

# Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja

**José Frederico CENTURION<sup>1</sup>; Maria Aparecida Pessoa da Cruz CENTURION<sup>2</sup>; Amauri Nelson BEUTLER<sup>3</sup>; Leandro Aurélio ROSSINI<sup>3</sup>; Onã da Silva FREDDI<sup>3</sup>; Eurico Lucas de SOUZA NETO<sup>3</sup>**

Autor para correspondência. Departamento de Solos e Adubos, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, Cep 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil. Email: jfcentur@fcav.unesp.br

<sup>2</sup> Departamento de Produção Vegetal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, Cep 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil. Email: cidinha@fcav.unesp.br

<sup>3</sup> Departamento de Solos e Adubos, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, Cep 14884-900, Jaboticabal-SP, Brasil.

## Resumo

A qualidade física do solo é imprescindível para o desenvolvimento adequado das plantas. Assim, este estudo teve o objetivo de avaliar o efeito da compactação do solo no desenvolvimento de duas cultivares de soja (IAC – 8 e MG/BR 46 (Conquista)). Utilizaram-se amostras de Latossolo Vermelho coletadas na camada de 0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. O solo foi compactado em camadas de 0,03 m, em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro (9,82 L), formando quatro níveis de compactação que foram caracterizados pela densidade do solo de 0,93; 1,25; 1,37 e 1,60 Mg m<sup>-3</sup>. Em novembro de 2003, foi semeada a soja e após 10 dias, desbastada, deixando duas plantas por vaso, que foram irrigadas diariamente para atingir 80% da capacidade de campo (conteúdo de água na tensão de 0,006 MPa). A densidade do solo de até 1,6 Mg m<sup>-3</sup> não causou decréscimo significativo na produção das cultivares de soja, as quais apresentaram tolerância equivalente à compactação.

**Palavras-chave adicionais:** *Glycine max*; densidade do solo; porosidade do solo; umidade do solo.

## Abstract

CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. DA C.; BEUTLER, A. N.; ROSSINI, L. A.; FREDDI, O. DA S.; SOUZA NETO, E. L. DE. Soil compaction effects on growth and yield of soybean cultivars. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.2, p.203-209, 2006

Aiming to evaluate the effects of soil compaction on the development and productivity of two soybean varieties (IAC - 8 and MG/BR 46 (Conquista), this study was undertaken. Oxisol soil samples were collected at 0-0.20 m depth and passed through a 0.004 wire mesh sieve. The experimental units were arranged according to a completely random design, in a 4 x 2 factorial, with four replications. The soil was compacted in layers of 0.03 m in pots of 0.20 m of height and 0.25 m of diameter (9.82 L), forming four compaction levels that were characterized by the soil densities of 0.93, 1.25, 1.37, and 1.60 Mg m<sup>-3</sup>. In November of 2003, the soybean seeds were sown and the seedlings thinned 10 days later so as to have two plants per pot. The soil of those vases was daily irrigated to reach 80% of field capacity (water content at 0.006 MPa). The results showed that even the highest soil density (1.60 Mg m<sup>-3</sup>) did not cause significant reduction in yield of plants of both soybean varieties.

**Additional keywords:** *Glycine max*; bulk density; soil porosity; soil moisture.

## Introdução

No Brasil, a soja é a cultura que ocupa maior área agrícola (21.500.000 ha), e a sua produção equivale a 25% da produção mundial, que confere o mérito de segundo maior produtor mundial, superado apenas pelos Estados Unidos, e, desse montante, 64% são produzidos na região central do Brasil (EMBRAPA, 2004). Para tal crescimento nessas áreas anteriormente desvalorizadas, contribuíram os regimes pluviométricos favoráveis aos cultivos de verão e as facilidades de mecanização total da cultura, entre outros. Porém, com

o aumento gradativo das áreas cultivadas em sistemas com menor revolvimento, denominado sistema plantio direto, tem sido verificada a compactação superficial do solo que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e o não-revolvimento do solo neste sistema (BEUTLER & CENTURION, 2004; TAVARES FILHO et al., 2001).

A compactação do solo é caracterizada por uma alteração estrutural que causa aumento da densidade do solo e redução da porosidade total (STONE et al., 2002), que pode reduzir a penetração de raízes (BENGOUGH et al., 1997) e alterar o equilíbrio na

proporção de gases do solo e a disponibilidade de água e nutrientes às raízes das plantas (STIRZAKER et al., 1996; HÅKANSSON & VOORHEES, 1998). Em consequência, o funcionamento bioquímico da planta é alterado, restringindo, entre outros fatores, o crescimento da parte aérea (TURNER, 1997) e a produção da cultura (BEUTLER & CENTURION, 2004).

A tolerância das plantas à compactação, em relação ao valor crítico à produção, diverge entre culturas (CINTRA & MIELNICZUK, 1983; MIELNICZUK et al., 1985; STIRZAKER et al., 1996; ROSOLEM et al., 2002; BEUTLER et al., 2004), porém entre cultivares são observadas apenas algumas alterações nos componentes de desenvolvimento, como do crescimento radicular e da parte aérea (BORGES et al., 1988; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000; FOLONI et al., 2003). BORGES et al. (1988) verificaram que a cultivar de soja tropical foi mais sensível em relação a IAC-8, Doko, Cristalina e Bossier, em relação ao desenvolvimento da parte aérea.

Para avaliar a compactação do solo, sua densidade (Ds) tem sido um atributo indicado e muito utilizado, por ser uma medida quantitativa com razoável sensibilidade e de fácil determinação (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Para o Latossolo Vermelho distroférico, em casa de vegetação, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, BEUTLER et al. (2004) verificaram que a produção de soja, cultivar Embrapa 48, decresceu a partir da Ds de 1,37 Mg m<sup>-3</sup>. Já em condições de campo, para o mesmo tipo de solo e cultivar de soja, a produção decresceu a partir da Ds de 1,48 Mg m<sup>-3</sup> (BEUTLER & CENTURION, 2004). MIELNICZUK et al. (1985) verificaram que a produção da massa da matéria seca da parte aérea de soja, em Latossolo Roxo, foi menor na Ds de 1,50 Mg m<sup>-3</sup>. Em geral, para solos de

textura franco-argilosa (média), são considerados críticos valores de Ds a partir de 1,55 Mg m<sup>-3</sup> (CAMARGO & ALLEONI, 1997; REICHERT et al., 2002).

Diante da importância econômica da soja e do crescente aumento na demanda de grãos dessa cultura, são imprescindíveis o estudo científico dos sistemas de produção e o avanço tecnológico para aumentar sua produtividade, competitividade e rentabilidade. Ainda, com a expansão generalizada do sistema de plantio direto para o cultivo da soja, são essenciais o estudo da compactação superficial (0-0,20 m) que ocorre nesse sistema e a determinação de valores a partir dos quais a produção é reduzida.

Este estudo teve o objetivo de avaliar o efeito da compactação do solo no desenvolvimento e na produção de duas cultivares de soja em casa de vegetação.

## Material e métodos

O experimento foi realizado em 2003-2004, em casa de vegetação. Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico, hipoférrico (LVd), coletadas na camada de 0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta durante 16 horas, e o conteúdo de argila, obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O LVd apresentou: 330 g kg<sup>-1</sup> de argila, 40 g kg<sup>-1</sup> de silte e 630 g kg<sup>-1</sup> de areia. O solo foi adubado segundo RAIJ et al. (1996); em 1 m<sup>3</sup> de solo foi utilizada a adubação referente a 5 m<sup>2</sup> no campo, cuja análise química foi realizada conforme RAIJ et al. (1987). A caracterização química do solo, antes e após a adubação, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) antes e após a realização da calagem e adubação para o cultivo da soja.

Table 1 - Chemical characterization of the Oxisol soil before and after soil liming and fertilizing for soybean crop.

pH CaCl <sub>2</sub>	MO/ Organic matter (g dm <sup>-3</sup> )	P <sub>resina</sub> / P <sub>resin</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	K -----	Ca (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Mg -----	V (%)
Antes da adubação/ Before fertilization						
4,5	21	14	1,2	8	5	31
Após a adubação/ After fertilization						
5,4	13	19	1,4	14	11	54

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2 (níveis de compactação x cultivares de soja), com quatro repetições.

Os quatro níveis de compactação do solo foram obtidos por meio de 0; 1; 2 e 5 impactos da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), conforme descrito em BEUTLER et al. (2004) e apresentado na Figura 1.

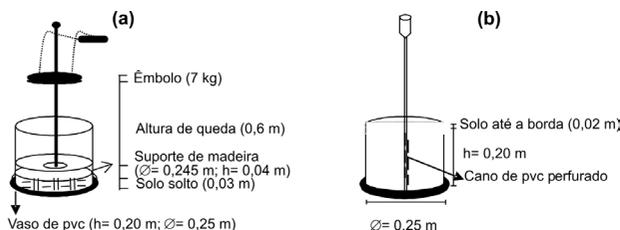


Figura 1 - Esquema da compactação do solo no vaso (a) e do vaso utilizado para o cultivo da soja (b).

Figure 1 - Device used to get soil compacted in a vase (a) and the vase with compacted soil used to grow soybean plants (b).

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

O solo foi compactado em camadas de 0,03 m. Em seguida, foram coletadas oito amostras indeformadas por tratamento, em dois vasos não-utilizados para o cultivo, para a determinação da porosidade total (DANIELSON & SUTHERLAND, 1986); da microporosidade na mesa de tensão a -0,006 MPa

(OLIVEIRA, 1968); da macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade; e da densidade do solo (Ds), segundo BLAKE & HARTGE (1986) (Tabela 2).

Determinou-se, ainda, a Ds máxima em amostras deformadas passadas em peneira de 0,004 m, utilizando-se do teste Proctor normal com reuso de material (NOGUEIRA, 1998), obtendo-se o valor de 1,85 Mg m<sup>-3</sup> para o LVd.

Em novembro de 2003, foram inoculadas as sementes de soja (*Glycine max*) das cultivares de ciclo médio MG/BR 46 (Conquista) (131-140 dias) e de ciclo semitardio IAC - 8 (141-150 dias) com *Bradyrhizobium japonicum* e semeadas três sementes por cova (4 covas vaso<sup>-1</sup>). Após 10 dias, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas por vaso. O conteúdo de água no solo foi mantido próximo a 80% da capacidade de campo (-0,006 MPa) (REICHARDT, 1988), mediante pesagem diária dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso; a pesagem e o rodízio dos vasos foram feitos a cada sete dias.

Os componentes de desenvolvimento avaliados foram: altura das plantas, altura de inserção da primeira vagem, comprimento de entrenós, número de ramos por planta, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa de 100 grãos e produção de grãos por planta (13% de umidade).

A análise estatística consistiu da análise de variância pelo teste F, e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade e regressão entre a densidade do solo e os componentes de desenvolvimento da planta. As análises foram processadas por meio do Statistical Analysis System (SAS Institute, 1996).

Tabela 2- Atributos físicos nos quatro níveis de compactação do solo.

Table 2 - Soil physical attributes in the four soil compaction levels.

Densidade do solo/ <i>Soil density</i> (Mg m <sup>-3</sup> )	Porosidade total/ <i>Total porosity</i>	Macroporosidade/ <i>Macroporosity</i>	Microporosidade/ <i>Microporosity</i>
	----- (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----		
0,93	0,431	0,254	0,177
1,25	0,497	0,274	0,223
1,37	0,455	0,242	0,213
1,60	0,389	0,151	0,238

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

## Resultados e discussão

O desenvolvimento e a produção das cultivares de soja em relação à compactação do solo foram equivalentes, não indicando interação entre esses fatores (Tabelas 3), confirmando os resultados de BORGES et al. (1988), QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000)

e FOLONI et al. (2003). Porém, a altura de plantas, o número de vagens por planta, a massa de 100 grãos e a produção foram superiores na cultivar IAC – 8, comparada a MG/BR 46 (Tabelas 3 e 4), possivelmente por fatores genéticos inerentes à própria cultivar, visto que não houve interação entre a compactação e as cultivares.

Tabela 3 - Quadrados médios obtidos em experimento utilizando cultivares de soja e diferentes densidades do solo.  
Table 3 - Analysis of variance of data referring to agronomical characteristics of two soybean plant varieties grown in soils of different densities

Tratamentos/ Treatments	Altura de plantas/ Plant height (cm)	Inserção 1ª vagem/ 1 <sup>st</sup> pod insertion (cm)	Comp. entrenós/ Internodes lenght (cm)	Nº ramos planta <sup>-1</sup> / Number of branches per plant -	Nº vagens planta <sup>-1</sup> / Number of pods per plant -	Nº grãos vagem <sup>-1</sup> / Number of grains pod <sup>-1</sup> -	Massa de 100 grãos/ Mass of 100 grains (g)	Produção de grãos/ Grain yield (g planta <sup>-1</sup> )/ (g plant <sup>-1</sup> )
Ds (soil density)	0,1299**	146,9479 <sup>ns</sup>	2,9209**	1,0078 <sup>ns</sup>	84,0703**	0,0574 <sup>ns</sup>	2,3023 <sup>ns</sup>	2,2379 <sup>ns</sup>
C (cultivars)	0,2520**	175,7812 <sup>ns</sup>	2,4531*	0,0703 <sup>ns</sup>	122,0703**	0,0002 <sup>ns</sup>	38,1507**	36,2952**
Ds x C	0,0187 <sup>ns</sup>	242,2812 <sup>ns</sup>	0,7557 <sup>ns</sup>	0,4453 <sup>ns</sup>	5,4036 <sup>ns</sup>	0,0256 <sup>ns</sup>	0,6357 <sup>ns</sup>	0,5213 <sup>ns</sup>
Níveis/Levels								
RL (linear regression)	0,3094**	241,6116 <sup>ns</sup>	7,8325**	2,6810 <sup>ns</sup>	150,9115**	0,0435 <sup>ns</sup>	1,5690 <sup>ns</sup>	5,8487 <sup>ns</sup>
RQ (quadratic regression)	0,0804**	147,9591 <sup>ns</sup>	0,7570 <sup>ns</sup>	0,1957 <sup>ns</sup>	7,9185 <sup>ns</sup>	0,0041 <sup>ns</sup>	0,5002 <sup>ns</sup>	0,6726 <sup>ns</sup>

Ds: Densidade do solo; C: Cultivares; RL: Regressão linear; RQ: Regressão quadrática; <sup>ns</sup>: não-significativo; \*: significativo a 5% de probabilidade; \*\*: significativo a 1% de probabilidade

Ds: Soil density; C: Cultivars; RL: linear regression; RQ: quadratic regression; <sup>ns</sup> not significant; \* significant at 5% of probability level; \*\* significant at 1% of probability level.

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

Tabela 4 - Médias da altura de plantas (cm), inserção da primeira vagem (cm), comprimento de entrenós (cm), número de ramos por planta, número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa de 100 grãos (g) e produção de grãos (g planta<sup>-1</sup>) em duas cultivares de soja, em Latossolo Vermelho.\*

Table 4 - Plant height (cm), first pod insertion height (cm), internode lenght (cm), number of branches per plant, number of pods per plant, number of grains per pod, mass of 100 grains (g planta<sup>-1</sup>), and grain yield (g planta<sup>-1</sup>) in two soybean cultivars growing in an Oxisol.\*

Tratamentos/ Cultivars	Altura de plantas/ Plant height (cm)	Inserção 1ª vagem / 1 <sup>st</sup> pod insertion height (cm)	Comp. Entrenós/ Internodes lenght (cm)	Nº ramos planta <sup>-1</sup> / Number of branches plant <sup>-1</sup> -	Nº vagens planta <sup>-1</sup> / Number of pods plant <sup>-1</sup> -	Nº grãos vagem <sup>-1</sup> / Number of grains pod <sup>-1</sup> -	Massa de 100grãos/ Mass of 100 grains (g)	Produção de grãos/ Grain yield (g)
IAC – 8	1,6 a	53,5 a	12,6 a	2,34 a	26,5 a	1,75 a	19,12 a	8,73 a
MG/BR 46	1,4 b	48,8 a	12,1 a	2,44 a	22,6 b	1,74 a	16,93 b	6,60 b
Média/ Mean	1,5	51,2	12,4	2,39	24,5	1,75	18,03	7,67
CV (%)	6,5	21,4	5,0	28,9	12,2	9,1	9,4	12,2

\*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

\* Means in the same column, followed by the same letter, are not significantly different at the level of 5% of probability according to Tukey's test.

The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

Com relação à compactação, a maioria dos componentes de desenvolvimento e a produção de grãos, independentemente da cultivar, não foram restringidos até a Ds de 1,60 Mg m<sup>-3</sup> (p > 0,05), equivalente a 86,48% da máxima Ds atingida pelo LVD, e mantidos em condições de umidade correspondente a 80% da capacidade de campo (- 0,006 MPa) (Tabela 3).

Houve efeito linear dos níveis de compactação sobre a altura de plantas, o comprimento de entrenós e o número de vagens por planta, onde o aumento da compactação causou a restrição desses parâmetros (Tabela 3 e Figura 2). Porém, o menor desenvolvimento desses parâmetros não resultou em decréscimo significativo da produção, corroborando NOGUEIRA & MANFREDINI (1983) e JOHNSON et al. (1990), que mencionam que o menor desenvolvimento da planta em função da compactação, muitas vezes, não causa decréscimo da produção. Segundo SCHÖFFEL et al. (2003), o número de vagens por planta de soja é o componente de desenvolvimento que mais afeta a produção, porém, nesse estudo, a restrição ao número de vagens causado pela compactação não refletiu em menor produção da soja. Isso, possivelmente por causa de uma pequena compensação (não-significativa) no número de grãos por vagem e peso de 100 sementes nos tratamentos mais compactados, conforme também verificado por SCHÖFFEL et al. (2003). Segundo KLUTHCOUSKI et al. (2000), as culturas da soja e do feijão apresentam melhor adaptabilidade ao sistema plantio direto do que o milho e, principalmente, do que o arroz.

Na literatura, estudos mostram que a compactação diminui o comprimento e o desenvolvimento radicular das plantas de soja, diminuindo assim a área explorada pelas raízes (BENGOUGH et al., 1997) e a produção da soja conforme verificado em BEUTLER & CENTURION (2004). Porém, o menor desenvolvimento radicular no solo compactado foi verificado in situ, entretanto não foi suficiente para diminuir significativamente a produção até a Ds de 1,60 Mg m<sup>-3</sup>, apesar de reduzir o crescimento de alguns parâmetros de desenvolvimento. Isso é confirmado por JOHNSON et al. (1990), TAYLOR & BRAR (1991), QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000) e BEUTLER & CENTURION (2003), que verificaram que muitas vezes a redução no comprimento radicular não é suficiente para restringir o suprimento de água e nutrientes à parte aérea e reduzir a produção.

Em relação aos valores limitantes à produção de soja, valores de Ds superiores a 1,37 Mg m<sup>-3</sup> são encontrados, em casa de vegetação, como valor a partir do qual a produção de soja cultivar Embrapa 48 decresceu, no conteúdo de água retido na tensão de 0,01 MPa e mesmo tipo de solo (BEUTLER et al., 2004).

Já em condições de campo, para o mesmo tipo de solo e cultivar, a produção decresceu a partir da Ds de 1,48 Mg m<sup>-3</sup> (BEUTLER & CENTURION, 2004). A maior tolerância das cultivares de soja IAC - 8 e Conquista, em relação à cultivar Embrapa 48 estudada por BEUTLER et al. (2004), pode ser atribuída principalmente a condução da cultura em condições de menor temperatura. Assim, houve reposição de menor quantidade diária de água, e o solo permaneceu por maior período com o conteúdo de água adequado, já que esse solo apresenta uma estrutura maciça pouco porosa, que dificulta a rápida movimentação de água através do perfil. Dessa forma, a planta permaneceu por mais tempo em condições de conteúdo de água adequado, minimizando os efeitos nocivos da compactação do solo e aumentando a tolerância à compactação. Maior tolerância da soja à compactação em maior conteúdo de água foi verificado em BEUTLER et al. (2004) e JOHNSON et al. (1990).

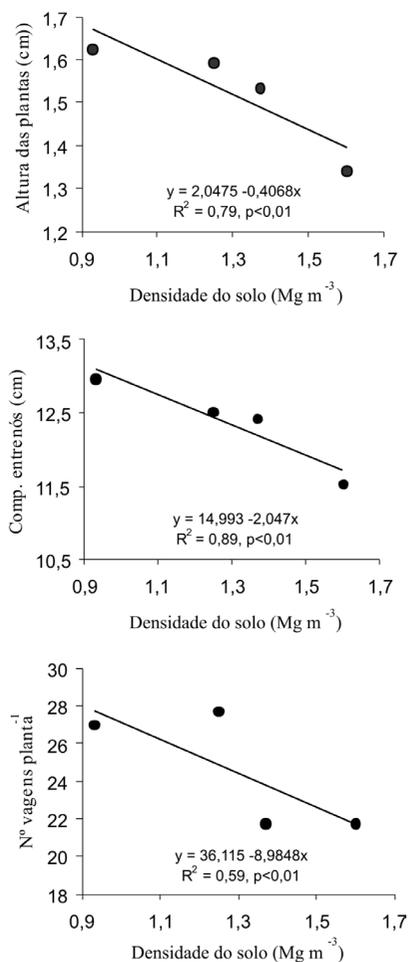


Figura 2 - Altura das plantas, comprimento de entrenós e número de vagens por planta em função da densidade do solo.

Figure 2 - Plant height, internode length and number of pods per plant as a function of soil density. The numbers after the comma are decimals. Example: 1,1 = one and one tenth.

Ainda, em relação aos atributos físicos do solo alterados pela compactação, verifica-se que a macroporosidade de  $0,151 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Tabela 2), no maior nível de compactação, foi superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado como limitante às trocas gasosas e ao desenvolvimento das plantas (CINTRA & MIELNICZUK, 1983). Dessa forma, o decréscimo da porosidade, possivelmente, não foi suficiente para reduzir a produção da soja.

Outra razão para a alta tolerância da soja à compactação nesse estudo é que, em condições adequadas de água no solo, ocorre maior disponibilidade de água e nutrientes na solução do solo, por diminuir a interação dos íons com os colóides do solo, além de aumentar a difusão dos nutrientes (NOVAIS & SMYTH, 1999). Neste paradigma, NOGUEIRA & MANFREDINI (1983) também não encontraram respostas da soja cultivar Santa Rosa à compactação do solo em condições adequadas de água e nutrientes.

## Conclusões

A compactação até a densidade do solo de  $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$  não foi prejudicial à produção de soja, em casa de vegetação, no conteúdo de água retido na tensão de  $0,006 \text{ MPa}$ , mas restringiu a altura de plantas, o comprimento de entrenós e o número de vagens por planta.

A cultivar de soja IAC – 8 apresentou maior altura de planta, número de vagens por planta, massa de 100 grãos e produção em relação à cultivar MG/BR 46 (Conquista).

## Referências

- BENGOUGH, A. G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.189, n.1, p.155-164, 1997.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.7, p.849-856, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.61, n.6, p.626-631, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical**

methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.363-375.

BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F.; REGAZZI, A. J.; FERNANDES, B.; BARROS, N. F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.35, n.202, p.553-568, 1988.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.2, p.197-201, 1983.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.443-461.

EMBRAPA. **Tecnologia de produção de soja - região central do Brasil - 2005**. Londrina: Embrapa Soja, 2004. 239p. (Sistemas de produção, 6).

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.8, p.947-953, 2003.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1. p.383-411.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p.167-179 (Advances in Soil Science).

JOHNSON, J. F.; VOORHEES, W. B.; NELSON, W. W.; RANDALL, G. W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, n.5, p.973-979, 1990.

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D.; RIBEIRO, M.; FERRARO, L. A. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.1, p.97-104, 2000.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.38, n.357, p.42-43, 1985.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**. Ensaios de laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248 p.

NOGUEIRA, S. S. S.; MANFREDINI, S. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.9, p.973-976, 1983.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.3, n.1, p.197-200, 1968.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996, 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.12, n.3, p.211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: UFMT, 2002. CD-ROM.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.1, p.109-115, 2002.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5th ed. Cary, 1996. 1686p.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A.; ATHAYDE, M. L. F.; PAVANI, L. C. Estabilidade dos componentes da produção de cultivares de soja em função de época de semeadura e irrigação. **Científica**, Jaboticabal, v.31, n.2, p.167-178, 2003.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.185, n.1, p.151-162, 1996.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.2, p.111-119, 1991.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

TURNER, N. C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.58, n.1, p.293-325, 1997.

Recebido em 2-3-2005

Aceito para publicação em 10-5-2006