

Compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa afetando o sistema radicular e a produtividade do milho¹

Onã da Silva Freddi², José Frederico Centurion³, Cinara Xavier de Almeida⁴

RESUMO

O conhecimento de padrões de crescimento radicular é importante para a tomada de decisões em relação ao manejo do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e da variação do conteúdo de água sobre determinadas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho de textura argilosa e associá-las ao crescimento radicular e à produtividade da cultura do milho. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com cinco intensidades de compactação e quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas do 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 resistência do solo à sua penetração e porosidade. Para determinação da densidade, superfície, diâmetro radicular e massa de matéria seca das raízes, foram retiradas amostras do solo nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; e 0,15-0,20 m em cada parcela. O conteúdo de água do solo foi monitorado durante todo o ciclo da cultura. O aumento da resistência do solo à penetração, assim como sua variabilidade temporal em função do conteúdo de água, com um período de estresse hídrico entre o 42° e 65° dias após emergência da cultura, alterou a morfologia do sistema radicular em todas as camadas, com exceção apenas para a densidade radicular e massa de matéria seca das raízes na camada de 0,10-0,20 m, restringindo também o crescimento radicular em profundidade. Contudo, o diâmetro radicular foi a única característica do sistema radicular que apresentou correlação inversa com a produtividade de milho.

Palavras-chave: Resistência do solo à penetração, macroporosidade, *Zea mays*, água no solo.

ABSTRACT

Effect of compaction of a clayey oxisol on root system and corn yield

Understanding patterns of root growth is important for decision making in relation to soil management. The objective of this paper was to evaluate the effects of compaction and variation of water content on certain physical properties of a clayey Red Latosol (Oxisol) and associate them with root growth and corn yield. The experiment was arranged in a complete randomized design with five compaction intensities and four repetitions. Undisturbed soil samples were collected in the layers 0.02-0.05, 0.08-0.11, 0.15-0.18 and 0.22-0.25 m to determine soil resistance to penetration and soil porosity. To determine bulk, surface, root diameter and root dry matter, soil samples were collected in the layers of 0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.15 and 0.15-0.20 m, from each plot. Soil water content was monitored throughout the crop cycle. Increased soil resistance to penetration as well as its temporal variability as a function of soil water content, with a water stress period between 42 and 65 days after emergence, changed root system morphology in all layers, except only for root density and root dry matter in the layer of 0.10-0.20 m, also restricting root growth in depth. However, the root diameter was the only parameter of the root system that showed inverse correlation with corn yield.

Key words: Soil resistance to penetration, macroporosity, *Zea mays*, soil water

Recebido para publicação em agosto de 2008 e aprovado em julho de 2009

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor.

² Engenheiro Agrônomo, Doutor. Pós-doutorando do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, FCAV/UNESP, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n, 14884-900, Jaboticabal, SP, Brasil. onafreddi@gmail.com

³ Engenheiro Agrônomo, Doutor. Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n, 14884-900, Jaboticabal, SP, Brasil. jfcentur@fcav.unesp.br

⁴ Engenheira Agrônoma, Mestre. Doutoranda do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n, 14884-900, Jaboticabal, SP, Brasil. cinarax@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Pesquisas demonstraram que a compactação reduz o volume de poros do solo (Klein & Libardi, 2002; Stone *et al.*, 2002) e que nesse processo os macroporos são os primeiros a desaparecerem (Primavesi, 1987). Assim, o desenvolvimento das raízes é afetado negativamente devido ao aumento da resistência do solo à penetração (Stone *et al.*, 2002), à diminuição da concentração de oxigênio, à menor taxa de mineralização da matéria orgânica e à difusão lenta de nutrientes e de oxigênio (Ribeiro, 1999), que diminui a disponibilidade e a absorção de água e de nutrientes pelas plantas (Medeiros *et al.*, 2005).

O crescimento e o desenvolvimento das raízes dependem das condições físicas e químicas do solo. Normalmente as raízes possuem crescimento vertical, mas quando encontram uma camada compactada podem modificar sua direção e forma de crescimento (Varsa *et al.*, 1997). Bengough & Mullins (1990) afirmam que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre por causa da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema. Entre as modificações morfológicas nas raízes provocadas pela restrição ao crescimento estão o aumento do diâmetro e a diminuição do comprimento, tornando-as tortuosas (Silva & Rosolem, 2002). Essas modificações, geralmente, são decorrentes do seu crescimento nos pontos de menor resistência do solo à penetração (Borges *et al.*, 1988), como canais deixados por raízes decompostas e fendas naturalmente encontradas no solo.

Segundo Medeiros *et al.* (2005), a influência da compactação do solo sobre a absorção de nutrientes e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas dependem da espécie, da classe de solo e do conteúdo de água no solo. De acordo com Materechera *et al.* (1992), a compactação do solo pode promover o engrossamento das raízes, em razão de mudanças morfológicas e fisiológicas do sistema radicular, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem.

Um fator de suma importância a considerar é o impacto do conteúdo de água sobre as medidas de resistência do solo à penetração, já que à medida que o solo vai secando há aumento da coesão entre suas partículas, implicando numa maior resistência do solo à penetração (Gerard *et al.*, 1972). Segundo Dexter (1991), o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de resistência do solo à penetração inferiores a 1 MPa em solos secos, mas num conteúdo de água maior pode haver crescimento em valores variando entre 4,0 e 5,0 MPa.

O reconhecimento da ocorrência dessas interações e de que as culturas estão sujeitas às suas interferências demonstrou a necessidade de quantificá-las na avaliação da influência das práticas de manejo sobre as condições

físicas do solo (Tormena *et al.*, 1998a). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação do solo, proporcionada pelo tráfego de tratores, e da variação de seu conteúdo de água sobre determinadas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho de textura argilosa e associá-las ao sistema radicular e à produtividade de milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na fazenda de ensino e pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP). O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29''S e 48° 16' 47''O, com altitude média de 540 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen.

A composição granulométrica do solo foi determinada na camada 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, 116 g kg⁻¹ de areia fina e 59 g kg⁻¹ de areia grossa.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com cinco intensidades de compactação. 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.

Antes da instalação do experimento realizou-se uma escarificação do solo até 0,30 m de profundidade. Os tratamentos foram: T₀ = solo não trafegado, T_{1*} = uma passada de um trator de 4 Mg; e T₁, T₂ e T₄ corresponderam a uma, duas e quatro passadas de um trator de 11 Mg, respectivamente. Os tratores trafegaram por toda a parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O conteúdo de água no solo durante a compactação do tratamento T_{1*} foi de 0,17 kg kg⁻¹ e nos demais tratamentos foi de 0,22 kg kg⁻¹.

No dia 29 de novembro de 2005, foi semeado o milho (cultivar Máster) no espaçamento de 0,9 m entrelinhas e 12 sementes por metro, que foi 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 obter cinco plantas por metro linear. A adubação de cobertura foi realizada quando as plantas estavam com seis folhas, utilizando-se 0,450 Mg ha⁻¹ da fórmula 20-00-15, sem incorporação.

Foram abertas quatro trincheiras por tratamento, uma em cada parcela, para retirada de amostras indeformadas

do solo. Em duas delas coletou-se um cilindro de 54,29 x 10⁻⁶ m³ nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11; 0,15-0,18; e 0,22-0,25 m, para determinação das propriedades físicas do solo. A microporosidade foi determinada por secagem (tensão de 0,01 MPa) 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.

Nas outras duas trincheiras, coletaram-se seis cilindros por camada para determinação da resistência do solo à penetração (RP), em diferentes conteúdos de água em câmaras de pressão de Richards (0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1; e 0,3 MPa), assim como a determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente pelo modelo proposto por Genuchten (1980). A RP foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico estático, conforme descrito por Tormena *et al.* (1998a), 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. Os valores médios de RP, apresentados na Tabela 1 e utilizados nas regressões entre as características do sistema radicular e produtividade de grãos em função da compactação do solo, foram determinados na capacidade de campo (0,01 MPa), conteúdo de água utilizado e padronizado para determinação da RP, o que possibilita comparações com os valores encontrados na literatura.

No estádio de pendoamento da cultura do milho, que ocorreu 59 dias após a germinação (01/02/2006), período no qual, segundo Mengel & Barber (1974), o sistema

radicular do milho alcança a máxima extensão, foram retiradas amostras de solo distanciadas de 0,10 m do eixo principal das plantas nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; e 0,15-0,20 m. As raízes foram então separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando-se peneiras de abertura de malha de 0,002 e 0,001 m. As imagens das raízes foram digitalizadas em um "scanner" de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, fornecendo o diâmetro médio e o comprimento das raízes para a determinação da densidade do comprimento radicular e da superfície radicular (Harris & Campbell, 1989). Na sequência, as amostras foram secas em estufa a + 65 °C até massa constante, para a determinação da massa de matéria seca das raízes (massa de matéria seca das raízes de cada amostra dividida pelo volume de solo coletado), da densidade do comprimento radicular (comprimento radicular dividido pelo volume de solo coletado) e da superfície radicular (comprimento radicular multiplicado pelo comprimento do círculo radicular dividido pelo volume de solo coletado). 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%.

O conteúdo de água no solo foi monitorado durante o ciclo da cultura do milho nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 1). Como a RP varia inversamente com o conteúdo de água no solo, numa relação exponencial, foram realizados ajustes entre essas duas variáveis (Tabela 2), a partir dos quais se obteve a variação da RP durante o ciclo da cultura.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade. Para atender às hipóteses iniciais, todas as variáveis do sistema radicular fo-

Tabela 1 Macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho submetido a intensidades de compactação (médias e desvio padrão das médias)

Camada (m)	Intensidade de compactação ¹				
	T ₀	T _{1*}	T ₁	T ₂	T ₄
	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
0,02-0,05	0,22±0,01	0,19±0,01	0,08±0,01	0,09±0,02	0,05±0,00
0,08-0,11	0,22±0,00	0,21±0,02	0,09±0,01	0,07±0,01	0,06±0,01
0,15-0,18	0,19±0,01	0,15±0,03	0,10±0,01	0,09±0,01	0,07±0,01
Média	0,21±0,01	0,18±0,01	0,09±0,01	0,09±0,01	0,06±0,00
	Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
0,02-0,05	0,37±0,00	0,38±0,01	0,42±0,01	0,42±0,01	0,43±0,00
0,08-0,11	0,35±0,00	0,38±0,01	0,42±0,00	0,42±0,01	0,42±0,00
0,15-0,18	0,37±0,01	0,38±0,02	0,41±0,01	0,41±0,01	0,42±0,00
Média	0,36±0,00	0,38±0,01	0,41±0,00	0,42±0,00	0,42±0,00
	Resistência do solo à penetração (MPa)				
0,02-0,05	0,31±0,05	0,37±0,05	1,16±0,06	1,14±0,25	2,13±0,20
0,08-0,11	0,35±0,05	0,33±0,04	1,09±0,17	1,20±0,19	1,70±0,15
0,15-0,18	0,31±0,03	0,60±0,12	1,04±0,09	1,13±0,20	1,68±0,32
Média	0,32±0,03	0,44±0,06	1,10±0,06	1,15±0,11	1,83±0,14

¹T₀= solo não trafegado, T_{1*}= uma passada de um trator de 4 Mg e T₁, T₂ e T₄, correspondem a uma, duas e quatro passadas de um trator de 11 Mg, respectivamente.

Tabela 2. Resistência à penetração (RP) de um Latossolo Vermelho como variável do conteúdo de água gravimétrico (UG) em diferentes intensidades de compactação e camadas

Tratamentos	Camadas ¹	
	0-0,10 m	0,10-0,20 m
T ₀	RP = 14,735e ^{-12,264UG} (R ² =0,89; p<0,01)	RP = 31,698e ^{-14,214UG} (R ² =0,87; p<0,01)
T _{1*}	RP = 27,080e ^{-13,623UG} (R ² =0,86; p<0,01)	RP = 13,799e ^{-8,9002UG} (R ² =0,78; p<0,01)
T ₁	RP = 108,79e ^{-15,852UG} (R ² =0,75; p<0,01)	RP = 373,99e ^{-19,695UG} (R ² =0,84; p<0,01)
T ₂	RP = 240,54e ^{-17,916UG} (R ² =0,83; p<0,01)	RP = 238,61e ^{-16,811UG} (R ² =0,90; p<0,01)
T ₄	RP = 144,59e ^{-14,310UG} (R ² =0,85; p<0,01)	RP = 484,29e ^{-19,555UG} (R ² =0,76; p<0,01)

¹ Para a camada de 0-0,10 m o número de observações foi de 24 e para camada de 0,10-0,20 m de 12.

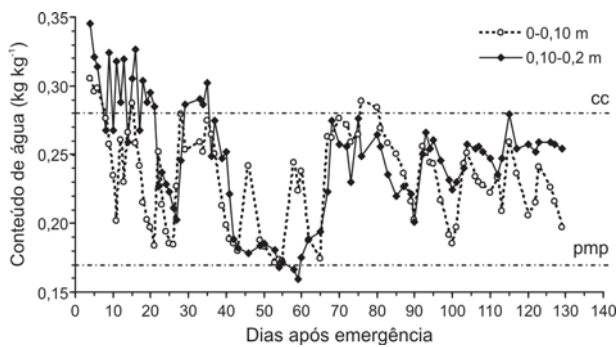


Figura 1. Variação do conteúdo de água nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m de um Latossolo Vermelho de textura argilosa cultivado com milho. O pmp representou o conteúdo de água no ponto de murcha permanente e cc na capacidade de campo.

ram transformadas em \sqrt{x} . A análise de variância para as variáveis do sistema radicular seguiu um delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo o fator secundário constituído pelas camadas de solo e as médias foram então comparadas pelo teste de Tukey. Em função da RP, foram realizadas análises de regressão polinomial dessas variáveis e também da produtividade do milho. Determinou-se a matriz de correlação entre as variáveis do sistema radicular avaliados e a produtividade de milho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam o comportamento da superfície radicular, densidade radicular, do diâmetro radicular e da massa seca das raízes, respectivamente, em função do aumento da compactação em diferentes camadas do solo. Nas camadas de 0,0,05 e 0,05-0,10 m, a superfície, densidade e o diâmetro radicular, assim como a massa de matéria seca das raízes, apresentaram comportamento quadrático em função do aumento da RP.

Nota-se que o aumento da compactação proporcionou aumento da superfície radicular até o valor de 1,27 MPa na camada de 0-0,05 m e de 1,33 MPa para a camada de 0,05-0,10 m, tendo a partir desses valores de RP a compactação do solo restringido o crescimento radicular. Para a densidade radicular e massa de matéria seca das raízes os valores de RP críticos nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m foram de 1,25;

1,28; 1,30; e 1,38 MPa, respectivamente, próximos aos encontrados para a superfície radicular.

Contudo, observa-se que houve incremento do diâmetro radicular até os valores de 1,41 e 1,45 MPa de RP nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente. Dessa forma, níveis mais elevados de RP foram necessários para restringir essa variável comparativamente à superfície, densidade e massa de matéria seca do sistema radicular (Figuras 2, 3, 4 e 5). Mello Ivo & Mielniczuk (1999) verificaram que para o plantio direto na camada superficial (0-0,05 m) a densidade do comprimento radicular foi significativamente maior que no preparo convencional, sendo essa situação invertida na camada de 0,10-0,15 m. Abaixo da camada trabalhada pelos implementos (0,25-0,35 m), as áreas preparadas apresentaram valores iguais de densidade radicular quando comparadas às áreas de plantio direto. Os autores verificaram que as raízes não sofreram deflexão no ângulo normal de crescimento no preparo convencional por ocasião da etapa de ocupação dos primeiros 0,30 m do solo, o que não ocorreu no plantio direto, devido à maior RP. Os autores também constataram que o raio médio das raízes no sistema plantio direto foi maior quando comparado ao observado com preparo convencional em todas profundidades avaliadas, devido à maior RP, que levaram as raízes a sofrerem deformações morfológicas exteriorizadas pelo aumento de seu raio.

Assim, observou-se que apenas duas passadas do trator de 11 Mg (T₂) foram suficientes para proporcionar valores de macroporosidade abaixo de 10% (Tabela 1). Segundo Thomasson (1978) e Secco *et al.* (2004), os solos devem possuir macroporosidade mínima de 10% para o crescimento e desenvolvimento satisfatórios das plantas, pois os macroporos constituem a rota principal ao crescimento das raízes (Camargo & Alleoni, 1997) e também são os responsáveis pela aeração (Primavesi, 1987). Solos mal estruturados prejudicam o desenvolvimento radicular. Como a macroporosidade está diretamente relacionada com a densidade do solo, são os macroporos os primeiros a desaparecer no processo de compactação (Primavesi, 1987). Nesse sentido, Tormena *et al.* (1998b), estudando as alterações da porosidade de aeração em sistema plantio direto, observaram que o tráfego de má-

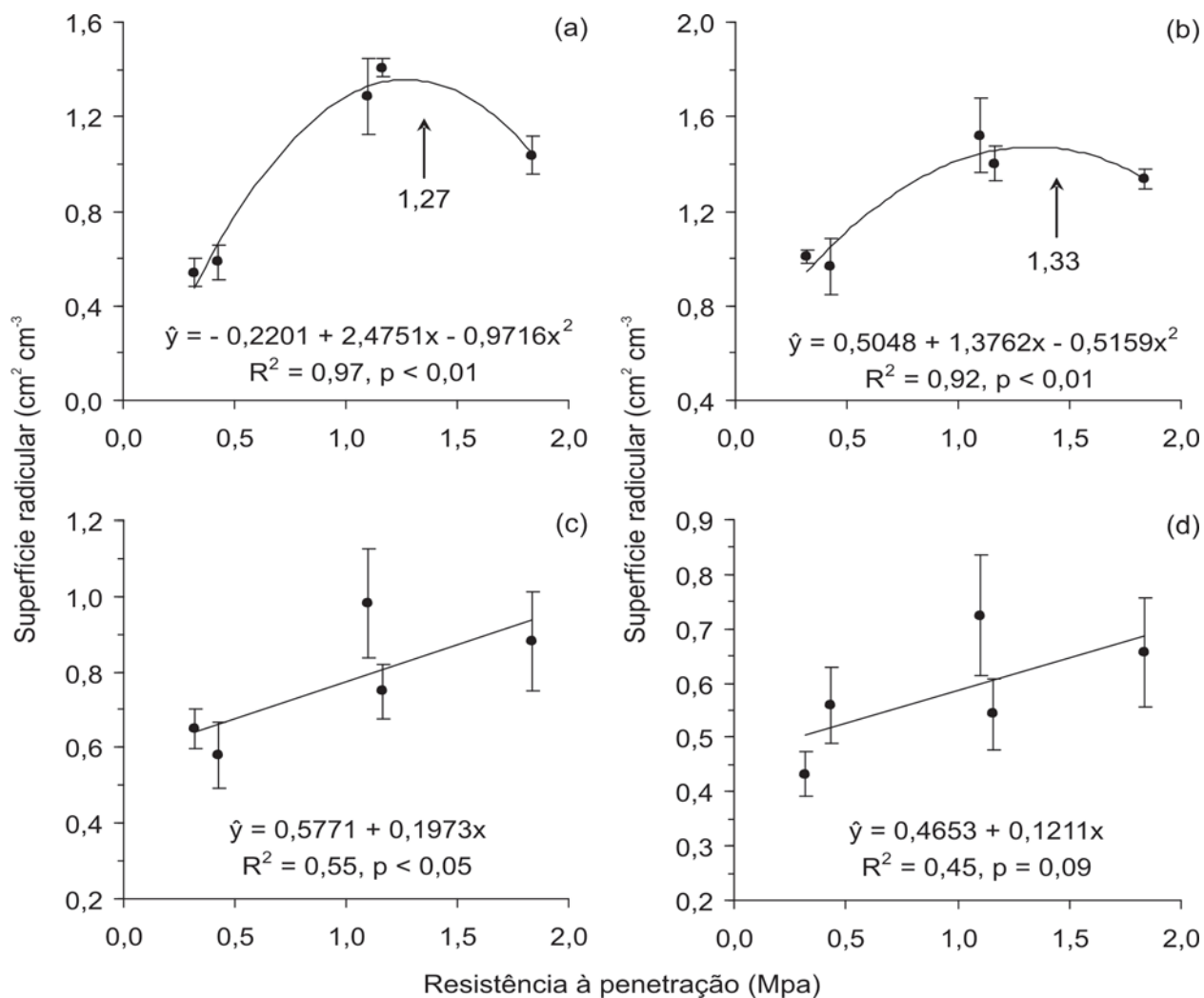


Figura 2. Superfície radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d) como variável da resistência do solo à penetração.

quinas reduziu seus valores para próximo de zero, restringido a produtividade das culturas.

Verificou-se que nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m a densidade e a massa de matéria seca radiculares não sofreram alterações com o aumento da RP (Figuras 3 e 5). Entretanto, a superfície e o diâmetro radicular, em ambas as camadas, apresentaram aumento linear com a compactação do solo (Figuras 2 e 4). Materechera *et al.* (1992), estudando o efeito da compactação em oito espécies vegetais, verificaram que o diâmetro radicular das espécies aumentou com a compactação do solo e que houve diferenças significativas na percentagem de penetração das raízes. Segundo Foloni *et al.* (2003), o diâmetro médio das raízes das plantas de milho aumentou significativamente com a compactação do Latossolo Vermelho distroférrico, ajustando-se a uma função linear. Esses pesquisadores afirmam ainda que o engrossamento das raízes na camada compactada pode ser um indicativo de que essa espécie tem pouco potencial para estabelecer o seu sistema radicular em solos compactados.

Pela análise de variância observou-se que todas as variáveis do sistema radicular do milho apresentaram interação entre as diferentes intensidades de compactação e as camadas do solo estudadas. Dentro do tratamento preparado e não trafegado (T_0) observou-se que a maior densidade e superfície radicular foram obtidas na camada de 0,05-0,10 m do solo (Tabela 3). Entretanto, o menor diâmetro radicular foi encontrado na camada de 0-0,05 e não houve diferença estatística entre as demais camadas. Maior massa de matéria seca de raízes foi observada na camada de 0,05-0,10 m, diferindo apenas dos valores obtidos nas camadas de 0-0,05 e 0,15-0,20 m.

Resultados semelhantes foram encontrados para densidade e superfície radiculares nos tratamentos T_0 e T_{1*} , nas diferentes camadas. Contudo, uma passada do trator de 4 Mg (T_{1*}) foi suficiente para modificar a distribuição do diâmetro e da massa de matéria seca das raízes nas diferentes camadas em relação ao tratamento T_0 , no qual o diâmetro radicular observado na camada de 0-0,05 não apresentou diferenças estatísticas comparativamente aos

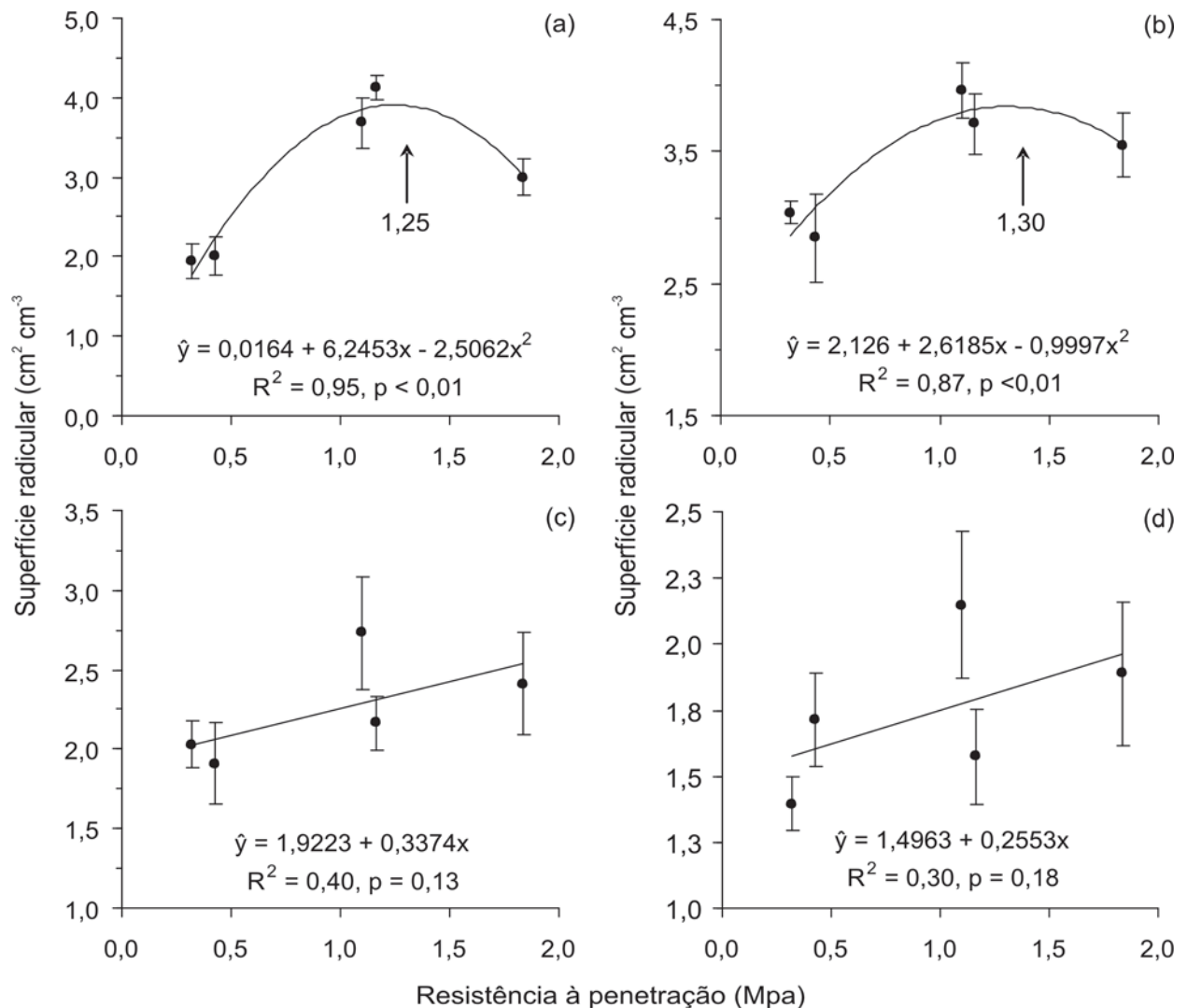


Figura 3. Densidade radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d) como variável da resistência do solo à penetração.

diâmetros observados nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m. Para o tratamento T_{1*}, a maior massa de matéria seca das raízes foi encontrada na camada de 0,05-0,10 m, não havendo diferença entre as demais camadas do solo. Segundo Camargo & Alleoni (1997), no processo de alongamento a pressão de crescimento das raízes depende da pressão de turgor das células do meristema radicular e da área de contato da raiz com um agente rígido externo. Portanto, quanto maior for o diâmetro da raiz, maior será a força exercida no processo de alongamento das células para a penetração no solo. Segundo Barber (1984), o aumento do diâmetro radicular é devido a um achatamento das células, de maneira que a área de membranas por unidade de comprimento da raiz aumente.

No tratamento T₁, a densidade radicular foi estatisticamente maior na camada de 0-0,10 m em relação à camada de 0,10-0,20 m, assim como ocorreu para a superfície radicular na camada de 0-0,10 m em relação à da camada de 0,10-0,15 m, maior que na camada de 0,15-

0,20 m (Tabela 3). O diâmetro radicular foi maior na camada de 0,05-0,10 m em relação ao verificado nas demais camadas. Verificou-se para a massa de matéria seca das raízes que não houve diferença nas três camadas mais superficiais e que o seu menor valor foi obtido na camada de 0,15-0,20 m (Tabela 3). Logo, nesse tratamento foram verificados os primeiros efeitos da compactação sobre o crescimento radicular. A maior concentração de raízes na superfície e a menor exploração do solo em profundidade prejudicam a absorção de água, já que raízes mais profundas usualmente podem extrair água de maneira mais efetiva do que aquelas próximas à superfície do solo, devido ao fato de serem mais jovens, menos comprimidas e, frequentemente, localizadas em solo mais úmido (Basso *et al.*, 1994). Segundo Lal (1989), o rearranjo da estrutura do solo, decorrente da compactação, se reflete no crescimento das raízes, que tendem a concentrar-se na camada superficial do solo até 0,10 m de profundidade.

Tabela 3. Densidade radicular (cm cm^{-3}), superfície radicular ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$), diâmetro radicular (mm) e massa de matéria seca da raiz (mg cm^{-3}) de milho em resposta a diferentes intensidades de compactação em camadas de um Latossolo Vermelho de textura argilosa

Camada ¹ (m)	Tratamentos				
	T ₀	T _{1*}	T ₁	T ₂	T ₄
	Densidade radicular ²				
0-0,05	1,94±0,22 b	2,01±0,24 b	3,68±0,32 a	4,12±0,15 a	3,00±0,23 ab
0,05-0,10	3,04±0,08 a	2,85±0,33 a	3,96±0,21 a	3,71±0,23 a	3,55±0,24 a
0,10-0,15	2,03±0,15 b	1,91±0,26 b	2,73±0,35 b	2,16±0,17 b	2,41±0,32 bc
0,15-0,20	1,39±0,10 b	1,72±0,18 b	2,15±0,28 b	1,57±0,18 b	1,89±0,27 c
	Superfície radicular ²				
0-0,05	0,54±0,06 b	0,58±0,07 b	1,29±0,16 a	1,41±0,04 a	1,04±0,08 b
0,05-0,10	0,96±0,03 a	0,92±0,12 a	1,47±0,15 a	1,35±0,08 a	1,28±0,04 a
0,10-0,15	0,65±0,05 b	0,58±0,09 b	0,98±0,14 b	0,75±0,07 b	0,88±0,13 bc
0,15-0,20	0,43±0,04 b	0,56±0,07 b	0,72±0,11 c	0,54±0,07 b	0,66±0,10 c
	Diâmetro radicular ²				
0-0,05	0,49±0,00 b	0,52±0,02 b	0,62±0,03 b	0,64±0,02 ab	0,62±0,00 b
0,05-0,10	0,56±0,01 a	0,57±0,00 a	0,70±0,01 a	0,68±0,01 a	0,68±0,01 a
0,10-0,15	0,57±0,01 a	0,54±0,01 ab	0,64±0,02 b	0,62±0,01 b	0,65±0,02 ab
0,15-0,20	0,55±0,01 a	0,55±0,01 ab	0,60±0,03 b	0,61±0,02 b	0,62±0,01 b
	Massa de matéria seca das raízes ²				
0-0,05	0,23±0,02 bc	0,24±0,03 b	0,44±0,04 a	0,49±0,02 a	0,37±0,02 b
0,05-0,10	0,38±0,01 a	0,37±0,03 a	0,52±0,05 a	0,48±0,02 a	0,48±0,01 a
0,10-0,15	0,31±0,03 ab	0,25±0,04 b	0,43±0,02 a	0,28±0,03 b	0,35±0,05 bc
0,15-0,20	0,17±0,02 c	0,24±0,03 b	0,27±0,05 b	0,19±0,01 b	0,25±0,03 c

¹T₀= solo não trafegado, T_{1*}= uma passada de um trator de 4 Mg e T₁, T₂ e T₄, correspondem a uma, duas e quatro passadas de um trator de 11 Mg, respectivamente. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ²

Dados transformados em \sqrt{x} .

Quando foram efetuadas duas passadas do trator de 11 Mg (T₂), atingindo média de 1,15 MPa de RP (Tabela 1), não houve alteração na densidade radicular em profundidade, como no tratamento com uma única passada do trator de 11 Mg. A maior superfície radicular concentrou-se também na camada de 0-0,10 m (Tabela 3). Já os diâmetros radiculares observados nas camadas de 0-0,05 m e de 0,05-0,10 m não apresentaram diferença estatística entre si. A massa de matéria seca de raízes também foi maior na camada de 0 0,10 m em relação à de 0,10-0,20 m. Desse modo, ficou evidente a concentração de raízes mais espessas na superfície e sua dificuldade em alcançar camadas mais profundas do solo, concordando com Rosolem *et al.* (1994) e Mello Ivo & Mielniczuk (1999). Em um Hapludalf com problemas de drenagem e elevada densidade nos horizontes subsuperficiais, Varsa *et al.* (1997) observaram que o rompimento de camadas adensadas pelo preparo do solo até a profundidade de 0,90 m promoveu maior penetração das raízes e produção de milho, devido à menor RP. Esses pesquisadores verificaram que nos anos de menor precipitação foram observados os maiores benefícios no aumento da profundidade de subsolagem, pois as raízes que penetraram a maiores profundidades explorando um volume maior de solo extraíram mais água e nu-

trientes, minimizando assim as condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura, o que resultou em maiores produtividades.

No tratamento T₄ verificou-se que a densidade radicular não apresentou diferenças estatísticas nas duas camadas mais superficiais do solo, mas que na camada de 0,05-0,10 m apresentou maior densidade em relação às camadas inferiores do solo (Tabela 3). Já a superfície radicular alocada nas duas camadas superficiais do solo foi estatisticamente diferente, sendo os maiores valores encontrados na camada de 0,05-0,10 m, superiores também aos das duas camadas inferiores. Não houve diferença no diâmetro radicular observado na camada de 0,05-0,15 m. Essa variável foi estatisticamente maior apenas na camada de 0,05-0,10 m em relação às camadas de 0-0,05 e 0,15-0,20 m. A massa de matéria seca das raízes ficou concentrada nas duas camadas superficiais do solo, estando em maior quantidade na camada de 0,05-0,10 m. Esperava-se que no tratamento T₄, devido à maior RP, as raízes ficassem mais concentradas nas camadas superiores, seguindo a tendência demonstrada do T₀ até o T₂. Entretanto, Materechera *et al.* (1992) relataram comportamentos variáveis do crescimento radicular na transição entre o solo solto e as camadas compactadas do subsolo não-

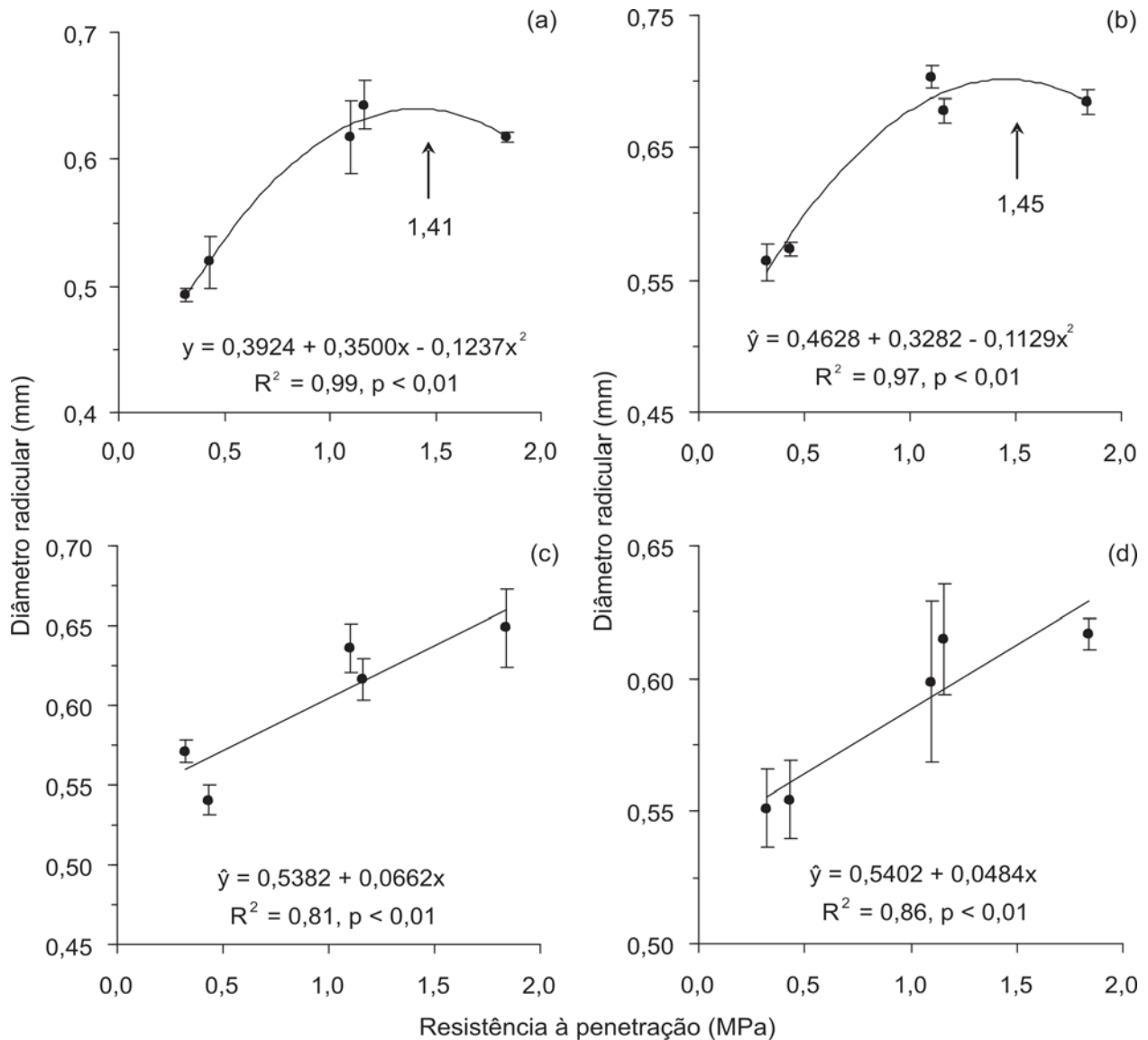


Figura 4. Diâmetro radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d) como variável resistência do solo à penetração.

preparado. Segundo os autores, as raízes podem se inclinar horizontalmente ou penetrar tais camadas. As raízes que se inclinaram podem percorrer horizontalmente a interface entre as camadas até achar possíveis pontos de baixa RP e entrar para o subsolo por meio desses caminhos, ou apenas secar e parar seu crescimento. As que conseguiram penetrar as camadas compactadas sem inclinação horizontal podem continuar crescendo na mesma direção, mas com redução na taxa de crescimento ou penetrar pequenas distâncias dentro da camada e quase sempre interromper seu crescimento. A idade das plantas e a presença de caminhos com baixa RP (bioporos e fendas) no subsolo são pontos importantes para o estabelecimento do sistema radicular.

Segundo Beutler & Centurion (2004), tão importante quanto o desenvolvimento radicular é a determinação do valor crítico de RP ao desenvolvimento radicular e sua

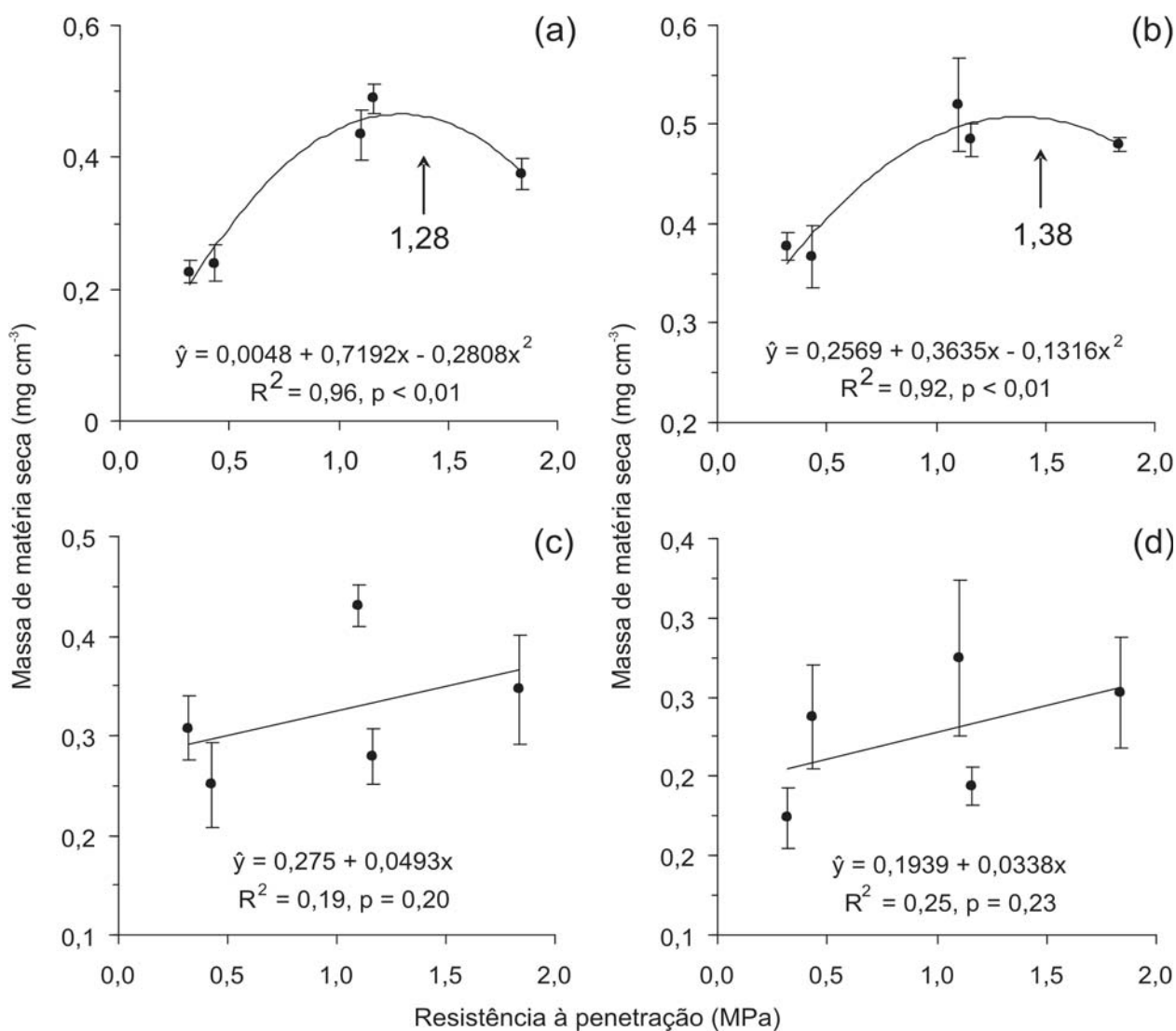
relação com a produtividade das culturas. Portanto, foi estabelecida a equação de regressão linear entre a RP e a produtividade de grãos da cultura do milho apresentada na Figura 6. Observa-se que com o aumento da RP, a partir do tratamento T_0 (0,32 MPa) até o T_4 (1,83 MPa), houve redução de 27% na produtividade de milho. Portanto, verifica-se que o aumento da compactação do solo proporcionou modificações no sistema radicular, ocasionando redução da produtividade.

Pela matriz de correlação (Tabela 4) observa-se que todas as características do sistema radicular, avaliadas na camada de 0-0,20 m, correlacionaram-se diretamente. A produtividade do milho correlacionou-se inversamente com todas as características do sistema radicular. Entretanto, a única correlação significativa encontrada foi com o diâmetro radicular. Segundo Bennie (1996), a influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular

Tabela 4. Matriz de correlações entre a superfície, densidade e diâmetro radiculares, massa de matéria seca das raízes e produtividade de milho cultivado em Latossolo Vermelho de textura argilosa submetido a diferentes intensidades de compactação

Características	Coeficientes de correlação ⁽¹⁾				
	Superfície	Densidade	Massa	Diâmetro	Produtividade
Superfície	1				
Densidade	0,97**	1			
Massa	0,96**	0,94**	1		
Diâmetro	0,87**	0,78**	0,86**	1	
Produtividade	-0,36 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,53*	1

(1)* significativo a 5% de probabilidade, ^{ns} não significativo.

**Figura 5.** Massa de matéria seca das raízes do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d) como variável da resistência do solo à penetração.

decorre de uma série de fatores, que dependem das características genéticas das plantas, das condições ambientais (precipitações) e do estágio de desenvolvimento do vegetal. Segundo Tormena *et al.* (1998b), a relação entre a estrutura do solo e a produtividade das culturas ainda é pouco compreendida, devido às dificuldades em quantificar as várias propriedades físicas do solo ligadas

à estrutura. A variabilidade espacial e temporal da estrutura do solo é um dos fatores que dificultam essa quantificação, já que algumas propriedades físicas do solo variam conjuntamente.

As Figuras 7 e 8 mostram que a RP aumentou com a diminuição do conteúdo de água do solo, o qual não permaneceu na capacidade de campo durante todo o ciclo da

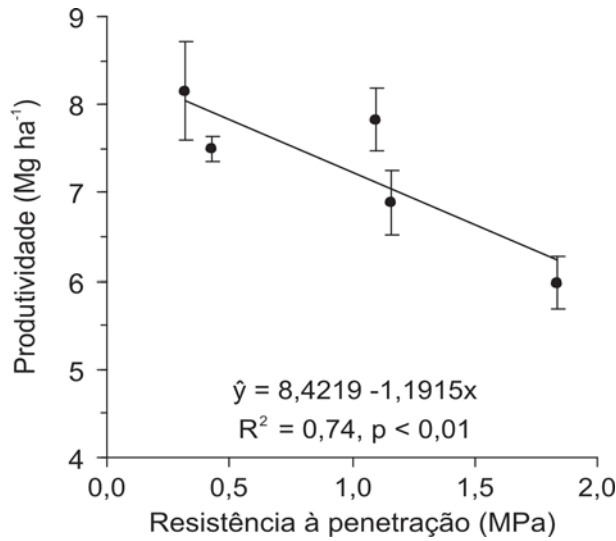


Figura 6. Produtividade de milho como variável da resistência à penetração em um Latossolo Vermelho.

cultura (Figura 1). Observa-se pelas Figuras 7 e 8 um período em que a RP atingiu os maiores valores (entre o 42° e 65° dias após emergência da cultura). Nesse período, o sistema radicular estava em pleno desenvolvimento, as-

sim como a parte aérea da planta, o que possivelmente resultou em menor produtividade. Portanto, verificou-se que, dependendo do regime hídrico, a RP pode atingir valores extremos mesmo em solos preparados, assim como, dependendo do estágio em que a cultura se encontra, ocasionar sérios problemas no crescimento radicular e na absorção de água e nutrientes, refletindo em menor produtividade.

Boone *et al.* (1987) demonstraram que a ocorrência de restrições ao crescimento das plantas tanto devido à excessiva RP como à reduzida difusão de oxigênio em solos compactados foi dependente da variabilidade temporal do conteúdo de água no solo decorrente da distribuição da precipitação. Logo, o estabelecimento de níveis limitantes das propriedades físicas é bastante complexo, pois envolve a integração de variáveis relacionadas com o solo, clima e a planta (Tormena *et al.*, 1998a). Assim, vários limites de RP ao crescimento radicular são mencionados na literatura, concordando com Coelho *et al.* (2000), os quais exemplificaram vários artigos demonstrando que o sistema radicular do algodão não cresceria em solos com RP acima de 3 MPa.

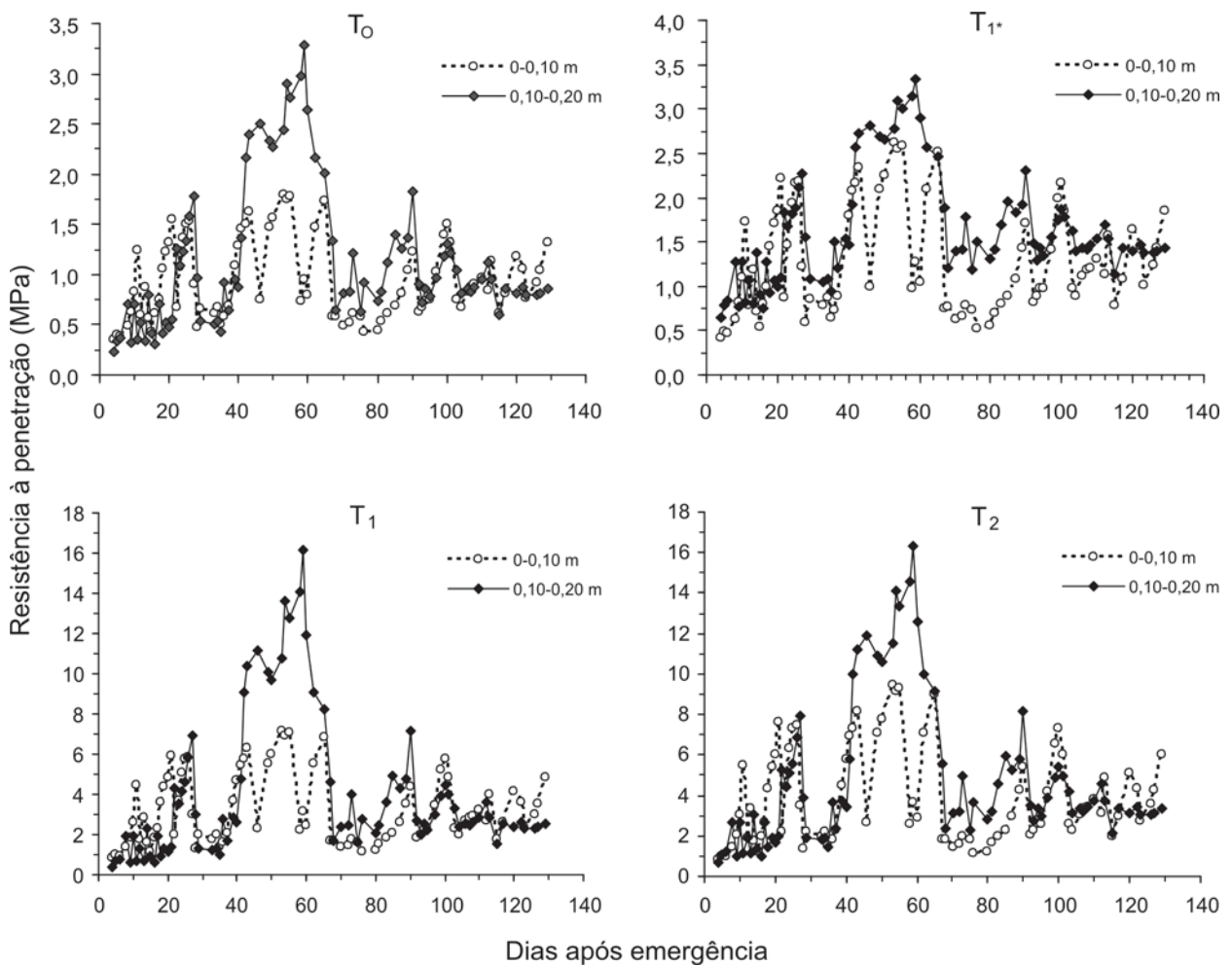


Figura 7. Variação da resistência à penetração em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho submetido a intensidades de compactação conforme a variação do conteúdo de água, durante o ciclo da cultura do milho.

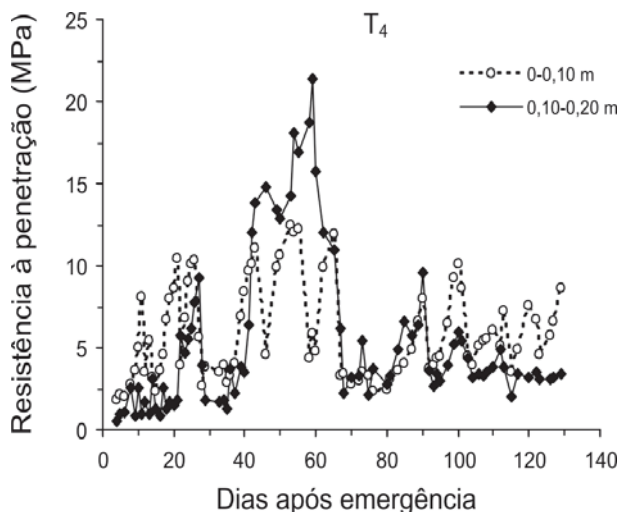


Figura 8. Variação da resistência à penetração em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho, após quatro passadas de um trator de 11 Mg, de acordo com o conteúdo de água observado durante o ciclo da cultura do milho.

Em relação ao desenvolvimento de raízes em solos compactados, a literatura relata principalmente a redução da profundidade e a redistribuição do sistema radicular, diminuindo o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Rosolem *et al.*, 2002; Beutler & Centurion, 2004) e não propriamente o decréscimo da quantidade total de raízes. Tais alterações promovem a exploração da camada superficial e menor volume de solo. Consequentemente, muitas vezes, essas raízes, absorvem água e nutrientes em quantidade insuficiente para manter a demanda da parte aérea e possibilitar produtividades elevadas.

CONCLUSÕES

As raízes apresentaram maior superfície, densidade e diâmetro radicular, assim como houve aumento da massa de matéria seca com a elevação da resistência do solo à penetração, que restringiu o crescimento radicular em profundidade.

O aumento da resistência do solo à penetração, bem como sua variabilidade temporal, conforme o conteúdo de água no solo reduziu a produtividade de milho em 27%.

A compactação do solo afetou o crescimento radicular da cultura do milho, mas não anulou o seu desenvolvimento; havendo, portanto, a produtividade mínima de aproximadamente 6 Mg ha⁻¹.

AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Barber SA (1984) Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach. New York, John Wiley e Sons. 398p.
- Basso LH, Fante Júnior L, Jorge LAC, Crestana S & Reichardt K (1994) Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estrutura latossólica: II. Compactação entre cultura irrigada e fertirrigada. *Scientia Agrícola*, 51:541-548.
- Bengough AG & Mullins CE (1990) Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth response. *Journal Soil Science*, 41:341-358.
- Bennie ATP (1996) Growth and mechanical impedance. In: Waisel Y, Eshel A & Kafkafi U (Eds.) *Plant roots*. New York, M. Dekker. p.453-470.
- Beutler AN & Centurion JF (2004) 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*, 24:142-149.
- Boone FR, Werf HMG, Kroesbergen B, Haag BA & Boers A (1987) The effect of compactation of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35:113-128.
- Borges EN, Novais RF, Fernandez B & Barros NF (1988) Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. *Revista Ceres*, 35:553-568.
- Camargo AO & Alleoni LRF (1997) Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, USP. 132p.
- Coelho MB, Mateos L & Villalobos FJ (2000) Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. *Soil and Tillage Research*, 57:129-142.
- Danielson RE & Sutherland PL (1986) Porosity. In: Klute A (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1 - Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy. p. 443-460.
- Dexter AR (1991) Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*, 20:87-100.
- Foloni JSS, Calonego JC & Lima SL (2003) Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:947-953.
- Gee GW & Bauder JW (1986) Particle-size analysis. In: Klute A (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1 -Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy. p.383-409.
- Genuchten MTA (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-897.
- Gerard CJ, Mehth HC & Hinojosa F (1972) Root growth in a clay soil. *Soil Science*, 114:37-49.
- Harris GA & Campbell GS (1989) Automated quantification o roots using a simple image analyzer. *Agronomy Journal*, 81:935-938.
- Klein VA & Libardi PL (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 26:857-867.
- Klute A (1986) Water retention: laboratory methods. In: Klute A (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1 -Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy. p.635-660.

- Lal R (1989) Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Advances in Agronomy*, 42:85-97.
- Matechera SA, Alston AM, Kirby JM & Dexter AR (1992) Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144:297-303.
- Medeiros RD, Soares AA & Guimarães RM (2005) Compactação do solo e manejo da água. I: efeitos sobre absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciência e Agrotecnologia*, 29:940-947.
- Mello Ivo WMP & Mielniczuk J (1999) Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23:135-143.
- Mengel DB & Barber SA (1974) Development and distribution of the corn root under field conditions. *Agronomy Journal*, 66:341-344.
- Primavesi A (1987) Manejo Ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo, Nobel. 549p.
- Raij B, Cantarella H, Quaggio JA & Furlani AMC (1997) Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC. 285p.
- Ribeiro MAV (1999) Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade. Lavras, Universidade Federal de Lavras. 71 p.
- Rosolem CA, Almeida ACS & Sacramento LVS (1994) Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, 53:259-266.
- Rosolem CA, Foloni JSS & Tiritan CS (2002) Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 65:109-115.
- Secco D, Reinert DJ, Reichert JM & Da Ros CO (2004) Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:797-804.
- Silva RH & Rosolem CA (2002) Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37:855-860.
- Stone LF, Guimarães CM & Moreira JAA (2002) Compactação do solo na cultura do feijoeiro – I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6:207-212.
- Thomasson AJ (1978) Towards an objective classification of soil structure. *Journal of Soil Science*, 29:38-46.
- Tormena CA, Roloff G & Sá JCM (1998b) Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:301-309.
- Tormena CA, Silva AP & Libardi PL (1998a) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:573-581.
- Varsa EC, Chong SK, Abolaji JO, Farquhar DA & Olsen FJ (1997) Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil and Tillage Research*, 43:219-228.