

COMPACTAÇÃO DO SOLO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NO CRESCIMENTO DA PARTE AÉREA E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO

Onã da Silva Freddi; José Frederico Centurion; Ricardo Garcia Aratani; Amauri Nelson Beutler

Departamento de Solos e Adubos, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, ona_freddi@yahoo.com.br

1 RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a compactação do solo proporcionada pelo tráfego de tratores sobre o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o crescimento e produtividade do milho em um Latossolo Vermelho de textura argilosa. Os tratamentos foram constituídos por cinco intensidades de compactação e quatro repetições em delineamento inteiramente casualizado. Foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas de 0,02–0,05, 0,08–0,11, 0,15–0,18 e 0,22–0,25 m para determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência à penetração e o IHO. Os parâmetros da cultura avaliados foram à altura das plantas e inserção da primeira espiga, o diâmetro do colmo, o número de espigas por planta, a massa seca das plantas e de 1000 grãos e a produtividade. A compactação do solo restringiu todos os parâmetros da cultura avaliados com exceção apenas para o número de espigas e a massa de 1000 grãos. O IHO foi reduzido pela resistência do solo à penetração mesmo no tratamento com solo preparado com densidade média de $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$. Apenas o tratamento com quatro passadas do trator de 11 Mg apresentou densidade do solo acima da densidade crítica determinada no IHO, que foi de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$, no qual a produtividade de milho foi significativamente menor.

UNITERMOS: *Zea mays*, resistência do solo à penetração, densidade do solo

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, R. G; BEUTLER, A. N. SOIL COMPACTION AND LEAST LIMITING WATER RANGE ON CORN SHOOT GROWTH AND SEED PRODUCTIVITY

2 ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the effect of soil compaction caused by tractor wheel traffic on the limiting water range (LLWR), shoot growth and levels of compaction and four replications in a completely randomized experimental design. Soil samples with preserved structure were collected in the layers: 0.02-0.05; 0.08-0.11; 0.15-0.18 and 0.22-0.25m to determine macroporosity, microporosity, total porosity, bulk density, resistance to penetration and LLWR. The evaluated corn parameters were: plant and first spike height, stem diameter, number of spikes per plant, plant dry matter, dry matter of 1000 seeds and seed productivity. The soil compaction restricted all corn parameters except the number of spikes per plant and dry matter of 1000 seeds. The LLWR was reduced by the soil resistance to penetration, even in the tilled soil with bulk density of 1.12 Mg m^{-3} . Only the treatment

with 11 Mg tractor, repeated four times on the area, demonstrated bulk density above critical bulk density in the LLWR that was 1.37 Mg m^{-3} , where the seed productivity was significantly smaller.

KEY WORDS: Zea mays, soil resistance to penetration, bulk density

3 INTRODUÇÃO

O crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas é influenciado por várias propriedades físicas do solo, com complexas interações que envolvem o potencial da água no solo, o teor de oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes (Tormena et al., 1998), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento e produtividade das culturas (Beutler et al., 2004a). Segundo Silva et al. (2006), a densidade da camada compactada capaz de limitar o crescimento das plantas varia conforme a classe de solo, condições de umidade, espécie e ou mesmo do cultivar plantado.

Segundo Coelho et al. (2000), a relação entre a resistência, densidade e o conteúdo de água variam entre os solos; e, embora, a relação entre a densidade do solo e a resistência do solo à penetração com o crescimento radicular já tenham sido extensivamente estudadas, valores de resistência relacionados diretamente com restrições impostas ao crescimento radicular e produtividade das culturas não têm sido conclusivas para uma série extensiva de solos. Tal estudo pode ser verificado na literatura na qual valores de resistência do solo à penetração variando entre 1,10 a 4,7 MPa são determinados como restritivo ao crescimento radicular da cultura do milho (Cintra & Mielniczuk, 1983; Veen & Boone 1990; Rosolem et al., 1994; Rosolem et al., 1999; Tavares Filho et al., 2001; Foloni et al., 2003).

O intervalo hídrico ótimo é um indicador físico do solo que incorpora os efeitos do conteúdo de água no solo sobre as variações do potencial mátrico, aeração e resistência do solo à penetração. Tais particularidades tornam o intervalo hídrico ótimo uma variável útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável do solo, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (Tormena et al., 1998).

Segundo Pereira Filho & Cruz (2003), o nível médio nacional de produtividade do milho é muito baixo, cerca de $3,390 \text{ Mg ha}^{-1}$, já que a cultura tem alto potencial produtivo, tal como a média nacional de $8,500 \text{ Mg ha}^{-1}$ atingida pelos Estados Unidos (Coelho et al., 2004). Pereira Filho & Cruz (2003) ainda afirmaram que o potencial produtivo do milho é o somatório da melhoria genética (48%) e da melhoria ambiental (52%), que é a utilização de técnicas de manejo cultural mais adequadas a cada ambiente e às plantas. Portanto, a compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais ao desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter & Youngs, 1992). Neste contexto, o objetivo deste estudo foi determinar o efeito da compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa, proporcionada pelo tráfego de tratores, em algumas propriedades físicas do solo, intervalo hídrico ótimo (IHO), assim como estabelecer as relações destes com o desenvolvimento aéreo e a produtividade de milho.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino e Pesquisa da UNESP - Universidade Estadual Paulista (FCAV), Jaboticabal (SP), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29'' de latitude Sul e 48° 16' 47'' de longitude Oeste de Greenwich, e altitude média de 614 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen, com verão quente e inverno seco, precipitação média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C. As precipitações diárias, durante o ciclo da cultura (novembro de 2005 a abril de 2006), obtidas na Estação Meteorológica Automatizada do Departamento de Engenharia Rural da UNESP/FCAV, e a variação do conteúdo de água, determinado por meio de uma sonda Profile Probe type PR2 acoplada a um Moisture Meter HH2, são apresentadas respectivamente nas Figuras 1 e 2.

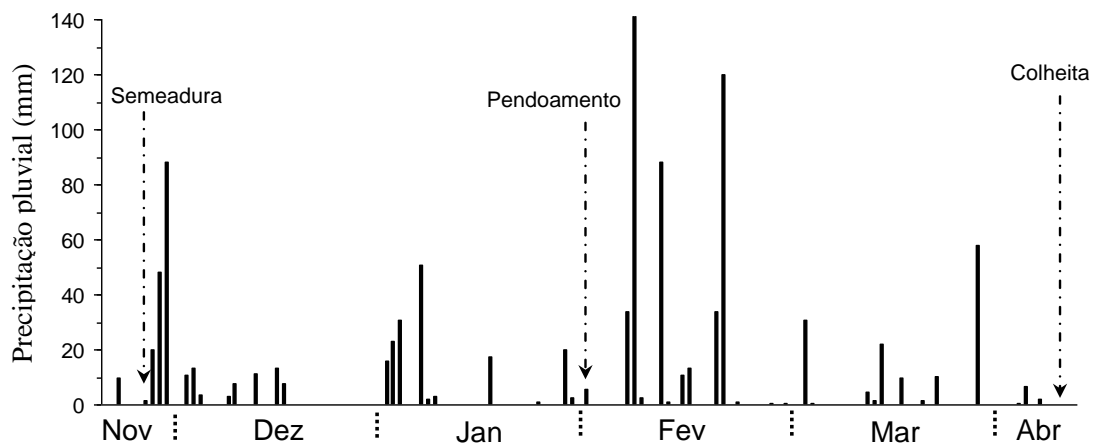


Figura 1. Precipitação pluviométrica diária no período de 23 de novembro de 2005 a 17 de abril de 2006.

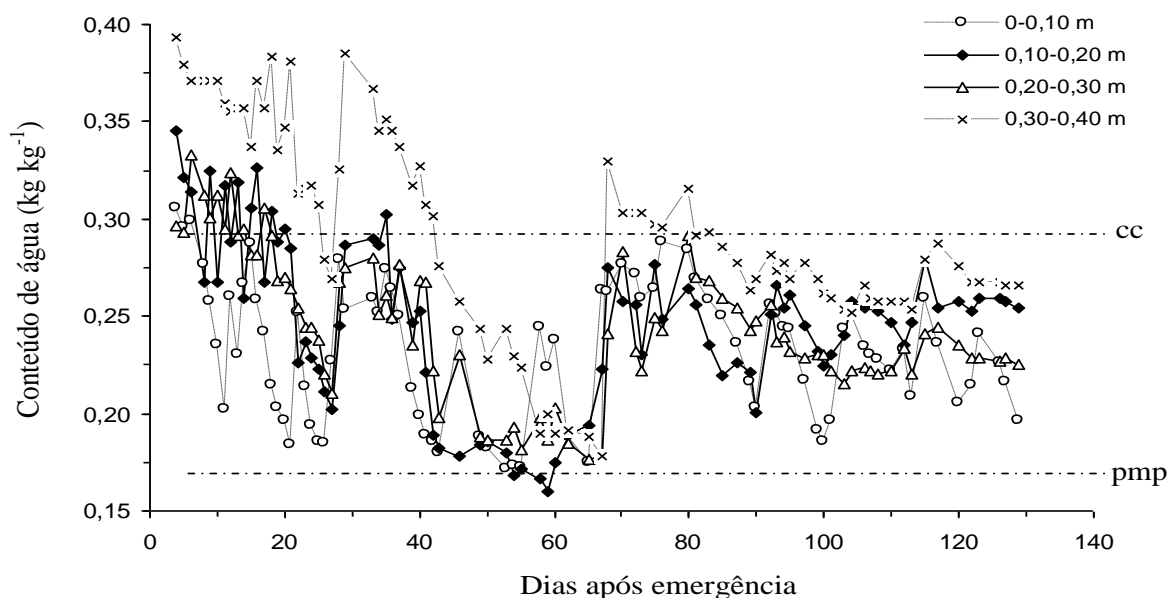


Figura 2. Variação do conteúdo de água em diferentes camadas do Latossolo Vermelho eutroférrico (LVef). O pmp representou o conteúdo de água no ponto de murcha permanente e cc na capacidade de campo.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Eutroférrico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef). Sua composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas, nas camadas de 0-0,20 m, por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). O LVef apresentou 572 g kg⁻¹ de argila, 253 g kg⁻¹ de silte e 116 g kg⁻¹ de areia fina e 59 g kg⁻¹ de areia grossa.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, constituído por cinco intensidades de compactação e quatro repetições. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com seis metros de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais, desprezando-se um metro e meio de cada extremidade.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu metodologia proposta por Raij et al. (1987). No mês de setembro de 2005, aplicou-se calcário para elevação da saturação por bases a 70%, incorporando-o com uma gradagem pesada. Antes da instalação do experimento, realizou-se escarificação do solo até 0,30 m de profundidade. Os tratamentos foram: T0= solo não trafegado; T1*= 1 passada de um trator de 4 Mg; T1= 1 passada de um trator de 11 Mg; T2= 2 passadas de um trator de 11 Mg e T4= 4 passadas de um trator de 11 Mg. Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O conteúdo de água no solo durante a compactação do tratamento T1* foi de 0,17 Kg Kg⁻¹ e dos demais tratamentos foi de 0,22 kg kg⁻¹.

No dia 29 de novembro de 2005, foi semeado o milho, cultivar Master, um híbrido triplo de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 12 sementes por metro, utilizando-se para isso uma semeadora-adubadora de plantio direto, e adubado com 0,300 Mg ha⁻¹ da fórmula 8-20-20 para obtenção da produtividade esperada de milho de 6 a 8 Mg ha⁻¹, segundo Raij et al. (1997). Após 15 dias, foi feito o desbaste para 5 plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada quando as plantas estavam com 6 folhas, utilizando-se 0,450 Mg ha⁻¹ da fórmula 20-00-15, aplicado em superfície ao lado da linha de plantio.

A caracterização química do solo, na camada de 0-0,20 m, após adubação foi obtida com a amostragem de 5 pontos por parcela, retiradas na entrelinha da cultura, para formar uma única amostra composta (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química do Latossolo Vermelho cultivado com milho pertencente à fazenda experimental da FCAV, realizada após adubação na entrelinha da cultura.

Tratamento	pH	MO	P	Complexo sortivo				V%
				K	Ca	Mg	H+Al	
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³mmol _c dm ⁻³				
T0	5,3±0,1	20,8±0,5	33,3±0,9	2,6±0,3	19,9±6,6	12,0±1,6	28,8±1,9	57,8±4,4
T1*	5,4±0,1	20,5±0,5	38,8±3,3	2,7±0,2	21,4±7,1	12,5±1,7	28,0±1,7	59,5±4,4
T1	5,45±0,1	21,0±0,7	35,0±2,4	2,95±0,3	31,5±1,3	14,5±0,7	25,8±0,8	65,5±1,4
T2	5,5±0,0	21,0±0,6	33,3±4,7	2,9±0,5	27,8±3,0	12,8±1,6	26,5±0,9	61,5±3,5
T4	5,4±0,1	21,8±0,5	33,3±2,4	3,67±0,3	27,0±4,2	11,5±1,5	28,0±1,7	60,0±4,7

Após a semeadura, foram coletados dois conjuntos de 6 amostras indeformadas de solo, por tratamento, com cilindros de $54,29 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11; 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m totalizando 48 amostras por tratamento, e 240 cilindros para determinações das propriedades físicas e do Intervalo hídrico ótimo.

Para determinar a curva de retenção, foi adotado o procedimento descrito em Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em seis grupos de 40 cilindros, sendo 2 amostras por tratamento e camada de amostragem em cada tensão. Após devidamente preparadas, as amostras com estrutura não deformada foram saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água em uma bandeja e então submetidas às tensões de 60; 100; 330; 600; 1000 e 3000 hPa, em câmaras de Richards (Klute, 1986). Ao atingir o equilíbrio, foram pesadas, determinando-se a resistência à penetração (RP) por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$, cone com ângulo de 30° e com área da base de $2,96 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a obtenção dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998), realizando-se duas repetições por amostra perfazendo 180 leituras por repetição. A RP média foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade da amostra. Na seqüência, as amostras foram secadas em estufa a $\pm 105^\circ \text{C}$ durante 24 horas para determinação do conteúdo de água em cada tensão (Gardner, 1986) e da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986). A microporosidade foi determinada por secagem, na tensão de 100 hPa, em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (Klute, 1986), a porosidade total segundo Danielson & Sutherland (1986), e a macroporosidade obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. Como foram determinadas apenas duas amostras na tensão 100 hPa por tratamento e camada na construção do IHO, coletaram-se mais duas amostras indeformadas por tratamento e camada para determinação da macro, micro, porosidade total e densidade do solo, formando assim quatro repetições.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo, na camada de 0-0,25 m, a curva de retenção de água no solo foi ajustada utilizando o modelo não linear empregado por Silva et al. (1994), na forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\text{Ln}\theta = \text{ln}a + b \text{ln}D_s + c \text{ln}\psi \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}), ψ é a tensão de água no solo (hPa) e a, b, c são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

A partir dos coeficientes estimados pela equação 1, aplicou-se o antilogaritmo e foram obtidos os valores estimados das propriedades físicas. Assim, assumindo-se o conteúdo de água na capacidade de campo (cc) equivalente à tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente (pmp) de 15000 hPa, o θ_{CC} e θ_{PMP} foram estimadas pelas equações (2) e (3), respectivamente, obtidas da equação (1) a seguir:

$$\theta_{\text{CC}} = \exp^a D_s^b 100^c \quad (2)$$

$$\theta_{\text{PMP}} = \exp^a D_s^b 15000^c \quad (3)$$

A curva de resistência do solo à penetração foi ajustada utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990), na forma log-transformada, a seguir:

$$\text{lnRP} = \text{ln}d + e \text{ln}\theta + f \text{ln}D_s \quad (4)$$

em que d , e , f são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi obtido pela equação (5), obtida da equação (4):

$$\theta_{RP} = (RP_{(crit.)}/(\exp^d * (Ds^e)))^{1/f} \quad (5)$$

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é igual a 10% (θ_{PA}) foi calculado pela equação (6) descrita a seguir:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad (6)$$

em que PT representou a porosidade total determinadas nas amostras indeformadas do solo, em $m^3 m^{-3}$.

Os modelos do IHO ajustados para cada camada convergiram para o mesmo resultado. Assim, foi ajustado um modelo com todos os dados das quatro camadas. Desta forma, os dados de produção de milho foram discutidos com valores das propriedades físicas obtidas na média das quatro camadas.

No estágio de pendramento do milho, foi determinada a altura das plantas, a altura de inserção da primeira espiga e o diâmetro do segundo internódio do colmo, em 10 plantas por parcela. A altura das plantas foi determinada entre solo e a inserção da base do pendão, e o diâmetro do colmo determinado utilizando a média de duas leituras do segundo internódio do colmo por meio de paquímetro digital. Também, determinou-se a massa seca mediante a coleta de 20 plantas por parcela cortadas junto ao solo. Foram separados caules, folhas, pendões e espigas e levados à estufa ventilada, a 65°C até massa constante. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para um hectare, considerando-se a teor de água padrão de 13%.

Os componentes avaliados da produtividade da cultura foram: número de espigas por planta e massa de 1000 grãos. Obteve-se o número de espigas por planta pela razão entre o número de espigas colhidas e o número de plantas existentes na área útil da parcela. A massa de 1000 grãos foi avaliada pela contagem manual de 4 amostras de 100 grãos, pesagem e correção da teor de água para 13%, e por regra de três simples, extrapolado para 1000 grãos.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade a 5%, respectivamente, por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999). Todos os dados apresentaram homocedasticidade e distribuição normal, não sendo necessária aplicação de transformação. Para produtividade do milho, a análise de variância seguiu delineamento inteiramente casualizado, e para as propriedades físicas do solo, o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo o fator secundário constituído pelas camadas do solo. Em função da resistência à penetração do solo, foram realizadas análises de regressão polinomial por meio da rotina PROC REG (SAS, 1999), adotando-se, como critérios de seleção dos modelos, o maior R^2 e a significância de 5% dos parâmetros das equações. E em função das camadas do solo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se a rotina PROC GLM (SAS, 1999).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância demonstrou que apenas a porosidade total apresentou interação entre a compactação e as camadas do solo. As demais propriedades físicas do solo avaliadas não apresentaram diferença entre as camadas do solo, sendo observada diferença apenas entre as intensidades de compactação. Logo, o L_{Vef}, na camada de 0-0,25 m, apresentou condições homogêneas de macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração e densidade do solo, tanto para o solo preparado como para o trafegado por tratores.

Observa-se que a passagem do trator de 4 Mg (T1*) proporcionou maior porosidade total na camada de 0,08-0,11 m em relação as camadas de 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m, não diferindo estatisticamente da camada 0,02-0,05 m (Tabela 2). Contudo, nos demais tratamentos, não se observou diferença na porosidade total entre as camadas. Possivelmente, este comportamento seja devido à menor força de compressão do solo promovida pelo trator de 4 Mg e ao menor teor de água do solo quando trafegado neste tratamento, não conseguindo compactar as camadas mais profundas do solo. A compactação adquire intensidade máxima somente quando o solo está na capacidade de campo podendo ser moldado ou deformado permanentemente pela aplicação de pressão (Camargo & Alleoni, 1997).

Tabela 2. Valores médios e erros padrões da porosidade total nas diferentes intensidades de compactação e camadas do L_{Vef}.

Camada (m)	Intensidade de compactação ¹				
	T0	T1*	T1	T2	T4
	Porosidade total (m ³ m ⁻³)				
0,02-0,05	0,58±0,01 aA	0,57±0,01abA	0,50±0,00 aB	0,51±0,01 aB	0,48±0,00 aB
0,08-0,11	0,57±0,00 aA	0,58±0,00 aA	0,51±0,01 aB	0,50±0,01 aB	0,48±0,00 aB
0,15-0,18	0,57±0,01 aA	0,54±0,02bAB	0,51±0,02aBC	0,50±0,00aBC	0,49±0,01 aC
0,22-0,25	0,57±0,01 aA	0,54±0,01bAB	0,51±0,01 aB	0,53±0,01aAB	0,50±0,00 aB

¹Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas, na linha, referem-se à comparação das médias na mesma camada entre os diferentes tratamentos; e letras minúsculas, na coluna, comparam as médias de um tratamento dentro das diferentes camadas.

Quando o solo foi trafegado com o trator de 11 Mg, houve diminuição da porosidade total nas duas primeiras camadas do solo quando comparado aos tratamentos T0 e T1* (Tabela 2). Para a camada de 0,15-0,18 m também não se verificou diferença na porosidade total quando o solo foi trafegado com o trator de 4 Mg para o solo preparado; entretanto, a utilização do trator de 11 Mg alterou a porosidade total somente no tratamento T4 em relação aos tratamentos T0 e T1*. Na camada de 0,22-0,25 m, observou-se o menor efeito do tráfego de máquinas sobre o solo na porosidade total, notou-se menor porosidade nos tratamentos T1 e T4 em relação ao T0, que não apresentou diferença para os tratamentos T1* e T2.

O tratamento com solo preparado e não trafegado apresentou a maior macroporosidade seguida do tratamento com uma passada do trator de 4 Mg (T1*) que diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, que não apresentaram diferença entre si (Tabela 3). A macroporosidade ficou abaixo de 10% quanto se trafegou uma vez o solo com o trator de 11 Mg, representando uma redução de 57% dos macroporos em relação ao T0; e, a partir

deste tratamento, o aumento de passadas não conseguiu diminuir significativamente a macroporosidade.

Tabela 3. Propriedades físicas do Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), na camada de 0-0,25 m, submetido a diferentes manejos.

Compactação	Propriedades físicas do solo ¹			
	Macro	Micro	RP	Ds
	m ³ m ⁻³		MPa	Mg m ⁻³
T0	0,21±0,02 a	0,36± 0,02 b	0,34±0,11 c	1,12±0,06 d
T1*	0,17±0,04 b	0,38±0,02 b	0,49±0,22 c	1,21±0,06 c
T1	0,09±0,02 c	0,42±0,02 a	1,12±0,23 b	1,34±0,05 b
T2	0,09±0,03 c	0,42±0,01 a	1,10±0,36 b	1,34±0,06 b
T4	0,07±0,01 c	0,43±0,01 a	1,76±0,50 a	1,40±0,05 a

Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; PT = Porosidade total; Ds = Densidade do solo.

¹Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5%.

A microporosidade não apresentou diferença entre os tratamentos com o solo preparado (T0) e com uma passada do trator de 4 Mg (T1*), que foram maiores do que a microporosidade encontrada nos demais tratamentos (Tabela 3). A microporosidade apresentou o mesmo efeito da compactação observada para macroporosidade quando se utilizou o trator de 11 Mg. A RP, como a microporosidade, não apresentou diferenças nos dois primeiros tratamentos; entretanto, foi sensível ao número de passadas do trator de 11 Mg; observa-se na Tabela 2 que os tratamentos T1 e T2 não apresentaram diferenças na RP, mas foram inferiores ao tratamento T4 o qual apresentou a maior RP. Assumindo-se a RP do tratamento T6 como 100%, observamos a redução de 37,5; 36,4; 72,2; 80,7%, respectivamente para os tratamentos T2, T1, T1*, T0.

A densidade do solo do tratamento T0 foi inferior à do T1*, sendo que este último tratamento apresentou menor densidade do solo em relação aos tratamentos T1 e T2 (Tabela 3). Os tratamentos com uma e duas passadas do trator de 11 Mg não apresentaram diferença em suas densidades; entretanto foram superiores à densidade obtida no tratamento com 4 passadas do trator de 11 Mg (T4). Houve uma redução de 20% na densidade do solo do tratamento T4 para o T0.

Os resultados ficaram de acordo com os obtidos por Klein & Libardi (2002) que, estudando a densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob os diferentes sistemas de uso e manejo, verificaram que o sistema de plantio direto sem irrigação em relação à mata, apresentou uma redução na porosidade total até 0,5 m de profundidade e, na macroporosidade, até 0,4 m com conseqüente aumento da microporosidade. Na profundidade de 0,10 m, ocorreu a redução da porosidade total em torno de 12%, enquanto os macroporos reduziram em 24%, comprovando que, no processo de compactação, ocorre a transformação de macro em microporos. Observaram, ainda, que para o Latossolo Vermelho Ácrico, de textura argilosa, a densidade do solo de 1,256 Mg m⁻³, atingida na com sistema plantio direto com irrigação, reduziu a macroporosidade a valores restritivos à aeração das raízes para a maioria das culturas de 0,045 m³ m⁻³.

O aumento da RP, causada pelo rodado do trator, restringiu todos os parâmetros da cultura avaliados que se ajustaram a regressões lineares decrescentes com o aumento da RP (Figura 3 e 4), com exceção apenas para o número de espigas por planta e a massa de 1000 grãos que não sofreram efeitos da compactação do solo.

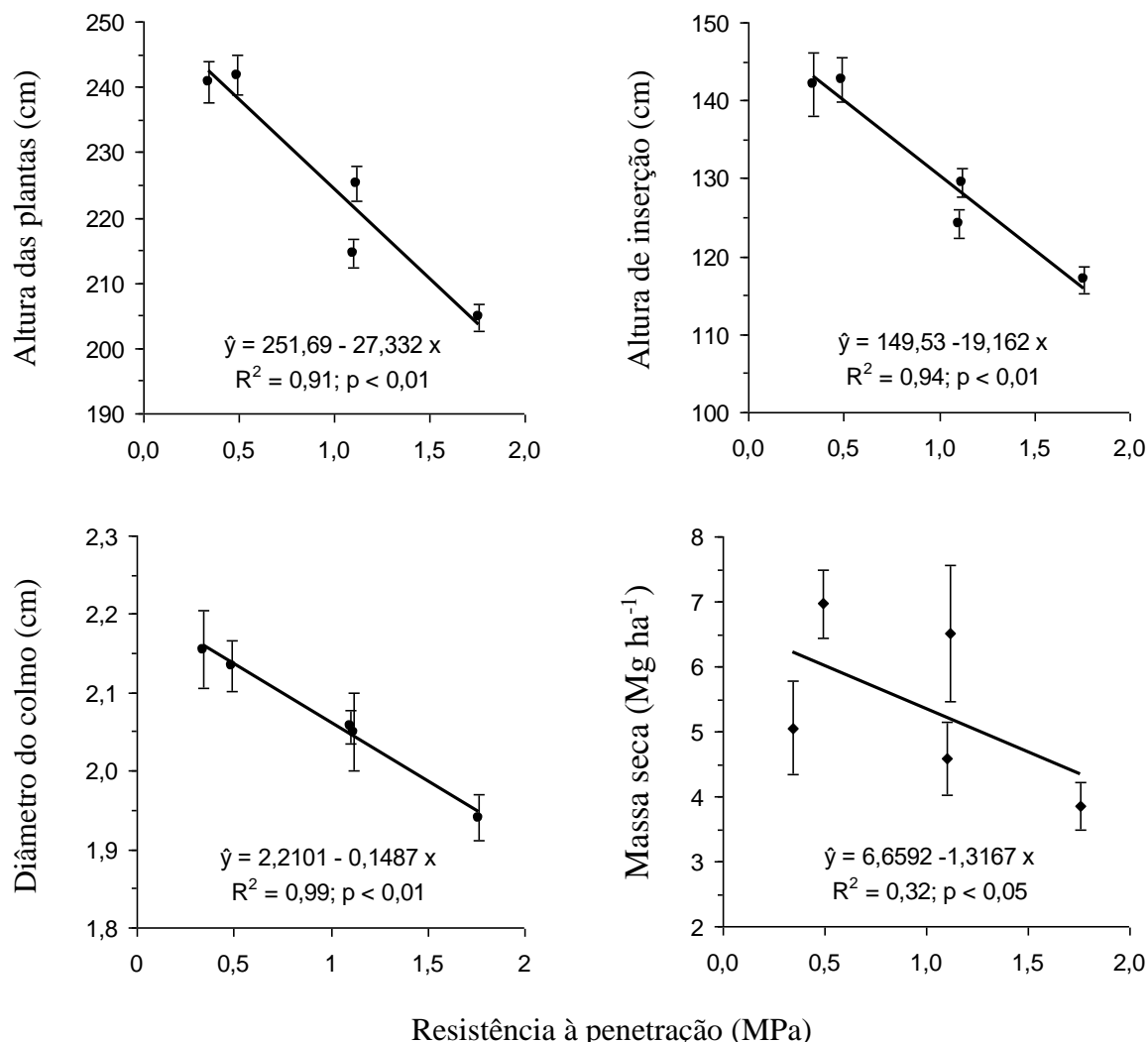


Figura 3. Regressão entre a resistência do Latossolo Vermelho à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e massa seca das plantas. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

O aumento da RP resultou em diminuições de 15,0; 17,6; 10,0 e 23,9%; respectivamente, para a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e massa seca das plantas, comparando-se o tratamento T0 ao T4. Segundo Letey (1985), o aumento da resistência à penetração do solo causa o desenvolvimento reduzido do sistema radicular que, através de sinais hormonais enviados pelas raízes à parte aérea da planta, reduz seu desenvolvimento, podendo assim comprometer a produtividade aérea. Concordando com Foloni et al. (2003), que também observaram redução de 20% no crescimento aéreo das plantas de milho após 40 dias de cultivo sob 1,4 MPa de impedância mecânica de um Latossolo Vermelho distroférico em subsuperfície, assim como Silva & Rosolem (2001) também verificaram que o crescimento aéreo do sorgo granífero foi reduzido

em mais de 40% ao final de 38 dias de cultivo, com uma resistência do solo à penetração de 1,22 MPa; e Coelho et al. (2000) que em condições de campo verificou que as plantas de algodão apresentaram menor altura, biomassa aérea e área foliar com o aumento da compactação do solo.

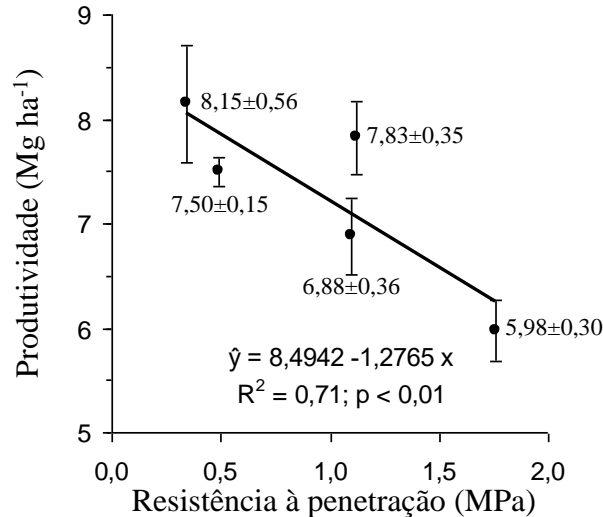


Figura 4. Regressão entre a resistência do Latossolo Vermelho à penetração e a produtividade de grãos da cultura do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Nos tratamentos T0, T1*, T1 e T2, a produtividade de milho foi superior a 6,000 Mg ha⁻¹, condizente com a adubação utilizada, sendo a máxima produtividade alcançada de 8,147 Mg ha⁻¹ no tratamento T0 (Figura 4). Com o aumento da RP, houve reduções na produtividade de 8, 4, 16, 27%, respectivamente, para os tratamentos T1*, T1, T2, e T4, em relação ao T0, representando uma perda de grãos de 2,166 Mg ha⁻¹. Al-Adawi & Reeder (1996) estudando os efeitos da compactação proporcionada por uma carreta de transporte de grãos com 9 e 11 Mg por eixo verificaram reduções de 24% e 43% na produtividade de grãos de milho, respectivamente. Para Albuquerque & Reinnert (2001), uma das principais propriedades físicas que reduz a produtividade das culturas é a densidade do solo e sua relação com a resistência à penetração. Estes autores observaram que a restrição ao crescimento radicular reduziu a produtividade de grãos de milho em 1,169 Mg ha⁻¹.

A resistência do solo à penetração crítica (RP_(crít.)), utilizada para definição da curva de resistência do solo no IHO pela equação (5), foi obtida por meio da regressão entre a produtividade de grãos do milho e as diferentes intensidades de compactação do solo (Figura 4), contudo, na tentativa de determinar um valor crítico de RP para a produtividade de milho, devido ao comportamento linear, adotou-se o critério de Gravetter & Wallnau (1995) para diferenciar estatisticamente os tratamentos, o que ocorre quando não há sobreposição dos limites superior e inferior dos erros padrões na comparação das médias dos tratamentos. Logo, constatou-se por meio dos erros padrões, que não houve diferença significativa entre a produtividade dos tratamentos T0, T1* e T1. Entretanto, quando a RP atingiu o valor de 1,10 MPa no tratamento T2, houve perda significativa da produtividade de milho, adotando-se este valor de RP como crítico no IHO.

Pelos coeficientes de correlação obtidos na Tabela 4, verifica-se que a altura das plantas correlacionou-se positivamente com a altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, massa seca das plantas, produtividade de grãos, contudo, não se observou

correlação entre o diâmetro do colmo e da massa seca das plantas com a produtividade de milho. Logo, plantas mais alta e com maior altura de inserção da primeira espiga, provavelmente, atingirão maiores produtividades, comparando-se o mesmo material, concordando com Magalhães (2003), que a redução da massa vegetativa ocasiona uma diminuição na capacidade fotossintética, afetando diretamente a produção de grãos. O diâmetro do colmo também não apresentou correlação com a massa seca das plantas. A massa seca das plantas foi o parâmetro que apresentou menor influência das modificações impostas pela compactação do solo, correlacionando-se positivamente apenas com a porosidade total e negativamente com a resistência do solo à penetração. A densidade do solo, a microporosidade e a resistência à penetração correlacionaram-se negativamente, com a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e produtividade; e positivamente, com a porosidade total e macroporosidade do solo. Verificou-se, então, que as modificações nas propriedades físicas do solo, proporcionadas pelo tráfego de tratores, modificou o crescimento aéreo das plantas de milho, resultando em menores produtividades. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos entre as propriedades físicas do solo, sendo o menor coeficiente de 0,80 entre a porosidade total e a microporosidade.

Tabela 4. Coeficientes de correlação entre os atributos do solo e da cultura do milho cultivado em Latossolo Vermelho eutroférrico (LVef).

Atributos ⁽¹⁾	Matriz de correlação								
	AP	IP	DI	MS	PD	DS	PT	MA	MI
IP	0,98**								
DI	0,66**	0,66**							
MS	0,54*	0,53*	0,32 ^{ns}						
PD	0,56*	0,47*	0,44 ^{ns}	0,32 ^{ns}					
DS	-0,89**	-0,86**	-0,70**	-0,43 ^{ns}	-0,59**				
PT	0,86**	0,83**	0,70**	0,48*	0,58**	-0,96**			
MA	0,86**	0,82**	0,68**	0,38 ^{ns}	0,60**	-0,96**	0,97**		
MI	-0,75**	-0,71**	-0,57**	-0,19 ^{ns}	-0,57**	0,84**	-0,80**	-0,93**	
RP	-0,91**	-0,87**	-0,75**	-0,51*	-0,70**	0,94**	-0,93**	-0,93**	0,81**

⁽¹⁾ AP = altura das plantas, IP = inserção da primeira espiga, DI = diâmetro do colmo, MS = massa da matéria seca, PD = produtividade, DS = densidade do solo, PT = porosidade total, MA = macroporosidade, MI = microporosidade e RP = resistência do solo à penetração.

Pelo IHO, pôde-se verificar que o aumento da Ds influenciou positivamente a variação do conteúdo de água disponível do solo ($\theta_{cc} - \theta_{pmp}$), concordando com Tormena et al. (1998) que o aumento da retenção de água ao longo dos valores de Ds é justificado pela redução da macroporosidade e a redistribuição dos tamanhos dos poros (Figura 5).

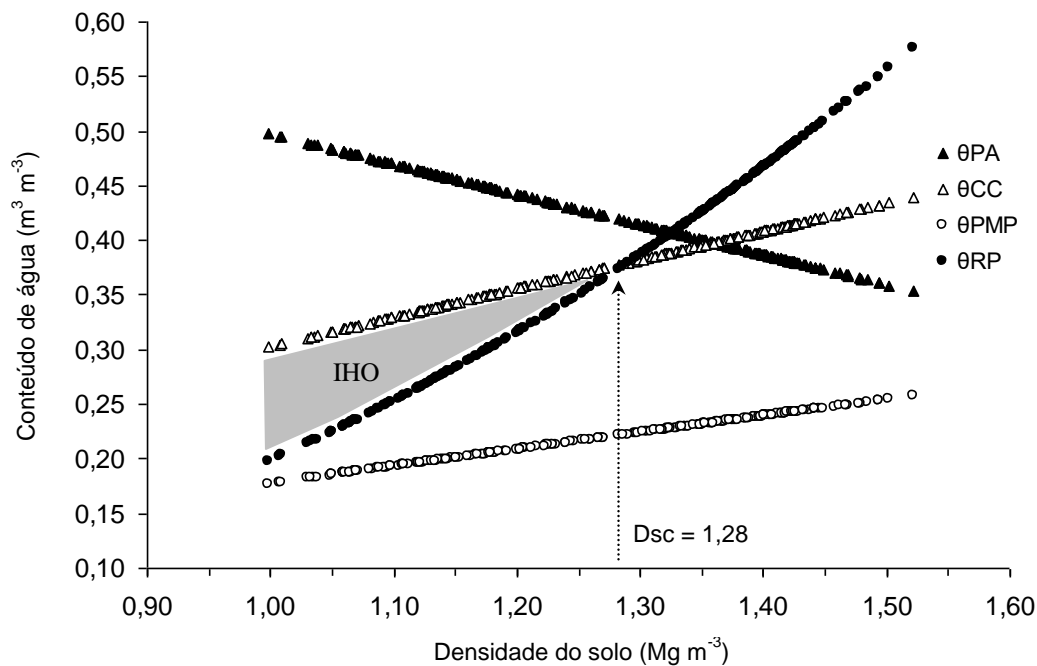


Figura 5. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 1,10 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no Latossolo Vermelho eutroférico. IHO = intervalo hídrico ótimo. Dsc = densidade crítica do solo, na camada de 0-0,25 m.

A variação da D_s teve grande impacto sobre a θ_{RP} (Figura 4). O θ_{RP} substituiu o θ_{PMP} no valor de $D_s \geq 1,03 \text{ Mg m}^{-3}$. Já na parte superior do IHO com a diminuição do θ_{PA} pelo aumento da D_s , este alcançou valores restritivos ao IHO apenas na $D_s \geq 1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, próximo ao valor da densidade do solo crítica (D_{sc}) de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$, que segundo Silva et al. (1997) é definida como a D_s onde o IHO é igual a zero, ou seja, a D_s na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas, associadas à qualidade física do solo, e que o valor de D_s em que IHO é menor do que a água disponível pode ser identificado como a densidade máxima aceitável para que as plantas se desenvolvam sem problemas de restrição física do solo, podendo o conteúdo de água variar entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Tormena et al. (1998), Tormena et al. (1999), Beutler (2003) e Beutler et al. (2004b), que em solos tropicais o IHO é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela resistência do solo à penetração. Logo, para a cultura do milho cultivado em um Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa a D_{sc} foi de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ e a partir da D_s de $1,03 \text{ Mg m}^{-3}$ a RP já seria fator restritivo para o crescimento de plantas se o conteúdo de água do solo permanecesse abaixo do θ_{RP} .

Segundo Silva et al. (1994), o crescimento das plantas é menos restrito dentro dos limites do IHO, enquanto as limitações aumentam fora desses. Silva (1998) observou que o crescimento da parte aérea das plantas de milho foi negativamente correlacionado com a frequência que o conteúdo de água do solo ocorreu fora do IHO. Assim, a magnitude do IHO pode ser utilizada como um diagnóstico da frequência com que a estrutura do solo determina

as condições de umidade que impõem limites ao crescimento das plantas. Dentro deste contexto, apenas o tratamento T4 apresentou Ds acima da Dsc proposta pelo IHO, ou seja, mesmo que o conteúdo de água ficasse sempre na capacidade de campo durante o ciclo da cultura, o que não ocorreu (Figura 2), haveria severas restrições ao crescimento radicular pela elevada RP (Figura 5). Contudo, os demais tratamentos apresentaram uma faixa de variação no conteúdo de água onde não existiria impedimento ao crescimento radicular pela RP, mas em nenhum dos tratamentos o conteúdo de água poderia atingir o ponto de murcha permanente, já que a Ds observada para o tratamento T0 foi de $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ sendo o limite inferior do IHO nesta Ds limitado pela RP (Figura 5). Pelo IHO, pôde-se estabelecer que o menor conteúdo de água onde não ocorreriam restrições pela RP foi de 0,21; 0,24; 0,24 e 0,28 kg kg^{-1} para os tratamentos T0, T1*, T1, T2, respectivamente, e quanto menor a faixa do IHO, maiores foram as restrições impostas pela RP ao crescimento da parte aérea das plantas e produtividade.

6 CONCLUSÃO

A compactação do solo proporcionada pelo tráfego de tratores modificou suas propriedades físicas, ocorrendo aumento da microporosidade, da resistência do solo à penetração e da densidade do solo assim como diminuição da macroporosidade e porosidade total.

O aumento da resistência do solo à penetração acima de 0,34 MPa, determinada na tensão de 100 hPa, restringiu o crescimento aéreo das plantas de milho assim como sua produtividade.

O Intervalo hídrico ótimo foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (100 hPa) e na parte inferior, pela resistência do solo à penetração em todas as intensidades de compactação, com densidade do solo crítica ao crescimento radicular de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$.

A produtividade do milho foi significativamente menor quando a resistência do solo à penetração atingiu o valor de 1,10 MPa.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelas bolsas de estudos e concessão de auxílio pesquisa para o desenvolvimento do projeto. Os agradecimentos são extensivos ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo auxílio financeiro concedido e bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo autor.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.539-549, 2001.

AL-ADAWI, S. S.; REEDER, R. C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 39, n.5, p.1641-1649, 1996.

BEUTLER, A. N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro**. 2003. 126 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

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, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade do arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Campinas, v.39, n.6, p.575-580, 2004b.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph , v. 33, n.3, p. 519-524, 1990.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: USP, 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**, Viçosa, v.7, n.3, p.323-327, 1983.

COELHO, M. B.; MATEOS, L.; VILLALOBOS, F. J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.57, n.3, p.129-142, 2000.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Desafios para obtenção de altas produtividades**. Sete Lagoas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2004. 20p.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 443-460.

DEXTER, A. R.; YOUNGS, I. M. Soil physics toward 2000. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.2, p.101-106, 1992.

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.

- GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.493-541.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-409.
- GRAVETTER, F. J.; WALLNAU, L. B. **Statistics for the behavioral sciences**. St. Paul: West Publishing, 1995. 429p.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances In Soil Sciences**, New York, v.1, n.1, p.277-293, 1985.
- MAGALHÃES, P. C. Aspectos fisiológicos da cultura do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003, p.43-67.
- PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Produção de milho em sistema irrigado. In:RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003, p.206-244.
- RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Boletim Técnico Instituto Agrônomo de Campinas**, n.100, 1997. 285p. 2ed. rev. atual.
- ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.53, n.2, p.259-266, 1994.
- ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Campinas, v.34, n.5, p.821-828, 1999.
- SAS INSTITUTE. **SAS user's guide**. Cary, 1999. 595p.

SILVA, A. P. **Qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas de milho.** 1998. 80f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1998.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n.6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1/2, p.81-93, 1997.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.31-40, 2006.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.253-260, 2001.

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.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.52, n.3/4, p.223-232, 1999.

VEEN, B. W.; BOONE, F. R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1/2, p.219-226, 1990.