

# PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO E SOB MATA NATIVA<sup>(1)</sup>

M. A. ARAUJO<sup>(2)</sup>, C. A. TORMENA<sup>(3)</sup> & A. P. SILVA<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo na qualidade física dos solos são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar algumas propriedades indicadoras da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico da região Noroeste do Paraná, cultivado e sob mata nativa. Foram coletadas 24 amostras de solo com estrutura não deformada, na profundidade de 0-0,20 m, em duas áreas contíguas, sob mata nativa e cultivado, localizadas na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá, município de Maringá, PR. A área cultivada tem sido utilizada com culturas anuais, com preparo convencional do solo (arado de discos e grade niveladora). A área sob mata nativa é classificada como Floresta Estacional semidecidual. Avaliaram-se a porosidade, a densidade do solo, a curva de retenção de água do solo, a curva de resistência do solo à penetração e o intervalo hídrico ótimo. Os resultados indicaram valores significativamente maiores de densidade do solo e menores de macroporosidade e porosidade total na área cultivada. Não foi constatado efeito significativo do uso do solo na curva de retenção de água, apesar de ter sido ela influenciada pela densidade do solo. A curva de resistência foi significativamente influenciada pelo uso do solo, evidenciada pelos maiores valores de resistência à penetração com o secamento do solo na área cultivada. O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi menor no solo cultivado, uma vez que a resistência à penetração e a porosidade de aeração determinaram os limites, inferior e superior, de água disponível com o aumento da densidade do solo. No solo sob mata nativa, o IHO foi igual à água disponível determinada pela capacidade de campo e pelo ponto de murcha permanente. A compactação do solo na área cultivada resultou em mudanças no sistema poroso, as quais foram descritas pelos menores valores do IHO na área cultivada.

**Termos de indexação: degradação do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo.**

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada no Curso de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Recebido para publicação em setembro de 2002 e aprovado em novembro de 2003.

<sup>(2)</sup> Doutorando em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista da CAPES. E-mail: araujoomaa@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Agronomia, UEM. Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

<sup>(4)</sup> Professor Associado da Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: apsilva@carpa.ciagri.usp.br

**SUMMARY:** *PHYSICAL PROPERTIES OF A DYSTROPHIC RED LATOSOL (OXISOL) UNDER CROP CULTIVATION AND NATIVE FOREST*

*The understanding and quantification of the impact caused by soil use and management on the physical soil quality are fundamental for the development of sustainable agricultural systems. The objective of this research was to quantify some physical soil properties to evaluate the physical quality of a dystrophic Red Latosol (Rhodic Ferralsol) in the northwest of the State of Paraná, Brazil. Undisturbed soil samples were collected from two contiguous areas on an Experimental Farm of the State University of Maringá. One area was cultivated with annual crops under conventional tillage (disk plow and harrowing) and the other under native forest (semideciduous seasonal forest). The evaluated physical soil attributes were soil porosity and bulk density, soil water retention curve, soil resistance curve, and the least limiting water range. Results indicated significantly higher values of bulk density and lower values of soil porosity in the cultivated area. The soil water retention curve was not influenced by the soil use system, but was negatively influenced by bulk density. The soil resistance curve was influenced by the soil use system, evidenced by high values of soil resistance to root penetration under increasing drought in the cultivated soil. The least limiting water range was significantly smaller in the cultivated soil owing to the soil resistance to root penetration and air-filled porosity, which determined the lower and upper limits of soil water availability with bulk density increase. In the soil under native forest, the least limiting water range was equal to the water availability determined by the field capacity and the permanent wilting point. Soil compaction in the cultivated soil induced changes in the soil porous system, which were described by lower values of the least limiting water range than in virgin soil.*

*Index terms: soil degradation, soil porosity, soil resistance to penetration, least limiting water range.*

## INTRODUÇÃO

A região Noroeste do Paraná corresponde a 17,6 % da superfície do território estadual e apresenta solos derivados do arenito Caiuá, os quais representam 71,4 % da área da região e, em sua maioria, são caracterizados por apresentarem textura superficial franco-arenosa e baixos teores de matéria orgânica (Carvalho, 1994). Devido a fragilidade do ecossistema desta região, tem-se constatado a degradação física e química dos solos (Cardoso et al., 1992; Bragagnolo, 1994; Fidalski, 1997). A degradação física destes solos está relacionada com a redução nos teores de matéria orgânica (Cardoso et al., 1992), resultando em menor retenção de água e estabilidade dos agregados do solo (Costa & Coelho, 1990; Costa et al., 1997).

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter & Youngs, 1992). De acordo com Sanchez (1981), avaliações das modificações no solo decorrentes do cultivo deveriam ser feitas, submetendo um solo sob vegetação natural às explorações agrícolas desejadas e analisando suas propriedades periodicamente. No entanto, por diferentes razões, é difícil atender a essas condições experimentais. Alternativamente, estes estudos podem ser feitos utilizando solos cultivados e sob mata nativa, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados com a formação

dos solos. No Brasil, têm sido feitos alguns estudos avaliando as mudanças nas propriedades dos solos utilizando o solo sob mata como referência (Silva & Ribeiro, 1992; Araújo et al., 1998; Dias Junior & Estanislau, 1999; Sanches et al., 1999; Borges et al., 1999).

A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um desequilíbrio no ecossistema, modificando as propriedades do solo, cuja intensidade varia com as condições de clima, uso e manejos adotados e a natureza do solo (Godefroy & Jacquín, 1975). Com o uso intensivo dos solos, geralmente ocorre a deterioração das suas propriedades físicas (Coote & Ramsey, 1983). Modificações na densidade e na porosidade do solo podem variar consideravelmente, dependendo da textura, dos teores de matéria orgânica do solo (Curtis & Post, 1964) e da frequência de cultivo (Hajabbasi et al., 1997).

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (Hamblin, 1985; Letey, 1985). Num solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Desta forma, a caracterização dos efeitos dos sistemas de

uso e manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações.

Neste contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998), a partir do trabalho de Silva et al. (1994), incorpora num único dado a amplitude de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que o solo está submetido. Desta maneira, o IHO é utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo, como proposto por Silva et al. (1994).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo (De Maria et al., 1999; Stone & Silveira, 2001), porosidade do solo (Beutler et al., 2001; Oliveira et al., 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (Tormena & Roloff, 1996; De Maria et al., 1999; Rosolem et al., 1999; Beutler et al., 2001).

Neste sentido, Lal (1994) sugere que estas avaliações utilizem medidas integradoras do comportamento físico do solo, fazendo menção ao IHO. Os valores médios de propriedades, como densidade, água disponível e porosidade do solo, permitem comparar os efeitos dos sistemas de manejo e, por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a utilização do IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, aeração e resistência do solo à penetração, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas. Imhoff et al. (2001) utilizaram o conceito do IHO juntamente com a pressão de preconsolidação para estimar as pressões críticas que podem ser aplicadas sem causar a degradação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado e sob mata nativa, utilizando indicadores tradicionais, tais como: a densidade e a porosidade do solo e também indicadores não tradicionais como: a curva de resistência do solo à penetração e o IHO.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá, localizada

no município de Maringá, região noroeste do Paraná (Latitude 23° 21' S e Longitude 52° 03' W). O solo utilizado é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999). O material de origem deste solo provém de resíduos intemperizados do Arenito Caiuá da Série São Bento do período Cretáceo. Nesta região, o tipo climático dominante é o Cfa na classificação de Köppen. O relevo é praticamente plano ou suave ondulado, com altitudes variando de 350-550 m (EMBRAPA, 1984).

A amostragem foi realizada em maio de 1999. Foram selecionadas duas áreas próximas, uma sob mata nativa (Floresta estacional semidecidual) e outra cultivada por cerca de 20 anos, utilizando o sistema convencional de preparo do solo com aração e gradagem, alternado com preparo mínimo do solo por meio de escarificação. Diferentes culturas têm sido utilizadas na área cultivada, sendo as mais comuns as de milho, aveia, sorgo, soja e mandioca. Por ocasião da amostragem, a cultura implantada era a da mandioca. Em ambas as áreas, os resultados da análise granulométrica indicaram os seguintes teores de areia grossa = 350 g kg<sup>-1</sup>, de areia fina = 410 g kg<sup>-1</sup>; de silte = 10 g kg<sup>-1</sup> e de argila = 230 g kg<sup>-1</sup>, sendo sua classe textural franco-argilo-arenoso (EMBRAPA, 1999).

Em cada área foram selecionados, aleatoriamente, 24 pontos de amostragem e, em cada ponto, no centro da camada de 0-0,20 m de profundidade, coletou-se uma amostra com estrutura não deformada, utilizando amostrador com anel metálico de 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura, perfazendo um total de 48 amostras. Após a coleta, as amostras foram envoltas em papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos. No laboratório, as amostras foram preparadas para as análises, retirando-se o excesso de solo das suas extremidades. Em seguida, foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura das amostras.

A porosidade total foi calculada como sendo o conteúdo de água do solo saturado. A quantificação dos valores de macroporosidade (Poros  $\geq$  50  $\mu$ m) e microporosidade (Poros  $<$  50  $\mu$ m) foi obtida submetendo as amostras saturadas ao potencial de -0,006 MPa (EMBRAPA, 1997), utilizando uma mesa de tensão adaptada de Topp & Zebtchuck (1979). Macroporos foram estimados como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e o conteúdo de água do solo após a aplicação do potencial de -0,006 MPa. O volume de microporos foi estimado como sendo o conteúdo de água retido no potencial de -0,006 MPa.

Para determinar a curva de retenção de água (CRA), foi adotado o procedimento descrito em Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em 8 grupos de 6 amostras, sendo três amostras por sistema de uso do solo em cada potencial utilizado. Foram utilizados os seguintes potenciais: -0,004, -0,006, e

-0,01 MPa numa mesa de tensão adaptada de Topp & Zebtchuk (1979) e, -0,033, -0,07, -0,1, -0,3 e -1,5 MPa, utilizando pressões aplicadas em câmaras com placas porosas, conforme Klute (1986).

Cessada a drenagem e atingindo o equilíbrio hidráulico aparente, as amostras foram pesadas e, em seguida, foi determinada a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrômetro, conforme método descrito por Tormena et al. (1998). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a  $\pm 105$  °C, por 24 h, para a determinação do conteúdo de água e da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

Para a determinação do IHO, é necessário quantificar as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. A curva de retenção de água no solo, expressa pela relação entre o potencial mátrico ( $\psi$ ) e o conteúdo de água ( $\theta$ ), foi estimada utilizando a função empregada por Ross et al. (1991), descrita na equação 1:

$$\theta = a |\psi|^b \quad (1)$$

na qual, aplicando-se a função logaritmo natural, chega-se à função linear descrita na equação 2:

$$\ln \theta = \ln a + b \ln |\psi| \quad (2)$$

em que  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\psi$  = potencial mátrico (MPa) e  $a$  e  $b$  coeficientes de ajuste da função. Os efeitos da densidade do solo ( $D_s$ ) e do uso do solo (variável qualitativa: mata nativa = 0, solo cultivado = 1) foram avaliados conforme Silva et al. (1994). Desta forma, a equação 2 pode ser reescrita como:

$$\ln \theta = \ln (a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2) + (b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2) \ln (|\psi|) \quad (3)$$

em que  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_1x_2$  são, respectivamente, densidade do solo, uso do solo e a interação entre as duas variáveis, e  $a_i$  e  $b_i$  são os coeficientes determinados por regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados.

A resistência do solo à penetração varia com o conteúdo de água e com a densidade do solo, e desta relação funcional pode-se determinar a curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não-linear, proposto por Busscher (1990), utilizando os procedimentos descritos por Silva et al. (1994). O modelo utilizado é descrito na equação 4.

$$RP = c \theta^d D_s^e \quad (4)$$

que, com a transformação logarítmica, resulta na equação 5:

$$\ln RP = \ln c + d \ln \theta + e \ln D_s \quad (5)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa),  $\theta$  é a umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e  $D_s$  é a densidade do

solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), e  $c$ ,  $d$ , e  $e$  são os coeficientes de ajuste do modelo. O procedimento para avaliar o efeito do uso do solo nos parâmetros do modelo (equação 5) foi semelhante ao adotado para a curva de retenção de água no solo (equação 3).

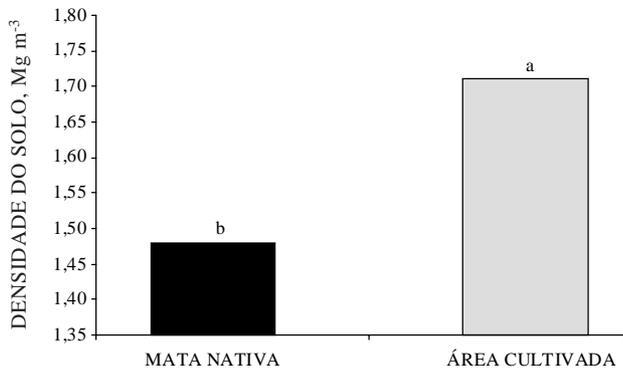
O IHO foi determinado com base nos procedimentos descritos por Tormena et al. (1998). Os valores críticos de umidade associados com o potencial mátrico, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) ou conteúdo de água estimado no potencial de -0,01 MPa (Reichardt, 1988); o ponto de murchamento permanente ( $\theta_{PMP}$ ) ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (Savage et al., 1996); o conteúdo de água no solo em que a resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ) atinge 2,0 MPa (Taylor et al., 1966) e o conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  (Grable & Siemer, 1968). Os valores de  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram obtidos nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa, utilizando a curva de retenção de água, enquanto os valores de  $\theta_{RP}$ , em que ocorre resistência à penetração de 2,0 MPa, foram obtidos por meio da curva de resistência do solo à penetração. O valor de  $\theta_{PA}$ , em que a porosidade de aeração é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ , foi obtido por  $[(1-D_s/D_p)-0,1]$ . Considerou-se o valor de  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$  como sendo a densidade de partículas ( $D_p$ ) do solo. O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água: o limite superior é o menor valor de  $\theta$  considerado na capacidade de campo ou na porosidade de aeração de 10 %; o limite inferior é o maior valor de  $\theta$  considerado, em que a resistência do solo à penetração atinge 2,0 MPa ou o valor de  $\theta$  no ponto de murchamento permanente ( $\Psi = -1,5 \text{ MPa}$ ).

A comparação dos tratamentos para as variáveis densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade foi feita pelo teste  $t$  para amostras independentes (Hatcher & Stepanski, 1997). Os ajustes dos modelos das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração foram feitos com base na rotina PROC REG (SAS, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A  $D_s$  foi significativamente maior na área cultivada em comparação com a área sob mata nativa (Figura 1).

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Islam & Weil (2000), que constataram um valor médio da  $D_s$  significativamente maior em área cultivada comparada com solo sob floresta natural. Também Silva & Ribeiro (1992) obtiveram resultados similares, comparando solo cultivado com cana e sob mata nativa. Sanches et al. (1999) constataram que, independentemente da posição de



**Figura 1. Valores médios de densidade do solo na área cultivada e sob mata nativa na profundidade de 0-0,20 m. Valores seguidos por letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos (p < 0,05).**

amostragem, seja linha ou entrelinha da cultura da laranja, a Ds foi maior do que no solo sob mata nativa.

A maior Ds nos solos cultivados está relacionada com a compactação do solo pelo tráfego de máquinas e implementos (Hajabbasi et al., 1997; Hartemink, 1998; Cavenage et al., 1999), com a redução dos teores de matéria orgânica (Silva & Kay, 1997; Dalal & Chan, 2001) e com a menor estabilidade da estrutura do solo (Horn et al., 1995). O aumento da densidade do solo na área cultivada também pode ser explicado pela redução nos teores de matéria orgânica em comparação com o solo sob mata nativa. Os teores de matéria orgânica foram de 18,4 g dm<sup>-3</sup>, no solo sob mata nativa, e de 11,1 g dm<sup>-3</sup>, no solo cultivado, estatisticamente diferentes pelo teste t (t = 10,05; p > t = 0,0001).

Os valores de macroporos e de porosidade total do solo foram significativamente menores no solo cultivado em comparação com os do solo sob mata nativa (Figura 2). Resultados similares, em solo cultivado com cana-de-açúcar, foram obtidos por Silva & Ribeiro (1992). A drástica redução da macroporosidade nos solos cultivados decorre do aumento da compactação do solo, que é evidenciada pelo aumento da densidade do solo (Borges et al., 1999; Kay & Angers, 1999).

A macroporosidade, ou a porosidade ocupada com ar no potencial de -0,006 MPa, é uma medida relacionada com a taxa de difusão de oxigênio no solo. Os resultados obtidos por Thomasson (1978) em solos temperados indicam que a rápida drenagem do solo cessa em potenciais da ordem de -0,005 MPa e os poros drenados neste potencial determinam a capacidade de aeração dos solos. Utilizando o critério estabelecido por Thomasson (1978) e os valores médios de macroporosidade obtidos neste estudo (Figura 2), constatou-se que a capacidade de aeração do solo na área cultivada é classificada como inadequada, enquanto no solo sob mata é

considerada muito boa. Salienta-se que valores adequados de capacidade de aeração são dependentes das condições climáticas e devem ser ampliados sob condições mais úmidas.

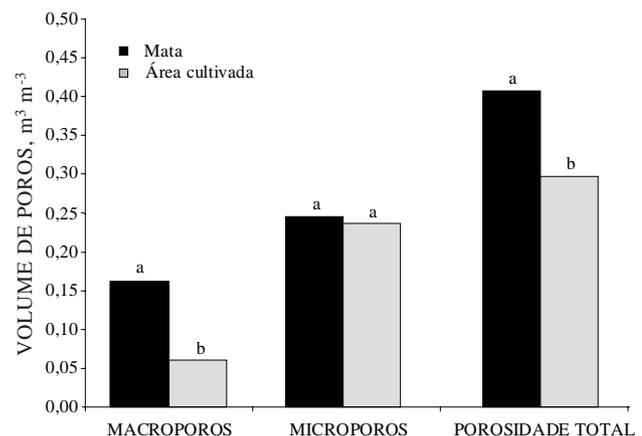
Na microporosidade do solo, não foi constatada diferença significativa (p > 0,05) entre os dois sistemas de uso avaliados. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada do tráfego de máquinas, implementos, etc.

As CRS, obtidas a partir do ajuste dos dados da equação 4, são descritas nas equações 6 e 7. Todos os coeficientes do ajuste são estatisticamente significativos (p < 0,05). A RP é positivamente correlacionada com a Ds e negativamente com θ em ambos os sistemas de uso avaliados, corroborando os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998) e Imhoff et al. (2001). Os resultados indicaram um aumento significativamente maior da resistência do solo à penetração com a perda de água no solo cultivado comparado ao solo sob mata nativa (p < 0,05). O modelo ajustado explicou 84 % da variabilidade dos dados de resistência do solo à penetração.

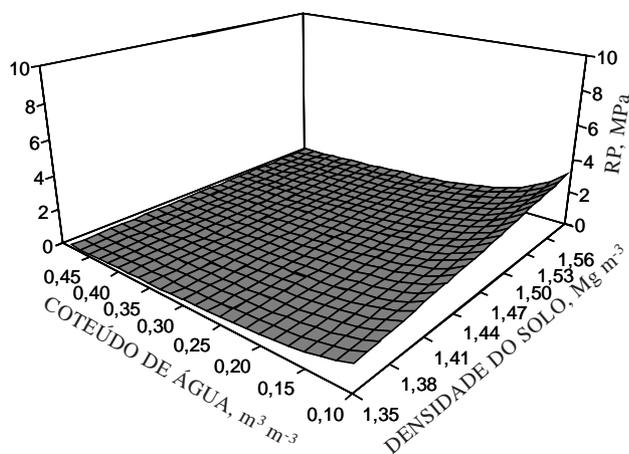
**Mata nativa:**  $RP = 0,0132574 Ds^{5,3229} \theta^{-1,3406}$   
 $F=57,33; p = 0,0001; R^2 = 0,84; N = 24$  (6)

**Área cultivada:**  $RP = 0,0028515 Ds^{5,3229} \theta^{-2,0592}$   
 $F = 57,33; p = 0,0001; R^2 = 0,84;$   
 $N = 24$  (7)

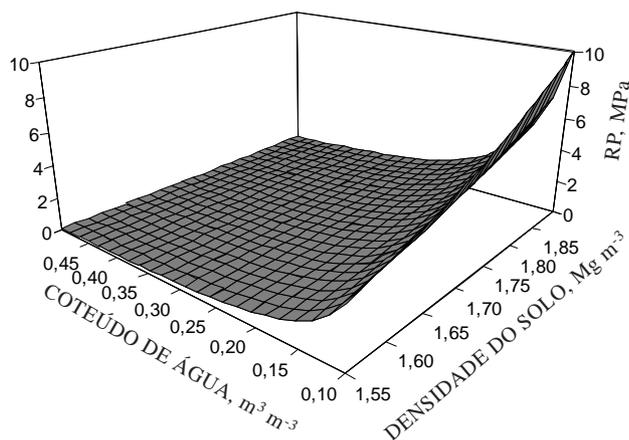
A representação gráfica da RP em função de Ds e θ é ilustrada nas figuras 3 e 4, respectivamente, para o solo sob mata nativa e cultivado.



**Figura 2. Valores médios de macro, micro e porosidade total do solo na área cultivada e sob mata nativa na profundidade de 0-0,20 m. Valores seguidos por letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos (p < 0,05).**



**Figura 3. Curva de resistência à penetração do solo sob mata nativa.**



**Figura 4. Curva de resistência à penetração do solo cultivado.**

Com o secamento, o solo cultivado apresentou valores de RP mais altos do que o solo sob mata nativa (Figuras 3 e 4). No solo sob mata, os valores de RP atingem níveis considerados críticos ao crescimento das raízes ( $RP \geq 2,0$  MPa) somente para conteúdos de água muito baixos e em valores de Ds elevados. Comparando as figuras 3 e 4, constata-se que o maior valor de Ds encontrado no solo sob mata nativa é muito próximo do menor valor de Ds encontrado no solo sob cultivo e, nestes dois pontos, os valores da RP, no mesmo conteúdo de água do solo, são muito semelhantes, indicando que os maiores valores de densidade do solo na área cultivada causaram maior sensibilidade da resistência do solo à penetração em relação à umidade, o que foi constatado pelo coeficiente significativamente maior no solo cultivado. Estes resultados estão em concordância com os de Murphy et al. (1995). O aumento dos valores de RP com o decréscimo da  $\theta$  pode estar associado com o aumento do "stress efetivo" (Giarola et al., 2003) ou com a maior coesão entre as partículas minerais (Kay & Angers, 1999), sendo maior no solo cultivado.

Não foi constatado efeito significativo do uso do solo nos parâmetros da equação 1, utilizada para ajustar os dados da CRA. Por outro lado, constatou-se que a Ds influenciou significativamente e de forma negativa a retenção de água ( $p < 0,05$ ). A Ds tem ação sobre a retenção de água, decorrente de sua influência na porosidade total e distribuição do tamanho dos poros (Archer & Smith, 1972). Cerca de 78 % da variabilidade da retenção de água no solo foi explicada pelo modelo ajustado aos dados (equação 8).

A determinação do IHO exige estimativas dos conteúdos de água na capacidade de campo (CC, potencial de  $-0,01$  MPa) e no ponto de murcha permanente (PMP, potencial de  $-1,5$  MPa). A equação utilizada para esta finalidade, tanto para mata nativa quanto para área cultivada, é descrita pela equação 8.

$$\theta = (e^{(-1,1036 - 0,3635 Ds)} * (|\psi|^{-0,1535}))$$

$$F = 80,68; p = 0,0001;$$

$$R^2 = 0,78; N = 48 \quad (8)$$

As estimativas do conteúdo de água em que a RP atingiu  $2,0$  MPa foram obtidas das equações 6 e 7, as quais são apresentadas nas equações 9 e 10, para as áreas avaliadas.

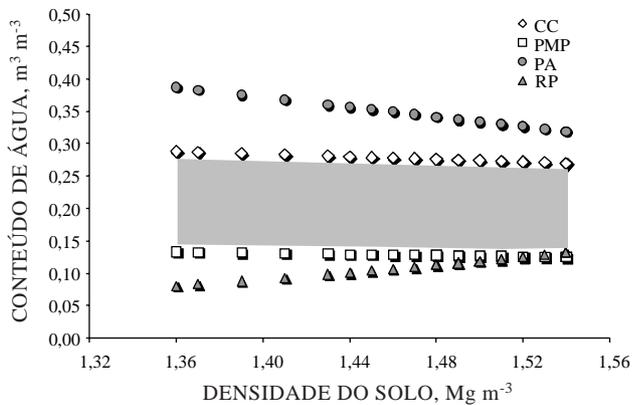
$$\text{Mata nativa: } \theta = (RP / (0,0132574 Ds^{5,3229}))^{1/-1,3406} \quad (9)$$

$$\text{Área cultivada: } \theta = (RP / (0,0028515 Ds^{5,3229}))^{1/-2,0592} \quad (10)$$

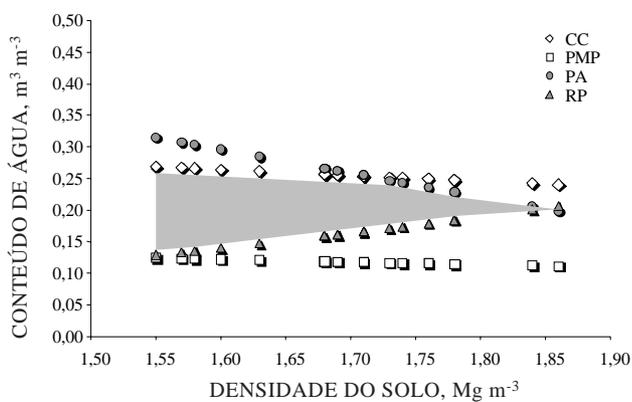
Os conteúdos de água nos limites críticos do IHO, no solo sob mata nativa e cultivado, são apresentados nas figuras 5 e 6, respectivamente.

Em ambos os sistemas de uso, com o aumento na Ds, ocorreram simultaneamente um aumento na  $\theta_{RP}$  e um decréscimo na  $\theta_{PA}$  (Figuras 5 e 6), concordando com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998) e Imhoff et al. (2001). No solo sob mata nativa, os resultados indicam que a maior disponibilidade de água ocorreu entre a CC e o PMP, exceto para duas amostras com valores maiores de Ds na distribuição (Figura 5), nos quais os valores de  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$  foram praticamente iguais. Na área sob mata nativa, em praticamente toda a variação de Ds, o IHO teve como limite superior e inferior os valores de umidade correspondentes a CC e ao PMP. Estes resultados evidenciam que, na área sob mata nativa, as limitações físicas ao crescimento das plantas são determinadas pelos potenciais relativos a CC e PMP ao longo de praticamente toda faixa de Ds avaliada, corroborando as indicações de que solos sob mata nativa apresentam excelentes condições físicas (Reynolds et al., 2002).

No solo cultivado, a  $\theta$  na qual a porosidade de aeração  $\leq 10$  % ( $\theta_{PA}$ ) foi menor do que a CC a partir da densidade de  $1,71$  Mg m<sup>-3</sup> (Figura 6), ou seja, a partir deste valor de densidade, quando o solo estiver na capacidade de campo, a difusão de oxigênio pode



**Figura 5. Variação do conteúdo de água com a densidade, no solo sob mata nativa, nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), 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).**



**Figura 6. Variação do conteúdo de água com a densidade, na área sob cultivos anuais, nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), 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).**

ser insatisfatória, acarretando condições físicas desfavoráveis para o crescimento das culturas.

No solo cultivado, a variação da  $D_s$  teve também grande impacto sobre a RP. A  $\theta_{RP}$  substituiu a  $\theta_{PMP}$  nos valores de  $D_s \geq 1,55 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 6). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Topp et al. (1994), Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998; 1999) e Imhoff et al. (2001), nos quais a RP foi o fator que mais freqüentemente reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo. Na literatura, há exemplos da ocorrência de impedimentos ao crescimento das plantas pela RP sob potenciais maiores que o PMP (Boone et al., 1986).

No solo sob mata nativa, o IHO foi igual à água disponível e, no solo cultivado, com o aumento da  $D_s$ , constatou-se redução no IHO decorrente da atuação simultânea da porosidade de aeração e da RP. De acordo com Kay (1989), o decréscimo do IHO caracteriza a perda da qualidade física do solo, considerando a maior probabilidade de as culturas serem expostas a estresses físicos, o que foi constatado por Silva & Kay (1996). Estes resultados evidenciam que, comparativamente ao solo sob mata nativa, a degradação da estrutura do solo pelo cultivo impõe limitações ao crescimento das plantas pela redução na água disponível e pela restrição de aeração sob elevada umidade do solo ou pela elevação da resistência do solo à penetração, que pode atingir valores altos, ao longo do secamento do solo.

### CONCLUSÕES

1. O solo sob cultivo apresentou maiores valores de densidade do solo e menores valores de porosidade total e de macroporosidade comparado com o solo sob mata nativa.

2. A resistência do solo à penetração foi influenciada positivamente pela densidade e negativamente pela umidade do solo, com maior magnitude no solo cultivado. A densidade do solo afetou a retenção de água, refletindo os efeitos do uso do solo.

3. No solo sob mata nativa, o IHO foi igual ao da água disponível. No solo cultivado, o IHO foi menor do que no solo sob mata nativa em decorrência da influência da porosidade de aeração e da resistência do solo à penetração que estabeleceram os limites de disponibilidade de água no solo.

### LITERATURA CITADA

ARAUJO, Q.R.; COSTA, L.M.; JUCKSCH, I.; FONTES, L.E.F. & REGAZZI, A.J. Alterações nas propriedades físicas de um podzólico vermelho-amarelo da região cacauzeira da Bahia, sob diferentes coberturas vegetais. *Agrotropica*, 10:69-78, 1998.

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.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177, 2001.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.363-375.

- 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.
- BORGES, A.L.; KIEHL, J.C. & SOUZA, L.S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um latossolo amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:1019-1025, 1999.
- BRAGAGNOLO, N. Uso dos solos altamente susceptíveis à erosão. In: PEREIRA, P.P.; FERREIRA, M.E. & PESSOA DA CRUZ, M.C., eds. Solos altamente susceptíveis à erosão. Jaboticabal, FCAV-UNESP/SBCS. 1994. p.3-16.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- CARDOSO, A.; POTTER, R. & DEDECEK, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no Noroeste do estado do Paraná. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:349-353, 1992.
- CARVALHO, A.P. Solos do arenito caiuá. In: PEREIRA, P.P.; FERREIRA, M.E. & PESSOA DA CRUZ, M.C., eds. Solos altamente susceptíveis à erosão. Jaboticabal, FCAV-UNESP/SBCS, 1994. p.39-49.
- CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:997-1003, 1999.
- COOTE, D.R. & RAMSEY, J.F. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. *Can. J. Soil Sci.*, 63: 1-14, 1983.
- COSTA, A.C.S. & COELHO, S.M.R. Efeito do manejo do solo em Latossolo Vermelho-Escuro textura média-Led2 do Município de Paranavaí-Paraná.II. Estabilidade dos agregados em água. In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DE SOLOS, 8., Londrina, 1990. Resumos. Londrina, 1990. p.35.
- COSTA, A.C.S.; NANNI, M.R. & JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente por diferentes metodologias. *R. Unimar*, 19:827-844, 1997.
- CURTIS, R.O. & POST, B.W. Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:285-286, 1964.
- DALAL, R.C. & CHAN, K.Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Aust. J. Soil Res.*, 39:435-464, 2001.
- DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.
- DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physics toward 2000. *Soil Till. Res.*, 24:101-106, 1992.
- DIAS JUNIOR, M.S. & ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:45-51, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Curitiba, 1984. (Boletim técnico 57)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 1999. 412p.
- FIDALSKI, J. Fertilidade do solo sob pastagens, lavouras anuais e permanentes na região noroeste do Paraná. *R. Unimar*, 19:853-861, 1997.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. & DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, 113:95-108, 2003.
- GODEFROY, J. & JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et le apports organiques en conditions tropicales;comparasion avec les sols forestiers. *Fruits*, 30:595-612, 1975.
- 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.
- HAJABBASI, M.A.; JALALIAN, A. & KARIMZADEH, H.R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant Soil*, 190:301-308, 1997.
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158, 1985.
- HARTEMINK, A.E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma*, 85:283-306, 1998.
- HATCHER, L. & STEPANSKI, E.J. A step-by-step approach to using the SAS System for Univariate and Multivariate Statistics. Cary, SAS Institute, 1997. 552p.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.
- IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agric. Ecosys. Environ.*, 79:9-19, 2000.
- KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12:1-51, 1989.
- KAY, B.D. & ANGERS, D.A. Soil structure. In: A. SUMNER, M.E., ed. Handbook of Soil Science. Boca Raton, CRC Press, 1999. p.229-276.

- KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods*. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- LAL, R. *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics*. Soil Management Support Service, USDA, U.S. Agency for International Development. Ohio, Ohio State University, 1994. 78p. (Technical Monograph n° 21)
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- MURPHY, W.M.; BARRETO, A.D.; SILMAN, J.P. & DINDAL, D.L. Cattle and sheep grazing effects on soil organisms, fertility and compaction in a smooth-stalked meadowgrass-dominant white clover sward. *Grass Forrage Sci.*, 50:191-194, 1995.
- OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, M.G.; SCAPIM, C.A.; MUNIZ, A.S. & SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:443-450, 2001.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110:131-146, 2002.
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:821-828, 1999.
- 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.
- SANCHES, A.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & RIGOLIN A.T. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:91-99, 1999.
- SANCHEZ, P.A. *Suelos del trópico - características y manejo*. San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1981. 645p.
- 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. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, M.S.L. & RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:397-402, 1992.
- SAS INSTITUTE. *Statistical Analysis System. Procedure guide for personal computers*. Cary, 1999.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:395-401, 2001.
- 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.
- THOMASSON, A.J. Towards objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.*, 29:38-46, 1978.
- TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. *Soil Quality Evaluation Program. Agriculture and Agri-Food Canada*, 1994. 36p. (Technical report, 2)
- TOPP, G.C. & ZEBTCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. *Can. J. Soil Sci.*, 59:19-26, 1979.
- TORMENA, C.A.; DA 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.
- 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. & ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339, 1996.

