



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Brasil

Liane Rodrigues de Lima, Claudia; Silva, Alvaro Pires da; Imhoff, Silvia; Leão, Tairone Paiva  
Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à  
penetração

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 30, núm. 2, 2006, pp. 217-223

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214051003>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# **ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DO SOLO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO<sup>(1)</sup>**

**Claudia Liane Rodrigues de Lima<sup>(2)</sup>, Alvaro Pires da Silva<sup>(3)</sup>,  
Silvia Imhoff<sup>(4)</sup> & Tairone Paiva Leão<sup>(5)</sup>**

## **RESUMO**

A pressão de preconsolidação, apesar das dificuldades inerentes à sua obtenção, representa uma medida útil do estado mecânico do solo para o seu uso, manejo e planejamento de sistemas de mecanização. A estimativa da pressão de preconsolidação, a partir de propriedades do solo facilmente mensuráveis, é, portanto, uma alternativa que pode ser utilizada para contornar as dificuldades. Os objetivos deste trabalho foram: (a) quantificar a pressão de preconsolidação e a resistência do solo à penetração, em laboratório e em campo, para um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob pomar de laranja, e (b) estabelecer a relação entre ambos os indicadores físicos. A amostragem e as avaliações foram realizadas em oito dias consecutivos, acompanhando o secamento natural do solo. Houve relação significativa, positiva e linear entre a pressão de preconsolidação e a resistência do solo à penetração, medida no laboratório e no campo. A similaridade das relações entre resistência à penetração, obtida no campo e em laboratório, e a pressão de preconsolidação permitiu afirmar que a capacidade de suporte de carga pode ser adequadamente estimada a partir da resistência de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico à penetração medida diretamente no campo.

**Termos de indexação:** pomar de laranja, pressão de preconsolidação, Latossolo Vermelho-Amarelo.

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Curso de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Recebido para publicação em agosto de 2004 e aprovado em março de 2006.

<sup>(2)</sup> Pós-Doutoranda em Solos, Universidade Federal de Santa Maria – CCR/UFSM. Faixa de Camobi, Km 9, Campus Universitário, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: cirlima@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de 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: apisilva@esalq.usp.br

<sup>(4)</sup> Professora da Universidad Nacional del Litoral. Av. Kreder 2805, CEP 3080 Esperanza, Argentina. E-mail: simhoss@unl.edu.ar

<sup>(5)</sup> Doutorando, Department of Earth & Planetary Sciences, University of Tennessee Knoxville (TN). E-mail:tpleao@esalq.usp.br

**SUMMARY: EVALUATION OF SOIL RESISTANCE TO PENETRATION  
UNDERLYING SOIL LOAD SUPPORT CAPACITY ESTIMATE**

*The preconsolidation pressure, despite the difficulties inherent to its measurement, provides a useful measure of the soil mechanical state for soil management and the planning of mechanization systems. The estimation of the preconsolidation pressure, based on easily measurable soil physical properties, may be relevant to solve some difficulties. The objectives of this study were: (a) to quantify the preconsolidation pressure and soil resistance to penetration measured in the laboratory and the field for a Haplustox under orange orchard, and (b) to establish relationships between these physical indicators. Sampling and evaluations were carried out on eight consecutive days to observe the natural soil drying. There was a positive, linear, and significant relationship between the preconsolidation pressure and soil resistance to penetration measured in the laboratory as well as in the field. The similarity of the relationships among soil resistance to penetration measured in the laboratory and the field and the preconsolidation pressure allowed affirming that the load support capacity for the Haplustox may be estimated from the soil resistance to penetration measured in the field.*

*Index terms:* orange orchard, preconsolidation pressure, Haplustox.

## INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas a respeito do processo de compressão do solo (Earl, 1997). O processo de compressão descreve a compactação (expulsão do ar) e a consolidação (expulsão da água) do solo (Gupta & Allmaras, 1987). O entendimento do processo de compressão é essencial para estimar as alterações que podem ocorrer na estrutura do solo, quando submetido a determinada pressão externa.

A curva de compressão uniaxial tem sido amplamente utilizada para estudar o processo de compressão do solo. A partir dessa curva, é obtido um indicador que expressa a máxima pressão que pode ser aplicada ao solo antes da ocorrência de um incremento na compactação. Na literatura, esse indicador é chamado de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), sendo considerado um valor crítico, já que pressões inferiores podem causar pouca compactação adicional, enquanto estresses maiores provocam considerável compactação adicional, originando a degradação irreversível da estrutura do solo (Dawidowski et al., 2001). Por esse motivo, a pressão de preconsolidação é considerada uma estimativa da história do estresse ao qual o solo foi submetido e de sua capacidade de suporte de carga (Veenhof & McBride, 1996).

De acordo com Römkens & Miller (1971), a importância do conhecimento da pressão de preconsolidação é amplamente reconhecida por auxiliar na implementação de sistemas conservacionistas de manejo e por estar relacionada com a resistência do solo à penetração das raízes.

De acordo com esses autores, a pressão de preconsolidação é uma estimativa da resistência do solo na qual a elongação das raízes cessa, indicando que solos com valores elevados de pressão de preconsolidação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes.

Uma estimativa da pressão de preconsolidação obtida a partir de propriedades físicas facilmente mensuráveis, como a resistência do solo à penetração (RP), representa uma medida útil do estado mecânico do solo para o seu uso, manejo e planejamento de sistemas de mecanização agrícola. Estimativas dessa natureza foram apresentadas para outros atributos como o índice de compressão do solo (Silva et al., 2000; Imhoff et al., 2004).

Culley & Larson (1987) encontraram relação linear entre a resistência do solo à penetração e a pressão de preconsolidação. Burguer et al. (1988) mostraram que a variação na pressão de preconsolidação com a profundidade é comparável à variação da resistência do solo à penetração. Alguns autores têm mencionado que existe uma relação entre a RP e a  $\sigma_p$  de 10:1 (Canarache et al., 2000). Recentemente, essa relação foi confirmada por Mosaddeghi et al. (2003).

A hipótese testada no presente trabalho foi de que a capacidade de suporte de carga pode ser estimada a partir de avaliações da resistência do solo à penetração. Os objetivos foram: (a) quantificar a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e a resistência do solo à penetração, em laboratório ( $RP_L$ ) e em campo ( $RP_C$ ), para um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob pomar de laranja, e (b) estabelecer a relação entre ambos os indicadores físicos.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em um pomar de laranja pêra (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) sobre o portainxerto limão cravo (*Citrus limonia* (L.) Osbeck), com uma área total de 24.128 m<sup>2</sup>, com espaçamento de 8 x 4 m, instalado em 1991 e pertencente ao Departamento de Produção Vegetal (Setor de Horticultura) da ESALQ/USP, localizado no município de Piracicaba (SP). O solo de textura franco-arenosa foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Embrapa, 1999).

O controle de plantas daninhas na linha do cultivo foi realizado três vezes ao ano com a aplicação de herbicida e roçada nas entrelinhas com roçadeira Baldan RP 1700, com peso aproximado de 358 kg. O controle de ácaros (*Phyllocoptuta oleivora* e *Brevipalpus phoenicis*), moscas das frutas (*Ceratitis capitata* e *Anastrepha fraterculus*) e bicho furão (*Ecdytolopha aurantiana*) foi efetuado duas vezes ao ano, utilizando um pulverizador de, aproximadamente, 825 kg e capacidade para 2.000 L. Em todas as operações agrícolas, foi utilizado um trator MF 275 (4 x 2) com peso, aproximado, de 3.900 kg e pneus dianteiros do tipo 7.5–16F2, cuja pressão de inflação de ar é de 240 kPa e traseiros do tipo 18.4–30R1, que utilizam pressão de 96,5 kPa.

A amostragem foi realizada em junho de 2003. Na área de amostragem, foram estabelecidas cinco parcelas com dimensões de, aproximadamente, 1 m<sup>2</sup>, posicionadas na linha da cultura. As parcelas foram irrigadas até atingir a umidade de saturação na camada superficial (0–0,10 m). A partir do segundo dia, foram coletadas cinco amostras com estrutura indeformada (uma por parcela) por oito dias consecutivos, acompanhando o secamento natural do solo, totalizando quarenta amostras. As amostras coletadas, utilizando anéis volumétricos com altura de 0,025 m e diâmetro interno de 0,07 m, corresponderam à profundidade média de amostragem de 0,05 a 0,075 m.

Imediatamente antes da coleta das amostras com estrutura indeformada e durante os oito dias consecutivos, foi avaliada a resistência do solo à penetração em campo, na camada de 0 a 0,08 m, realizando cinco medidas ao redor do local em que seria coletada cada amostra indeformada, utilizando-se um penetrômetro estático convencional cônico, modelo Solotest S-310, com ângulo de penetração de 30° e área basal de 0,0001 m<sup>2</sup>, totalizando 200 leituras.

As amostras foram levadas ao laboratório para a determinação da resistência do solo à penetração e para a construção da curva de compressão uniaxial. Foram pesadas e imediatamente obtidas três repetições de resistência do solo à penetração em cada amostra com estrutura indeformada, empregando-se um equipamento que utiliza um atuador linear elétrico, com motor de passo e célula

de carga com capacidade de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição e armazenamento das informações (Tormena et al., 1998), perfazendo um total de 120 avaliações.

Após a avaliação da resistência do solo à penetração, as amostras foram recobertas para manter a umidade até o momento da realização do ensaio de compressão uniaxial. Esse ensaio consistiu na aplicação sucessiva e contínua de pressões crescentes e preestabelecidas de 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1.000, 1.300 e 1.600 kPa, por cinco minutos, período suficiente para atingir 99 % da deformação máxima (Silva et al., 2000). O deslocamento vertical a cada pressão aplicada foi registrado por meio de um sensor ligado a um sistema de consolidação e aquisição de dados automatizados Satron MCT 2000 (MIRAE Engineering Inc., Buscan Korea).

As amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, e a massa de cada amostra foi mensurada. A partir dos valores de massa e do volume calculado, para cada pressão aplicada, foram determinados os valores de densidade do solo de cada amostra (Blake & Hartge, 1986a).

A densidade de partículas foi determinada pelo método do picômetro (Blake & Hartge, 1986b). A relação de vazios (e) foi obtida para cada amostra baseando-se na densidade do solo (D<sub>s</sub>) e na densidade de partículas (D<sub>p</sub>) pela seguinte expressão:  $e = \frac{D_p}{D_s} - 1$  (McBride & Joosse, 1996).

O ensaio permitiu a obtenção da curva de compressão uniaxial do solo, que relaciona o logaritmo da pressão aplicada (eixo x) versus a relação de vazios (eixo y). A partir dessas curvas, foi obtido o valor da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), utilizando-se o método de Casagrande (1936). Esse método consiste na identificação, na curva de compressão uniaxial, do ponto de raio mínimo de curvatura, sendo por ele traçada uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva de compressão uniaxial. A partir do ângulo formado entre essas duas retas, traçou-se a bisetriz e, no ponto de interseção da bisetriz com o prolongamento da reta de compressão virgem, obteve-se a pressão de preconsolidação do solo.

Os resultados foram submetidos a análises de regressão linear e não-linear, utilizando-se o software SAS (SAS, 1991).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amplitude de variação da resistência do solo à penetração avaliada em laboratório ( $RP_L$ ) e no campo ( $RP_C$ ) e da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) esteve associada, provavelmente, à variação da umidade com base gravimétrica ( $U_g$ ), decorrente do

secamento natural do solo nos oito dias consecutivos de amostragem (Quadro 1).

As  $RP_L$ ,  $RP_C$  e  $\sigma_p$  foram, significativamente, relacionadas com a umidade do solo ( $P < 0,0001$ ). Houve diminuição da resistência à penetração com incremento da umidade do solo (Figura 1), corroborando os resultados de Häkansson et al. (1988), Busscher et al. (1997), Laboski et al. (1998) e Vaz & Hopmans (2001). A relação obtida entre a  $RP_L$  e a  $Ug$  ( $R^2 = 0,711$ ) foi similar à encontrada para a  $RP_C$  e a  $Ug$  ( $R^2 = 0,660$ ) (Figura 1), evidenciando que a maneira de obtenção da resistência à penetração (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a resistência à penetração e a  $Ug$ . Similarmente, a  $\sigma_p$  diminuiu com o aumento da umidade do solo (Figura 2).

Diversos trabalhos mostram que a capacidade de suporte de carga relaciona-se negativamente com a

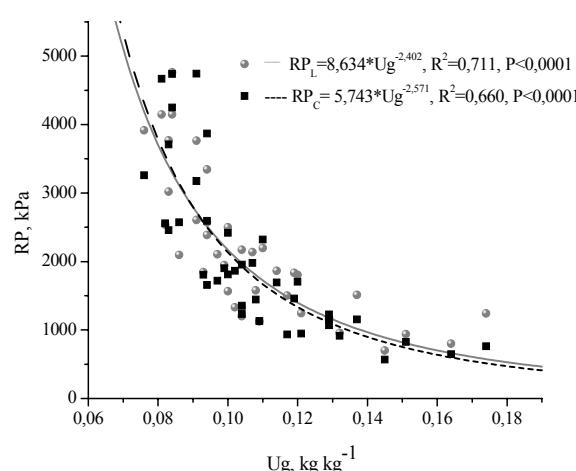
umidade do solo (Horn, 1988; Alexandrou & Earl, 1998; Kondo & Dias Junior, 1999). A umidade do solo é um fator amplamente reconhecido como determinante do processo de compressão e da magnitude da deformação de determinado tipo de solo. A água atua como "lubrificante" entre as partículas, permitindo o seu deslocamento. Esse deslocamento é favorecido à medida que há incremento da umidade do solo (Larson et al., 1980; McNabb et al., 2001; Sánchez-Girón et al., 2001). O aumento da umidade do solo origina redução do número de contatos entre as partículas, diminuindo as forças de ligação entre elas e, por sua vez, reduzindo a capacidade de suporte de carga (Horn & Lebert, 1994; McNabb & Boersma, 1996; Silva et al., 2002).

Considerando que a  $RP_L$ , a  $RP_C$  e a  $\sigma_p$  estão relacionadas com a umidade gravimétrica do solo

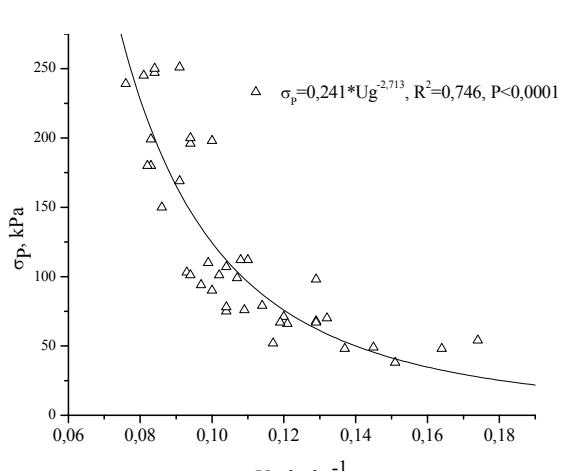
**Quadro 1.** Número de determinações (N), média, desvio-padrão, valores (mínimo e máximo) e coeficiente de variação (CV) das variáveis analisadas para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de citrus

Variável <sup>(1)</sup>	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV
$Ug$	40	0,11	0,02	0,08	0,17	21,4
$D_s$	40	1,52	0,08	1,40	1,69	5,5
$RP_L$	120	2.099,00	1.045,21	700,00	4.763,00	49,8
$RP_C$	200	2.056,00	1.175,69	568,00	4.743,00	57,2
$\sigma_p$	40	121,00	67,00	38,00	251,00	55,2

<sup>(1)</sup>  $Ug$  = umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $D_s$  = densidade do solo inicial ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $RP_L$  e  $RP_C$  (kPa) = resistência do solo à penetração, avaliada em laboratório e em campo, respectivamente;  $\sigma_p$  = pressão de preconsolidação do solo (kPa).



**Figura 1.** Resistência do solo à penetração (RP) avaliada em laboratório ( $RP_L$ ) e em campo ( $RP_C$ ) versus umidade do solo, com base gravimétrica ( $Ug$ ), para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, sob cultivo de citrus.



**Figura 2.** Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) versus umidade do solo, com base gravimétrica ( $Ug$ ), para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, sob cultivo de citrus.

(Figuras 1 e 2), espera-se que exista uma relação entre RP e  $\sigma_p$ . Canarache et al. (2000) e Mosaddeghi et al. (2003) observaram uma relação de 10:1 entre a resistência à penetração e a  $\sigma_p$  em solos de regiões de clima temperado.

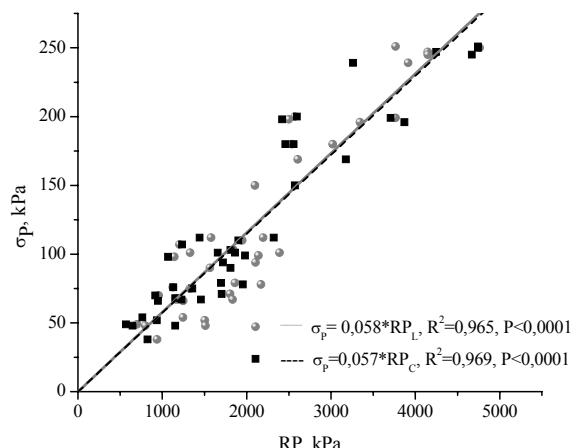
Pela análise de regressão linear da  $\sigma_p$  em função da  $RP_L$  e  $RP_C$ , observou-se que o coeficiente linear não foi significativo (Quadro 2). Com o intuito de simplificar o modelo apresentado (Quadro 2), efetuou-se novamente a análise de regressão entre a  $\sigma_p$  em função da  $RP_L$  e da  $RP_C$ , desconsiderando-se o coeficiente linear (Figura 3).

Houve uma relação significativa, positiva e linear entre a RP e a  $\sigma_p$ , ou seja, valores superiores de  $\sigma_p$  estiveram associados ao incremento da resistência à penetração (Figura 3), corroborando os resultados de Culley & Larson (1987).

Considerando que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para ambas as equações foram semelhantes (Figura 3), mostra-se que a  $\sigma_p$  pode ser satisfatoriamente estimada a partir da  $RP_C$ .

A relação RP: $\sigma_p$  foi de 17:1, tanto para a  $RP_L$ , quanto para  $RP_C$ , valor superior aos encontrados por Canarache et al. (2000), para um solo franco-siltoso e argilo-siltoso, e por Mosaddeghi et al. (2003), para um solo franco e outro originado de sedimentos aluviais (10:1).

A diferença dessas relações (17:1 e 10:1) pode estar relacionada com a textura dos solos estudados. O teor e o tipo de argila, incluindo a quantidade de óxidos de Fe, exercem efeito sobre o comportamento compressivo dos solos (McBride, 1989). Solos com predomínio de argila apresentam maior capacidade de suporte de carga do que aqueles com predominância de areia. A influência da argila na capacidade de suporte de carga do solo está relacionada com a força de coesão imposta pelas partículas. A força de coesão entre partículas impede a separação e o deslocamento das partículas, aumentando a capacidade de suporte de carga, corroborando os resultados apresentados por Imhoff et al. (2004).



**Figura 3.** Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) versus resistência do solo à penetração (RP) medida em laboratório ( $RP_L$ ) e em campo ( $RP_C$ ), para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, sob cultivo de citrus.

Considerando a relação RP: $\sigma_p$  obtida (17:1) e que limitações ao crescimento radicular em áreas de citrus ocorrem a valores de RP > 2.200 kPa (Abercrombie & Plessis, 1995), espera-se que ocorra diminuição na produtividade do pomar a valores de pressão de preconsolidação superiores a, aproximadamente, 127 kPa (Figura 3).

Estima-se, ainda, que operações agrícolas efetuadas no solo estudado, com valores de umidade gravimétrica superiores a, aproximadamente, 0,10 kg kg<sup>-1</sup>, poderão causar compactação adicional (Figura 2).

Nas condições deste estudo e, para que seja evitada a degradação estrutural, sugere-se que as operações agrícolas não só sejam efetuadas por máquinas que exerçam no solo pressão inferior a 127 kPa, mas também que sejam realizadas em condição de umidade gravimétrica inferior a 0,10 kg kg<sup>-1</sup>.

**Quadro 2.** Resultados da análise de regressão linear da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ , kPa) em função da  $RP_L$  e da  $RP_C$ , para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, sob cultivo de citrus

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Valor t	Pr > t
$RP_L$				
A	-2,585	9,381	-0,28	0,784
B	0,059	0,004	14,67	< 0,0001
$RP_C$				
A	11,579	7,575	1,53	0,135
B	0,053	0,003	16,58	< 0,0001

$RP_L$  = resistência do solo à penetração medida em laboratório (kPa);  $RP_C$  = resistência do solo à penetração avaliada em campo (kPa). A, B = Coeficientes linear e angular do modelo:  $\sigma_p = A + B \cdot (RP_L \text{ ou } RP_C)$ .

## CONCLUSÕES

1. Os resultados comprovaram que a capacidade de suporte de carga do solo pode ser estimada a partir de avaliações da resistência à penetração em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de citrus.
2. Houve relação significativa, positiva e linear entre a pressão de preconsolidação e a resistência do solo à penetração, medida no laboratório e no campo.
3. A similaridade das relações entre resistência à penetração, obtida no campo e em laboratório, e a pressão de preconsolidação revelam que a capacidade de suporte de carga pode ser adequadamente estimada a partir da resistência de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico à penetração medida no campo.

## LITERATURA CITADA

- ABERCROMBIE, R.A. & PLESSIS, S.F. DU. The effect of alleviating soil compaction on yield and fruit size in an established navel orange. *J. South Afr. Soc. Hort. Sci.*, 5:85-89, 1995.
- ALEXANDROU, A. & EARL, R. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *J. Agric. Eng. Res.*, 71:75-80, 1998.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. ed., *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. p.363-375.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. p.377-381.
- BURGUER, N.; LEBERT, M. & HORN, R. Prediction of the compressibility of arable land. *Catena*, 11:141-151, 1988. (Supplement)
- BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R. & SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Till. Res.*, 43:205-217, 1997.
- CANARACHE, A.; HORN, R. & COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Till. Res.*, 56:185-196, 2000.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Cambridge, 1936. Proceedings. Cambridge, 1936. p.60-64.
- CULLEY, J.L.B. & LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:562-567, 1987.
- DAWIDOWSKI, J.B.; MORRISON, J.E. & SNIEG, M. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Trans. Am. Soc. Eng.*, 4:1059-1064, 2001.
- EARL, R. Assessment of behaviour of field soils during compression. *J. Agr. Eng. Res.*, 68:147-157, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Brasília, Produção de Informação, 1999. 412p.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:5-10, 1987.
- HÄKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena*, 11:53-71, 1988. (Supplement)
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:17-24, 2004.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- LABOSKI, C.A.M.; DOWDY, R.H.; ALLMARAS, R.R. & LAMB, J.A. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. *Plant Soil*, 203:239-247, 1998.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- MCBRIDE, R.A. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated, structured soils. *Soil Till. Res.*, 19:383-397, 1989.
- MCBRIDE, R.A. & JOOSSE, P.J. Overconsolidation in agricultural soil: Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:373-380, 1996.
- MCNABB, D.H. & BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:333-341, 1996.
- MCNABB, D.H.; STARTSEV, A.D. & NGUYEN, H. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1238-1247, 2001.
- MOSADDEGH, M.R.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A. & ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in Central Iran. *Soil Till. Res.*, 70:53-64, 2003.

- RÖMKENS, M.J.M. & MILLER, R.D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data – A mathematical model. *Plant Soil*, 35:237-248, 1971.
- SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E. & HERNANZ, J.L. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents. *Soil Till. Res.*, 62:85-99, 2001.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arenoso e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. *R. Bras. Ci.Solo*, 26:1-8, 2002.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, SAS Institute, 1991. 1104p.
- 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.
- VAZ, C.M.P. & HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer - TDR moisture probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:4-12, 2001.
- VEENHOF, D.W. & MCBRIDE, R.A. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:362-373, 1996.

