

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

EFEITOS DE SISTEMAS DE PREPARO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO⁽¹⁾

Karina Maria Vieira Cavaliere⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽³⁾, Pedro
Soares Vidigal Filho⁽³⁾, Antonio Carlos Andrade
Gonçalves⁽³⁾ & Antonio Carlos Saraiva da Costa⁽³⁾

RESUMO

Os sistemas de preparo do solo e o manejo dos resíduos culturais assumem fundamental importância para a sustentabilidade dos sistemas de produção de mandioca nos solos de textura média a arenosa da região Noroeste do Estado do Paraná. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes sistemas de preparo utilizados para o plantio da cultura da mandioca, em algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. Os tratamentos utilizados foram: plantio sem revolvimento do solo (PSR), preparo mínimo com escarificação (PM) e preparo convencional com aração e gradagem (PC). Nas camadas de 0-0,15 e 0,15-0,30 m, foram avaliadas as seguintes propriedades físicas: a densidade do solo (Ds), a curva de retenção de água no solo, a curva de resistência do solo à penetração e o intervalo hídrico ótimo (IHO). Nos sistemas de preparo com reduzida mobilização do solo (PSR e PM), foram constatados maiores valores de Ds e de resistência do solo à penetração. A curva de retenção de água foi influenciada apenas pela Ds, a qual incorporou os efeitos dos sistemas de preparo, independentemente da camada amostrada. A modelagem da curva de resistência do solo à penetração foi influenciada pelos sistemas de preparo e camadas amostradas, com maior resistência à penetração em PSR > PM > PC, acentuada na camada subsuperficial. Com o aumento da Ds, verificou-se redução do IHO associada aos efeitos da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração que determinaram, respectivamente, os limites inferior e superior de água disponível. Os valores do IHO seguiram a seqüência PC = PM > PSR na camada de 0-0,15 m, não diferindo significativamente na camada de 0,15-0,30 m. O valor de densidade do solo crítica (Dsc), densidade em que IHO = 0, foi menor

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Recebido para publicação em março de 2004 e aprovado em outubro de 2005.

⁽²⁾ Doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: kmvcaval@esalq.usp.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

no PSR e PM, comparado ao PC, o que contribuiu para a menor frequência de valores de densidade maiores que a Dsc no PC.

Termos de indexação: densidade do solo, qualidade física, retenção de água no solo, intervalo hídrico ótimo, resistência do solo à penetração.

SUMMARY: EFFECTS OF TILLAGE SYSTEMS ON THE SOIL PHYSICAL PROPERTIES OF A DYSTROPHIC RED LATOSOL

Soil tillage systems and the crop residue management are essential for the sustainability of cassava production in sandy and sandy loam soils of Northwestern Paraná State, Southern Brazil. The objective of this study was to evaluate the effects of different tillage systems used for planting cassava: no-tillage (NT), minimum tillage using chiseling (MT) and conventional tillage with moldboard plow and disking (CT) on some physical properties of a dystrophic Red Latosol. The following soil physical properties were evaluated in the 0–0.15 m and 0.15–0.30 m soil layers: soil bulk density (BD), soil water retention curve, soil resistance to penetration curve and least limiting water range (LLWR). Higher values of BD and soil resistance to penetration were verified in the NT and MT treatments. The soil water retention curve was only influenced by BD, which incorporated the effects of the soil tillage systems independent of sampled layers. The soil resistance curve to penetration was influenced by tillage systems and layers, indicating that the soil resistance to root penetration was higher in NT > MT > CT, and was accentuated at the 0.15–0.30 m depth. The increase in the BD led to a reduction in the LLWR due to the effects of soil resistance to penetration and air-filled porosity, which in turn determined the range of soil available water. Results indicated that LLWR value followed the sequence: PC = PM > PSR in the 0–0.15 m soil layer, and was not influenced by tillage systems in the 0.15–0.30 soil layer. The critical bulk density value (BDc), the BD value at which LLWR = 0, was lower in NT and MT tillage systems compared with CT, therefore resulting in a smaller frequency of higher BD values than BDc in the soil under CT.

Index terms: soil bulk density, soil physical quality, soil water retention, least limiting water range, soil resistance to penetration.

INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura na maioria das regiões agrícolas do Estado do Paraná ocorreu com a retirada da mata nativa e com a introdução de sistemas de manejo que utilizavam sistemas de preparo intensivo, com elevado potencial de degradação do solo. Na região Noroeste, com a maior parte dos solos apresentando textura média a arenosa e com baixos teores de matéria orgânica, as conseqüências destes sistemas de manejo foram as elevadas taxas de erosão e a degradação física, biológica e química dos solos. Neste contexto, os sistemas de preparo e o manejo dos resíduos culturais, além de oferecerem as condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, fundamentam a sustentabilidade dos sistemas de produção nestes solos. A redução na movimentação do solo e a manutenção de resíduos culturais na superfície são práticas necessárias para o controle da erosão e para a redução da degradação do solo e do meio ambiente (Lal, 2000).

A cultura da mandioca plantada com o uso de sistemas de preparo convencional do solo é ampla-

mente cultivada no Estado do Paraná. As raízes tuberosas desta cultura apresentam elevada sensibilidade à compactação do solo, sendo constatado que sistemas de preparo que resultem em aumento da densidade podem comprometer a produtividade da cultura (Howeler et al., 1993). Associado ao preparo do solo, a reduzida cobertura proporcionada pelo manejo e colheita da cultura expõe excessivamente os solos à erosão hídrica e à perda da sua capacidade produtiva. A adoção de sistemas de preparo com mínimo revolvimento do solo que mantêm em superfície os resíduos de culturas de cobertura, como a aveia, tem sido preconizada por constituírem uma alternativa tecnicamente viável para a cultura (Oliveira et al., 2001). Contudo, não há estudos que avaliam as modificações nas propriedades físicas do solo sob sistemas de preparo que têm potencial de utilização para a cultura da mandioca.

A compactação do solo pelo uso de práticas inadequadas de manejo resulta diretamente em aumento na densidade do solo (Ds) e, por conseqüência, em alterações deletérias em outras propriedades físicas, tais como: a porosidade do solo, a retenção de água, a aeração e a resistência do solo

à penetração das raízes (Letey, 1985). Hill et al. (1985) mencionam que, mesmo com o aumento da D_s , os preparos com mínimo revolvimento podem proporcionar maior quantidade de água disponível às plantas quando comparados ao preparo convencional, apesar de tais efeitos variarem com a textura e com o teor de matéria orgânica dos solos. Outros autores argumentam que, nestes sistemas, a compactação superficial ocasionada pelo tráfego de máquinas resulta em maiores valores de D_s e resistência do solo à penetração e em menores valores de porosidade com ar (Maria et al., 1999; Watanabe et al., 2002), com impactos negativos na produtividade das culturas.

A avaliação dos efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas tem sido feita utilizando diferentes propriedades do solo. A densidade e a porosidade do solo têm sido comumente utilizadas (Corsini & Ferraudo, 1999). A resistência do solo à penetração tem sido muito utilizada pela facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas. No entanto, preconiza-se que a avaliação da qualidade física do solo deva integrar diferentes propriedades num reduzido número de parâmetros que expresse o ambiente físico a que as plantas são submetidas (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Zou et al., 2000).

O teor de água no solo, ou, mais especificamente o potencial em que a água se encontra no solo, exerce controle sobre as condições físicas para o crescimento das plantas, decorrente de sua relação com a temperatura, com a difusão de O_2 e com a resistência do solo à penetração (Letey, 1985). Neste sentido, é bem documentada a relação inversa entre o teor de água no solo e as variáveis resistência do solo à penetração, aeração e potencial da água no solo (Eavis, 1972; Busscher et al., 1990). Uma variação no teor de água estabelece modificações na tensão da água no solo, no teor e difusão de gases no solo, na resistência do solo à penetração, na condutividade hidráulica, dentre outras propriedades físicas do solo.

Letey (1985) propôs o termo "Non-limiting Water Range" como uma faixa de teor de água que integra propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas. Este termo foi aprimorado por Silva et al. (1994), como "Least Limiting Water Range" (LLWR), e definido como a faixa de teor de água no solo em que são mínimas as limitações às plantas por água, resistência do solo à penetração e aeração. A designação "Least Limiting Water Range" foi traduzida para a língua portuguesa como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) por Tormena et al. (1998).

O IHO é determinado pela diferença entre o limite superior e inferior de disponibilidade de água no solo: o limite superior é o menor valor do teor de água dentre a capacidade de campo (CC) e aquele em que a porosidade de aeração é de 10 %, enquanto o limite inferior é considerado o maior valor do teor

de água correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP) ou a umidade em que a resistência do solo à penetração atinge valores limitantes ao crescimento de plantas. O IHO aprimora o tradicional conceito de água disponível entre CC e PMP, adicionando as limitações associadas com a aeração e a resistência do solo à penetração. Nos solos em que os sistemas de manejo propiciam melhoria da sua qualidade estrutural, o IHO é numericamente igual a AD.

Por outro lado, em situações de degradação estrutural, percebe-se redução na porosidade total, bem como alteração na distribuição de tamanho dos poros. Isto implica que valores de porosidade com ar de pelo menos 10 % ocorrem em teores de água inferiores a CC, enquanto valores não-restritivos de resistência à penetração exigem teores de água superiores ao PMP. Nestes casos, os limites, superior e inferior, do IHO são determinados, respectivamente, pela porosidade de aeração e pela resistência do solo à penetração.

A utilização de diferentes sistemas de manejo do solo tem como premissa básica manter a qualidade física do solo para a produção das culturas. O IHO integra numa única medida os efeitos da disponibilidade de água, da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração sobre o crescimento das plantas. Neste sentido, o IHO pode ser utilizado para investigar os efeitos de sistemas de uso e manejo em modificações na qualidade física do solo, a exemplo de Betz et al. (1999), Tormena et al. (1999), Benjamin et al. (2003) e Lapen et al. (2004). A degradação da estrutura do solo resulta em redução do IHO (Letey, 1985), a qual, conforme Kay (1989), aumenta a probabilidade de serem as raízes das culturas expostas à ocorrência de limitações físicas no solo. Os resultados obtidos por Silva & Kay (1996) e, mais recentemente, por Lapen et al. (2004) confirmam esta hipótese.

A densidade do solo crítica (D_{sc}) é definida como o valor de D_s em que o limite superior do IHO se iguala ao limite inferior, ou seja, quando o IHO é igual a zero (Silva et al., 1994). Valores de densidade do solo maiores que a D_{sc} indicam condições físicas severamente restritivas para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, para a produtividade das culturas. Quanto maior a frequência de valores de $D_s > D_{sc}$, indicativo de reduzida qualidade estrutural do solo, maiores os riscos de as culturas serem expostas a situações de estresses físicos por reduzida oxigenação do solo ou por elevados valores de resistência do solo à penetração. Neste contexto, a D_{sc} pode ser utilizada como parâmetro-limite para o controle e monitoramento da qualidade física do solo em estudos de sistemas de manejo do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes sistemas de preparo utilizados no plantio da cultura da mandioca em algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na fazenda experimental da Pinduca Indústria Alimentícia Ltda, localizada no município de Araruna, região Noroeste do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico Cfb, sem estação seca, com verões quentes, precipitação média anual de 1.617 mm (Godoy et al., 1976). O solo utilizado neste estudo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, cuja análise granulométrica, na camada de 0–0,30 m, indicou teores de 680 g kg⁻¹ de areia, 10 g kg⁻¹ de silte e 310 g kg⁻¹ de argila, apresentando classe textural franco-argilo-arenosa (Embrapa, 1999). Anterior ao experimento, o sistema de cultivo adotado na área era o de culturas anuais em sistema plantio direto. O experimento iniciou-se com o plantio de aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb), em abril de 1999, por meio de semeadura direta, que se repetiu em maio de 2000. Quando da floração plena, a aveia passou por um processo de rolagem utilizando um “rolo-faca”. A cultura da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz), variedade espeto, foi estabelecida em outubro de 1999 e setembro de 2000.

Os tratamentos foram constituídos de três sistemas de preparo: plantio da cultura sem revolvimento do solo, exceto ao longo das linhas de plantio (PSR); preparo mínimo com escarificação a uma profundidade de 0,25–0,30 m, seguido de destorroador e posterior plantio (PM), e preparo convencional com aração, utilizando-se de arado de aiveca a 0,25–0,30 m de profundidade, seguido de gradagem niveladora (PC). Este procedimento foi adotado sempre antes de cada cultivo da mandioca e após a rolagem da aveia. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos completos casualizados, com oito repetições por sistema de preparo, perfazendo um total de 24 unidades experimentais. Cada unidade experimental teve como área total 75 m² (5 x 15 m) e área útil de 30 m² (2 x 15 m). Tanto as unidades experimentais, quanto os blocos, foram espaçados entre si, por 1 m.

A amostragem foi realizada em julho de 2001, após dois anos de adoção dos sistemas de preparo do solo. Foram coletadas seis amostras com estrutura indeformada em anéis metálicos com dimensão de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura, em cada unidade experimental, sendo três no centro da camada de 0–0,15 m e três na camada de 0,15–0,30 m, totalizando 48 amostras por tratamento. Os pontos de amostragem foram aleatórios dentro de cada bloco. As amostras foram envoltas em papel-alumínio, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de aproximadamente 5 °C até serem processadas.

Feita a preparação, as amostras foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura do cilindro. Após a saturação, as amostras foram divididas em oito grupos de 18 amostras, com três

amostras por potencial, em cada sistema de preparo e camada amostrada. Os seguintes potenciais foram aplicados: -20, -60 e -100 hPa, utilizando uma mesa de tensão, e os potenciais de -300, -500, -1.000, -4000 e -15.000 hPa, por meio de pressões aplicadas em placas porosas, conforme Klute (1986). Após atingir o equilíbrio, foi determinada a massa úmida das amostras, nas quais, posteriormente, foi determinada a resistência do solo à penetração.

Em cada amostra, com um valor conhecido de Ds e do teor de água (θ), após atingir o equilíbrio nos potenciais acima especificados, foi determinada a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrômetro similar ao descrito por Tormena et al. (1998). Utilizou-se uma haste com cone metálico de 4 mm de diâmetro e um semi-ângulo de 30°. As medidas de resistência do solo à penetração obtidas da superfície da amostra até 0,01 m de profundidade foram descartadas. 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 para cada amostra.

Após a determinação da resistência, foi feita a secagem das amostras em estufa, por 24 horas, em temperatura de 105–110 °C. A Ds foi calculada de acordo com Blake & Hartge (1986). Procedeu-se à análise exploratória dos dados de Ds, para verificar possíveis valores discrepantes na distribuição conforme Libardi et al. (1996).

Aos dados de retenção de água no solo foi ajustada a equação proposta por van Genuchten (1980), descrita na equação (1), adotando a restrição para $m=1-1/n$:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [(1 + \alpha \psi)^n]^{1-1/n} \quad (1)$$

em que θ é o teor de água (m³ m⁻³), ψ é o módulo do potencial mátrico (hPa), θ_r é o teor de água residual (m³ m⁻³) e α (hPa⁻¹) e n são parâmetros obtidos no ajuste dos dados ao modelo. O valor de θ_s , o teor de água do solo saturado, foi obtido como $\theta_s = (1-Ds/2,65)$, a partir da Ds e assumindo a densidade de partículas igual a 2,65 Mg m⁻³. Os parâmetros α , n e θ_r foram determinados iterativamente no ajuste dos dados ao modelo. Os efeitos qualitativos dos tratamentos sistemas de preparo e das camadas amostradas foram avaliados nos parâmetros da equação (1), conforme Neter et al. (1996).

A resistência do solo à penetração mostrou-se influenciada pela Ds e θ , de forma que uma relação funcional entre estas variáveis pode ser descrita matematicamente, estabelecendo-se a curva de resistência do solo. Esta foi ajustada por meio de um modelo não-linear, proposto por Busscher (1990), e apresentado na equação 2, adotando os procedimentos de linearização da função conforme Silva et al. (1994).

$$RP = c\theta^d Ds^e \quad (2)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é o teor de água ($m^3 m^{-3}$), D_s é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e c , d e e são parâmetros de ajuste do modelo. Os efeitos dos tratamentos e das camadas foram avaliados conforme Neter et al. (1996).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi determinado conforme Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Para cada amostra, os valores de θ nos limites de potencial mátrico correspondentes à capacidade de campo (θ_{CC}) e ao ponto de murcha permante (θ_{PMP}) foram estimados com base na equação (1). Por meio da curva de resistência do solo à penetração (Equação 2), foi determinado o valor do teor de água no qual a resistência atinge o valor considerado limitante ao crescimento das plantas (θ_{RP}). Assim, os valores do teor de água nos limites, superior e inferior, do IHO foram associados com o potencial de -100 hPa (θ_{CC}) e de -15.000 hPa (θ_{PMP}), com um valor-limite de resistência à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}) e com a porosidade de aeração de 10 % (θ_{Par}). A θ_{RP} foi obtida por meio do rearranjo da equação (2), enquanto a θ_{Par} foi obtida como $\theta_s - 0,1$. O valor de água disponível no solo (AD) foi estimado como a diferença entre a θ_{CC} e θ_{PMP} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo das análises estatísticas descritivas para a D_s está apresentado no quadro 1. Os valores obtidos para o limite inferior e superior da faixa fora da qual se podem caracterizar dados como candidatos a "outliers", conforme Libardi et al. (1996), permitiram identificar apenas uma amostra de $D_s = 1,45 Mg m^{-3}$, externo à distribuição no sistema PM na camada de 0,15–0,30 m. Para os

outros sistemas de preparo e em ambas as camadas estudadas, os dados de D_s encontram-se dentro da faixa na qual não se têm valores discrepantes. Assim, no restante das análises, excluiu-se tal amostra, perfazendo $N = 143$.

Os valores de D_s em PSR, PM e PC e nas duas camadas estudadas compõem uma distribuição cuja média é menos que 1 % maior ou menor que a mediana, estando bem próximos um do outro. O Coeficiente de variação (CV) indicou para todos os sistemas de preparo que os valores de D_s estão mais dispersos na camada de 0–0,15 m. Isto mostra que as influências dos sistemas de preparo na D_s manifestam-se com maior intensidade nesta camada, constatadas pelos valores crescentes do CV na seqüência PSR, PM e PC. Na camada de 0,15–0,30 m, o maior valor de CV ocorre no PSR e PM. No entanto, para o PC, os valores de D_s aproximam-se mais da média, indicando maior uniformidade dos seus valores.

A aplicação do teste de Shapiro Wilk (W) serve como parâmetro para avaliar a normalidade dos dados, sendo adequado para este tipo de distribuição, uma vez que o teste W é indicado para $N < 50$ (Shapiro & Wilk, 1965). O parâmetro W indicou que todos os sistemas de preparo e camadas atendem à normalidade de distribuição ($p > 0,05$). Contudo, a camada de 0–0,15 m apresenta uma freqüência mais normalmente distribuída, quando comparada com a camada de 0,15–0,30 m. O PSR e o PM praticamente não diferiram quanto à normalidade dos dados de D_s na camada de 0–0,15 m. Na camada de 0,15–0,30 m, o PSR foi o que apresentou o maior valor de W, provavelmente em razão da maior homogeneidade do solo em relação ao PM e PC. O PM e o PC manifestaram menores valores de W nesta camada, indicando uma variação maior dos

Quadro 1. Estatística descritiva para os dados de densidade do solo ($Mg m^{-3}$) em três sistemas de preparo (PSR, PM e PC), nas duas camadas amostradas

Parâmetro	PSR		PM		PC	
	0–0,15 m	0,15–0,30 m	0–0,15 m	0,15–0,30 m	0–0,15 m	0,15–0,30 m
Nº amostras	24	24	24	24	24	24
Média	1,66	1,68	1,56	1,66	1,50	1,65
Mediana	1,67	1,67	1,55	1,66	1,49	1,66
Mínimo	1,49	1,55	1,35	1,45	1,31	1,57
Máximo	1,77	1,79	1,75	1,79	1,69	1,72
Quartil inferior	1,61	1,64	1,49	1,62	1,43	1,62
Quartil superior	1,71	1,71	1,64	1,70	1,57	1,68
Amplit. interquart.	0,10	0,08	0,15	0,07	0,14	0,06
Desvio-padrão	0,07	0,06	0,09	0,07	0,10	0,04
Limite inferior	1,46	1,53	1,27	1,51	1,22	1,54
Limite superior	1,86	1,83	1,86	1,81	1,79	1,76
Coef. de variação (%)	4,32	3,72	5,99	4,34	6,81	2,58
W (teste Shapiro Wilk)	0,96	0,97	0,96	0,95	0,98	0,95
$p < W$	0,44	0,76	0,44	0,29	0,90	0,24

valores de D_s em cada sistema, provavelmente associados à utilização dos implementos que efetuaram o revolvimento do solo.

Os resultados obtidos do ajuste da curva de retenção de água estão apresentados nas equações 3 e 4. Não foi constatado efeito significativo dos sistemas de preparo e das camadas amostradas nos coeficientes da equação de van Genuchten (1980). Apenas a D_s foi incorporada ao modelo por meio do parâmetro n . As estimativas de todos os coeficientes da regressão foram estatisticamente significativas, constatados pelo intervalo de confiança dos coeficientes que não inclui o valor zero, conforme recomendação de Glantz & Slinker (1990).

$$\theta = [0,170 + (\theta_s - 0,170) / [(1 + 0,038*\psi)^n]^{1-1/n}] \quad (3)$$

$$n = 12,155 - 11,675*D_s + 3,100*D_s^2 \quad (4)$$

$$R^2 [1 - (SQ_{res}/SQ_{mod})] = 0,99$$

O parâmetro n foi expresso por uma função quadrática da densidade do solo, similar aos resultados obtidos por Tormena et al. (1999) num latossolo de textura muito argilosa. Estes resultados evidenciam que a D_s resumiu e incorporou, de forma indireta, os efeitos dos sistemas de preparo e das camadas amostradas na retenção de água no solo. O procedimento de ajuste utilizando o modelo de van Genuchten (1980) permitiu explicar 99 % da variabilidade da retenção de água no solo, demonstrando a versatilidade e a adequação do modelo aos dados, também verificado por outros autores (Rasiah & Aylmore, 1998; Tormena & Silva, 2002).

A figura 1 apresenta a variação da AD entre θ_{CC} e θ_{PMP} em função da D_s . Observa-se aumento do valor da θ_{CC} à medida que a D_s aumenta. No entanto, a partir de $D_s = 1,65 \text{ Mg m}^{-3}$, o valor da θ_{CC} decresce discretamente, indicando a redução no volume de poros que retêm água no potencial de -100 hPa . Para θ_{PMP} , constatou-se que os seus valores aumentaram com a D_s , com tendência de estabilização ao extremo superior da variação de D_s . Estes resultados estão de acordo com os de Reeve et al. (1973) que também verificaram um aumento na AD com o aumento da D_s , em solos de texturas similares, onde a amplitude de densidade encontrada não excedia $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$.

AD decresceu tanto em baixos como em altos valores de D_s . No primeiro caso, pelo fato de os baixos valores de θ_{CC} estarem provavelmente associados a elevados valores de macroporosidade do solo. Já em elevados valores de D_s , a AD foi reduzida graças à redução da θ_{CC} e ao aumento do θ_{PMP} . Com o aumento da densidade até $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$, o aumento da retenção de água na capacidade de campo é devido à redistribuição do tamanho de poros para maiores quantidades que retêm água no $\psi = -100 \text{ hPa}$. Resultados similares foram obtidos por O'Sullivan & Ball (1993) e por Beutler et al. (2002). Já o limite inferior (θ_{PMP}) tende a ser constante até um valor de D_s igual a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ e, a partir daí, aumentou com a D_s . De acordo com van der Berg et al. (1997), com o acréscimo da D_s aumenta a quantidade de partículas com área de superfície disponível para reter água em baixos potenciais, como em $\Psi = -15.000 \text{ hPa}$.

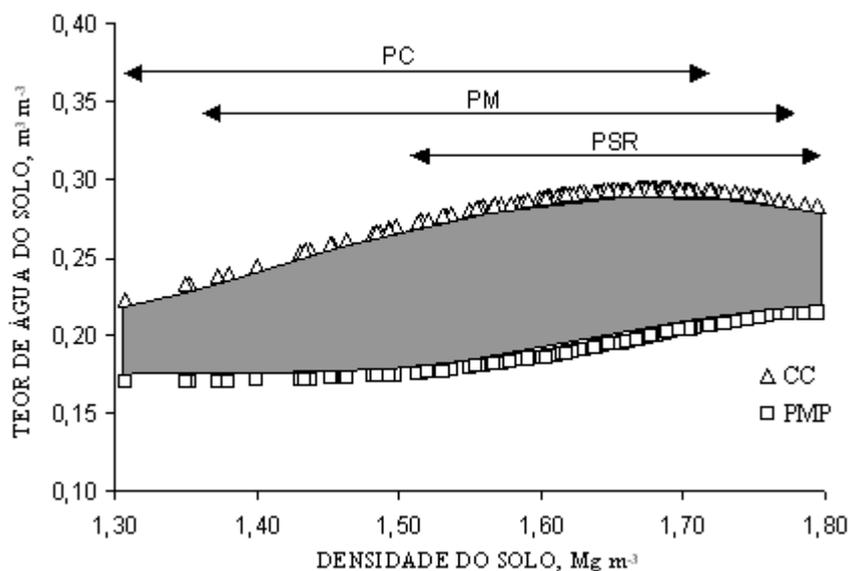


Figura 1. Teor de água no potencial correspondente à capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) em função de D_s . A área hachurada entre CC e PMP representa a água disponível (AD). As setas indicam os intervalos de D_s nos sistemas de preparo PSR = plantio sem revolvimento; PM = preparo mínimo e PC = preparo convencional do solo.

Como a D_s foi influenciada pelos sistemas de preparo, estes assumem intervalos diferentes, mas que se sobrepõem na curva de retenção de água do solo (Figura 1). É possível verificar que no PC e PM ocorreram maiores quantidades de amostras com baixa D_s , com menores valores de AD, apesar da baixa frequência de ocorrência destes valores de D_s . Resultados similares foram obtidos por Rasiah & Aylmore (1998), evidenciando que as mudanças na disponibilidade de água decorrentes dos sistemas de preparo ou compactação do solo ocorrem por meio de modificações na distribuição do tamanho dos poros. Neste sentido, Hill & Cruse (1985) salientam que, em preparo convencional, com menor D_s e maior macroporosidade, os solos poderiam drenar mais rapidamente e influenciar temporalmente a AD para as plantas, o que provavelmente pode acontecer no PC e no PM.

Os valores médios de AD para PSR, PM e PC foram, respectivamente, de 0,092, 0,094 e 0,093 $m^3 m^{-3}$, valores bem acima daqueles encontrados por Beutler et al. (2002) num solo de textura similar. Constatou-se que PM e PC não diferiram estatisticamente, mas, quando comparados ao PSR, houve diferença estatística nos valores de AD ($p < 0,05$). Os maiores valores de AD encontrados no PM foram associados à maior frequência de amostras na faixa de D_s que maximizam os seus limites, provavelmente resultante do efeito da escarificação em ampliar a distribuição de tamanhos de poros.

A curva de resistência do solo foi influenciada pelos sistemas de preparo e camadas amostradas. As estimativas dos coeficientes de regressão foram estatisticamente significativas ($p < 0,01$) e o modelo ajustado aos dados explicou 82 % da variabilidade da resistência do solo à penetração. As equações de regressão para os diferentes sistemas de preparo e camadas estudadas encontram-se no quadro 2.

A resistência do solo à penetração foi positivamente correlacionada com a D_s e negativamente com θ , em concordância com outros estudos (Betz et al., 1998; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2000). A variação da resistência do solo à penetração em função da

D_s , dos sistemas de preparo e das camadas amostradas para diferentes valores de θ , é mostrada na figura 2.

Segundo os resultados apresentados na figura 2, o efeito positivo da D_s e negativo de θ na resistência do solo à penetração manifesta-se similarmente nos sistemas de preparo estudados, com maior magnitude no PSR e PM. Na camada de 0,15–0,30 m, com o aumento de D_s e redução de θ , a resistência atinge valores maiores do que na camada de 0–0,15 m. Também pode ser constatado que, enquanto o solo está acima da θ_{CC} ($\theta = 0,35$ e $0,30 m^3 m^{-3}$), em ambas as camadas, a resistência não ultrapassa o valor crítico adotado de 2,5 MPa. Entretanto, à medida que ocorre a secagem do solo, a resistência aumenta consideravelmente, mesmo em menores valores de D_s , assumindo valores bem acima do valor-limite adotado. Este efeito da secagem do solo na resistência tornou-se mais intenso na camada de 0,15–0,30 m, provavelmente associado a maiores teores de argila dispersa nesta camada. A elevação da resistência com a redução de θ e aumento de D_s pode ser atribuída ao aumento na coesão e fricção entre as partículas, como revelaram Sojka et al. (2001). A menor amplitude de D_s no PC impede que os valores de resistência atinjam valores tão elevados quanto no PM e PSR.

O IHO para os sistemas de preparo e camadas amostradas está apresentado na figura 3. Constatou-se que tanto os sistemas de preparo quanto as camadas amostradas apresentaram valores distintos de IHO. Com o aumento da D_s , tanto θ_{RP} como θ_{Par} determinaram o limite (inferior e superior) de água disponível às plantas em relação ao θ_{CC} e θ_{PMP} , também constatado por Silva et al. (1994), Betz et al. (1998), Tormena et al. (1999). A redução do IHO PSR > PM > PC e foi maior na camada de 0,15–0,30 m, comparada à camada de 0–0,15 m. Os valores de θ em que a resistência atingia o valor crítico de 2,5 MPa ocorreram acima dos valores de θ_{PMP} na maior parte dos valores de D_s , o que concorreu para a redução nos valores de IHO.

Valores de D_s que determinaram o limite superior do IHO dependeram do sistema de preparo

Quadro 2. Equações de regressão da curva de resistência do solo para os sistemas de preparo: PSR = plantio sem revolvimento do solo; PM = preparo mínimo e PC = preparo convencional do solo nas duas camadas estudadas

Camada	Sistema de preparo do solo		
	PSR	PM	PC
0–0,15 m	$RP = 0,0056 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$	$RP = 0,0052 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$	$RP = 0,0047 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$
0,15–0,30 m	$RP = 0,0065 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$	$RP = 0,0059 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$	$RP = 0,0055 \cdot \theta^{-2,154} D_s^{6,468}$

RP = resistência do solo à penetração (MPa); D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e q = teor de água do solo ($m^3 m^{-3}$).

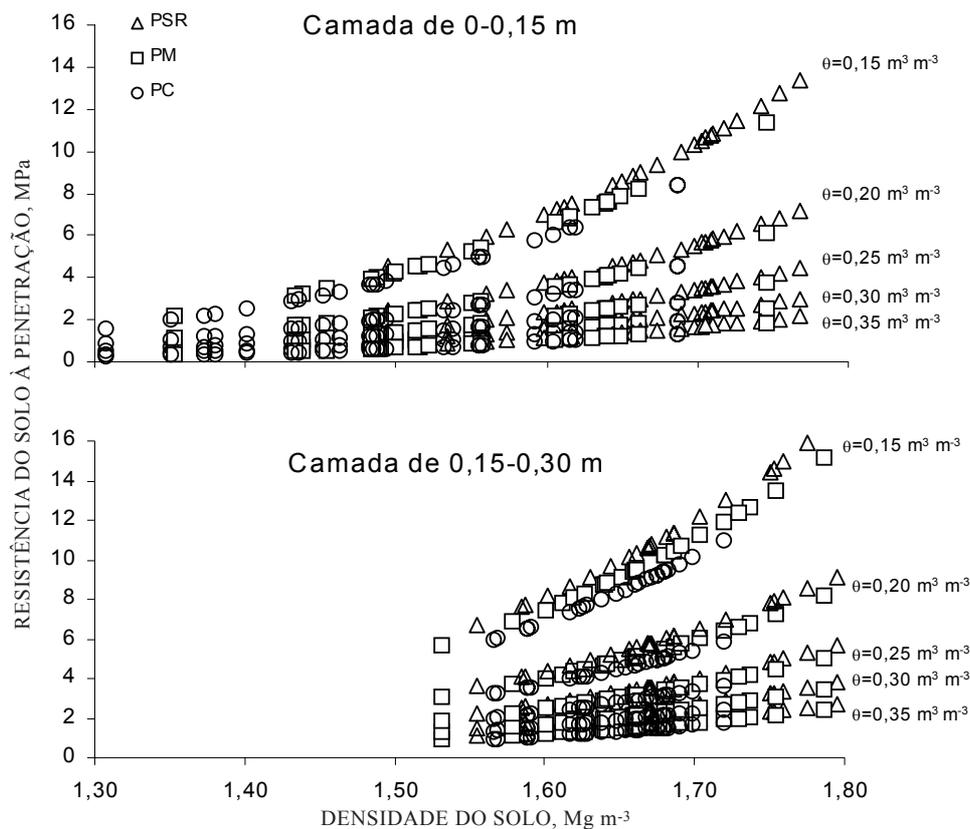


Figura 2. Resistência do solo à penetração (MPa) em função da densidade do solo, do teor de água do solo (θ) e do sistema de preparo e camadas amostradas. PSR = preparo sem revolvimento; PM = preparo mínimo; PC = preparo convencional.

e camada amostrada. Para o PSR, a θ_{par} foi limite superior do IHO em relação a θ_{CC} para valores de $D_s > 1,62 \text{ Mg m}^{-3}$, em ambas as camadas; para o PM, os valores de D_s foram de 1,60 e $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente, para as camadas de 0–0,15 e 0,15–0,30 m. Para D_s menores que estes valores, o limite superior do IHO foi determinado pela θ_{CC} .

Em relação a θ_{RP} , o limite inferior do IHO na camada de 0–0,15 m, para o PSR, foi determinado por esta variável em todos os valores de D_s . No PM, a θ_{RP} foi maior que o θ_{PMP} para valores de D_s maiores que $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ e maiores que $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PC. Na camada de 0,15–0,30 m, o limite inferior do IHO foi determinado pela θ_{RP} , independentemente dos valores de D_s e em todos os sistemas de preparo. A resistência do solo à penetração contribuiu para a redução do IHO em maior proporção que a porosidade de aeração. A maior influência da resistência no IHO também foi encontrada em vários solos, compreendendo distintas classes de textura, desde muito argiloso (Tormena et al., 1998) até siltoso e areia franca (Silva et al., 1994).

Os valores médios do IHO na camada de 0–0,15 m foram maiores em PC e PM ($0,068$ e $0,055 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação ao PSR ($0,019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na camada de

0,15–0,30 m, não se observaram diferenças estatísticas significativas do IHO entre os sistemas de preparo ($p < 0,05$). O IHO demonstrou ser mais sensível do que AD às variações de D_s , indicando maiores restrições quanto à disponibilidade de água, justamente por considerar outras propriedades, como: a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração, em concordância com Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998).

Resultados similares aos obtidos neste estudo foram constatados por Betz et al. (1998), que verificaram maiores valores do IHO em solo sob preparo convencional e escarificação, possibilitando ambiente físico do solo mais favorável às raízes das plantas. Os resultados obtidos neste estudo indicaram que as restrições físicas aumentam com a redução do revolvimento do solo, sendo maior no PSR. No entanto, no PM, as condições físicas do solo podem ser consideradas similares ao PC, com a vantagem de manter a maior parte dos resíduos culturais na superfície do solo. Neste sentido, a qualidade física do solo às plantas pode ser modificada pelas condições climáticas, mantendo a umidade do solo dentro dos limites do IHO. O monitoramento da θ é fundamental para futuras pesquisas envolvendo o IHO e sistemas de preparo, visto que

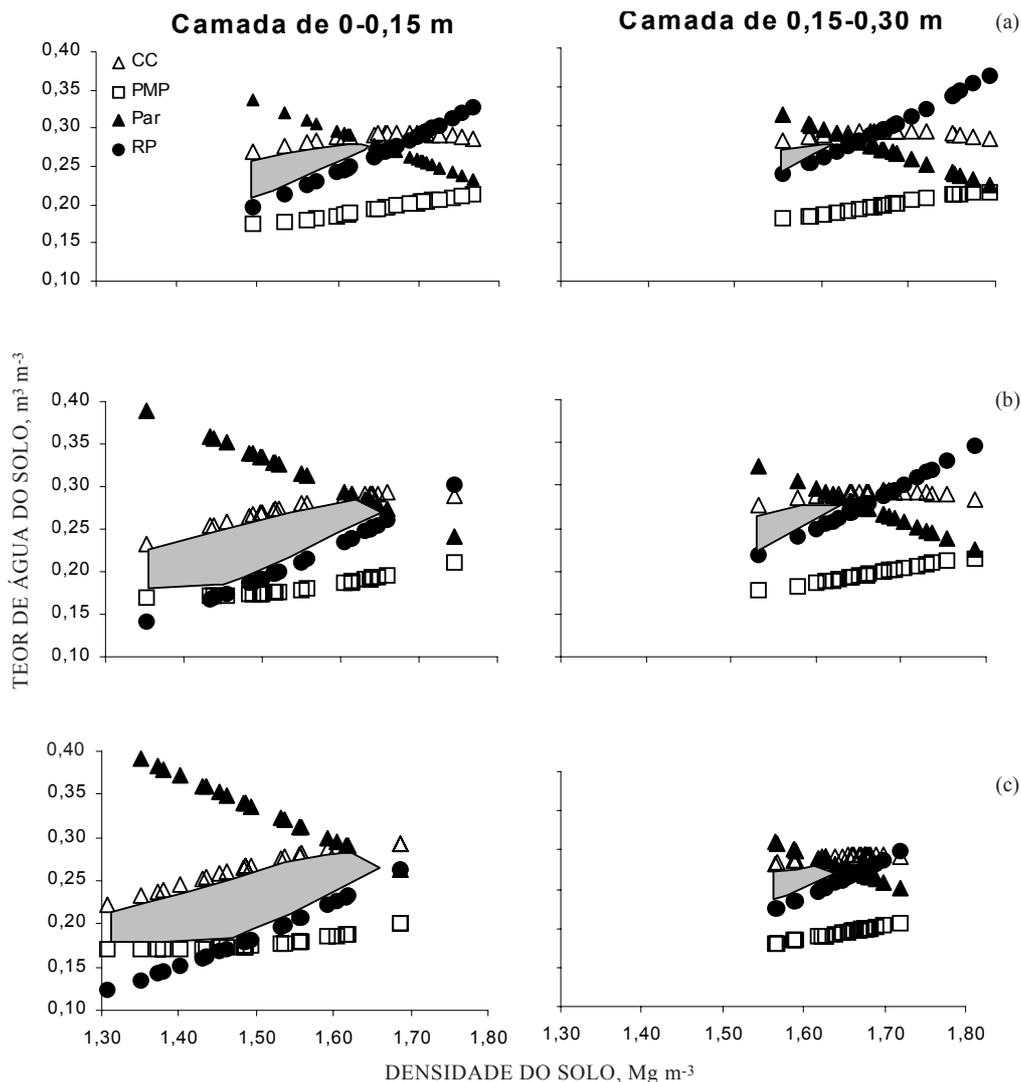


Figura 3. Teor de água no solo (θ) em função da D_s na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP), na porosidade de aeração de 10 % (Par) e na resistência do solo à penetração de 2,5 MPa (RP). A área hachurada representa o conjunto de IHOs correspondentes às densidades avaliadas para plantio sem revolvimento (a), preparo mínimo (b) e preparo convencional do solo (c).

a frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO depende do manejo do solo (Silva & Kay, 1997) e tem relação com o crescimento das plantas, como foi constatado por Silva & Kay (1996).

O valor de D_s em que ocorre interseção dos limites, superior e inferior, ou seja, onde o IHO torna-se nulo, foi denominado por Silva et al. (1994) D_s crítica (D_{sc}). A figura 4 apresenta a percentagem de amostras em que a densidade do solo está acima da D_{sc} , caracterizando a intensidade de limitação física do solo estabelecido pelos sistemas de preparo nas camadas amostradas. Os valores de D_{sc} para os sistemas PSR, PM e PC foram de 1,65, 1,66 e 1,68 $Mg\ m^{-3}$, para a camada de 0–0,15 m, e de 1,62, 1,64 e 1,63 $Mg\ m^{-3}$, para a camada de 0,15–0,30 m.

Pode ser constatado pela figura 4 que, na camada de 0–0,15 m, apenas no PSR e PM ocorreram valores de D_s maiores que a D_{sc} . No PSR, acima de 50 % das amostras apresentaram $D_s > D_{sc}$, enquanto no PM este valor foi de apenas 4,2 %. Para a camada de 0,15–0,30 m, cerca de 75 % das amostras em PSR estavam acima do valor crítico, enquanto no PM e PC estes valores foram reduzidos para 54,2 e 41,7 %, respectivamente. Considerando as duas camadas, o PSR apresentou condições físicas mais limitantes ao crescimento das plantas, especialmente para a cultura da mandioca, que exige facilidade na deformação do solo para o desenvolvimento e crescimento das raízes tuberosas. É necessário salientar que a maior parte destas restrições está associada ao comportamento da resistência do solo

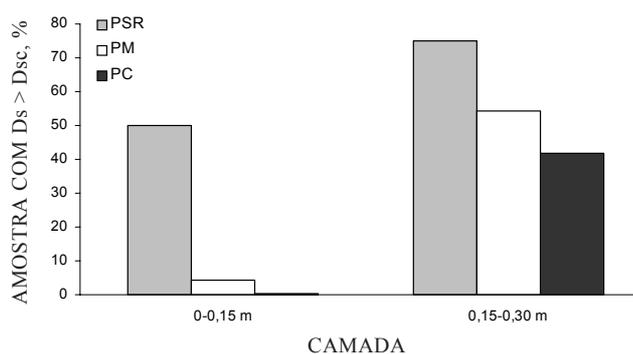


Figura 4. Percentagem de amostras com Ds acima da densidade do solo crítica (Dsc) nas duas camadas amostradas, para cada sistema de preparo do solo. PSR = preparo sem revolvimento; PM = preparo mínimo; PC = preparo convencional.

e que o período de dois anos ainda é relativamente curto para caracterizar o PSR. A produção média de massa seca de raízes tuberosas de mandioca, ao final de dois anos agrícolas, foi de 12.252 kg ha⁻¹ em PC, 9.343 kg ha⁻¹ em PM e 8.170 kg ha⁻¹ no PSR. Neste sentido e considerando o período do experimento, o PM apresenta vantagem em relação ao PSR e PC, por associar a conservação do solo à presença dos resíduos, bem como por mostrar condições físicas favoráveis às plantas.

CONCLUSÕES

1. Os sistemas de preparo influenciaram a densidade do solo e a resistência do solo à penetração nas camadas estudadas.

2. A retenção de água no solo não foi influenciada pelos sistemas de preparo apenas pela Ds. Os valores de AD entre θ_{CC} e θ_{PMP} foram maiores no PC e PM em relação ao PSR.

3. Na camada superficial do solo, os valores do IHO foram maiores no PC e PM e menores no PSR; em subsuperfície, os sistemas de preparo não influenciaram o valor do IHO. θ_{RP} e θ_{Par} reduziram o valor do IHO em todos os sistemas de preparo e camadas amostradas.

4. O PSR apresentou maior frequência de amostras com Ds > Dsc comparado ao PM e PC.

LITERATURA CITADA

BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C. & VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148, 2003.

BETZ, D.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1384-1393, 1998.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:829-834, 2002.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 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. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524, 1990.

CORSINI, P.C. & FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 34, 289-298, 1999.

EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36:613-622, 1972.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

GLANTZ, S.A. & SLINKER, B.K. *Primer of applied regression and analysis of variance*. New York, McGraw-Hill, 1990. 777p.

GODOY, H.; CORREA, A.R. & SANTOS, D. Clima do Paraná. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Londrina, Manual Agropecuário para o Paraná, 1976. 178p.

HILL, R.L. & CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1270-1273, 1985.

HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, M.R. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1264-1270, 1985.

HOWELER, R.H.; EZUMAH, H.C. & MIDMORE, D.J. Tillage systems for root and tuber crops in the tropics. *Soil Till. Res.*, 27:211-240, 1993.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing systems. *Plant Soil*, 219:161-168, 2000.

KAY, B.D. Assessing the suitability of different soils for new cropping systems in terms of rates of change in soil structure. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. *Mechanics and related processes in structured agricultural soils*. Dordrecht, NATO series in Applied Sciences, 1989. p.223-232.

- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- LAL, R. Management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165:57-72, 2000.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. & TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:1-12, 1996.
- MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.
- NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. *Qualitative predictor variables; Regression approach to single-factor analysis of variance*. In: NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J. & WASSERMAN, W., eds. *Applied linear statistical models*. 4.ed. Chicago, 1996. p.455-496.
- OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, M.G.; SCAPIM, C.A.; MUNIZ, A.S. & SAGRILLO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:443-450, 2001.
- O'SULLIVAN, M.F. & BALL, B.C. The shape of the water release characteristic as affected by tillage, compaction and soil type. *Soil Till. Res.*, 25:339-340, 1993.
- RASIAH, V. & AYLMOORE, L.A.G. Sensitivity of selected water retention functions to compaction and inherent soil properties. *Aust. J. Soil Res.*, 36:317-326, 1998.
- 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.
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52:591-611, 1965.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil. Sc. Soc. Am. J.*, 61:884-888, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil. Sc. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.
- SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J. & LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulk density, and water content relations of a Durinodic xeric haplocalcid soil. *Soil Sci.*, 166:520-529, 2001.
- TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:305-314, 2002.
- 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.
- van der BERG, van der M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.
- van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- WATANABE, S.H.; TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & MUNIZ, A.S. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. *Acta Sci.*, 24:1255-1264, 2002.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 38:947-958, 2000.