

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E A PRODUÇÃO DE SOJA E ARROZ EM DOIS LATOSSOLOS

Amauri Nelson Beutler¹; José Frederico Centurion¹⁻²; Álvaro Pires da Silva²

¹Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, Viaamaurib@yahoo.com.br

²Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

1 RESUMO

Os objetivos deste estudo foram determinar o IHO em Latossolo Vermelho textura média (LVd) e argiloso (LVef) para estabelecer sua relação funcional com a produção de grãos de soja e arroz. Foram coletadas amostras de solo na camada de 0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m de abertura de malha. Para a determinação do IHO, estabeleceram-se, em vasos (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), três níveis de compactação do solo. Foram coletadas 45 amostras indeformadas para determinação da curva de resistência do solo à penetração, da curva de retenção de água, da densidade do solo e do IHO. Para o estudo de crescimento das plantas, estabeleceu-se um experimento com quatro níveis de compactação do solo em vasos, nos quais foram determinados os valores de resistência do solo à penetração e de densidade do solo limitantes à produção de soja e arroz. Em relação ao IHO, os resultados indicaram que a amplitude foi maior no LVef comparado ao LVd. A densidade do solo crítica foi alterada com o valor de resistência à penetração limitante inserido no modelo do IHO, sendo, em geral, superior a densidade limitante a produção de soja e arroz, no LVd, e inferior no LVef.

UNITERMOS: conteúdo de água, compactação do solo, *Glycine max*, *Oryza sativa*.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. LEAST LIMITING WATER RANGE AND YIELD OF SOYBEAN AND RICE IN TWO OXISSOLS

2 ABSTRACT

The objectives of this study were determine the Least limiting water range (LLWR) of a Haplustox medium texture soil(LVd) and Eutruxtox clayey soil(LVef) and to establish its functional relation with the yield of soybean and rice. Soil samples were collected at the depth of 0-0.20 m and then sieved in 0.004 m mesh sieve. Three levels of soil compaction in pots (0.20 m high and 0.25 m diameter) were established to determine LLWR. 45 undisturbed samples were collected to determine soil resistance to root penetration and soil water retention curve, bulk density and the LLWR. For the study of plant growth, an experiment with four levels of soil compaction was established in 0.20 m high x 0.25 m diameter pots; then the values for resistance to penetration and critical bulk density to

Recebido em 10/01/2004 e aprovado para publicação em 18/05/2004

1 Parte da Tese de Doutorado. Projeto financiado pela FAPESP

2 Bolsista CNPq

DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2004v09n2p181-192>

yield of soybean and rice were determined. In relation to the LLWR, the results indicated that the amplitude was higher in LVef compared to the LVd. The critical bulk density was modified with the limit value for soil resistance to penetration inserted in the model of the LLWR, and was, in general, superior to the limit bulk density to yield of soybean and rice in Haplustox whereas it was inferior in Eutruxtox.

KEYWORDS: Water content, soil compaction, *Glycine max*, *Oryza sativa*

3 INTRODUÇÃO

A exploração de grande diversidade de áreas para fins agrícolas implica na utilização de solos com comportamentos físicos distintos, que devem ser considerados quando da tomada de decisões sobre o manejo. É consenso que a compactação do solo, principalmente em sistemas de plantio direto (SPD), é fator limitante a continuidade de uso do sistema. No entanto, a área cultivada com o SPD cresce desde a década de setenta, principalmente na região sul e no cerrado brasileiro. A compactação do solo altera a infiltração e redistribuição de água, a difusão de gases, a disponibilidade de oxigênio no solo, reduz o crescimento das raízes podendo diminuir a eficiência de utilização da água e dos nutrientes pelas plantas (HAKANSSON & VOORHEES, 1998).

Vários atributos físicos do solo são utilizados para avaliar o estado de compactação do solo, entre estes, a densidade e a porosidade do solo. Entretanto, na maioria dos estudos, não tem sido possível estabelecer relações funcionais destes atributos com o crescimento e a produção das culturas. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998), foi originalmente proposto por Letey (1985) e quantificado pela primeira vez por Silva et al. (1994). O IHO, um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas, é definido por uma faixa de conteúdo de água do solo no qual as limitações ao crescimento das plantas em função da disponibilidade de água, da aeração e da resistência do solo à penetração são mínimas. O limite superior do IHO é o menor valor entre o conteúdo de água retida na

tensão de 0,01 MPa, equivalente a capacidade de campo (REICHARDT, 1988) e o conteúdo de água na qual a porosidade de aeração é de 10% (GUPTA & ALLMARAS, 1987); o limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água retida na tensão de 1,5 MPa equivalente ao ponto de murcha permanente (SAVAGE et al., 1996) e a resistência à penetração limitante de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994).

Dentro destes limites estabelecidos para o IHO, o crescimento das plantas é menos restritivo e o grau dessas limitações aumenta de dentro para fora desses limites (SILVA et al., 1994). Silva & Kay (1996) verificaram que a ocorrência de conteúdo de água fora dos limites do IHO restringiu o crescimento das plantas de milho e que o crescimento das plantas foi positivamente correlacionado com o IHO. Dos atributos que integram o IHO, a resistência do solo à penetração é o fator que mais freqüentemente reduz o IHO (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001), e seus valores oscilam com cultivares, culturas e com a condição estrutural do solo (HAMBLIM, 1985). Além disso, o valor de resistência à penetração de 2,0 MPa aceito como limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea (TORMENA et al., 1998) tem sido questionado para as diferentes culturas, sistemas de manejo e solos tropicais, necessitando de mais estudos específicos. Neste sentido, são escassos os estudos que relacionam o IHO com a produção das culturas, em especial nos solos tropicais do Brasil.

A compactação do solo modifica o comportamento físico do solo em função da mudança na distribuição dos poros do solo. O IHO diminui com o aumento da densidade do solo (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2000 e 2001; SILVA et al., 2002) podendo atingir o

valor zero quando os limites superior e inferior são numericamente iguais. Nesta condição, a densidade do solo (D_s) é denominada de densidade do solo crítica (D_{sc}) ao desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001). Tanto o IHO como a D_{sc} variam com a textura e com a condição estrutural do solo (SILVA et al., 1994) e, tem sido constatado que em solos argilosos é grande a frequência de valores do IHO muito baixos e/ou até nulos (TOPP et al., 1994). Os resultados obtidos por Silva et al. (2002), estudando o IHO em três solos, indicam que a D_{sc} diminui do solo mais arenoso para o mais argiloso. Sugere-se que, quando a D_{sc} é atingida, são necessárias medidas biológicas ou mecânicas para recuperação da estrutura do solo, ou seja, para realizar a descompactação do solo.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi de determinar o IHO e a D_{sc} de um Latossolo Vermelho de textura média e de um Latossolo Vermelho argiloso e estabelecer as relações destes com a produção de grãos de soja e arroz em dois conteúdos de água no solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os solos utilizados neste trabalho são classificados como Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulínico hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférrico típico textura argilosa A moderado caulínico-oxídico (LVef), localizados na FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. A composição granulométrica dos mesmos foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas. O conteúdo de areia foi obtido por tamisamento, o de argila pelo método da pipeta (DAY, 1965) e o de silte por diferença. Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente: 271 e 517 g kg^{-1} de argila, 42 e 256 g kg^{-1} de silte e 687 e 227 g kg^{-1} de areia. A densidade de partículas determinada pelo método do picnômetro (EMBRAPA, 1997) foi de 2,82 e 2,98 Mg m^{-3} , para o LVd e LVef, respectivamente.

Foram coletadas amostras deformadas dos solos na camada de 0,00-0,20 m, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 0,004 m, sendo analisadas para fins de fertilidade segundo Raij et al. (1987) e corrigidas e fertilizadas segundo Raij et al. (1996), para soja e arroz.

A primeira etapa do trabalho consistiu na determinação do IHO. Para a determinação do IHO foram estabelecidos três níveis de compactação com o objetivo de ampliar as condições estruturais do solo para a modelagem das curvas de retenção e de resistência do solo necessárias para a quantificação do IHO. Os três níveis de compactação foram estabelecidos por meio de uma calibração, para obter níveis de resistência à penetração próximo de 0,5; 2,0 e 4,0 MPa, sendo que o menor valor representa a condição de solo solto e o último terceiro nível uma condição de solo muito compactado.

O solo foi compactado em vaso cilíndrico de pvc com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m, sendo cada camada compactada, por meio da queda livre de um êmbolo de 7,0 kg de uma altura de 0,6 m, no centro geométrico de uma suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso (Figura 1a). Para cada nível de compactação (mesmo número de impactos/ volume de solo) foram coletadas 5 amostras indeformadas, na profundidade de 0,02 a 0,05 m, utilizando anéis volumétricos (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), com três repetições (cada repetição foi constituída de um vaso, do qual foram coletadas cinco amostras), formando cinco grupos de três amostras. Cada grupo de amostras foi saturado e submetido a uma das seguintes tensões: 0,006; 0,01; 0,033; 0,06 e 0,3 MPa em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Após o equilíbrio, as amostras foram pesadas e tiveram determinadas a resistência à penetração (RP) utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$ e, cone com área de $3,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Este penetrômetro é equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998). A RP foi determinada no centro geométrico de cada amostra por uma camada útil de 0,01 a

0,02 m, obtendo-se uma leitura a cada 0,001 m, perfazendo 100 leituras por amostra, e o valor médio destas foi utilizado. Os valores obtidos (kgf cm^{-2}) foram multiplicados pelo fator de 0,098 para transformação em MPa.

Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C por 24 horas. Nestas amostras foram determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (KLUTE, 1986) e a densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986). As curvas de retenção de água foram ajustadas pelo modelo proposto por Genuchten (1980), a partir do qual foi estimado o conteúdo de água na capacidade de campo (tensão de 0,01 MPa) e no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 MPa).

Os valores de RP foram ajustados em função do conteúdo volumétrico de água e a Ds utilizando o modelo não-linear proposto por Busscher (1990), na sua forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds \quad (1)$$

Sendo RP a resistência do solo à penetração (MPa), θ o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Ds a densidade do solo (Mg m^{-3}) e a , b , c são os coeficientes do modelo obtidos por meio do ajuste do modelo aos dados. O conteúdo de água em que a RP foi limitante foi calculado pela equação (2) obtida de (1), a seguir:

$$\theta_{(RP\text{lim})} = RP_{(\text{lim})} / (e^{a*} (Ds^c))^{1/b} \quad (2)$$

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10% foi obtida pela equação a seguir:

$$\theta_{PA} = (1 - Ds/Dp) - 0,1 \quad (3)$$

Sendo θ_{PA} o conteúdo de água em que a porosidade de aeração de 10% é limitante ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Dp a densidade de partículas do solo (Mg m^{-3}).

O IHO foi determinado para cada amostra conforme metodologia descrita por Silva et al. (1994). O conteúdo volumétrico de água do solo nos valores limitantes de RP foi obtido utilizando os níveis de RP limitantes estabelecidos no experimento de produção de grãos de soja e arroz descrito adiante.

Na segunda etapa do trabalho, o experimento foi conduzido em casa de vegetação da FCAV/UNESP. Antes da instalação do experimento, foram previamente estabelecidos quatro níveis de RP (três repetições) e coletadas amostras indeformadas para determinação dos conteúdos gravimétricos de água em câmaras de Richards (KLUTE, 1986) nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa. Em seguida foram ajustados os conteúdos de água de 0,11 e 0,14 kg kg^{-1} no LVd e 0,24 e 0,27 kg kg^{-1} no LVef, correspondentes as tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Na seqüência foi realizada uma calibração do número de impactos por camada de solo necessários para atingir os valores de RP desejados. Nessa etapa foram determinados os quatro níveis de RP com o penetrômetro de anel dinamométrico, com ângulo de cone de 30°, sendo as leituras realizadas quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m, e o valor de cada repetição foi obtido da média de quatro determinações. Foram utilizados cones com diâmetros da base de 0,028; 0,022; 0,012 e 0,006 m, respectivamente, diminuindo o diâmetro da base do cone com o incremento dos valores de compactação do solo. A utilização de cones com menores diâmetros foi necessário para possibilitar as determinações nos maiores níveis de RP. Após essa calibração, mantendo o solo sempre coberto para evitar perda de água, foi realizada a compactação do solo utilizando o número de impactos/ camada estabelecidos anteriormente, seguindo a metodologia descrita na primeira fase (Figura 1a). Imediatamente após a compactação do solo, cada vaso foi pesado para utilização desse valor na condução do experimento, e manter o solo nos conteúdos de água pré-determinados.

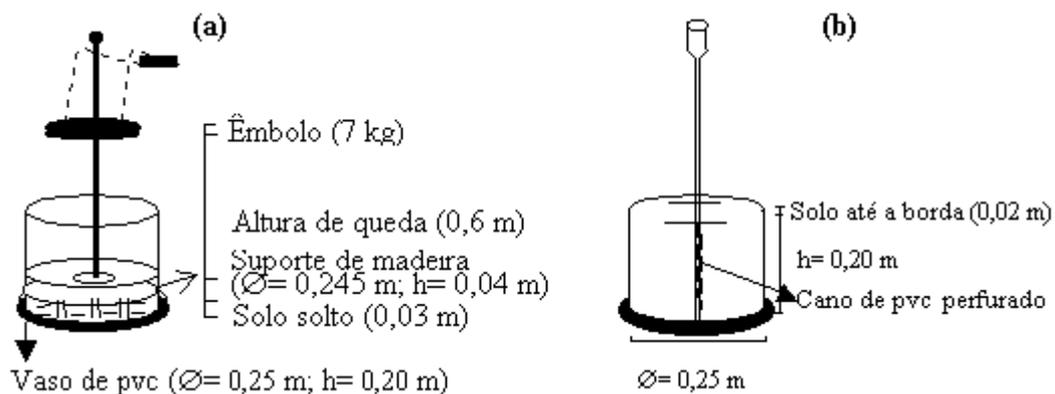


Figura 1. Esquema da compactação do solo no vaso (a) e do vaso utilizado no cultivo da soja e do arroz (b).

Foram semeadas três sementes por cova (quatro covas/vaso) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e arroz (*Oryza sativa* cv. IAC 165), em 2001. Após sete dias, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja e quatro de arroz por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os tratamentos de água pré-determinados, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água do solo para possibilitar a germinação das sementes nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, por meio de duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso (Figura 1b), sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada 5 dias. Na colheita, foi avaliada a produção de grãos/planta e ajustada a 12% de umidade.

Os tratamentos consistiram de quatro níveis de resistência à penetração e dois níveis de água, para cada solo e cultura, constituindo quatro experimentos inteiramente casualizados, com três repetições. A análise estatística consistiu da análise de variância, e de regressão entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo com a produção de grãos de soja e arroz, em cada nível de água e solo. As análises foram processadas por meio do Statistical Analysis System (SAS, 1996).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de produção de grãos indicam, de modo geral, que para soja os valores de RP limitantes foram, em geral, superiores ao arroz, e que na tensão de 0,01 MPa foram obtidas maiores produções apesar dos valores de RP limitante terem sido maiores do que os obtidos na tensão de 0,05 MPa (Tabela 1), confirmando os estudos de Tardieu (1994). Por meio das regressões da RP com a produção, verifica-se que no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, a RP limitante à produção de grãos de soja no LVd e arroz no LVd e LVef, é próximo de 2,0 MPa adotado em alguns trabalhos como crítico ao desenvolvimento do sistema radicular de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998). Ainda, verifica-se que com o aumento do conteúdo de água pode se tolerar um maior valor de RP e que o menor valor crítico de RP com a redução do conteúdo de água pode ser indicativo de um interação com efeito do potencial da água no solo restringindo a atividade fisiológica da planta. Neste sentido, vários trabalhos abordam esta interação com a RP (TARDIEU, 1994; STIRZAKER et al., 1996).

A partir dos valores limitantes de RP, para soja e arroz (Tabela 1), foi determinado o conteúdo de água em que a RP é limitante, os quais foram utilizados na confecção do IHO. Para tal, foram ajustados modelos aos dados de RP em função da D_s e θ (Tabela 2). Verifica-se que os coeficientes das variáveis utilizadas no modelo foram significativos a 1% de probabilidade no LVef, e no LVd a D_s apresentou probabilidade de erro acima de 4%, demonstrando menor interação desta

variável no modelo, confirmando os estudos de Tormena et al. (1998). Por meio dos coeficientes do modelo ajustado da RP verifica-se que a Ds teve relação direta e a θ inversa com a RP, conforme verificado por Smith et al. (1997) e Tormena et al. (1998).

Nos modelos apresentados na Tabela 2 foi calculada a θ em função da RP limitante para cada cultura e densidade do solo, obtendo um conjunto de conteúdos de água a partir dos quais a RP torna-se limitante a produção para cada cultura, solo e conteúdo de água utilizado no cultivo. Essas curvas são apresentadas nas Figuras 2 e 3 e por meio dessas verifica-se que diferentes valores de RP limitante altera a amplitude do IHO e a Dsc, i.e. o solo LVd em que a Dsc aumenta de 1,55 para 1,63 Mg m⁻³ quando a RP limitante aumenta de 1,66 para 2,22 MPa. Esses resultados corroboram Silva et al. (1994).

A θ em que a RP é limitante (θ_{RP}) ou a curva da θ no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) constitui o limite inferior e a θ na capacidade de campo (θ_{cc}) ou a θ em que a porosidade de aeração é de 10% (θ_{PA}) o limite superior do IHO. Verificou-se que o limite inferior do IHO foi a θ_{PMP} na condição de solo solto e a θ_{RP} com o aumento da Ds (Figuras 2 e 3), confirmando os estudos de

Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998) e Imhoff et al. (2001). Visto que o conteúdo de água do solo se encontra muitas vezes abaixo da capacidade de campo durante o ciclo das culturas, a θ_{RP} , em solos compactados, torna-se o fator limitante ao crescimento das plantas até a Dsc, destacando a importância da utilização de valores de RP limitantes para cada cultura, no IHO.

O limite superior do IHO foi a θ_{cc} no solo de textura média (LVd) e argilosa (LVef) (Figuras 2 e 3), corroborando Tormena et al. (1998) que verificaram que em 97% das amostras a θ_{cc} foi o limite superior do IHO, em Latossolo Roxo muito argiloso, e Imhoff et al. (2001) em Podzólico Vermelho Amarelo de textura média. A θ_{PA} não foi fator limitante do IHO até a Dsc, e foi superior no LVef argiloso em relação ao LVd de textura média (Figuras 2 e 3). Neste sentido, Beutler et al. (2002) verificaram maior porosidade total no LVef graças a mineralogia oxidada do LVef, que segundo Ferreira et al. (1999), proporciona a formação de microagregados arredondados < 1 mm, formando uma estrutura com aspecto maciça porosa “in situ”, resultando em maior proporção de poros grandes, comparado ao LVd caulínico, em que ocorre a formação de estrutura maciça coesa.

Tabela 1 Equações de regressão e nível limitante de resistência à penetração (RP) para a produção de soja e arroz (g/planta), no LVd e LVef, no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 e 0,01 MPa.

Conteúdo de água, kg kg ⁻¹	Equação y = produção; x = RP	R ²	Produção máxima	RP limitante ¹
SOJA				
LVd				
0,11	y = 4,986 + 1,627 x - 0,490 x ²	0,99**	6,34	1,66
0,14	y = 7,157 + 5,865 x - 1,318 x ²	0,99**	13,68	2,22
LVef				
0,24	y = 0,528 + 7,717 x - 1,266 x ²	0,99**	12,28	3,05
0,27	y = 7,450 + 8,165 x - 1,455 x ²	0,93**	18,90	2,81
ARROZ				
LVd				
0,11	y = 2,078 - 0,311 x	0,89**	1,92	0,27
0,14	y = 2,537 + 2,768 - 0,581 x ²	0,86**	5,83	2,38
LVef				
0,24	y = 1,815 - 0,229 x	0,89**	1,81	0,43
0,27	y = 2,763 + 1,443 x - 0,349 x ²	0,93**	4,25	2,06

¹ Valor de resistência à penetração (MPa) a partir do qual ocorreu decréscimo da produção de grãos/planta. ** Significativo a 1%. Os valores médios de RP foram de: 0,27; 2,04; 2,75; 4,18 e 0,31; 1,79; 2,32; 3,58 para o LVd e 0,43; 2,52; 3,83; 4,32 e 0,27; 1,78; 2,54; 4,03 para o LVef, na umidade de 0,11; 0,14 e 0,24; 0,27 kg kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 2 Valores dos parâmetros estimados da regressão linearizada e probabilidade dos coeficientes dos modelos ajustados da RP em função do conteúdo de água e Ds, no LVd e LVef, nos três níveis de compactação ($\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$).

	LVd		LVef	
	Parâmetro estimado	Probabilidade	Parâmetro estimado	Probabilidade
Compactação 1				
<i>a</i>	-9,248	0,0001	-4,929	0,0001
<i>b</i>	-3,860	0,0001	-3,188	0,0001
<i>c</i>	5,932	0,1498	5,893	0,0018
Compactação 2				
<i>a</i>	-7,205	0,0012	-4,947	0,0001
<i>b</i>	-2,756	0,0012	-3,754	0,0001
<i>c</i>	8,115	0,0461	7,792	0,0071
Compactação 3				
<i>a</i>	-6,131	0,1128	-5,749	0,0001
<i>b</i>	-2,710	0,0251	-4,360	0,0001
<i>c</i>	6,062	0,3152	9,457	0,0001

As amostras de solo utilizadas no modelo apresentaram valores de resistência à penetração de 0,16 - 9,00 e 0,33 - 6,63 MPa; densidade do solo de 1,13 - 1,76 e 0,91 - 1,30 Mg m⁻³; e conteúdo de água de 0,09 - 0,24 e 0,20 - 0,40 m³ m⁻³, no LVd e LVef, respectivamente. Em cada nível de compactação, o modelo foi estimado com 15 amostras, sendo a curva de RP utilizada no IHO final, obtida da junção das três curvas.

Segundo Imhoff et al. (2001), a Dsc é atingida quando o valor numérico do limite superior é igual ao do limite inferior do IHO. Desta forma, quando a Ds é superior a Dsc ocorrem condições altamente restritivas ao crescimento radical. Baseado neste conceito, foram obtidas regressões entre a Ds e a produção de grãos de soja e arroz (Figura 4) para verificar a relação funcional entre a Dsc obtida a partir do IHO e a produção de grãos de soja e arroz.

A Ds a partir da qual ocorreu redução da produção de soja e arroz foi inferior a Dsc para o LVd e ligeiramente superior a Dsc para o LVef (Figuras 2 e 3), no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. Isto possivelmente está relacionado a mineralogia do solo, que segundo Beutler et al. (2002), condicionou maior porosidade total no LVef, comparado ao LVd. Visto que o experimento foi conduzido em casa de vegetação, a maior porosidade no LVef possivelmente aumentou a condutividade hidráulica não saturada desse solo. Desta forma, a água atingiu mais rapidamente os pontos de absorção das raízes, após as duas irrigações diárias, diminuindo o tempo em que estas permaneceram em condições de déficit hídrico, em relação aos potenciais de água utilizados, no LVef. Associado a porosidade, outro aspecto que contribuiu para esse resultado, no LVef, foi o valor do IHO superior em 0,006 m³.m⁻³ e a menor redução do IHO pela θ_{RP} limitante

próxima a Dsc, comparado ao LVd. Ainda, a faixa de Ds do solo em que θ_{RP} é limitante foi de 0,14 no LVef, enquanto que no LVd foi de 0,30. Kay (1990) afirmou que quanto menor o IHO maior a probabilidade de ocorrência de limitações físicas ao crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas. Neste contexto, a relação funcional diferenciada do IHO com a produção das culturas, para cada solo, indica que a resposta das culturas à compactação está relacionada a estrutura do solo, conforme mencionado por Hamblim (1985).

A produção de soja, no LVd, foi reduzida a partir da Ds de 1,27 e 1,37 Mg m⁻³ (Figura 4) e a Dsc foi de 1,55 e 1,63 Mg m⁻³ (Figura 2), resultando em produção de grãos 15 e 17% menor na Dsc determinada no IHO, no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Desta forma, a Ds a partir da qual ocorreu limitação à produção de grãos de soja ocorreu quando o IHO começou a ser reduzido pela θ_{RP} , no entanto, o modelo do IHO mostra que não ocorreram restrições de água, aeração e RP nos valores de Ds em que houve redução da produção e grãos. Este comportamento também foi observado para o arroz no LVd, em que a produção foi reduzida na Ds de 1,37 Mg m⁻³ (Figura 4) e a Dsc foi de 1,66 Mg m⁻³ (Figura 3) no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

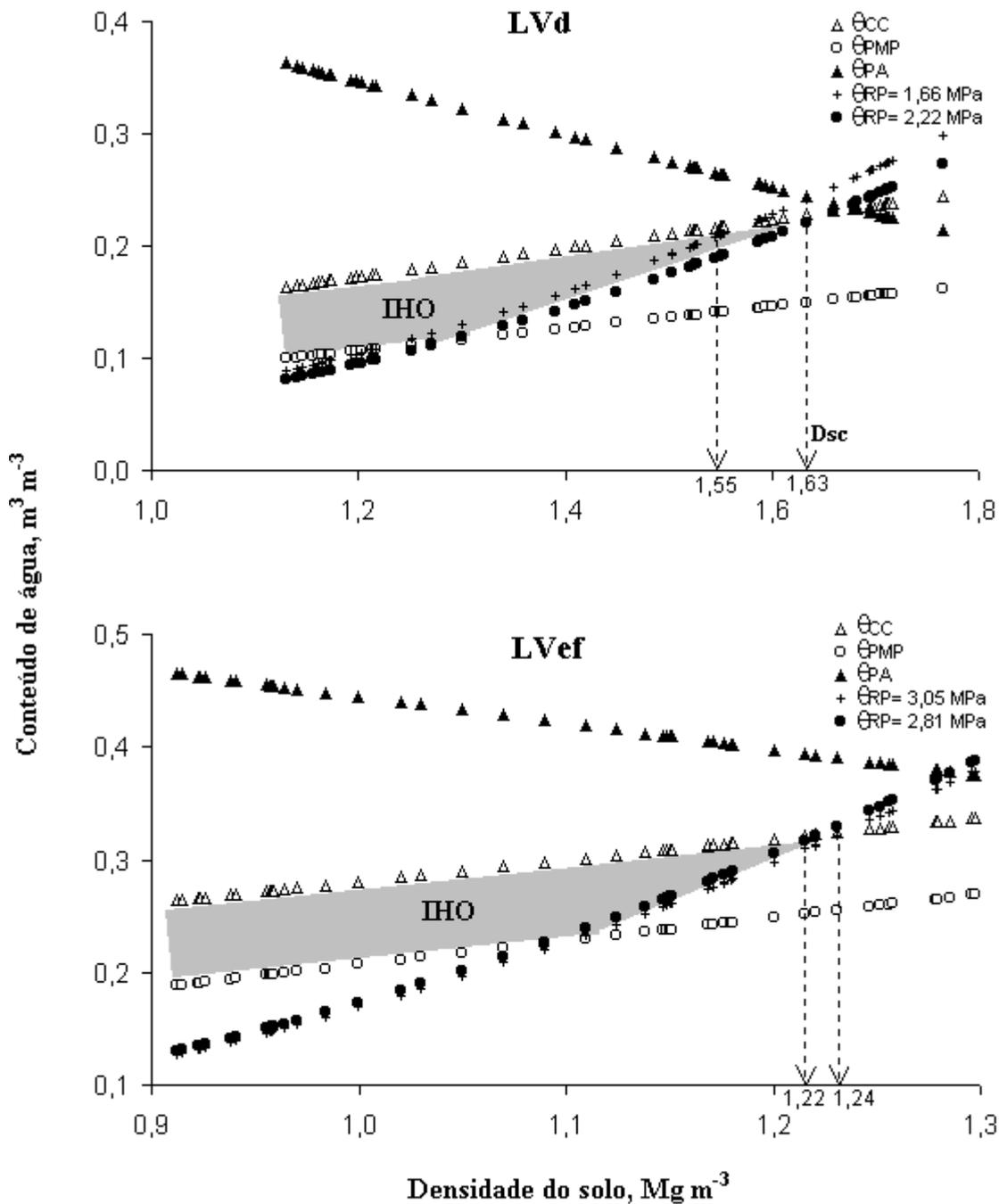


Figura 2 Variação do conteúdo volumétrico de água (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência à penetração limitante para a cultura de soja no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 (+) e 0,01 MPa (●) (θ_{RP}), no LVd e LVef, respectivamente. **IHO**= intervalo hídrico ótimo.

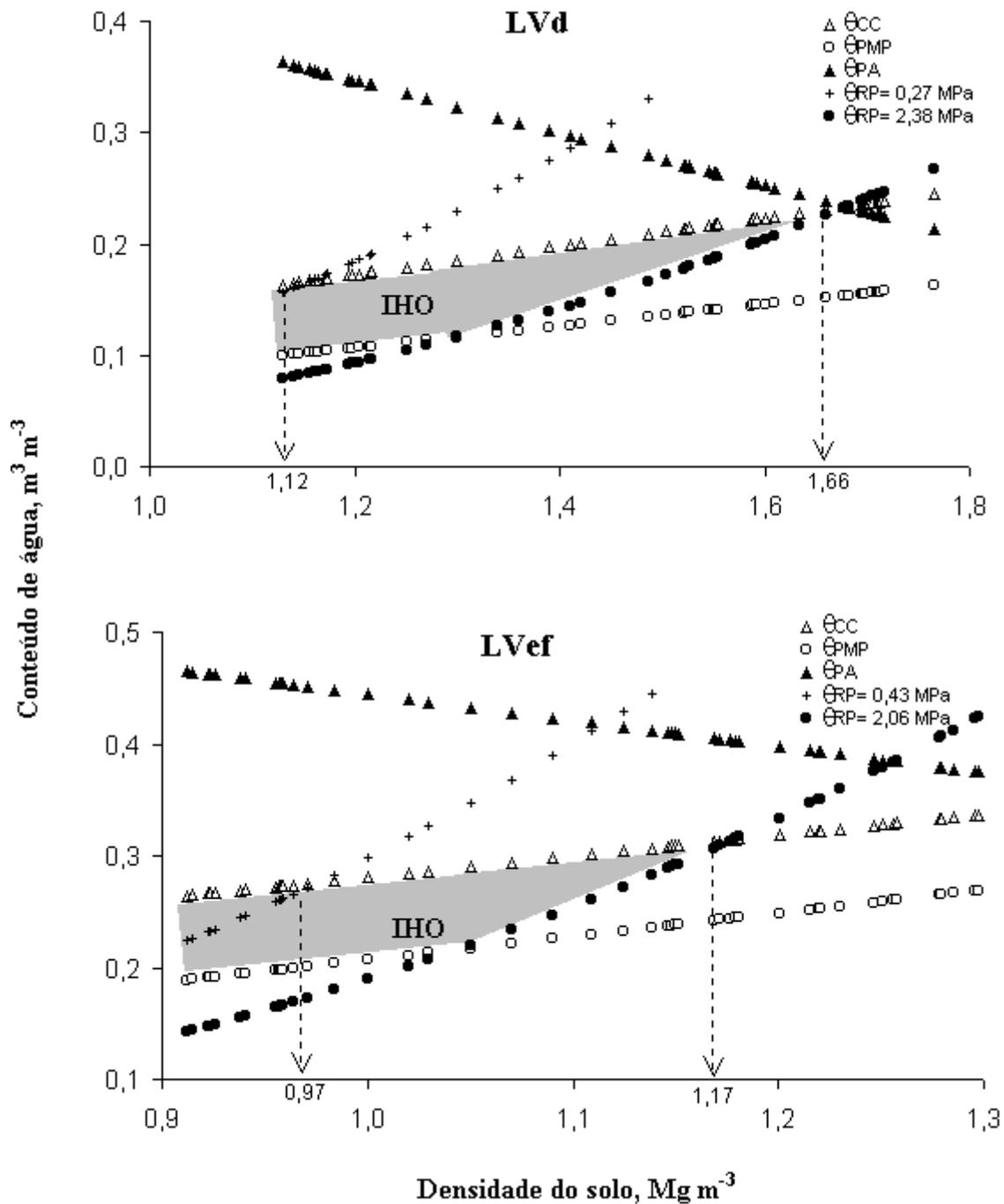


Figura 3 Variação do conteúdo volumétrico de água (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência à penetração limitante para a cultura de arroz no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 (+) e 0,01 MPa (\bullet) (θ_{RP}), no LVd e LVef, respectivamente. **IHO**= intervalo hídrico ótimo.

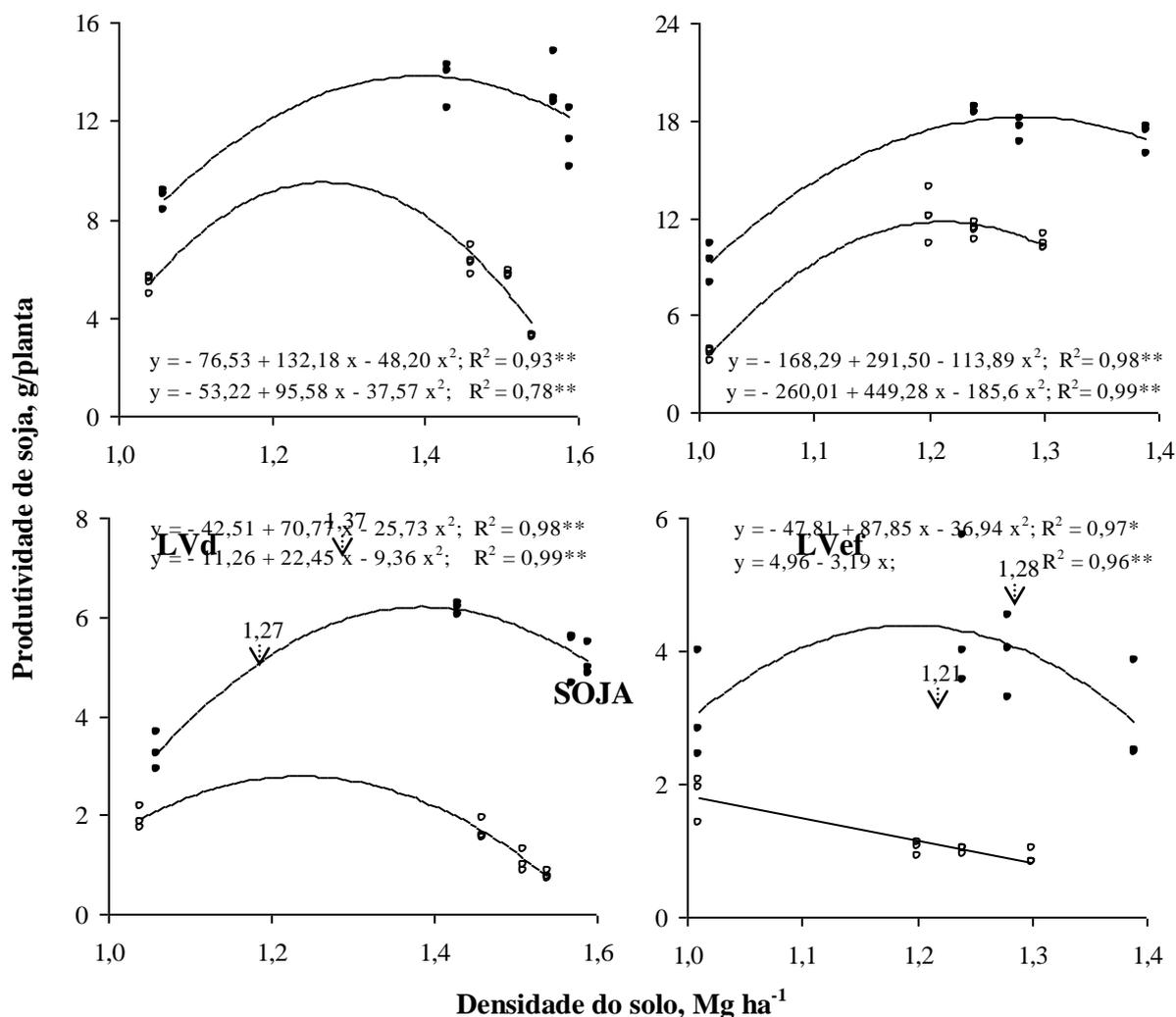


Figura 4 Produção de grãos de soja e arroz (g/planta) no LVd e LVEf, em níveis de densidade do solo e de água. (o) Conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa; (●) Conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

Já o arroz sequeiro foi mais sensível ao conteúdo de água no solo, confirmando estudos de Moura Neto (2001), ao passo que, no LVd, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa ocorreu redução de 34% da produção de grãos na Dsc comparada a Ds limitante (Figuras 3 e 4). No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa ocorreu menor produção e, maior decréscimo da produção de grãos com o incremento da Ds (Figura 2), nos dois solos.

No LVEf a Ds limitante a produção de grãos de soja e arroz (Figura 4) foi ligeiramente superior a Dsc obtida por meio do IHO. Neste caso, ao considerar-se a Dsc como limite crítico para a descompactação do LVEf com vistas a melhoria de sua estrutura, seria obtida uma

menor produção de grãos de soja de 1,7 e 2,5% no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 e 0,01 MPa, e de arroz sequeiro de 0,5% no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. Para esse solo, os resultados permitem inferir que a Dsc foi um atributo adequado no monitoramento da compactação do solo para a soja e arroz, com vistas à qualidade estrutural do solo.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que a utilização do IHO e da Dsc no monitoramento da qualidade estrutural do solo com vistas a maximização da produção das culturas é um índice promissor. No entanto, há necessidade de estudos em nível de campo onde ocorrem períodos com diferentes conteúdos de

água no solo durante o ciclo das culturas. A utilização da Dsc como a Ds a partir da qual devem ser tomadas medidas mecânicas ou biológicas para descompactar o solo demonstra ser um atributo altamente dependente do conteúdo de água no solo durante o ciclo das culturas.

6 CONCLUSÕES

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é superior no L_{Vef} comparado ao LV_d, e a densidade do solo crítica obtida no IHO é, em geral, superior a densidade do solo limitante a produtividade de soja e arroz, no LV_d, e inferior no L_{Vef}.

O conteúdo de água no solo altera a produtividade das culturas e os valores dos atributos físicos a partir dos quais ocorre decréscimo da produtividade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEUTLER, A.N. et al. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, 2002.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 3, n. 2, p. 519-524, 1990.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analyses. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 545-566.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 507-514, 1999.
- GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5/6, p. 892-897, 1980.
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p. 65-100, 1987.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R. et al. (Eds.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p. 167-179. (Advances in Soil Science).
- HAMBLIM, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 95-158, 1985.
- IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas 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. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.
- KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, v. 12, n. 1, p. 1-51, 1990.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1, p. 635-660.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, n. 1, p. 277-294, 1985.
- MOURA NETO, F.P. **Desempenho de cultivares de arroz de terras altas sob plantio**

- direto e convencional.** 2001. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- RAIJ, B. van et al. **Análise química do solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.
- RAIJ, B. van et al. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2. ed. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo & Fundação IAC**, n. 100, p. 1-285, 1996.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers: version 5.** Cary, 1996.
- SAVAGE, M.J. et al. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 844-851, 1996
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, n.1/2, p. 323-329, 1996.
- 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. et al. Intervalo Hídrico Ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 1 CD-ROM.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 93-111, 1997.
- STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 185, n. 1/2, p. 151-162, 1996.
- TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n. 2/4, p. 217-243, 1994.
- TOPP, G.C.; GALGANOW, Y.T.; WIRES, K.C. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure.** Ottawa: Soil Quality Evaluation Program, 1994. 96 p. (Technical Report, 2).
- 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, 1999