

Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos

Sergio Hitoshi Watanabe^{1*}, Cássio Antonio Tormena¹, Marcelo Alessandro Araujo¹, Antonio Carlos Andrade Gonçalves¹, Álvaro Pires da Silva², José Carlos Pintro¹, Antonio Carlos Saraiva da Costa¹ e Pedro Soares Vidigal Filho¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá-Paraná, Brazil.

²Departamento de Ciência do Solo, Esalq/Universidade de São Paulo, São Paulo-São Paulo, Brazil. *Author for correspondence. e-mail: catormena@uem.br

RESUMO. A degradação do solo provoca modificações nas suas propriedades com reflexos na sua qualidade para a produção agrícola. Este estudo foi desenvolvido para quantificar as alterações no comportamento físico de um Latossolo Vermelho Distrófico, textura média, sob plantio direto, desenvolvido sobre o Arenito Caiuá. Quarenta amostras de solo indeformadas foram coletadas aleatoriamente, na profundidade de 0-20 cm. As amostras foram utilizadas para determinação da porosidade de aeração e da curva de resistência do solo à penetração. Os resultados indicaram que na tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo), 25% das amostras apresentam valores de porosidade de aeração abaixo do valor de 10%. A curva de resistência do solo à penetração indicou que na umidade correspondente à tensão de 0,3 MPa, em toda a faixa de densidade do solo obtida, a resistência do solo à penetração atingiu valores de 2,0 MPa, considerados impeditivos ao crescimento radicular. Os resultados também sugerem que a qualidade física para o crescimento das plantas é dependente da dinâmica da umidade do solo.

Palavras-chave: resistência à penetração, porosidade de aeração, propriedades físicas do solo, plantio direto, Latossolo Vermelho Distrófico.

ABSTRACT. Soil resistance to penetration and aeration porosity of dystrophic red latisol after two years of no-tillage planting. Soil degradation promotes changes in soil related to quality in agricultural production. This study was conducted to quantify the alterations in the physical behavior of Dark Red Latosol, under the no-tillage system, developed on the Caiuá sandstone. Forty undisturbed soil samples were collected at a depth of 0-20 cm. Samples were used to determine air-filled porosity and soil resistance to penetration curve (SRC). Results indicated that at 0,01 MPa tension (field capacity), 25% of soil samples presented air-filled porosity below 10%. SRC indicated that with corresponding moisture at of 0,3 Mpa tension, soil resistance to penetration reached values impeding root growth. Results also showed that the soil's physical quality for plant growth is highly dependent on temporal variations of soil moisture.

Key words: soil resistance to root penetration; soil's physical properties, no-tillage system, air-filled porosity.

Nos solos tropicais e subtropicais, a implantação de sistemas agrícolas de baixa sustentabilidade tem causado um rápido declínio no potencial produtivo dos solos devido às rápidas perdas de matéria orgânica e à degradação da estrutura do solo (Cassel e Lal, 1992). Esse processo é intensificado com a implantação, em larga escala, de sistemas agrícolas intensivamente mecanizados.

A capacidade do solo em prover o sistema radicular de condições físicas adequadas para o

crescimento e desenvolvimento das plantas pode ser alterada pelas práticas de manejo. Essas modificações influenciam a produtividade das culturas através 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 o comportamento físico do solo são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter e Youngs, 1992).

A redução e a estagnação da produtividade das culturas decorrem, muitas vezes, da degradação física do solo devido à erosão e à compactação. As avaliações das propriedades físicas dos solos têm sido feitas utilizando-se propriedades que descrevem a sua forma estrutural, como a densidade e porosidade do solo (Dexter, 1988), e a condutividade hidráulica. Em geral, estas determinações caracterizam bem os efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre as propriedades físicas do solo, mas demonstram pouco a funcionalidade física do solo como meio de crescimento e desenvolvimento das plantas.

As condições físicas na zona radicular, relacionadas com a estrutura do solo, são determinadas pela disponibilidade de água, pela aeração, pela temperatura e pela resistência que o solo oferece à penetração das raízes (Eavis, 1972; Letey, 1985; Boone *et al.*, 1986). Estes fatores físicos estão diretamente relacionados com o crescimento das plantas. Valores-limite destas propriedades em relação ao crescimento das plantas têm sido documentados na literatura. Os resultados obtidos por Grable e Siemer (1968) sugerem a porosidade de aeração de 10% como crítica para o crescimento radicular, em função da limitada difusão de oxigênio no solo. 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.

A porosidade de aeração de 10% tem sido adotada como crítica para o crescimento radicular das plantas, apesar da variação deste valor entre diferentes espécies de plantas. Há indicações na literatura de que em algumas situações este valor de 10% pode não ser suficiente para atender à demanda do sistema radicular em oxigênio. Por outro lado, o valor de resistência à penetração de 2,0 MPa tem sido aceito como limite crítico, embora diferentes espécies de plantas possam crescer em diferentes valores de resistência crítica (Materechera *et al.*, 1991). Algumas pesquisas têm demonstrado que as culturas podem apresentar crescimento radicular sob resistências superiores a 2,0 MPa (Ehlers *et al.*, 1983), ou restrito sob resistências ainda menores que este valor (Bengough e Mullins, 1990).

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 dependeu da distribuição da precipitação. Há uma interação entre as condições físicas do solo e o crescimento das plantas, e algumas pesquisas sugerem que as raízes parecem dispor de mecanismos de detecção destas condições, enviando-lhes sinais os quais controlam o

crescimento da parte aérea das plantas (Davies e Zhang, 1991).

Os solos de textura média, originados do Arenito Caiuá, no Noroeste do Estado do Paraná, passaram por diferentes sucessões de uso e manejo. Atualmente, está sendo iniciado um processo de substituição das áreas de pastagens por culturas anuais, notadamente a cultura da soja, utilizando o sistema de manejo do solo com plantio direto. Há vários indicativos da degradação destes solos no decorrer do processo de cultivo, especificamente de natureza química e biológica. No entanto, não há informações quantitativas do comportamento físico destes solos, sobretudo quando submetidos ao sistema de plantio direto.

Neste contexto, levando-se em conta a fragilidade do ecossistema desta região e a dinâmica temporal de uso e manejo dos solos, tem-se constatado a ocorrência de degradação física e química dos solos (Cardoso *et al.*, 1992; Fidalski, 1997). Neste solo, as indicações da degradação química são evidenciadas pelos baixos níveis atuais de matéria orgânica e de nutrientes disponíveis (Cardoso *et al.*, 1992; Marun, 1996). Constata-se também que o processo erosivo intensificou-se nas últimas décadas, devido ao manejo inadequado do solo, com a redução nos teores de matéria orgânica do solo e aumento da tendência à compactação, à redução da retenção de água e à deterioração dos agregados do solo (Costa e Coelho, 1990; Cardoso *et al.*, 1992; Costa *et al.*, 1997). No entanto, a quantificação do comportamento físico do solo não tem sido feita sistematicamente, bem como não se conhece o grau destas mudanças em face dos atuais sistemas de uso e manejo destes solos. Algumas avaliações das propriedades físicas do solo têm sido relatadas por Cardoso *et al.* (1992) e Marun (1996). Em geral, os estudos da avaliação da degradação e qualidade física dos solos se reportam às propriedades físicas com influência indireta sobre o desenvolvimento das plantas.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o comportamento físico de um latossolo vermelho distrófico cultivado em sistema de plantio direto, no segundo ano de sua implantação, utilizando como parâmetros indicadores a porosidade de aeração e a curva de resistência do solo à penetração das raízes.

Material e métodos

O solo utilizado neste estudo é classificado como latossolo vermelho distrófico, que representa a maior área de solos no Arenito Caiuá (Embrapa, 1999). A área de estudo vem sendo cultivada no sistema de plantio direto há dois anos, adotando-se a

sucessão soja - milho safrinha e cultivo de aveia + nabo forrageiro no inverno.

Foram retiradas aleatoriamente 40 amostras com estrutura indeformada, na área selecionada, por meio de amostrador e anéis com volume de 100 cm³, na porção intermediária de 0-0,20 m de profundidade. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ até serem processadas. Em três pontos de amostragem foram obtidas amostras deformadas para determinação da granulometria e análises de rotina para fins de fertilidade (Embrapa, 1997).

As amostras indeformadas foram utilizadas para determinação da porosidade de aeração e da curva de resistência do solo à penetração. Inicialmente as amostras foram saturadas por elevação gradual de uma lâmina de água até 2/3 da altura do anel, numa bandeja, durante 48 horas. Foi feita a determinação da porosidade de aeração em diferentes tensões (0,002, 0,004, 0,006 e 0,01 MPa) utilizando-se uma mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979). As amostras indeformadas também foram utilizadas para determinação da curva de resistência do solo à penetração, de acordo com o procedimento descrito em Tormena *et al.* (1998), onde a resistência foi determinada em cada amostra após a aplicação de um gradiente de umidade. Para a determinação da resistência do solo à penetração utilizou-se um penetrômetro similar ao descrito por Tormena *et al.* (1998), o qual é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel para controle de 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 20kg acoplada na extremidade do braço mecânico do atuador. Uma haste metálica com um cone de diâmetro igual a 4 mm, com um semi-ângulo de 30° e área de base de 0,1256 cm² foi utilizada nesta determinação. 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. Foi feita uma medida de resistência na seção transversal de cada amostra. A velocidade de penetração foi de 1,0 cm min⁻¹ até a profundidade de 4,0 cm, sendo que a frequência de amostragem correspondeu à coleta de um valor de resistência a cada 1,0 segundo, obtendo-se um total de 240 leituras, das quais um valor médio foi utilizado. O equipamento foi configurado para obter os valores de resistência em MPa, de forma que nenhuma transformação foi requerida no tratamento dos dados.

A resistência do solo (RP) é influenciada pela densidade (Ds) e conteúdo de água do solo (θ), de

forma que uma relação funcional entre RP, Ds e θ é identificada como curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada através de um modelo não-linear proposto por Busscher (1990). O modelo utilizado é descrito na equação 1.

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

ou, a transformação logarítmica do mesmo,

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds \quad (2)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ representa a umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³), Ds corresponde à densidade do solo (Mg m⁻³), sendo *a*, *b*, *c* os coeficientes do modelo. O ajuste foi feito por meio de modelos de regressão linear múltipla (SAS, 1999).

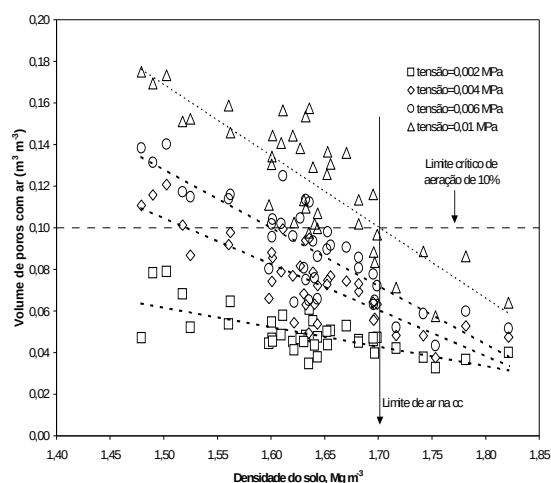
Resultados e discussão

Os resultados da caracterização química e física do solo estudado são apresentados na Tabela 1. A análise física do solo indica que os teores de areia, silte e argila são constantes ao longo do perfil de solo avaliado. Já a análise química do solo mostra o efeito das práticas de adubação adotadas na área, onde na camada de 0 –20 cm de profundidade os teores de nutrientes são elevados, quando comparados a outras profundidades, e reduzem-se drasticamente em maiores profundidades.

A variação da porosidade de aeração (PA) em diferentes tensões com a densidade do solo é um indicador do *status* de aeração do solo, amplamente utilizado (Stepniewski *et al.*, 1994). Um baixo valor de porosidade de aeração é um indicativo da baixa difusividade de oxigênio no solo para as raízes das plantas, estando diretamente relacionado à redução dos macroporos. Os resultados indicaram que, nas diferentes tensões, a porosidade de aeração é negativamente relacionada com a densidade do solo ($p < 0,05$). O valor de 10% de poros com ar tem sido considerado o mínimo necessário para um adequado crescimento do sistema radicular das plantas (Grable e Siemer, 1968). Considerando-se este valor, constata-se que sob as tensões de 0,002 e 0,004 MPa, valores menores que 10% de poros com ar ocorrem em praticamente 100% das amostras. Na tensão de 0,006 MPa, 65% das amostras apresentaram PA < 10%. Com o secamento do solo, gradativamente ocorreu um aumento no volume de poros com ar, apesar de que na tensão de 0,01 MPa, 25% das amostras ainda apresentaram valores de PA abaixo do crítico de 10%.

Tabela 1. Caracterização física e química do solo utilizado no estudo

Prof (m)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	P	C	arcia	silte	argila
		cmol _c dm ⁻³					mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		
0,00 – 0,10	5,37	0,00	3,31	3,74	2,28	0,60	9,00	10,78	680	10	310
0,10 – 0,20	5,00	0,27	3,70	3,50	2,32	0,49	4,67	11,44	690	10	300
0,20 – 0,40	4,50	0,60	4,34	2,25	1,48	0,17	1,00	5,86	650	20	330
0,40 – 0,60	4,47	0,77	4,81	1,87	1,37	0,07	1,00	4,79	650	20	330
0,60 – 0,80	4,23	1,27	5,77	1,39	0,98	0,05	1,00	6,12	630	10	360
0,80 – 1,00	4,23	1,27	5,90	1,45	1,06	0,04	0,67	5,99	630	30	340

**Figura 1.** Variação da porosidade de aeração das amostras em diferentes tensões da água no solo

A tensão de água no solo de 100 cm é frequentemente utilizada para especificar a umidade do solo como sendo aquela na capacidade de campo. Em solos severamente compactados, Boone *et al.*, (1986) constataram a reduzida aeração do solo, ainda na capacidade de campo, e relacionaram a redução na produtividade da cultura do milho com a má aeração do solo. Os resultados obtidos neste estudo indicam que valores de densidade maiores que 1,70 Mg m⁻³, na condição de capacidade de campo, podem oferecer restrições ao desenvolvimento das plantas, devido à reduzida difusão de oxigênio no solo. Em solos compactados, sob condições de elevada umidade do solo, o desenvolvimento de zonas anaeróbicas induzem a deficiência no suprimento de oxigênio às raízes (Stepniewski *et al.*, 1994), com reflexos na absorção de água, na absorção de nutrientes (Marschner *et al.*, 1995) e na produtividade e na qualidade das culturas (Rachwal e Dedecek, 1996). Os resultados apresentados na Figura 1 sugerem que é necessário um maior período de secamento do solo, além da tensão de 0,01 MPa, para que a PA atinja o valor mínimo de 10% nas amostras com densidades do solo superiores a 1,7 Mg m⁻³.

No sistema de plantio direto, a ausência de revolvimento do solo aliada ao tráfego de máquinas

promove a compactação superficial e modificações na distribuição dos tamanhos de poros do solo. Tormena e Roloff (1996) constataram que o tráfego de máquinas, num solo sob plantio direto, ocasionou reduções drásticas no volume de macroporos do solo, com valores próximos de zero na entrelinha trafegada. Também Corsini e Ferraudo (1999) observaram que nos três primeiros anos de implantação do plantio direto, ocorreu a diminuição da porosidade, com reflexos no potencial de desenvolvimento radicular da camada superficial do solo.

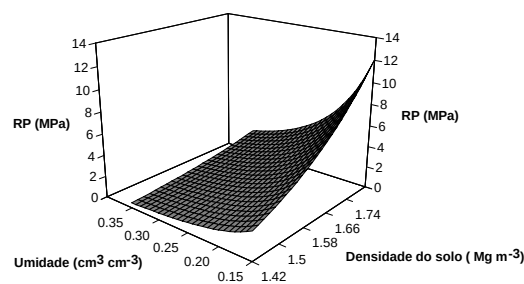
Os resultados do ajuste dos dados de resistência à penetração (RP) ao modelo empregado são apresentados na Tabela 2. A RP foi positivamente relacionada com a densidade e negativamente com o conteúdo de água do solo, concordando com os resultados obtidos por Tormena *et al.*, (1998), utilizando o mesmo modelo para ajustar os dados de RP. O modelo ajustado explicou 73% da variabilidade dos dados de resistência à penetração. Vários autores também demonstraram relações positivas da RP com a densidade e negativas com a umidade do solo (Taylor *et al.*, 1966; Eavis, 1972; Smith *et al.*, 1997).

Tabela 2. Valores dos parâmetros do modelo de resistência $RP = a_0 + b_0 \ln D_s + c_0 \ln \theta$

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Valor de T	P > T
ao	-4,9623	0,5899	-8,412	0,0001
bo	6,2090	0,9332	6,654	0,0001
co	-1,9687	0,2686	-7,330	0,0001

RP=resistência do solo (MPa), θ =conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³), Ds=densidade do solo (Mg m⁻³), n=40

A representação tridimensional da variação da RP com Ds e umidade é apresentada na Figura 2.

**Figura 2.** Curva de resistência do solo à penetração determinada a partir do modelo $RP = 0,006997 D_s^{6,2090} \theta^{-1,9687}$

Valores de $RP > 2,0$ MPa têm sido considerados limitantes para o crescimento das raízes (Taylor *et al.*, 1966). Tardieu *et al.*, (1994) constataram que $RP = 2,0$ MPa também foi limitante para o crescimento da parte aérea de plantas de milho. Desta forma, a ocorrência de valores limitantes de RP depende das condições do solo em termos de umidade e densidade do solo. A variação da umidade do solo determina os valores de densidade do solo em que a RP atinge valores superiores ao crítico de 2,0 MPa. No entanto a variabilidade espacial da densidade do solo, ao longo do seu secamento, permite uma ampla variação de RP , a qual pode ser explorada pelo sistema radicular das plantas.

A Figura 3 mostra a variação de RP com a densidade em diferentes condições de secamento. A variação da densidade teve grande impacto sobre os valores de resistência à penetração e a magnitude desta variação foi tanto maior quanto menor o conteúdo de água do solo.

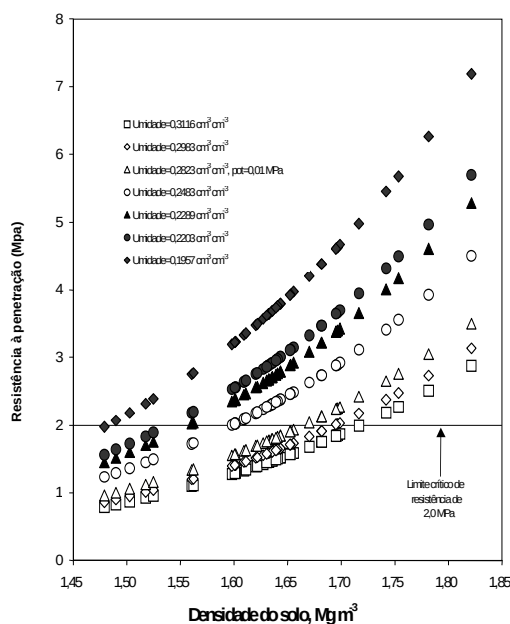


Figura 3. Variação da resistência do solo à penetração com a densidade do solo em função da umidade obtida em diferentes potenciais da água no solo

Ainda na Figura 3, a densidade do solo no qual ocorre a resistência de 2,0 MPa varia com o grau de secamento do solo. Considerando-se a RP como fator de impedimento ao crescimento radicular, num valor de umidade de $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a RP atinge o valor crítico, em densidade superiores a $1,72 \text{ Mg m}^{-3}$. Já num valor de umidade igual a $0,1957 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a $RP = 2,0$ MPa ocorre no valor de densidade do solo igual a $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, o que apóia a argumentação de Letey (1985) de que a densidade do solo é uma

propriedade física indiretamente relacionada com o crescimento das plantas. Estes resultados demonstram que, neste solo, a qualidade física do solo, para o crescimento das plantas, é dinâmica com a umidade do solo e que a densidade do solo, isoladamente não pode ser utilizada para avaliar o efeito de práticas de manejo na qualidade física do solo.

Referências bibliográficas

- Bengough, 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
- Boone, F.R.; Werf, H.M.G van der; Kroesbergen, B.; Haag, B.A. ten; 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.; Werf, H.M.G van der; Kroesbergen, B.; Hag, B.A. ten; 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.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Agricult. Soc. Agricult. Engin.*, 33:519-524, 1990.
- Cardoso, A., Potter, R.O.; Dedeczek, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no Noroeste do Paraná. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27(2):349-353, 1992.
- Cassel, D.K.; Lal, R. Soil physical properties of the tropics: commons beliefs and management restraints. In: Miths and science of soils of the tropics. Madison: *Soil Science Society of America*, 1992. p.61-89,
- 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. Agropec. Bras.*, 34:289-298, 1999.
- 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. *Resumos...* Londrina: SBCS, 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. *Rev. Unimar*, 19:827-844, 1997
- Davies, W.J.; Zangh, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.*, 42:55-76, 1991.
- Dexter, A.R.; Youngs, I.M. Soil physic toward 2000. *Soil Tillage Res.*, 24:101-106, 1992.
- Dexter, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11:199-238, 1988.

- Ehlers, W.W.; Kopke, F.; Hesse, F.; Bohm, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Tillage Res.*, 3:261-275, 1983.
- Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de Métodos de Análises de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- Embrapa. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999. 412p.
- Eavis, B.W. Soil physical condition affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36:613-622, 1972.
- Fidalski, J. Fertilidade do solo sob pastagens, lavouras anuais e permanentes na região Noroeste do Paraná. *Rev. Unimar*, 19(3):853-861, 1997.
- 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.
- Kiehl, E.J. Porosidade. In: Kiehl, E.J. *Manual de Edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres, 1979. p.96-111.
- Letey, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- Marun, F. Propriedades físicas e biológicas de um Latossolo Vermelho Escuro do Arenito Caiuá sob pastagem e culturas anuais. *Pesq. Agropec. Bras.* 31(8):593-597, 1996.
- Marschner, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London: Academic Press, 1995. 889p.
- Materechera, S.A.; Dexter, A.R.; Alston, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. *Plant and Soil*, 135:31-41, 1991.
- Rachwal, M.F.G.; Dedeczek, R.A. Influência da aeração e da disponibilidade hídrica em cambissolos e latossolos com diferentes níveis de erosão sobre a produtividade e qualidade da cultura da batata. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 20:485-491, 1996.
- Sas Institute. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary: NC, 1999.
- 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*, 78:91-111, 1997.
- Stepniewski, W.; Glinski, J.; Ball, B.C. Effects of soil compaction on soil aeration properties. In Soane, B.D.; van Ouwerkerk, C. *Soil Compaction and Crop Production*. Elsevier: Amsterdam, 1994. p.167-189.
- Tardieu, F. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. *Soil Tillage. Res.*, 30:217-243, 1994.
- 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.
- Tormena, C.A.; Roloff, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 20: 333-339, 1996.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 22:573-581, 1998.

Received on May 31, 2000.

Accepted on August 31, 2000.