

Nota

MÉTODO ALTERNATIVO PARA QUANTIFICAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM LABORATÓRIO⁽¹⁾

Wagner Henrique Moreira⁽²⁾, Leonardo Pim Petean⁽³⁾, Edner Betioli Junior⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽⁴⁾, Getúlio Coutinho Figueiredo⁽⁵⁾ & Álvaro Pires da Silva⁽⁶⁾

RESUMO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é definido pela amplitude do teor de água (θ) no solo em que são mínimas as limitações ao crescimento vegetal, associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração (RP). Em geral, a determinação do IHO exige equipamentos de elevado custo, sendo laboriosa a obtenção dos dados de retenção de água e RP. O uso de membranas de pressão e placas porosas de Richards exige longo tempo para definir a curva de retenção de água no solo (CRA) em função do tempo de equilíbrio hidráulico, o qual depende das dimensões da amostra, do tipo de solo e da pressão aplicada. Atualmente, há disponibilidade de equipamentos para determinar o potencial de água do solo (Ψ) com rapidez e menor custo como tensiômetros e equipamentos psicrométricos. O objetivo deste trabalho foi quantificar o IHO a partir do secamento de amostras indeformadas de solo em estufa elétrica com ventilação de ar e temperatura de 40 °C (tempos de secamento de 20, 40, 60, 80, 100, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 min), com subsequentes medições de Ψ , utilizando tensiômetro ou psicrômetro, e medidas de RP, usando um penetrômetro eletrônico com aquisição automatizada de dados. A CRA e a curva de resistência do solo à penetração (CRS) foram adequadamente descritas utilizando o método proposto, que permitiu obter dados de θ e de RP em 10 dias e possibilitou ajuste acurado dos dados para descrever o IHO e alcançar a densidade crítica do solo (Dsc).

Termos de indexação: compactação, densidade do solo, estrutura do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 17 de junho de 2013 e aprovado em 25 de outubro de 2013.

⁽²⁾ Pós-graduandos em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá - UEM. Av. Colombo, 5790. CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: wh.moreira@hotmail.com, betioli.jr@gmail.com

⁽³⁾ Professor, Faculdade Integrado de Campo Mourão. Rodovia BR 158, km 207. CEP 87300-970 Campo Mourão (PR). E-mail: leonardopim@hotmail.com

⁽⁴⁾ Professor Associado, Departamento de Agronomia, UEM. Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

⁽⁵⁾ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP. Caixa Postal 9. Av. Pádua Dias, 11. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: figueiredo.go@gmail.com

⁽⁶⁾ Professor Titular, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. E-mail: apsilva@esalq.usp.br

SUMMARY: ALTERNATIVE METHOD FOR QUANTIFICATION OF THE LEAST LIMITING WATER RANGE IN THE LABORATORY

The least limiting water range (LLWR) is defined by the amplitude of the water content (θ) in the soil in which limitations to plant growth associated with water availability, aeration and soil resistance to penetration (SR) are minimal. In general, LLWR determination requires expensive equipment, and obtaining water retention and SR data is laborious. The use of pressure membranes and Richards' pressure plates requires a long time to determine the water retention curve (WRC) due to the need for achieving hydrostatic equilibrium, which depends on the dimensions of the sample, the soil type and the pressure applied. Currently, equipment is available for quickly and more cheaply determining water potential (Ψ), such as automatic tensiometers and psychrometric equipment. The aim of this study was to evaluate a method for quantifying the LLWR from the drying of undisturbed samples in an electric laboratory oven with air circulation and temperature of 40 °C (drying times of 20, 40, 60, 80, 100, 120, 180, 240, 300, 360 and 420 min), with subsequent measurements of Ψ using a tensiometer or psychrometer, and SR measurements using an electronic penetrometer with automated data acquisition. The WRC and the soil resistance to penetration curve were adequately described using the proposed method which allowed θ and SR data to be obtained in 10 days and allowed accurate fitting of the data to describe the LLWR and to obtain the critical bulk density of the soil.

Index terms: soil compaction, soil bulk density, soil structure.

INTRODUÇÃO

As interações entre a resistência do solo à penetração (RP), a aeração e a disponibilidade de água no solo são complexas e determinantes para o crescimento de plantas. O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra, em um único indicador, atributos físicos diretamente envolvidos em processos fisiológicos relacionados ao crescimento das plantas, ou seja, define o intervalo de teor de água (θ), em que as limitações ao crescimento das plantas, em razão da disponibilidade de água, aeração e RP, para determinada densidade do solo (Ds), são minimizadas (Tormena et al., 1999), constituindo um moderno indicador da qualidade física do solo. Solos com boa qualidade física apresentam mais frequentemente valores de θ entre os limites superior e inferior do IHO.

Vários estudos têm utilizado o IHO na avaliação da qualidade física do solo em diferentes culturas e sistemas de produção (Tormena et al., 1999; Leão et al., 2004; Collares et al., 2006; Petean et al., 2010; Betioli Junior et al., 2012). Assim, quando os limites superior ou inferior do IHO são definidos pela porosidade de aeração ou RP, respectivamente, em ordem de substituição da capacidade de campo ou do ponto de murcha permanente, isso é indicativo de aumento da degradação física do solo e reflete decréscimos da disponibilidade de água às plantas. Além disso, a densidade crítica do solo (Dsc), que é o valor da Ds em que o IHO = 0, pode ser utilizada como indicador da qualidade estrutural do solo, havendo indicações de severa degradação quando Ds > Dsc, podendo restringir o crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

A quantificação do IHO é dependente da curva de retenção de água no solo (CRA) e curva de resistência do

solo à penetração (CRS) (Silva et al., 1994), as quais são usadas para estimar os valores dos θ utilizados como limites do IHO. No método proposto por Silva et al. (1994), amplamente difundido, a CRA envolve a variação do θ em função da variação do potencial de água no solo (Ψ) em diferentes amostras com variação natural de Ds. Já a determinação da CRS é feita utilizando a variação da RP associada com a redução do θ e variação da Ds entre as amostras. Em geral, a definição da CRS envolve a utilização de penetrômetros estáticos, que introduzem uma haste cônica no solo por mecanismos eletromecânicos, como o equipamento descrito em Tormena et al. (1998). A CRA tradicionalmente requer o uso de membranas de pressão, placas porosas e fonte de pressão pneumática.

Mesas de tensão, funil de Haines e câmaras de Richards demandam longo tempo para determinação da CRA, decorrentes do equilíbrio hidráulico das amostras. Tormena et al. (1998) indicaram que no Ψ de -1,5 MPa o equilíbrio hidráulico das amostras foi alcançado em 30 dias. É importante ressaltar que o tempo necessário para o equilíbrio é relativo, pois depende de fatores como tipo de solo, dimensões da amostra e magnitude da pressão pneumática (Klute, 1986). Bittelli & Flury (2009), em solos com 142 a 179 g kg⁻¹ de argila e 703 a 715 g kg⁻¹ de silte, e Collares et al. (2002), em solos com 170 a 367 g kg⁻¹ de argila e 95 a 392 g kg⁻¹ de silte, identificaram tempos de equilíbrio hidráulico das amostras de solo iguais a 75 e 35 dias, respectivamente. Assim, métodos que possibilitem reduções de custo e de tempo para definir a CRA são importantes na quantificação da qualidade física do solo.

Atualmente, há equipamentos para determinar o Ψ com rapidez e menor custo como tensiômetros eletrônicos miniaturizados, aplicáveis em amostras

indeformadas de solo comumente utilizadas para a quantificação do IHO e, mais recentemente, um equipamento com base em psicrometria, o qual permite medir acuradamente Ψ menores, especialmente no ponto de murcha permanente. Entre os psicrômetros, o equipamento denominado *Dewpoint Potentiometer WP4-T*[®] tem sido bastante difundido (Costa et al., 2008; Bittelli & Flury, 2009; Klein et al., 2010; Solone et al., 2012). Esse equipamento apresenta um sistema de controle da temperatura no interior de sua câmara de medição, facilitando a estabilização da pressão de vapor de água (Scanlon et al., 2002). Assim, o Ψ na amostra corresponde ao somatório dos potenciais mátrico e osmótico (Scanlon et al., 2002). Entretanto, o WP4-T não é adequado para medição de Ψ mais altos (Klein et al., 2010). Portanto, a utilização combinada de tensiômetro e psicrômetro (WP4-T) possibilita a determinação mais expedita da CRA, comparada às câmaras de pressão e placas porosas de Richards.

Métodos para obter a CRA, a CRS e o IHO com reduções de custo e de tempo são desejáveis em estudos sobre a qualidade física do solo. A hipótese deste trabalho é que tensiômetros e psicrômetros, em substituição à mesa de tensão e às câmaras de Richards, são adequados para obter a CRA e CRS e, conseqüentemente, quantificar o IHO e a Dsc sem prejuízo à sua acurácia. O objetivo deste trabalho foi avaliar um método alternativo para quantificação do IHO, com a utilização combinada de tensiômetros e psicrômetro em amostras indeformadas de solo, submetidas ao secamento em estufa elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

A amostragem foi realizada na fazenda experimental da Cooperativa Agropecuária Mourãoense - COAMO, localizada no município de Campo Mourão, Paraná, situado a 24° 02' de latitude sul e 52° 22' de longitude oeste. O solo foi identificado como Latossolo Vermelho distroférrico (Embrapa, 2006), cuja composição mineralógica é basicamente caulinita, óxidos de ferro e alumínio (Costa, 1996). A análise granulométrica da camada de 0,0-20,0 cm apresentou valores médios de 850 g kg⁻¹ de argila, 120 g kg⁻¹ de silte e 30 g kg⁻¹ de areia, enquadrando-se na classe textural muito argilosa.

A amostragem foi realizada em uma área sob plantio direto descrita em Petean et al. (2010). Foram coletadas, aleatoriamente, amostras indeformadas de solo nas camadas de 0,0-7,5 e 7,5-15,0 cm, com o objetivo de obter ampla variabilidade de condições físicas do solo. As amostras foram coletadas em março de 2009, após a colheita da soja. Coletaram-se 180 amostras por camada de solo, totalizando 360 amostras, por meio da introdução lenta e contínua de cilindros metálicos de 5 x 5 cm (diâmetro e altura), utilizando um dispositivo atuador linear

eletromecânico para evitar perturbação mecânica no solo (Figueiredo, 2010). As amostras foram envolvidas com filme de PVC transparente e acondicionadas em caixas plásticas, para evitar evaporação de água e alterações. No laboratório, as amostras foram preparadas e saturadas durante 48 h, pela elevação gradual de lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de dois terços da altura das amostras.

No método proposto, todas as amostras foram equilibradas no Ψ de -0,002 MPa numa mesa de tensão (Ball & Hunter, 1988), gerando uniformidade no Ψ inicial dessas. Posteriormente, a dessaturação das amostras ocorreu por meio da secagem em estufa elétrica sob temperatura de 40 °C e circulação forçada de ar, utilizando 11 tempos de secagem pré-definidos, somado a um grupo de amostras no Ψ de -0,002 MPa (tempo de secagem = 0). Foram utilizados os seguintes tempos de secagem: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 min. No interior da estufa, as amostras foram acondicionadas numa estrutura metálica com cerca de 5 cm de altura, para que a secagem delas ocorresse pelas suas duas extremidades. Em seguida, elas foram resfriadas em dessecadores, em sala com temperatura de 25 °C, envolvidas em filme de PVC transparente e armazenadas em recipiente hermeticamente fechado por 24 h para redistribuição da água e evitar perda de água pós-estufa, quando foram aferidas quanto à massa e a RP imediatamente determinada conforme Tormena et al. (1998). Quando se registravam valores de carga próximos do limite suportado pela célula de carga (20 kgf ou 196,13 N), a determinação era interrompida, a amostra era manipulada para adição de água e acondicionada por 24 h para atingir novo equilíbrio hidráulico e possibilitar a determinação da RP.

Para Ψ até -0,085 MPa, foi utilizado um tensiômetro eletrônico (modelo T5, marca UMS) com cápsula porosa cônica de 0,5 cm de diâmetro na extremidade por 0,6 cm de altura em uma haste acrílica de 5 cm de altura, que está ligada ao corpo do sensor (UMS GmbH München, 2009), o qual foi inserido no centro das amostras que apresentavam um orifício resultante da penetração da haste do penetrômetro. Os $\Psi < -0,085$ MPa, fora da faixa de medida dos tensiômetros, foram determinados por psicrometria, utilizando o *Dewpoint Potentia Meter (WP4-T)* (Decagon Devices, 2007). Pequenas porções (10 g) de solos foram retiradas do centro das amostras e colocadas na cápsula desse equipamento para determinar o Ψ nas amostras que, subsequentemente, foram aferidas quanto à massa e secas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para definir a massa de sólidos e a massa de água no solo. A Ds foi determinada pela razão entre massa de sólidos e o volume da amostra (Grossman & Reinsch, 2002). O θ foi obtido pelo produto do teor de água em base massa e a Ds (Topp & Ferré, 2002).

Para viabilizar as determinações, as amostras foram separadas em quatro grupos e as determinações realizadas conforme quadro 1.

Quadro 1. Cronograma de atividades para obtenção dos dados

Atividade	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
Mesa de tensão	1	1 e 2	1 e 2	2 e 3	3 e 4	3 e 4	4			
Secamento em estufa			1	2		3	4			
Determinações (massa, RP e Ψ)				1	2		3	4		
Estufa (105 °C)				1	1 e 2	2	3	3 e 4	4	
Tabulação dos dados					1	2		3	4	
Ajuste do IHO										1, 2, 3 e 4

1: amostras da camada de 0,0-7,5 cm e tempo de secagem de 0, 40, 80, 120, 240 e 360 min; 2: amostras da camada de 0,0-7,5 cm e tempo de secagem de 20, 60, 100, 180, 300 e 420 min; 3: amostras da camada de 7,5-15,0 cm e tempo de secagem de 0, 40, 80, 120, 240 e 360 min; e 4: amostras da camada de 7,5-15,0 cm e tempo de secagem de 20, 60, 100, 180, 300 e 420 min.

A CRA expressa pela relação entre o Ψ e o θ foi estimada utilizando a função proposta por Ross et al. (1991), descrita na equação 1:

$$\theta = a \Psi^c \quad (1)$$

em que θ é o teor de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Ψ é o potencial da água no solo (hPa) e a e c são os parâmetros ajustados. Foi realizada transformação logarítmica na equação 1 e incorporou-se a D_s na descrição matemática da CRA, uma vez que ela permite descrever a variabilidade da estrutura do solo e estimar o θ em Ψ específicos para cada amostra. Dessa forma, a equação 1 toma a forma da equação 2, a qual foi utilizada por Leão et al. (2005):

$$\ln(\theta) = \ln(a + b D_s) + c \ln(\Psi) \quad (2)$$

em que a , b e c são os coeficientes de ajuste do modelo.

A RP varia com o θ e com D_s e dessa relação funcional entre a RP (D_s , θ) pode-se determinar a CRS. A CRS foi ajustada por um modelo não linear utilizado por Busscher (1990) descrito na equação 3:

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

o qual, com a transformação logarítmica, resulta na equação 4:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln D_s \quad (4)$$

em que RP, θ e D_s são expressos em MPa, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e Mg m^{-3} , respectivamente; e d , e , e f , os coeficientes de ajuste do modelo.

O IHO foi determinado adotando os seguintes procedimentos: os valores críticos de θ associados com Ψ , RP e porosidade de aeração são respectivamente: a capacidade de campo (θ_{CC}) ou teor de água no potencial de -0,01 MPa (Reichardt, 1988); o ponto de murchamento permanente (θ_{PMP}) ou teor de água no potencial de -1,5 MPa (Savage et al., 1996); o teor de água no solo em que a RP atinge 2,5 MPa (θ_{RP}); e o teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Grable & Siemer, 1968). Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidos nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa utilizando a CRA, enquanto os de θ_{RP} foram obtidos por meio da CRS, isolando a variável θ na equação 3. O θ_{RP} foi obtido com a substituição de RP = 2,5 MPa na equação ajustada para a CRS, valor

tomado como impeditivo para o crescimento das raízes conforme Taylor et al. (1966). O valor de θ_{PA} foi obtido por $[(1-D_s/D_p)-0,1]$, em que o valor médio de densidade de partículas do solo (D_p) foi de $2,85 \text{ Mg m}^{-3}$, correspondente à média de 33 amostras coletadas aleatoriamente na área experimental e obtidos conforme Embrapa (1997).

Uma variável muito útil para a aplicação do IHO para fins de monitoramento da qualidade física do solo é a D_s , em que ocorre interseção dos limites superior e inferior do IHO, ou seja, a D_s em que o IHO = 0. Imhoff et al. (2001) definem esse valor de D_s como D_{sc} , ou seja, aquela em que as condições físicas do solo podem ser altamente restritivas.

Os ajustes das CRA e CRS foram feitos com a rotina PROC GLM e PROC REG do programa SAS (SAS, 2002). Com o PROC GLM foi ajustado um modelo para testar a influência da camada na CRA e CRS, enquanto essas foram ajustadas para as diferentes camadas de solo com uso do PROC REG. Após obtenção do IHO, a D_{sc} foi determinada na interseção dos limites inferior e superior do IHO. As comparações dos atributos físicos entre as posições e amostragens foram realizadas, utilizando o intervalo de confiança da média (IC) como critério estatístico, calculado conforme a equação 5:

$$IC = \bar{X}_1 \pm t_{\alpha/2} (S_1 / \sqrt{n_1}) \quad (5)$$

em que \bar{X}_1 é a média; $t_{\alpha/2}$, o coeficiente tabelado; S_1 , o desvio-padrão da média; e n_1 , o número de observações. Quando não houve sobreposição entre os limites superior e inferior dos intervalos de confiança das médias, considerou-se, com 85 % de probabilidade, que houve diferença significativa conforme Payton et al. (2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos físicos apresentaram ampla faixa de valores, o que é desejável para a modelagem da CRA, CRS e, consequentemente, para a quantificação do IHO (Quadro 1). Constatou-se a ocorrência de elevados

valores de CV para a RP, os quais decorrem das diferenças do θ e da Ds entre as amostras. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999), Imhoff et al. (2001) e Leão et al. (2004, 2005).

Verificou-se similaridade na amplitude e no CV da Ds no conjunto de amostras de ambas as camadas de solo, apesar dos valores médios maiores de Ds nas amostras de 7,5-15,0 cm. Ressalta-se que a maior Ds no conjunto de amostras de 7,5-15,0 cm não resultou em valores de RP estatisticamente superiores nessa camada de solo. Para θ , os valores médios indicaram que o procedimento adotado para a secagem das amostras foi similar àquele obtido com uso de mesa de tensão e câmaras de extração de Richards, utilizados por Petean et al. (2010) e Tormena et al. (2007) em estudos nesse mesmo solo. Já para o Ψ , a intensidade de dessaturação das amostras de solo em estufa elétrica produziu valores de θ além do ponto de murcha permanente.

A CRA e CRS foram ajustadas incorporando a profundidade como variável de classe (profundidade de 0,0-7,5 cm = 0 e 7,5-15,0 cm = 1), sendo verificado efeito significativo dessa nos modelos ajustados (Quadro 2). Esse comportamento corrobora com Petean et al. (2010), porém resultados em que a profundidade não

apresentou diferenças são reportados em Beutler et al. (2007). No ajuste da CRA, a Ds apresentou influência positiva na variação do θ , assim como nos trabalhos de Tormena et al. (1998), Tormena et al. (2007) e Petean et al. (2010). O efeito da Ds na retenção de água ocorreu por causa da sua influência na porosidade total e na distribuição do tamanho de poros (Richard et al., 2001), e o sinal positivo do coeficiente b (equação 2) indicou que a retenção aumentou com a Ds. Os coeficientes estimados no modelo da CRS indicaram que a RP variou positivamente com a Ds e negativamente com θ , estando em concordância com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999), Leão et al. (2004) e Figueiredo et al. (2011). Os resultados tornaram evidentes que a CRA foi melhor descrita que a CRS, verificados pelos maiores valores de R^2 e F dos modelos ajustados. Apesar dos menores valores de R^2 dos modelos das CRSs terem sido obtidos com essa estratégia metodológica, os valores de F são altamente significativos ($p < 0,001$).

As estimativas de θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{RP} e θ_{PA} são apresentadas na figura 1. Constatou-se que o aumento da Ds foi acompanhado do aumento do θ_{RP} , bem como do decréscimo de θ_{PA} , corroborando com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (2007), Imhoff et al. (2001), Araújo et al. (2004) e Leão et al. (2004). A θ_{PA} determinou o limite superior do IHO a partir da Ds = 1,24 e 1,30 Mg m⁻³, para as camadas de 0,0-7,5 e 7,5-15,0 cm, respectivamente. Esses resultados sugeriram que o aumento na Ds implicou na maior necessidade de perda de água para propiciar poros livres de água em quantidade suficiente para a aeração em níveis não limitantes ao crescimento de raízes. Em razão da incorporação da Ds nos modelos da CRA, conforme aumentou o valor de Ds elevou também o valor de θ_{CC} e o de θ_{PMP} . Ressalta-se que para a profundidade de 7,5-15,0 cm, a substituição do θ_{CC} pelo θ_{PA} não implicou na redução do IHO, uma vez que a interseção do θ_{CC} com θ_{RP} ocorreu em Ds < 1,30 Mg m⁻³.

A RP determinou o limite inferior do IHO em toda a extensão de Ds da camada de 7,5-15,0 cm e a partir da Ds = 1,10 Mg m⁻³, na camada de 0,0-7,5 cm. Isso indica que a RP é a variável mais limitante e de maior importância para a qualidade física desse solo, anteriormente verificado em outros trabalhos, como os de Topp et al. (1994), Silva et al. (1994), Imhoff et al. (2001) e Petean et al. (2010). Ainda, esses resultados

Quadro 2. Atributos físicos do solo determinados nas amostras com estrutura não deformada para avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo

Atributo	Média	IC	Mínimo	Máximo	CV
			0,0-7,5 cm		%
Ds (Mg m ⁻³)	1,254	0,026	1,054	1,391	4,456
θ (m ³ m ⁻³)	0,440	0,029	0,313	0,549	14,143
ψ (MPa)	1,307	0,423	0,002	11,680	221,780
RP (MPa)	3,115	0,792	0,899	12,159	55,064
			7,5-15,0 cm		
Ds (Mg m ⁻³)	1,307	0,021	1,115	1,413	3,548
θ (m ³ m ⁻³)	0,419	0,029	0,242	0,546	14,963
ψ (MPa)	0,833	0,355	0,002	13,610	291,366
RP (MPa)	3,451	0,866	0,727	11,001	54,327

IC: intervalo de confiança da média a 85 % (Payton et al., 2000); Ds: densidade do solo; θ : teor de água do solo; e RP: resistência do solo à penetração.

Quadro 3. Ajuste das equações da curva de resistência do solo à penetração (CRS) e da curva de retenção de água no solo (CRA) nas camadas estudadas

Camada	CRA	CRS
cm		
0,0-7,5	$\theta = (0,1380 + 0,4092 Ds) \psi^{(-0,0889)}$ F = 1041,59; p < 0,0001; R ² = 0,92	RP = 0,1527 $\theta^{-1,8018}$ Ds ^{6,1534} F = 165,77; p < 0,0001; R ² = 0,65
7,5-15,0	$\theta = (0,0845 + 0,4716 Ds) \psi^{(-0,0781)}$ F = 927,08; p < 0,0001; R ² = 0,81	RP = 0,1222 $\theta^{-1,9918}$ Ds ^{5,4949} F = 123,84; p < 0,0001; R ² = 0,65

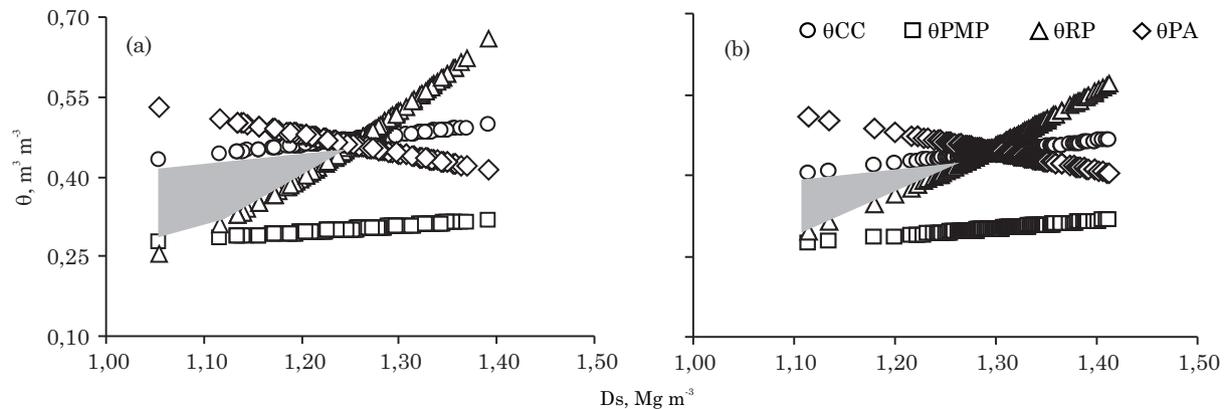


Figura 1. Variação do teor de água do solo (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), resistência à penetração (θ_{RP}) e porosidade de aeração (θ_{PA}) nas camadas de 0,0-7,5 (a) e 7,5-15,0 cm (b). As áreas em cinza correspondem ao IHO.

revelaram que, nesse solo, o limite inferior associado com o potencial de água de -1,5 MPa teve pequena importância relativa na estimativa do IHO e que esse pode ser substituído pelo θ em que a RP atinge um valor crítico.

Na camada de 0,0-7,5 cm de profundidade, o valor de D_{sc} foi de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 2), o qual foi similar ao obtido por Petean et al. (2010) na mesma área, indicando que o método proposto de determinação da CRA com o secamento das amostras em estufa proporcionou resultados similares àquele descrito em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998), amplamente utilizado para definir o IHO. Para a camada de 7,5-15,0 cm, o valor de $D_{sc} = 1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ foi numericamente igual ao alcançado por Petean et al. (2010), ratificando que ambas as estratégias podem ser utilizadas para estimar o IHO e, conseqüentemente, a D_{sc} do solo.

Os resultados descritos demonstraram que a utilização combinada de tensiômetro (T5) eletrônico e psicrômetro (WP4-T) é uma alternativa adequada para a determinação da CRA. A utilização de tensiômetros com capacidade de medir potenciais $< -0,08 \text{ MPa}$ pode contribuir para melhoria da descrição da CRA, como o tensiômetro usado por van der Ploeg et al. (2010), os quais conseguiram medir Ψ até -1,6 MPa com a substituição da água por polímeros. Uma vantagem do método proposto foi a redução no tempo necessário para obtenção dos dados de θ , Ψ e RP. Enquanto na literatura há relatos de até 75 dias para atingir o equilíbrio em -1,5 MPa (Bittelli & Flury, 2009), neste estudo foram necessários apenas 10 dias para alcançar todos os dados.

CONCLUSÕES

1. A CRA e a CRS foram adequadamente descritas utilizando o método alternativo proposto.

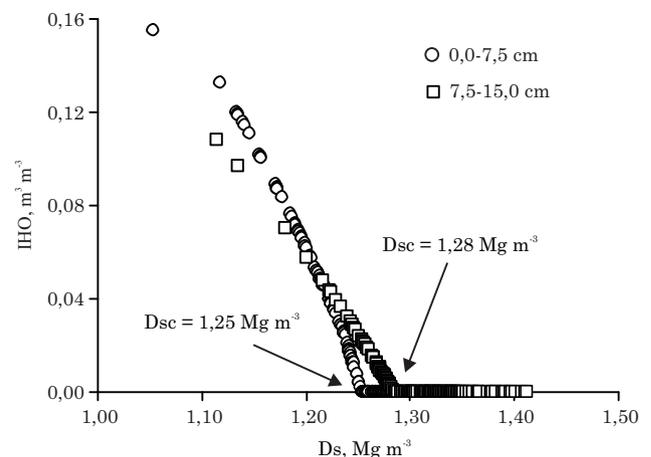


Figura 2. Variação do intervalo híbrido ótimo (IHO) e da densidade do solo (D_s) e respectivos valores da densidade crítica do solo (D_{sc}) nas camadas de 0,0-7,5 e 7,5-15,0 cm.

2. O método proposto permitiu obter dados de θ e RP em 10 dias e possibilitou ajuste acurado dos dados para descrever o IHO e obter a D_{sc} .

LITERATURA CITADA

- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004a.
- BALL, B.C. & HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. Geoderma, 43:195-212, 1988.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P. & GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 36:971-982, 2012.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G. & FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1223-1232, 2007.
- BITTELLI, M. & FLURY, M. Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effects on soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73:1453-1460, 2009.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.M. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SANTI, G.R.; PAULETTO, E.A. & PINTO, L.F.S. Retenção de água medida pelo método de placas porosas de Richards e pelo psicrômetro de termopar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., Cuiabá, 2002. *Anais...* Cuiabá, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002.
- COSTA, A.C.S. Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil. Columbus, The Ohio State University, 1996. 243p. (Tese de Doutorado)
- COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.S. & KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:515-523, 2008.
- DECAGON DEVICES, INC. Operator's manual version 5: WP4 Dewpoint PotentiaMeter. Pulmann, Decagon Devices, 2007. 78p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FIGUEIREDO, G.C. Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2010. 163p. (Tese de Doutorado)
- FIGUEIREDO, G.C.; DA SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S.O. & ALMEIDA, B.G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: Procedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil aggregates. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:373-387, 2011.
- 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 Sci. Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.
- GROSSMAN, R.B. & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p.201-228.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- KLEIN, V.A.; MADALOSSO, M.B.T. & MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ci. Rural*, 40:1550-1556, 2010.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. *Agron. J.*, 97:1210-1215, 2005.
- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E. & RAUN, W.R. Testing statistical hypothesis using standard error bars and confidence intervals. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 31:547-551. 2000.
- PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A. & ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1515-1526, 2010.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-16, 1988.
- RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J.F.; BRUAND, A. & GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52:49-58, 2001.
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. *Soil Sci. Soc Am. J.*, 55:923-927, 1991.
- SAS Institute. SAS: User's guide: Statistics. 9.ed. Cary, 2002. 943p.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.*, 88:844-851, 1996.
- SCANLON, B.R.; ANDRASKI, B.J. & BILSKIE, J. Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p.643-670.

- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F. & MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. *J. Hydrol.*, 470/471:65-74, 2012.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strengthroot penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TOPP, G.C. & FERRÉ, P.A. Methods for measurement of soil water content: thermogravimetric using convective oven drying. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 2002. Part 4. p.422-424.
- TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): An approach for assessing soil structure. Ottawa, Soil Quality Evaluation Program/Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical Report, 2)
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232, 1999.
- UMS GMBH MÜNCHEN. T5, T5x pressure transducer tensiometer: User manual. Munchen, UMS, 2009.
- van der PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.; HOOGENDAM, C.W.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K.; KRUIDHOF, H. & ROOIJ, G.H. Polymer tensiometers with ceramic cones: Direct observations of matric pressures in drying soils. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14:1787-1799, 2010.