maior ocorrência de F_{dentro} na posição linha, devido as menores densidades do solo registradas nesta posição.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil structure: evaluation and agricultural significance. In: BAVAR, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4.ed. New York : J. Wiley, 1972. p.178-223.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.57, n.2, p.437-447, 2006.

BERTOL, I; BEUTLER, J.F; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

BERTOL, I; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após a colheita de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.409-418, 1997.

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1384-1393, 1998.

BLAINSKI, E.; 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, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.; 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.273-281, 2009.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, Madison, v.1, p.363-375, 1986.

BLEVINS, R.L.; COOK, D.; PHILLIPS, S.H.; PHILLIPS, R.E. Influence of no-tillage on soil moisture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n.3, p.593-596, 1971.

BOIZARD, H.; RICHARD, G.; ROGER-ESTRADE, J.; DURR, C.; BOIFFIN, J. Cumulative effects of cropping system on the structure of the tilled layer in Northern France. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.64, n.1, p.149-164, 2002.

BOND, J.J.; WILLIS, W.O. Soil water evaporation: Surface residue rate and placement effects. **Soil Science American Proceedings**, Madison, v.33, n.3, p.445-448, 1969.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, Madison, v.1, p.463-478, 1986.

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

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recompaction 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.

CAVALIERI, K.M.; 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, n.30, v.1, p.137-147, 2006.

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

CURMI, P.; KERTTZMAN, F.F.; QUEIROZ NETO, J.P. **Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil)**. In: RINGROSE-VOASE A.J.; HUMPHERYS G.S. eds. Soil micromorphology: studies in management and genesis. In: INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 9, 1994, Townsville, 1994. Proceedings. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.596-579.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.4, p.688-690, 2002.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.703-709, 1999.

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.67, n.1, p.41-64, 2002.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.199-238, 1988.

DULEY, F. L. Surface factor affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.4, n.1, p.60-64, 1939.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras**. 3.ed. Rio de Janeiro, 1995. 65 p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Paraná 2007**. Londrina, 2007. 217p.

GANTZER, C.J.; BLAKE, G.R. Physical characteristics of the Le Seur clay loam soil following no-till and conventional tillage. **Agronomy Journal**, Madison, v.70, n. 4, p.853-857, 1978.

GENRO JÚNIOR, 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.

GLANTZ, S.A.; SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw-Hill, 1990. 770p.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.32, n.2, p.180-186, 1968.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

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

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD-ROM.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v.12, n.1, p.1-51, 1990.

KLEIN, V.A.; CÂMARA, 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.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, 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 soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.435-443, 2003.

MULLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.531-538, 2001.

NEGI, S.C.; RAGHAVAN, G.S.V.; TAYLOR, F. Hydraulic characteristics of conventional and zero-tillage field plots. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.2, n.1, p.281-292, 1981.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil water properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.42, n.7, p.251-260, 1973.

REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular do feijoeiro

em quatro sistemas de manejos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.3, p.310-319, 2009.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. **Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Resumos... Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.1 (CD-ROM).

RICHARD, G.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J.; BOIFFIN, J.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silt soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxônia, v.52, .1, p.49-58, 2001.

RINGROSE-VOASE, A.J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, Ottawa, v.29, n.6, p.777-813, 1991.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.4, p.692-698, 2002.

ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, n.3, p.491-497, 1994.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.427-436, 2000.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; HEINZMANN, F. Influência da adubação verde de inverno e seu efeito residual sobre o rendimento nas culturas de verão, em Latossolo Roxo distrófico. **Plantio Direto**, Ponta Grossa, v.2, n.9, p.4-5, 1984.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.884-888, 1997.

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

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.9-15, 2002.

STAT SOFT. **Statistica for Windows**. [Eletronic manual index], v.4.3, Tulsa, 1993.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, n.3, p.574-582, 1980.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, 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.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo potencial de água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.86-292, 1999.

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

TRINTINALHA, M.A. **Utilização da TDR para avaliação da distribuição espacial e estabilidade temporal do armazenamento de água em um Nitossolo Vermelho distroférico**. 2005. 110p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

VANDENBYGAART, A.J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A.D.; MILLER, J.J. Tillage system effects on near-surface soil morphology: Observations from the landscape to microscale in silt loam soils of southwestern Ontario. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.51, n.1, p.139-149, 1999.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.6, p.1220-1225, 1984.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.4, p.1403-1409, 2004.

ZHAI, R.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Tillage effects on the spatial and temporal variation of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, n.1, p.186-192, 1990.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)