

CARACTERIZAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO ROXO SOB PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

C. A. TORMENA⁽²⁾, A. P. SILVA⁽³⁾ & P. L. LIBARDI⁽⁴⁾

RESUMO

O crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas é influenciado por vários atributos físicos do solo, com complexas interações que envolvem o potencial da água no solo, o teor de oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um parâmetro físico do solo que incorpora os efeitos do conteúdo de água no solo sobre as variações do potencial mátrico, aeração e resistência mecânica do solo. O IHO não tem sido avaliado em solos tropicais, razão por que o objetivo deste trabalho é o de caracterizá-lo num Latossolo Roxo (Typic Hapludox), cultivado com milho no sistema de plantio direto. Para este fim, foram obtidas, nas posições linha e entrelinha da cultura do milho, 72 amostras de solo com estrutura indeformada, nas quais foram determinadas a curva de retenção de água, a curva de resistência à penetração e a densidade do solo, necessárias à obtenção do limite superior e inferior que definem o IHO. Segundo os resultados, o IHO variou positivamente até a densidade de $1,1 \text{ Mg m}^{-3}$ e negativamente para densidades superiores. A amplitude de variação do IHO foi de $0,0073$ até $0,125 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No limite inferior do IHO, em relação ao ponto de murcha, a resistência à penetração foi o fator limitante em 85% das amostras, enquanto a capacidade de campo foi o limite superior em 97% das amostras em relação à porosidade de aeração. As modificações na estrutura do solo, refletidas pela variação na densidade, foram mais sensivelmente descritas pelo IHO do que pela água disponível entre a capacidade de o campo e o ponto de murcha permanente. A resistência à penetração e a porosidade de aeração foram fortemente influenciadas pela densidade do solo; neste solo, a redução nos limites do IHO foi determinada pela variação da resistência do solo. Avaliações suplementares do IHO, em solos tropicais, são necessárias sob condições de ampla variação de textura e manejo.

Termos de indexação: propriedades físicas do solo, resistência à penetração, densidade do solo, Latossolo Roxo.

⁽¹⁾ Trabalho desenvolvido no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP. Recebido para publicação em janeiro e aprovado em agosto de 1998.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá e Pós-graduando em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Laboratório de Física de Solos, Departamento de Solos. Av. Pádua Dias, 11. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail catormen@cca.uem.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Física, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *CHARACTERIZATION OF THE LEAST LIMITING WATER RANGE OF AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE*

Soil physical attributes, i. e., soil water potential, soil oxygen, and soil strength, directly affect plant growth. The least limiting water range (LLWR) is the range of soil water content within which plant growth is least limited by water potential, aeration and mechanical resistance and has not been evaluated in tropical soils. The objective of this research was to characterize the LLWR of a Typic Hapludox cropped to corn under no-tillage. Seventy-two undisturbed soil samples were collected at the crop row and interrow. The soil water retention curve and the soil resistance curve were evaluated in order to compute the LLWR. The results indicated that the LLWR varied positively with bulk density up to 1.1 Mg m^{-3} and negatively for higher densities. The LLWR ranged from 0.0073 to $0.1252 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Soil resistance to penetration was the limiting factor at the dry end of the LLWR in 85% of the samples while field capacity was the limiting factor at the wet end in 97%. Further studies on the LLWR in tropical soils would be relevant under a wide range in texture and management.

Index terms: soil physical properties, soil density, soil penetration resistance, least limiting water range, Oxisol.

INTRODUÇÃO

A capacidade do solo em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas é denominada qualidade física do solo. A estrutura do solo pode ser alterada pelas práticas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por meio das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes. A quantificação e a compreensão do impacto dessas práticas sobre a qualidade física do solo são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter & Youngs, 1992). A relação entre a estrutura do solo e a produtividade das culturas ainda é pouco compreendida, considerando as dificuldades em quantificar os vários atributos físicos do solo ligados à estrutura. A variabilidade espacial e temporal da estrutura é um dos fatores que dificultam essa quantificação (Dexter, 1988). Além disso, alguns atributos físicos do solo variam conjuntamente.

As condições físicas do solo na zona radicular, as quais estão relacionadas com a estrutura do solo, são determinadas pela disponibilidade de água, pela aeração, pela temperatura e pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (Eavis, 1972; Letey, 1985; Hamblin, 1985; Boone et al., 1986). Os atributos físicos do solo diretamente relacionados com o crescimento das plantas são: a retenção de água, a aeração e a resistência à penetração das raízes (Letey, 1985). Valores-limites dessas propriedades em relação ao crescimento das plantas têm sido documentados na literatura. Grable & Siemer (1968) definem uma porosidade de aeração mínima de 10%, para que a difusão de oxigênio

atenda à demanda do sistema radicular. Taylor et al. (1966) consideram que valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa são impeditivos ao crescimento e funcionamento do sistema radicular. Viehmeyer & Hendrickson (1927) tomaram como água disponível (AD) a quantidade de água existente entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murchamento permanente (PMP). O conceito de AD entre os potenciais de -0,01 MPa (CC) e -1,5 MPa (PMP), no solo da zona radicular, tem sido utilizado no desenvolvimento de estratégias de manejo do solo (Cassel & Nielsen, 1986), apesar das críticas (Ritchie, 1981).

A AD incorpora uma ampla variação de tamanhos de poro e a sua utilização como indicador da qualidade do solo para o crescimento das plantas revela que, dentro desta faixa de potenciais, não ocorrem limitações por aeração e, ou, resistência do solo. No entanto, tal condição depende da estrutura do solo (Hamblin, 1985). Em um solo compactado, Boone et al. (1987) demonstraram que a ocorrência de restrições ao crescimento das plantas por excessiva resistência e, ou, reduzida difusão de oxigênio no solo foi dependente da variabilidade temporal da umidade devida à distribuição da precipitação. A variação do conteúdo de água no solo foi utilizada por Phene & Beale (1976) para demonstrar ser possível obter condições de abundante desenvolvimento de raízes num solo compactado.

Várias pesquisas revelam estreita interação das condições físicas do solo e o crescimento das plantas, uma vez que as raízes parecem dispor de mecanismos de detecção dessas condições, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento e a expansão foliar (Masle & Passioura, 1987; Passioura & Gardner, 1990; Davies & Zhang, 1991).

O reconhecimento da ocorrência desta interação e de que as culturas estão sujeitas as suas interferências demonstra a necessidade de quantificá-la na avaliação da influência das práticas de manejo sobre as condições físicas do solo. Essas condições são quantificadas por variáveis relacionadas a estrutura do solo, apesar de que, freqüentemente, tem-se enfatizado sobre a necessidade de um número mínimo de variáveis que integrem tais condições (Boone et al., 1987; Boone, 1988; Dexter, 1988), considerando os problemas envolvidos na redução de complexas interações para uma única variável (Topp et al., 1994).

O conceito de uma única variável que descreve as interações entre os atributos físicos e o crescimento das plantas foi proposto por Letey (1985) - "Non Limiting Water Range" (NLWR). O NLWR é definido como a faixa de conteúdos de água no solo, em que as limitações para o crescimento das plantas em função do potencial mátrico, aeração e resistência do solo são nulas. O limite inferior do NLWR é a capacidade de campo ou o conteúdo de água no solo, no qual a porosidade de aeração é de 10% e o limite superior é o ponto de murchamento permanente ou o conteúdo de água quando a resistência à penetração atinge 2,0 MPa. Isto evidencia que o crescimento radicular ocorre normalmente entre os limites do NLWR e é completamente impedido fora deste.

No entanto, o crescimento do sistema radicular varia de uma forma contínua com o potencial (Allmaras & Logsdon, 1990), o que levou Silva et al. (1994) a aprimorarem esse conceito. Segundo esses autores, o crescimento das raízes é menos restrito dentro dos limites, enquanto as limitações aumentam fora desses limites, caracterizando o "Least Limiting Water Range" (LLWR). O conceito do LLWR foi quantificado por Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994) e proposto como um índice da qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas. Orellana et al. (1997) também utilizaram o conceito introduzido por Letey (1985) em avaliações da qualidade física do solo, denominando-o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo, adotado neste trabalho. O IHO integra três fatores relacionados com o crescimento das plantas determinado pelas propriedades intrínsecas e pela estrutura do solo (Silva et al., 1994). Tais particularidades tornam o IHO uma variável útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável do solo, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas.

A variabilidade na textura do solo e os impactos dos sistemas de manejo sobre sua estrutura modificam os atributos físicos do solo na zona radicular, promovendo alterações na amplitude do IHO (Topp et al., 1994; Silva et al., 1994). As modificações no conteúdo de água no solo magnificam o impacto da estrutura do solo sobre o crescimento

das plantas, de forma que, conforme sugerido por Kay (1990), quanto menor o IHO, maior a probabilidade de ocorrência de limitações físicas para o crescimento das raízes no solo. Tal hipótese, comprovada por Silva & Kay (1997b), indica que a ocorrência de conteúdos de água fora dos limites do IHO foi negativamente relacionada com sua amplitude. Isto significa que os sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma maior freqüência de situações de stress por excesso ou falta de água. Assim, a magnitude do IHO pode ser utilizada como um diagnóstico da freqüência com que a estrutura do solo determina as condições de umidade que impõem limites ao crescimento das plantas.

A amplitude do IHO depende da estrutura e da textura do solo. O IHO foi avaliado em solos de clima temperado com diferentes classes texturais e condições de manejo, e os resultados demonstram ser ele negativamente correlacionado com o teor de argila e densidade dos solos (Topp et al., 1994; Silva et al., 1994; Silva & Kay, 1997a). Segundo resultados obtidos por Topp et al. (1994), é grande a freqüência de valores muito baixos e até nulos do IHO em solos argilosos. Estreitos valores do IHO indicam que as culturas podem ser submetidas a restrições por aeração deficiente ou excessiva impedância mecânica durante o seu crescimento, conforme teorizado por Kay (1990). Essas constatações demonstram a necessidade de quantificar o IHO em solos tropicais, especialmente nos de elevados teores de argila, com o objetivo de avaliar a sua sensibilidade às modificações na estrutura pelos sistemas de manejo. Dentre estes solos, os Latossolos de textura argilosa ou muito argilosa apresentam, sob condições naturais, excelentes condições físicas oriundas da microestrutura granular fortemente desenvolvida. Em geral, as boas condições físicas do solo referem-se à infiltração de água e à resistência a erosão.

Este trabalho teve por objetivos quantificar as funções necessárias para a obtenção dos limites do IHO, como proposto por Silva et al. (1994), e caracterizar o seu comportamento num Latossolo Roxo muito argiloso, cultivado no sistema de plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado numa área agrícola comercial situada no município de Guaíra, região nordeste do estado de São Paulo, situado entre as coordenadas 20° 19' 13" de latitude sul e 48° 18' 03" de longitude oeste. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, com temperatura média de 22,7°C, precipitação média 1.420 mm entre outubro e abril; e um período seco, com precipitações menor que 220 mm, entre maio e setembro (Saad, 1987).

Neste estudo, foram utilizadas amostras de um Latossolo Roxo (Typic Hapludox), cuja análise granulométrica revelou valores médios de 800 g kg⁻¹ de argila, 150 g kg⁻¹ de silte e 50 g kg⁻¹ de areia (classe textural muito argiloso). A amostragem foi realizada num talhão cultivado em sistema de plantio direto e irrigado por aspersão por meio de pivô central. A rotação de culturas utilizada consiste de soja no verão, como cultura principal; milho no inverno, como cultura “safrinha” seguido da cultura do feijão. A amostragem foi feita na primeira quinzena de agosto de 1996 e, neste período, a área estava sendo cultivada com milho (*Zea mays* L.) c.v. Cargill 701. A adubação de base da cultura de milho foi com 330 kg ha⁻¹ de uma formulação comercial 04-20-20 + Zn. Utilizaram-se, nas adubações de cobertura, 145 kg ha⁻¹ da formulação comercial 20-00-20 aplicados 20 dias após a germinação (DAG) das plantas; 70 e 40 kg ha⁻¹ de uréia foram aplicados aos 35 e 50 DAG. O controle de ervas daninhas foi feito por meio de métodos químicos convencionais.

A amostragem foi realizada na fase de maturação da cultura do milho. Foram retiradas amostras com estrutura indeformada (5 cm de altura por 5 cm de diâmetro) da camada de 0-0,10 m de profundidade, para as determinações físicas necessárias. Os pontos de amostragem foram localizados numa transeção transversal às linhas das culturas, com comprimento de 32,4 m, com as amostras sendo retiradas a cada 0,45 m, sequencialmente nas posições linha (L) e entrelinha (EL) da cultura, totalizando 72 amostras. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de aproximadamente 5°C até serem processadas.

Após devidamente preparadas, as amostras foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Para determinar a curva de retenção, adotou-se o procedimento descrito em Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em 9 grupos de 8, sendo quatro amostras por posição de amostragem: 4 amostras na linha e 4 amostras na entrelinha. Em cada grupo de amostras, foram aplicados os seguintes potenciais: -0,006 e -0,008 MPa numa mesa de tensão adaptada de Topp & Zebtchuk (1979); -0,01, -0,03, -0,05, -0,07, -0,1, -0,5 e -1,5 MPa, mediante pressões aplicadas em placas porosas conforme Klute (1986). O tempo para equilíbrio variou desde 48 horas, para o maior potencial, até trinta dias, para o menor potencial aplicado às amostras. Após atingir o equilíbrio, as amostras foram utilizadas para determinar a resistência à penetração e, em seguida, secas em estufa a 105-110°C para determinar o conteúdo de água e a densidade do solo, conforme Blake & Hartge (1986).

Para determinar o IHO, é necessário o conhecimento das curvas de retenção de água e de resistência do solo. A relação funcional entre potencial mátrico

(ψ) e conteúdo volumétrico de água (θ) foi ajustada pelo procedimento descrito por Silva et al. (1994).

A resistência do solo foi determinada em cada amostra após a aplicação dos potenciais já especificados, com o que se estabeleceu um gradiente de umidade entre as amostras. Utilizou-se de um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física de Solos da ESALQ/USP. O penetrômetro é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo; um painel para controle da velocidade e direção de deslocamento; uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste; e uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg acoplada na extremidade do braço mecânico do atuador. Uma haste metálica com diâmetro de 6 mm com um cone na sua extremidade foi utilizada para determinar a resistência do solo à penetração. O cone possui um semi-ângulo de penetração de 30° e área da base de 0,1256 cm². As medidas de resistência à penetração foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenadas num arquivo de dados próprio do sistema. Esses arquivos foram manipulados em planilha eletrônica após serem convertidos para o formato ASCII.

Para determinar a resistência à penetração, foi feita uma medida de resistência no centro geométrico de cada amostra. A velocidade de penetração foi de 1,0 cm min⁻¹ até a profundidade de 4,0 cm. As medidas obtidas da superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade foram descartadas, uma vez que a resistência aumenta até determinada profundidade e depois tende a tornar-se constante. Tal profundidade é considerada por Bradford (1986) como profundidade crítica de penetração e, para a maioria das amostras, ocorreu entre 0,5 e 1,0 cm. O equipamento foi configurado para obter os valores de resistência em MPa, de forma que nenhuma transformação foi requerida no tratamento dos dados. A frequência de amostragem correspondeu à coleta de um valor de resistência a cada 0,6767 segundos, obtendo-se um total de 266 leituras, das quais um valor médio foi utilizado.

A resistência à penetração (RP) é influenciada pela densidade (Ds) e conteúdo de água do solo (θ), de forma que uma relação funcional entre RP, Ds e θ pode ser identificada como curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não linear proposto por Busscher (1990) adotando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994).

O IHO foi determinado, conforme descrito em Silva et al. (1994), para cada amostra, e o valor da densidade do solo conhecido. Os valores críticos para o crescimento das culturas associados com o potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo (θ_{CC}) ou conteúdo de água no potencial de -0,01 MPa (Haise et al., 1955), o ponto de

murchamento permanente (θ_{PMP}) ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (Richards & Weaver, 1944; Savage et al., 1996), o conteúdo de água no solo em que a resistência (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (Taylor et al., 1966), e o conteúdo de água no 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 curva de retenção, e os valores de θ_{RP} em que ocorre resistência à penetração de 2,0 MPa foram obtidos por meio do modelo matemático ajustado aos dados de resistência. O valor de θ_{PA} , em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, foi obtido por $[(1-Ds/Dp) - 0,1]$. Considerou-se o valor de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ como sendo a densidade média de partículas (Dp) neste solo. O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados. O limite superior é o menor valor de θ considerado na capacidade de campo ou na porosidade com ar de 10%, e o limite inferior é o maior valor de θ na resistência de 2,0 MPa ou no ponto de murchamento permanente. O ajuste dos modelos de resistência e de retenção de água foi feito por meio do PROC REG (SAS, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros para as variáveis físicas determinadas nas amostras encontram-se no quadro 1. O elevado coeficiente de variação da resistência à penetração deve-se à variabilidade natural da densidade do solo e ao gradiente de umidade entre as amostras. Nenhuma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) foi observada entre as posições de amostragem sobre as curvas de retenção de água e resistência do solo. Isto pode ser atribuído ao efeito de homogeneização do solo pelos cultivos sobre a área, em torno de três, por ano agrícola.

Quadro 1. Estimadores dos parâmetros para as variáveis físicas do solo determinadas nas amostras com estrutura indeformada

Variável	Média	Desvio-padrão	CV	Mínimo	Máximo
RP	1,609	0,908	56	0,401	4,680
Ds	1,152	0,059	5	1,0	1,280
θ	0,336	0,052	15	0,239	0,435

RP = resistência do solo (MPa); θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}); CV = coeficiente de variação (%); n = 72.

Os coeficientes do modelo de resistência do solo à penetração são apresentados no quadro 2. O modelo ajustado explicou 86% da variabilidade dos dados de resistência à penetração. Os coeficientes demonstram que a resistência variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com o conteúdo de água, estando em concordância com os resultados obtidos por vários autores (Mirreh & Ketchenson, 1972; Ehlers et al., 1983; Stirzaker et al., 1996; Smith et al., 1997). A partir da estimativa dos coeficientes apresentados no quadro 1, obteve-se a equação abaixo (1). O conteúdo de água em que a resistência à penetração atingiu 2,0 MPa foi calculado pela equação (2) obtida de (1).

$$RP = 0,0361 Ds^{7,9683} \theta^{-2,2940} \tag{1}$$

$$\theta = (RP / (0,0361 Ds^{7,9683}))^{1/-2,2940} \tag{2}$$

em que RP = resistência à penetração (MPa); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ = conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Os coeficientes do modelo de retenção de água são apresentados no quadro 3. O modelo explicou 88% da variabilidade do conteúdo de água e os coeficientes obtidos estão de acordo com os resultados de Silva et al. (1994) e Silva & Kay (1997a). O ajuste da curva de retenção por meio do procedimento descrito em Silva et al. (1994) permite a incorporação da densidade do solo na estimativa da umidade. A densidade do solo influencia a retenção de água decorrente de sua influência na porosidade total e distribuição dos tamanhos dos poros. O sinal positivo do coeficiente c (Quadro 2) indica que a retenção de água aumentou com a densidade do solo. Efeitos semelhantes também foram observados por Willians et al. (1993). A equação utilizada para estimar os conteúdos de água na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente é descrita abaixo:

$$\theta = e^{(-1,4894 + 0,7959Ds)*} (\psi^{-0,0842}) \tag{3}$$

em que: θ = conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}) e ψ = potencial mátrico (cm).

O conteúdo de água nos limites críticos do IHO, i.e. θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} , e θ_{PA} , bem como o IHO para cada valor da densidade do solo, encontra-se na figura 1. Neste trabalho, observa-se um efeito positivo da densidade sobre a retenção de água nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa. Outros autores observaram efeito negativo da densidade sobre a retenção de água sob elevados potenciais e positivo sob baixos potenciais (Gupta & Larson, 1979; Smedema, 1993; Silva & Kay, 1997a). Tais autores argumentam que, sob elevados potenciais, a retenção é fortemente influenciada pela porosidade total que diminui com o aumento na densidade, enquanto, sob baixos potenciais, a retenção é controlada pelo volume de micro-poros, os quais têm correlação positiva com a densidade do solo, conforme demonstrado por Carter (1988).

Quadro 2. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para resistência a penetração do solo (RP = MPa), em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade ($D_s = \text{Mg m}^{-3}$) do solo: $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s$

Parâmetro	Erro-padrão	t	Probabilidade ⁽¹⁾	
a	-3,3211	0,1991	-16,68	0,0001
b	-2,2940	0,1606	-14,29	0,0001
c	7,9683	0,4916	16,21	0,0001

⁽¹⁾ Probabilidade de significância para os valores estimados dos parâmetros.

Quadro 3. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada para conteúdo volumétrico da água do solo ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{Mg m}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\psi = \text{cm}$): $\ln \theta = \ln d + e D_s + f \ln \psi$

Parâmetro	Erro-padrão	t	Probabilidade ⁽¹⁾	
d	-1,4894	0,1297	-11,477	0,0001
e	0,7959	0,1146	6,943	0,0001
f	-0,0842	0,0038	-22,128	0,0001

⁽¹⁾ Probabilidade de significância para os valores estimados dos parâmetros.

Como se pode observar na figura 1, na capacidade de campo ($\psi = -0,01 \text{ MPa}$), ocorre um aumento na retenção de água ao longo dos valores de densidade, uma vez que, com o aumento da densidade, há uma redução na macroporosidade (Hill et al., 1985) e uma redistribuição dos tamanhos dos poros. Para maiores valores de densidade, é possível que ocorra uma relação inversa entre retenção de água e densidade do solo, uma vez, para este solo, a máxima densidade obtida por Kertzman (1996), por meio do Teste Proctor, foi de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$. A máxima densidade obtida neste trabalho foi de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$. Tais resultados contrastam com os de Reeve et al. (1973), ou seja: sob elevados potenciais, a maior retenção de água ocorre em menores valores de D_s , em virtude do maior espaço poroso advindo da melhor condição estrutural do solo; sob baixos potenciais ($\psi = -1,5 \text{ MPa}$), o impacto da densidade sobre a retenção é menor do que sob altos potenciais, uma vez que, nestes solos, a microporosidade é pouco afetada pelo aumento da densidade do solo, como constatado por Kertzman (1996). Em solos tropicais, com elevados teores de ferro, a forte microagregação do solo minimiza os efeitos da matéria orgânica. Sob baixos potenciais, a maior retenção de água com o aumento da densidade é devida à maior quantidade de partículas minerais disponíveis para a adsorção de água (Rawls et al., 1982; van den Berg et al., 1997).

Com o aumento na densidade do solo, ocorrem, simultaneamente, um aumento na θ_{RP} e um decréscimo na θ_{PA} (Figura 1). A porosidade de aeração é progressivamente reduzida com o aumento da densidade, conforme constatado por Archer & Smith (1972) e Silva et al. (1994). Neste solo, a porosidade de aeração $\leq 10\%$ ocorreu apenas na máxima densidade medida de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, indicando que, para densidades inferiores, as plantas não terão seu desenvolvimento limitado pela reduzida difusão de oxigênio no solo. Esses resultados contrastam com os de Topp et al. (1994), em solos de textura muito argilosa, segundo os quais houve, com bastante freqüência, condições de stress por aeração. Os resultados deste estudo demonstram que apenas 3% das amostras apresentaram porosidade de aeração menor que 10%. A θ_{PA} ($\theta = 0,417 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) substituiu a θ_{CC} ($\theta = 0,423 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) apenas na máxima densidade obtida de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$. É possível que, para maiores valores de densidade, a θ_{PA} pode constituir-se numa limitação ao crescimento do sistema radicular.

A variação da densidade teve grande impacto sobre a resistência à penetração. A θ_{RP} foi considerada o limite inferior do IHO em 89% das amostras. A θ_{RP} substituiu θ_{PMP} nos valores de $D_s \geq 1,10 \text{ Mg m}^{-3}$. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994), nos quais a resistência foi o fator que mais

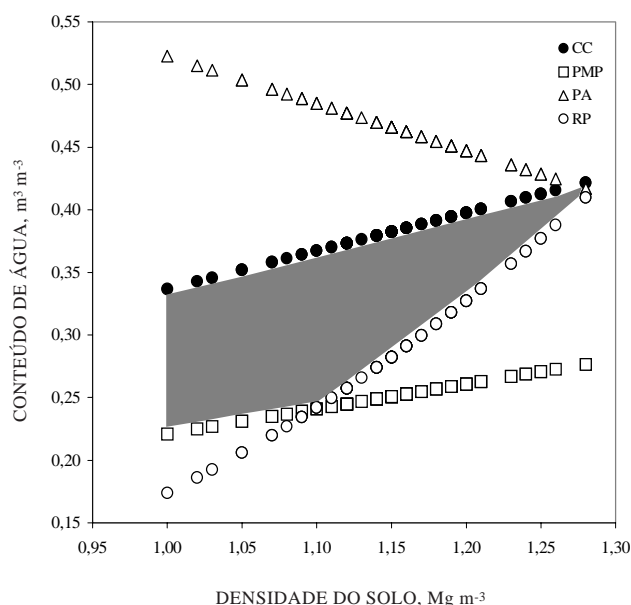


Figura 1. Variação do conteúdo de água com a densidade nos níveis críticos da capacidade de campo (CC ou $\psi = -0,01 \text{ MPa}$), ponto de murcha (PMP ou $\psi = -1,5 \text{ MPa}$), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do Solo (IHO).

frequentemente reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo. Essas constatações têm um significado especial para o manejo do sistema de plantio direto, pois, além de a resistência atuar mais frequentemente como fator limitante ao crescimento do sistema radicular, atinge o valor de 2,0 MPa sob baixos valores de densidade do solo. Os resultados obtidos referem-se à camada de 0-10 cm (entre 2,5 e 7,5 cm). É possível que, nas camadas inferiores, com maiores níveis de compactação, o impacto da resistência sobre o limite inferior do IHO seja ainda maior, em decorrência do forte impacto da densidade sobre a resistência do solo.

A relação funcional entre o IHO e a densidade do solo é mostrada na figura 2. O IHO é positivamente relacionado com a densidade até valores de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ e negativamente para valores superiores. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Silva et al. (1994) num solo de textura arenosa no Canadá, demonstrando que os Latossolos argilosos, com microagregação bastante desenvolvida, comportam-se similarmente aos solos arenosos em termos de retenção de água. Para o intervalo de densidades obtidas, os valores de θ_{RP} , θ_{PA} e θ_{CC} foram fortemente influenciados pela densidade, revelando ser o IHO sensível às modificações na estrutura desse solo, uma vez que a variação da θ_{CC} resultou da influência da densidade na retenção de água nessa faixa de potenciais.

O estabelecimento dos níveis limitantes de propriedades físicas é bastante complexo, pois envolve a integração de variáveis relacionadas com o solo, clima e planta. A capacidade de campo é um

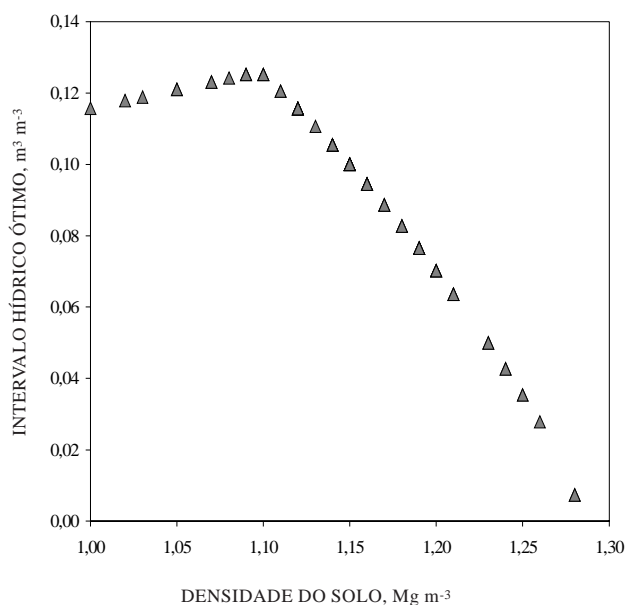


Figura 2. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo em função da densidade do solo.

processo dinâmico e, segundo Reichardt (1988), a escolha de um potencial que corresponda a CC não tem respaldo teórico, pelo que a utilização do potencial de $-0,001 \text{ MPa}$ parece ser uma boa opção, visto que ocorre com maior frequência em solos submetidos à drenagem sob condições de campo (Reichardt, 1988). Em relação ao PMP, recente estudo demonstrou que o conteúdo de água no potencial de $-1,5 \text{ MPa}$ pode ser considerado o limite inferior de disponibilidade de água às plantas (Savage et al., 1996). De acordo com Silva et al. (1994), a sensibilidade de variação do IHO com a densidade está ligada aos limites de resistência e aeração selecionados. A porosidade de aeração crítica de 10%, para uma adequada difusão de oxigênio no solo, tem sido adotada como mínima para uma adequada difusão de oxigênio no solo, e não há resultados indicando valores mais consistentes, apesar de ser a variação tolerada variável entre diferentes espécies de plantas. Topp et al. (1994) argumentam que, em algumas situações, este valor de 10% pode não ser suficiente para atender à demanda do sistema radicular em oxigênio.

Em relação à resistência crítica, o valor de 2,0 MPa tem sido aceito como limite, apesar de que as diferentes espécies de plantas apresentam competências diferenciadas para penetrar o solo (Materchera et al., 1991). Algumas pesquisas têm demonstrado que as culturas podem apresentar crescimento radicular sob resistências superiores a 2,0 MPa (Topp et al., 1994; Ehlers et al., 1983), ou restrito sob resistências ainda menores que este valor (Bengough & Mullins, 1990). A seleção de valores dos limites associados com o potencial, aeração e resistência modifica a sensibilidade do IHO, o qual varia com a textura e densidade do solo (Silva et al., 1994), sem alterar a forma e a validade do conceito do IHO. Esses autores constataram que as variações no IHO, adotando diferentes níveis críticos de porosidade de aeração e resistência, foram mais sensíveis sob maiores valores de densidade do solo.

Para o solo utilizado neste trabalho, a resistência é o fator que assume maior importância relativa em termos de limitações ao crescimento radicular. A variação do IHO, adotando níveis de resistência crítica de 1,5, 2,0 e 3,0 MPa, é apresentada na figura 3. Com o aumento na resistência, a densidade do solo, em que o IHO é máximo, é alterada, acompanhando a correlação positiva entre as duas variáveis. Os resultados apresentados na figura 3 indicam que com a variação nos limites de resistência, a sensibilidade de variação do IHO foi maior com o aumento da densidade do solo, em conformidade com os resultados obtidos por Silva et al. (1994). Isto revela que espécies mais sensíveis aos efeitos da resistência podem estar mais sujeitas às variações nas condições físicas do solo em função da variabilidade da densidade no campo, durante a fase de secamento do solo.

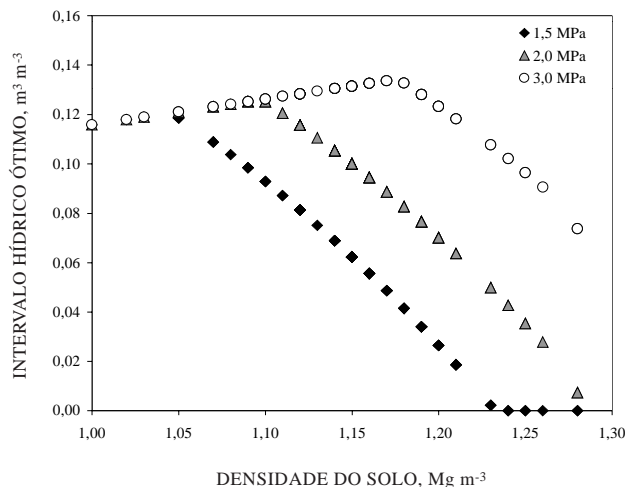


Figura 3. Variação no Intervalo Hídrico Ótimo em função da densidade do solo em diferentes níveis críticos de resistência à penetração.

O IHO foi mais sensível que a AD e densidade para descrever e quantificar os efeitos das variações na estrutura do solo sobre as limitações físicas para o crescimento das plantas. A resistência à penetração foi o atributo físico que contribuiu para esse comportamento, evidenciando que a avaliação dos limites de resistência para o crescimento de raízes em solos tropicais é fundamental em futuras utilizações do IHO. De forma geral, os resultados indicam que, neste solo, as funções utilizadas para avaliar o IHO permitem incorporar as variações da estrutura, representadas pela densidade do solo, podendo tal método ser utilizado para avaliar o IHO sob amplas variações de textura e condições de manejo.

CONCLUSÕES

1. As funções utilizadas permitiram descrever adequadamente o conceito do IHO, que se mostrou mais sensível às variações da estrutura do solo do que a água disponível. A amplitude de variação do IHO foi de 0,0073 até 0,125 m³ m⁻³.

2. A resistência à penetração e a porosidade de aeração foram fortemente influenciadas pela densidade do solo. A resistência à penetração foi o fator limitante em 85% das amostras, enquanto a capacidade de campo foi o limite superior em 97% das amostras em relação à porosidade de aeração.

3. IHO foi influenciado positivamente até a densidade de 1,1 Mg m⁻³ e negativamente para densidades superiores e, no campo, a variação da densidade resultou numa ampla variação do IHO.

LITERATURA CITADA

- ALLMARAS, R.R. & LOGSDON, S.D. Soil structural influences on root zone and rhizosphere. In: BOX Jr., J.E. & HAMMOND, L.C., eds. Rhizosphere dynamics. Washington, D.C.: AAAS, 1990. p.8-54.
- ARCHER, J.R. & SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. *J. Soil Sci.*, 23:475-480, 1972.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341- 358, 1990.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk Density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, ASA - SSSA, 1986. p.363-375.
- BOONE, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Till., Res.*, 11:283-324, 1988.
- BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A. & BOERS, A. The effect of compaction of arable layer in a sandy soils on the growth of maize for silage. I. Critical potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Res.*, 34:155-171, 1986.
- BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. *Neth. J. Agric. Res.*, 35:113-128, 1987.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods. 2 ed. Madison, ASA - SSSA. 1986. p.463-478.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil Till. Res.*, 12:37-51, 1988.
- CASSEL, D.K. & NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2 ed. Madison, ASA - SSSA, 1986. p.901-926.
- DAVIES, W.J. & ZANGH, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 42:55-76, 1991.
- DEXTER, A.R. Advancs in characterization of soil structure. *Soil Till., Res.*, 11:199-238, 1988.
- DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. *Soil Till. Res.*, 24:101-106, 1992.
- EAVIS, B.W. Soil physical condition affecting seedlling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36:613-622, 1972.
- EHLERS, W.W.; KOPKE, F.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.

- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:180-186, 1968.
- GUPTA, S.C. & LARSON, W.E. Estimating soil water characteristics from size distribution, organic carbon and bulk density. *Water Res. Res.*, 15:1633-1635, 1979.
- HAISE, H.R.; HAAS, H.J. & JENSEN, L.R. Soil mixture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15- and 26- atmosphere percentage. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 34:20-25, 1955.
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158, 1985.
- HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1264-1270, 1985.
- KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12:1-51, 1990.
- KERTZMAN, F.F. Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo roxo provocadas pela compactação do solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1996. 190p. (Tese de Doutorado)
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods.* 2 ed. Madison, ASA - SSSA, 1986. p.635-660.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294. 1985.
- MASLE, A. & PASSIOURA, J.B. Effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 14:634-656, 1987.
- MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R. & ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. *Plant Soil*, 135:31-41, 1991.
- MIRREH, H.F. & KETCHENSON, J.W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. *Can. J. Soil Sci.*, 52:477-483, 1972.
- ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.A. & GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. *J. Sustain. Agric.*, 9:91-108, 1997.
- PASSIOURA, J.B. & GARDNER, P.A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Aust. J. Plant Physiol.*, 17:149-157, 1990.
- PHENE, C.J. & BEALE, O.W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:430-436, 1976.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. & SAXTON, K.E. Estimation of soil water properties. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 35:1316-1320, 1982.
- REEVE, M.J., SMITH, P.D. & THOMASSON, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. *J. Soil Sci.*, 24:355-367, 1973.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- RICHARDS, L.A. & WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Sci.*, 56:331-339, 1944.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. *Plant Soil*, 58:327-338, 1981.
- SAAD, A.M. Apoio tecnológico à agricultura irrigada no município de Guaira, SP. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1987. 59p. (IPT, Publicação, 1746).
- SAS INSTITUTE. SAS/Stat procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, 1991.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.*, 88:844-851, 1996.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997a.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:884-888, 1997b.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SMEDEMA, L.K. Drainage performance and soil management. *Soil Technol.*, 6:183-189, 1993.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A. & LORENZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of south african forestry soils. *Geoderma*, 78:93-111, 1997.
- STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B. & WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, 185:151-162, 1996.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TOPP, G.C. & ZEBTCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. *Can. J. Soil Sci.*, 59:19-26, 1979.
- 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. Ottawa, Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2)
- Van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfers functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.
- VIEHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. *Plant Physiol.*, 2:71-78, 1927.
- WILLIAMS, J.; ROSS, P. & BRISTOW, K. Prediction of Campbell water retention from texture, structure and organic matter. In: van GENUCHTEN, M. Th. & LUND, L.J., eds. *Indirect methods for estimating the hydraulics properties of unsaturated soils.* Riverside, University of California, 1993. p.427-441.