

SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

COMPACTAÇÃO DO SOLO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NO CRESCIMENTO E NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO ⁽¹⁾

ONÃ DA SILVA FREDDI ⁽²⁾; JOSÉ FREDERICO CENTURION ^(3*); AMAURI NELSON BEUTLER ⁽⁴⁾; RICARDO GARCIA ARATANI ⁽⁵⁾; CRISTIAN LUARTE LEONEL ⁽⁶⁾; ÁLVARO PIRES DA SILVA ⁽⁷⁾

RESUMO

As modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor compactação, que poderá interferir na resistência mecânica à penetração, densidade e porosidade do solo influenciando o crescimento radicular e por fim a produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da compactação em um Latossolo Vermelho de textura média, localizado em Jaboticabal (SP), proporcionada pelo tráfego de tratores, sobre algumas propriedades físicas do solo, intervalo hídrico ótimo (IHO), crescimento aéreo e produtividade de milho. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com seis níveis de compactação e quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11 e 0,15-0,18 m para determinação da resistência mecânica do solo à penetração, da porosidade, da densidade do solo e do IHO. Os parâmetros da cultura avaliados foram: a altura das plantas e a inserção da primeira espiga, o diâmetro do colmo, o número de espigas por planta, a massa seca das plantas e de mil grãos e a produtividade. Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativa foram estabelecidas regressões entre a RP e Ds e os parâmetros da cultura. A faixa do conteúdo de água estabelecida pelo IHO na qual não haveria restrições para o desenvolvimento da cultura diminuiu com o aumento da compactação até o limite de Ds de 1,46 Mg m⁻³. A compactação do solo restringiu todos os parâmetros da planta avaliados, com exceção apenas para o número de espigas por planta.

Palavras-chave: *Zea mays*, qualidade física do solo, densidade do solo, resistência à penetração.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 23 de setembro de 2005 e aceito em 22 de março de 2007.

⁽²⁾ Pós-Doutorando em Produção Vegetal, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Departamento de Solos e Adubos, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/nº, 14884-900 Jaboticabal (SP), Brasil. Bolsista FAPESP. Email: onafreddi@fcav.unesp.br

⁽³⁾ Departamento de Solos e Adubos, UNESP/FCAV. Bolsista CNPq. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br (*) Autor correspondente.

⁽⁴⁾ Pós-Doutor, Departamento de Solos e Adubos, UNESP/FCAV. Email: amaurib@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Doutorando em Ciência do Solo, UNESP/FCAV. Bolsista FAPESP. Email: aratani@fcav.unesp.br

⁽⁶⁾ Mestrando em Produção Vegetal, UNESP/FCAV. Email: cristian.leonel@zipmail.com.br

⁽⁷⁾ Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, 13418-900 Piracicaba (SP). Email: apsilva@carpa.ciagri.usp.br

ABSTRACT**SOIL COMPACTION AND LEAST LIMITING WATER RANGE ON DEVELOPMENT AND PRODUCTIVITY OF MAIZE**

Soil structure modifications caused by different tillage systems can result in larger or smaller compaction, which can interfere in the mechanical resistance to penetration, bulk density and soil porosity, influencing root growth and productivity of the crops. The objective of this work was to evaluate the effect of compaction of an Oxisol, located in Jaboticabal, São Paulo State, Brasil, caused by traffic of machinery, on soil physical properties, least limiting water range (LLWR), aerial growth and corn productivity. The experimental design used was a completely randomized with six compaction levels and four repetitions. Undeformed soil samples were collected in the layers of 0.02–0.05, 0.08–0.11 and 0.15–0.18 m, to determinate soil resistance to penetration, porosity, bulk density and LLWR. Corn plant characteristics evaluated were: plant height, ear height, stem diameter, ear number per plant, plant dry mass, mass of 1,000 grains and grains yield. Data were submitted to variance analysis and when significant, regressions were adjusted between resistance to penetration and bulk density and plant characteristics. The range of water content established by LLWR where there would not be restrictions for corn development decreased with the increase of compaction until the limit of D_s of $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$. Compaction restricted all evaluated characteristics of the crop, with exception only for number ear of per plant.

Key words: *Zea mays*, soil physical quality, bulk density, resistance to penetration.

1. INTRODUÇÃO

A habilidade das plantas em absorver água e nutrientes depende da distribuição de raízes no perfil do solo, a qual é função de reduzidas limitações físicas e químicas, as quais são passíveis de alterações pelas práticas de manejo do solo (ALVARENGA e CRUZ, 2003).

A compactação do solo é uma alteração estrutural onde ocorre uma reorganização das partículas e de seus agregados, resultando no aumento da densidade do solo e redução da porosidade total e da macroporosidade do solo (STONE et al., 2002). A compactação excessiva pode limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água no solo, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea (GHOHMANN e QUEIROZ NETO, 1996), resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da energia necessária para o preparo do solo (SOANE e OUWERKERK, 1994). Segundo ROSOLEM et al. (1994), em Latossolo Vermelho-Escuro de textura média, o crescimento radicular do milho foi prejudicado em 50% quando a RP foi igual a 1,42 MPa, mas a RP de 2,00 MPa não foi suficiente para inibir completamente o crescimento radicular e o aéreo das plantas de milho. FOLONI et al. (2003), em Latossolo Vermelho de textura média, observou redução de 20% da massa seca da parte aérea do milho com RP de 1,40 MPa, mas não observou efeito da RP sobre a massa seca total da raiz. SILVA e ROSOLEM (2001) verificaram que o crescimento aéreo do sorgo granífero foi reduzido em mais de 40% no fim de 38 dias de cultivo, com um resistência mecânica do solo de 1,22 MPa. Para a cultura do arroz valores superiores a 3,00 MPa foram restritivos à altura e massa seca das plantas em Latossolo Vermelho de textura média (BEUTLER e CENTURION, 2004).

Vários atributos físicos do solo são utilizados para avaliar o estado de compactação do solo, entre eles, a densidade, a porosidade do solo e a resistência mecânica à penetração. Entretanto, na maioria dos estudos, não tem sido possível estabelecer relações funcionais desses atributos com o crescimento e a produção das culturas (BEUTLER et al., 2004a). O crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas é influenciado por vários atributos físicos 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.

Novas abordagens metodológicas têm sido propostas para avaliar a qualidade física do solo, destacando-se o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por TORMENA et al. (1998) e quantificado pela primeira vez por SILVA et al. (1994), sendo definido como um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas em função da disponibilidade de água, da aeração e da resistência mecânica do solo à penetração são mínimas. Segundo BEUTLER et al. (2004a), o valor de 2 MPa tem sido questionado como limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea para as diferentes culturas, sistemas de manejo e solos, sugerindo a necessidade de mais estudos que relacionassem o IHO com a produção das culturas em solos tropicais do Brasil.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho de textura média para o cultivo de milho, submetido a diferentes níveis de compactação, utilizando atributos do solo tradicionais como a densidade, porosidade e a resistência mecânica do solo à penetração e o IHO, assim como as relações destes com o desenvolvimento aéreo e a produtividade da cultura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na fazenda de ensino e pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 47" de longitude Oeste, e altitude média de 614 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen.

O solo da área experimental foi um Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulinitico, hipoférrico (LVd). A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, na profundidade de 0-0,20 m, através 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 e BAUDER, 1986). Observou-se na camada de 0-0,20 m valores médios de 323 g kg⁻¹ de argila, 45 g kg⁻¹ de silte e 632 g kg⁻¹ de areia. A densidade de partícula, obtido pelo método do picnômetro (BLAKE, 1965), foi de 2,86 Mg m⁻³.

O delineamento experimental utilizado para os parâmetros da planta foi o inteiramente casualizado, com seis níveis de compactação e quatro repetições. O total de parcelas foi de 24 com 3,00 de comprimento e 4,50 m de largura cada uma.

Antes da instalação do experimento, realizou-se escarificação do solo até 0,30 m de profundidade, uma gradagem aradora, aplicação de calcário para elevar a saturação por bases a 60% e uma gradagem niveladora até 0,12 m de profundidade. Os tratamentos foram: T₀= sem compactação; T_{1*}= 1 passada; T₁= 1 passada; T₂= 2 passadas, T₄= 4 passadas e T₆= 6 passadas de um trator de 11 toneladas, com os quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície. No tratamento T_{1*} a compactação foi realizada com um trator de 4 toneladas. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo à capacidade de campo (100 hPa).

O solo foi analisado quimicamente segundo método de RAIJ ET AL. (1987), e adubado com 0,3 t ha⁻¹

da fórmula 10-20-20 para obtenção da produtividade esperada de milho de 6 a 8 t ha⁻¹, segundo RAIJ ET AL. (1997). No dia 22 de novembro de 2004, foi semeado o milho, genótipo Master, um híbrido triplo de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 8 a 10 sementes por metro. Após 15 dias, foi feito o desbaste para 5 plantas por metro. A parcela experimental teve 5 linhas de 3 m de comprimento, considerando-se parcela útil as três linhas centrais descartando-se 0,5 m de cada extremidade. A adubação de cobertura foi realizada 28 dias após a emergência das plântulas utilizando-se 0,3 t ha⁻¹ de sulfato de amônio.

No estágio de pendramento do milho foi medida a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga e o diâmetro do segundo internódio do colmo acima do solo, em cinco plantas por parcela. Também, determinou-se a massa seca mediante a coleta de quatro plantas por repetição cortadas junto ao solo. Foram separados caules, folhas, pendões e espigas, e levados à estufa ventilada, a 65°C até peso 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 umidade padrão de 13%. Os componentes da produtividade avaliados foram número de espigas por planta e massa de 1.000 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 1.000 grãos foi avaliada pela contagem manual de 100 grãos, pesagem e correção da umidade para 13%, e por regra de três simples, extrapolado para 1.000 grãos.

Após a semeadura foram coletados dois conjuntos de 6 amostras indeformadas de solo, por tratamento, com cilindros de 53,16.10⁻⁶ m³ (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas profundidades de 0,02-0,05; 0,08-0,11 e 0,15-0,18m, totalizando 36 amostras por tratamento, para determinações dos atributos físicos. As amostras foram saturadas e 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) com duas repetições por amostra, na camada de 0,01 a 0,02 m, perfazendo 100 leituras por repetição que foram utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada com o penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 0,01 m min⁻¹, cone com ângulo de 30° e com área da base de 2,96 x 10⁻⁶ m², equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998).

Na seqüência, as amostras foram secas 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 e 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 e SUTHERLAND (1986), e a macroporosidade obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. As propriedades físicas de cada tratamento encontram-se na tabela 1.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), na camada de 0-0,20 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:

$$\ln\theta = \ln a + b \ln Ds + c \ln \Psi \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Ds 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 curva de resistência do solo à penetração foi ajustada utilizando o modelo não linear proposto por BUSSCHER (1990), na forma log-transformada, a seguir:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln Ds \quad (2)$$

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

A partir dos valores estimados dos parâmetros aplicou-se o antilogaritmo e foram obtidos os valores estimados dos atributos físicos. Assim, assumindo-se o conteúdo de água na capacidade de campo equivalente a tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente de 15000 hPa, o θ_{CC} e θ_{PMP} foram estimadas pelas equações (3) e (4), respectivamente, obtidas da equação (1) a seguir:

$$\theta_{CC} = \exp^a * Ds^b * 100^c \quad (3)$$

$$\theta_{PMP} = \exp^a * Ds^b * 15000^c \quad (4)$$

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi obtido pela equação (5), obtida da equação (2):

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

Tabela 1. Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nos diferentes níveis de compactação e camadas do Latossolo Vermelho

Camada m	Nível de compactação					
	T ₀	T ₁ *	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆
	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)*					
0,02-0,05	0,26±0,00	0,09±0,01	0,07±0,01	0,05±0,01	0,04±0,01	0,04±0,01
0,08-0,11	0,23±0,00	0,08±0,01	0,07±0,01	0,06±0,00	0,05±0,01	0,06±0,00
0,15-0,18	0,17±0,06	0,10±0,01	0,08±0,01	0,09±0,01	0,07±0,00	0,06±0,01
Média	0,21±0,02	0,09±0,00	0,07±0,00	0,07±0,01	0,06±0,01	0,06±0,01
	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0,02-0,05	0,26±0,00	0,30±0,00	0,30±0,01	0,29±0,01	0,28±0,01	0,29±0,00
0,08-0,11	0,27±0,00	0,30±0,01	0,30±0,01	0,29±0,01	0,30±0,01	0,30±0,01
0,15-0,18	0,28±0,02	0,29±0,01	0,30±0,01	0,29±0,01	0,29±0,00	0,29±0,00
Média	0,27±0,01	0,29±0,00	0,30±0,00	0,29±0,00	0,29±0,00	0,30±0,00
	Resistência à penetração (MPa)*					
0,02-0,05	0,83±0,13	2,07±0,02	2,71±0,09	3,57±0,32	5,03±0,01	6,75±1,52
0,08-0,11	1,23±0,44	2,38±0,03	2,15±0,04	2,75±0,23	3,99±0,28	4,62±0,10
0,15-0,18	2,90±2,00	2,17±0,14	2,23±0,02	3,79±1,10	3,02±0,49	3,06±0,49
Média	1,65±0,67	2,21±0,07	2,36±0,11	3,37±0,36	4,01±0,39	4,81±0,83
	Densidade do solo (Mg m^{-3})					
0,02-0,05	1,24±0,02	1,58±0,01	1,67±0,01	1,75±0,02	1,79±0,01	1,81±0,01
0,08-0,11	1,32±0,02	1,66±0,01	1,66±0,01	1,71±0,01	1,74±0,01	1,75±0,01
0,15-0,18	1,41±0,02	1,62±0,01	1,64±0,01	1,67±0,01	1,68±0,01	1,69±0,01
Média	1,32±0,02	1,62±0,01	1,66±0,01	1,71±0,01	1,74±0,01	1,75±0,01

* Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (100 hPa).

A $RP_{(crit.)}$ foi obtida através de regressão entre a produtividade de grãos do milho e os diferentes níveis de compactação do solo, obtendo-se o valor de 1,65 MPa no campo como o crítico. Segundo SILVA ET AL. (1994) e BEUTLER (2003) a determinação da RP limitante para cada cultura e sua inserção no IHO aumentam a sua precisão para o monitoramento da qualidade física do solo.

O conteúdo de água cuja porosidade de aeração é igual a 10% foi calculado pela equação (6) a seguir:

$$\theta_{PA} = (1 - (D_s/D_p)) - 0,1 \quad (6)$$

Utilizou-se para construção do IHO os dados dos atributos físicos determinados nas amostras indeformadas nas três camadas do solo.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade a 5%, de acordo com os procedimentos do Statistical Analysis System (SAS Institute, 1999). Após constatação da normalidade e homocedasticidade os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativas efetuou-se regressões entre a média dos atributos físicos determinados nas três camadas do solo e os parâmetros da cultura avaliados; sendo o teste F da variância da regressão significativo a 5%, selecionaram-se modelos, adotando-se, como critérios, o maior R^2 e a significância de 5% dos parâmetros da equação de acordo com os procedimentos do Statistical Analysis System (SAS Institute, 1999).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o solo solto e não trafegado a maior compactação ocorreu na camada 0,10-0,20 m devido à utilização da grade niveladora após a escarificação e aração do solo, mostrando que o sistema de preparo convencional destaca-se como um sistema que, além de pulverizar a superfície dos solos propicia a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas de solo movimentadas pelos implementos (TAVARES FILHO ET AL., 2001). Com uma passagem do trator de 4 Mg a maior compactação ocorreu na camada de 0,08-0,11 m. Entretanto, a utilização do trator de 11 Mg proporcionou maior compactação superficial do solo independente do número de passadas, decrescendo em profundidade (Tabela 1). Dessa forma, na semeadura direta, o tráfego de máquinas e implementos provoca compactação superficial do solo (BEUTLER ET AL., 2001; TAVARES FILHO ET AL., 2001). O tráfego de tratores sobre o Latossolo

Vermelho proporcionou, na média das três camadas avaliadas, redução de 71,43% na macroporosidade e aumento de 65,7; 24,6 e 10,0% na resistência mecânica à penetração, na densidade do solo e na microporosidade, respectivamente, concordando com KLEIN E LIBARDI (2002).

O aumento da resistência mecânica do solo à penetração, causada pelo rodado do trator, restringiu todos os parâmetros da cultura avaliados, com exceção apenas para o número de espigas por planta (Tabela 2). Houve efeito quadrático dos níveis de compactação sobre a massa de 1.000 grãos e a produtividade, que decresceram a partir de RPs de 1,80 e 1,65 MPa, respectivamente (Figura 1). No tratamento com solo preparado, uma passada com o trator de 4 Mg e uma passada com o trator de 11 Mg a produtividade do milho foi superior a 6,000 Mg ha⁻¹, condizente com a adubação utilizada, sendo a máxima produtividade alcançada de 6,718 Mg ha⁻¹ no tratamento com solo solto (Figura 1). Com o aumento da RP houve reduções na produtividade de 9, 5, 11, 21 e 38%, respectivamente para os tratamentos T_{1*}, T₁, T₂, T₄ e T₆, em relação ao T₀. AL-ADAWI E 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 E REINERT (2001) um dos principais atributos físicos 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 altura das plantas, o diâmetro do colmo, a massa seca e a altura de inserção da primeira espiga apresentaram comportamento linear decrescente a partir da resistência de 1,65 MPa (Figura 1) concordando com SILVA (1998), que a taxa de crescimento da parte aérea de plantas de milho variou negativamente com a RP. HANKANSSON E VOORHEES (1998) verificaram que o menor desenvolvimento da parte aérea em solos compactados ocorre por causa da redução da penetração e da ramificação das raízes em consequência da resistência mecânica do solo, e em decorrência da menor infiltração e movimento da água e disponibilidade de nutrientes no solo. Para 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 a parte aérea da planta reduz seu desenvolvimento.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para a altura das plantas (cm), altura de inserção da primeira espiga (cm), diâmetro do colmo (cm), número de espigas por planta, massa de 1.000 grãos (g), massa seca das plantas (Mg ha⁻¹) e produtividade (Mg ha⁻¹), envolvendo diferentes níveis de compactação do Latossolo Vermelho de textura média (C)

Parâmetros da planta	Média geral	CV (%)	Quadrado médio do Resíduo	Fc	Pr > Fc
Altura das plantas	233,45	2,45	445,242	13,54	< 0,0001
Alt. inserção 1ª espiga	142,12	4,07	5,789	9,69	0,0001
Diâmetro do colmo	1,78	4,67	0,037	5,40	0,0033
Nº espiga por planta	1,01	3,08	0,002	1,80	0,1637
Massa de 1.000 grãos	257,29	4,48	1866,942	14,02	< 0,0001
Massa seca das plantas	6,78	11,86	3,523	5,44	0,0032
Produtividade	5,78	7,26	3,455	19,58	< 0,0001

Fc: valor do F calculado; Pr: probabilidade de se obter um valor de F, maior ou igual a Fc.

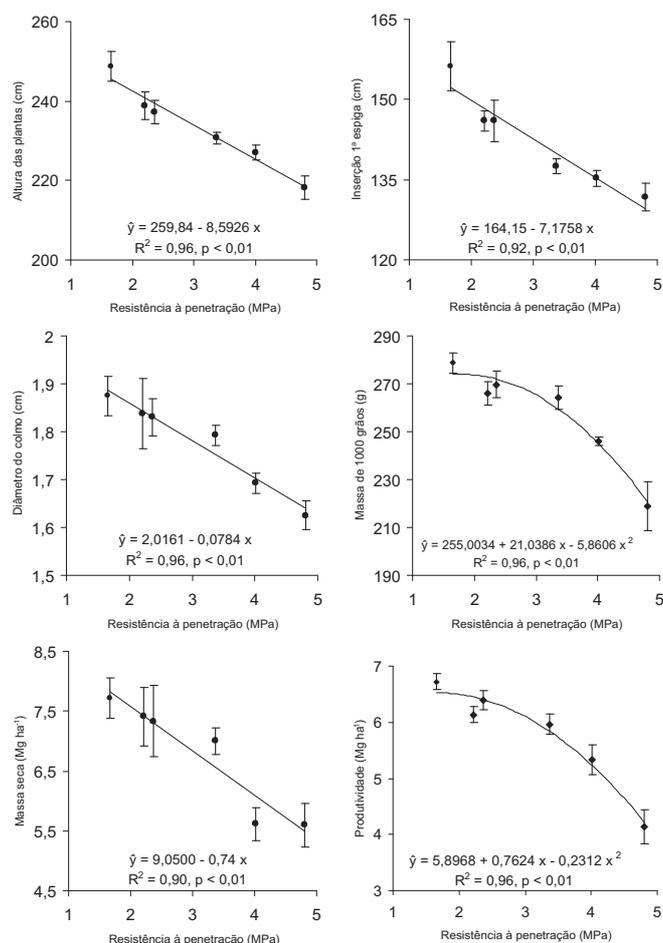


Figura 1. Regressão entre a resistência do Latossolo Vermelho à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, massa de 1.000 grãos, massa seca e produtividade de grãos da cultura do milho. As barras referem-se aos erros padrões da média.

Resultados contraditórios quanto ao desenvolvimento de plantas de milho em solos compactados na literatura já foram apresentados por FONOLI ET AL. (2003), onde, segundo o autor, o estágio de desenvolvimento das plantas, por ocasião da avaliação, e a condição de cultivo influenciaram a resposta do crescimento vegetativo aéreo, reforçando relatos sobre a dificuldade de se generalizar conclusões quanto ao desenvolvimento das plantas em solos compactados. A resistência mecânica do solo à penetração apresenta valores 2 a 8 vezes superior a máxima pressão axial que a raiz pode exercer (MISRA ET AL., 1986) e é acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela condição estrutural do solo (BEUTLER ET AL., 2004b), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento das culturas. BOONE ET AL. (1987) demonstraram que em solo compactado, com alta resistência ou reduzida difusão de oxigênio, a restrição ao crescimento das plantas dependeu da distribuição pluviométrica, ou seja, das condições de umidade do solo. A variação do conteúdo de água no solo também foi utilizada por PHEBE E BEALE (1976) para demonstrar ser possível obter condições de abundante desenvolvimento de raízes num solo compactado.

Segundo BEUTLER ET AL. (2004a) os diferentes valores críticos de RP para as culturas podem ser explicados, em parte, pelos diversos penetrômetros utilizados nas determinações, sendo que essas diferenças aumentariam com a compactação e o teor de argila, evidenciando a necessidade de padronização de penetrômetros. Segundo AL-ADAWI E REEDER (1996) deve-se tomar cuidado ao interpretar a resistência à penetração do solo por existir fatores que podem influenciar significativamente os resultados,

como o tipo de solo, a dureza do solo, o conteúdo de água, e o tipo de cone utilizado no penetrômetro e sua forma. Assim, HERRICK E JONES (2002) recomendam a utilização de penetrômetros estáticos com velocidade constante de penetração tanto por sua maior precisão como também para padronizar as determinações, como o utilizado no trabalho, além da padronização da umidade das amostras indeformadas em câmaras de Richards antes da leitura da resistência à penetração, eliminando também a interferência imposta pela variabilidade da umidade nas leituras.

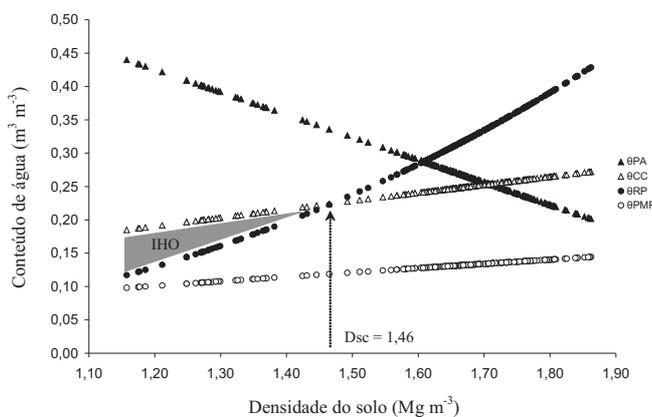


Figura 2. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 1,65 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no Latossolo Vermelho. IHO = intervalo hídrico ótimo. Dsc = densidade do solo crítica.

O conteúdo de água no solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), equivalente a resistência à penetração de 1,65 MPa (θ_{RP}) e equivalente à porosidade de aeração igual a 10% (θ_{PA}), utilizadas para definição do IHO, são apresentados na Figura 2.

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 2). KLEIN E LIBARDI (2002) estudando a densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob os diferentes sistemas de uso e manejo, mata secundária, área de sequeiro com dois cultivos anuais em plantio direto e uma terceira aérea irrigada por pivô central em

sistema plantio direto, verificaram que o sistema de manejo de sequeiro 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, observaram 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.

A variação da Ds teve grande impacto sobre o θ_{RP} . O θ_{RP} substituiu o θ_{pmp} no valor de Ds = 1,16 Mg m⁻³, já na parte superior do IHO mesmo com a diminuição do θ_{PA} pelo aumento da Ds, este não alcançou valores restritivos ao IHO, ou seja, o θ_{PA} não substituiu o θ_{cc} como fator limitante no solo. Tais resultados são similares aos obtidos por TORMENA et al. (1998), TORMENA et al. (1999), BEUTLER (2003), BEUTLER et al. (2004a,b) e LEÃO et al. (2004), 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.

A incorporação da aeração do solo e da resistência do solo à penetração na definição do IHO para o crescimento de plantas, tornou esse num parâmetro mais sensível às alterações da estrutura do solo do que ao conteúdo de água disponível, como já verificado por SILVA et al. (2002). O IHO variou de 0 a 0,066 m³ m⁻³, enquanto a água disponível variou de 0,087 a 0,128 m³ m⁻³ (Figura 2).

A densidade do solo crítica (D_{sc}) foi definida segundo SILVA E KAY (1997) como a Ds onde o IHO é igual a zero, ou seja, a Ds na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas. Neste solo, a Dsc foi de 1,46 Mg m⁻³ e a partir da Ds de 1,16 Mg m⁻³ a RP já seria restritiva para o crescimento de plantas se o conteúdo de água do solo permanecesse abaixo do θ_{RP} (Figura 2). Valores de Dsc de 1,55 e 1,63 Mg m⁻³ foram observadas por BEUTLER et al. (2004a) para a cultura do arroz cultivado em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho de textura média mantidos nas tensões de água de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Já em condições de campo, BEUTLER et al. (2004b) verificaram a Dsc de 1,63 Mg m⁻³ para a cultura do arroz de sequeiro utilizando o mesmo solo.

Segundo BEUTLER et al. (2004b), a produtividade das culturas deveria ser reduzida em valores inferiores ou próximos a Dsc. Portanto, realizou-se a regressão entre a Ds, obtida nas três camadas do solo (Tabela 1), e a produtividade do milho (Figura 3).

A Dsc foi igual ao valor de Ds restritiva à produtividade do milho. Portanto, para esse solo, os resultados permitem inferir que a Dsc foi um critério adequado no monitoramento da compactação do solo para a cultura do milho. MORAES E BENEZ (1996) estudando diferentes preparos do solo para a cultura do milho sob Terra Roxa Estruturada argilosa verificaram que o aumento da Ds de 1,25 a 1,33 Mg m⁻³, na camada de 0-0,20 m, não influenciou a produtividade de grãos da cultura concordando com os dados encontrados neste trabalho.

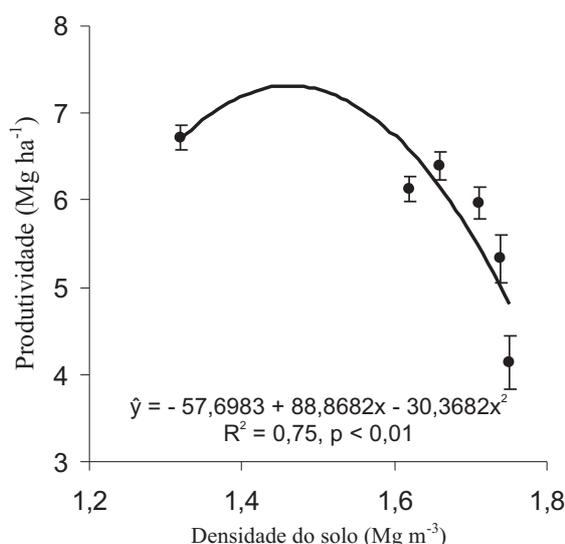


Figura 3. Regressão entre a densidade do solo e a produtividade de milho. As barras referem-se aos erros padrões da média.

SILVA E KAY (1997) concluíram que o crescimento das plantas é menos restrito dentro dos limites do IHO. SILVA (1998), corroborando este resultado, observou que o crescimento da parte aérea das plantas de milho foi negativamente correlacionado com a frequência com que a umidade do solo ocorreu fora do IHO. Assim, a magnitude do IHO pode ser utilizada como um diagnóstico da frequência em que a estrutura do solo determina condições de umidade limitantes ao crescimento das plantas. Nesse contexto, apenas o tratamento T₀ apresentou Ds (1,33 Mg m⁻³) abaixo da Dsc proposto pelo IHO (Tabela 1), significando não haver restrições físicas ao crescimento das plantas, podendo o conteúdo de água do solo variar entre 0,128 e 0,156 kg kg⁻¹, conforme comprovado pelos parâmetros da cultura avaliados neste tratamento (Figura 1). Para os demais tratamentos, mesmo que o conteúdo de água ficasse sempre na capacidade de campo, haveriam

restrições pelas RP observadas. O conteúdo de água do solo se encontra muitas vezes abaixo da capacidade de campo durante o ciclo das culturas, onde a θ_{RP} , em solos compactados, torna-se o fator limitante ao crescimento das plantas até a Dsc, destacando a importância da utilização de valores de RP limitantes para cada cultura (BEUTLER et al., 2004a).

4. CONCLUSÕES

1. O aumento da resistência mecânica do solo à penetração acima de 1,65 MPa restringe o crescimento da parte aérea e a produtividade das plantas de milho nas condições estudadas.

2. O Intervalo hídrico ótimo no solo estudado é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (0,01 MPa) e na parte inferior pela resistência mecânica do solo à penetração, com densidade do solo crítica ao crescimento radicular de 1,46 Mg m⁻³.

3. Apenas uma passada com trator de 4 Mg sobre um Latossolo Vermelho de textura média preparado, no conteúdo de água equivalente a capacidade de campo (0,01MPa), é suficiente para elevar a densidade do solo acima de 1,46 Mg m⁻³, limitante a produtividade de grãos da cultura do milho.

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.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Manejo de solos e agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed). **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003. p.70-106.

- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.1, p. 167-177, 2001.
- BEUTLER, A. N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agronômicas de soja e arroz de sequeiro**. Jaboticabal, 2003. 126 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias -UNESP.
- 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 de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.557-580, 2004b.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.142-149, 2004.
- BLAKE, G. R. Bulk density. In: Black, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.374-390.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 377-382.
- BOONE, F. R. WERF, H. M. G. van der; KROESBERGEN, B.; HAAG, B. A.; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and growth. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.35, n.1, p.113-128, 1987.
- 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.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 443-461.
- 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**, Viçosa, v.38, n.8, p.947-953, 2003.
- GARDNER, W. E. Water content. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.493-544.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411.
- GHOHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz. **Bragantia**, Campinas, v.25, n.39, p. 419-431, 1996.
- HANKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. (Ed). **A. Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p.167-179 (Advances in Soil Science).
- HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.4, p.1320-1324, 2002.
- 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**, v.26, n.4, p.857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-662.
- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M.C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Sciences**, v.1, n.1, p.277-293, 1985.
- MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of soil aggregates of finite size. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 94, n.1, p. 59-85, 1986.
- MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Rural**, Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, 1996.
- PHEBE, C. J.; BEALE, O. W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, n.3, p.430-436, 1976.
- RAIJ, B. van; 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. 170 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100)
- ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSE, H. F.; MORAES, M. H. **Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo**. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, n.3, p.491-497, 1994.
- SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **SAS user's guide**. Cary, 1999. 595p.

- 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. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n.3, p.877-883, 1997.
- SILVA, A. P. **Qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas de milho**. Piracicaba, 1998. 80p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP.
- SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.2, p.253-260, 2001.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed). **Qualidade física do solo: Métodos de estudo - Sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, 2002. p.1-18.
- 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**, v.30, p.31-40, 2006.
- SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.
- 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. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 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.