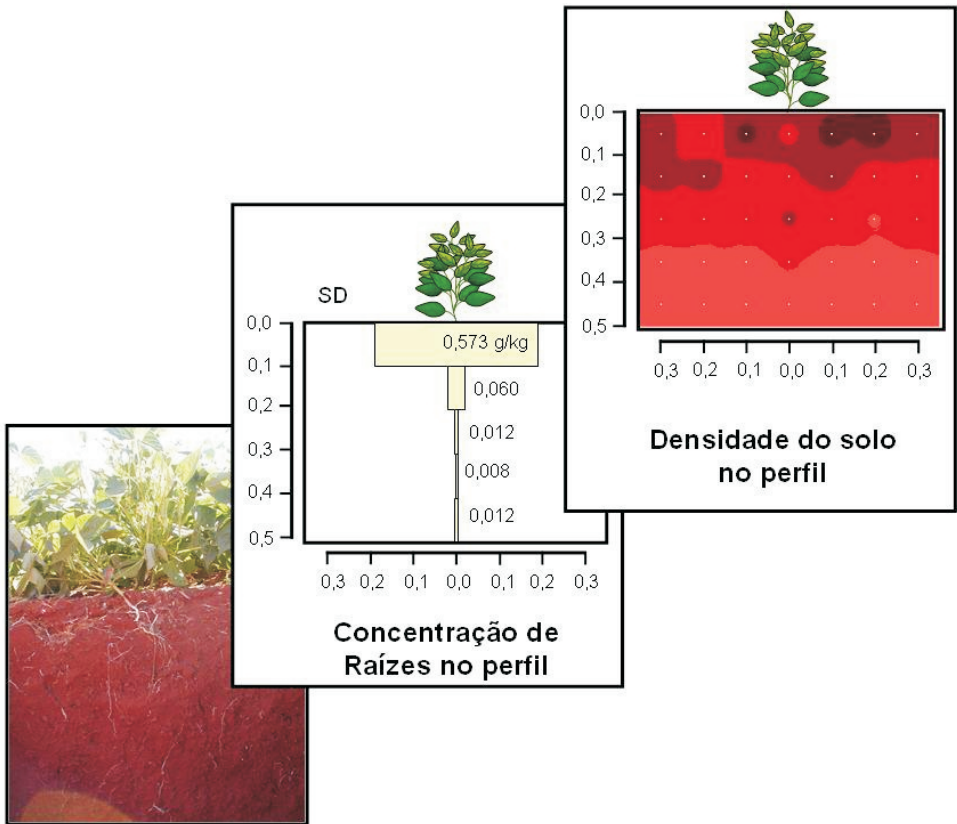


Avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo e sua Relação com a Produtividade e a Massa de Raízes de Feijoeiro em Sistema de Plantio Direto e Preparo Convencional do Solo



Perfil do solo

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 194

Avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo e sua Relação com a Produtividade e a Massa de Raízes de Feijoeiro em Sistema de Plantio Direto e Preparo Convencional do Solo

*Marcos Aurélio Carolino de Sá
João de Deus Gomes dos Santos Junior
Leo Nobre de Miranda*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretário-Executivo: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Revisão de texto: *Francisca Elijani do Nascimento*

Normalização bibliográfica: *Rosângela Lacerda de Castro*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Capa: *Jussara Flores de Oliveira*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Sousa /
Jaime Arbues Cerneiro*

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados**

S111a Sá, Marcos Aurélio Carolino de.

Avaliação do intervalo hídrico ótimo e sua relação com a produtividade e a massa de raízes de feijoeiro em sistema de plantio direto e preparo convencional do solo / Marcos Aurélio Carolino de Sá, João de Deus Gomes dos Santos Junior, Leo Nobre de Miranda. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2007.

28 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 194)

1. Compactação do solo. 2. Solo - perfil. 3. Solo - resistência mecânica. I. Santos Junior, João de Deus Gomes dos. II. Miranda, Leo Nobre de. III. Título. IV. Série.

631.4 - CDD 21

© Embrapa 2007

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Material e métodos	9
Resultados e discussão	13
Conclusões	25
Referências	25

Avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo e sua Relação com a Produtividade e a Massa de Raízes de Feijoeiro em Sistema de Plantio Direto e Preparo Convencional do Solo

Marcos Aurélio Carolino de Sá¹

João de Deus Gomes dos Santos Junior²

Leo Nobre de Miranda³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi determinar o intervalo hídrico ótimo utilizando-se um minipenetrômetro dinâmico em sistema de semeadura direta e preparo convencional do solo, cultivado com feijão em sistema irrigado. Amostras indeformadas foram coletadas em trincheiras de 0,80 m de largura por 0,50 m de profundidade, na porção central das camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. Em cada camada, foram coletadas sete amostras perpendicularmente à linha de plantio em intervalos regulares de 0,10 m, até os 0,30 m das entrelinhas adjacentes. Foram determinados o intervalo hídrico ótimo (IHO), a densidade do solo (Ds), a resistência à penetração (índice de cone - IC), a produtividade de grãos e a massa de raízes. Foram observados valores de Ds e IC mais elevados no sistema de semeadura direta, sobretudo nas camadas superficiais. Entretanto, esses resultados não afetaram a produtividade e a massa de raízes do feijoeiro, que foram substancialmente mais elevadas no sistema de semeadura direta que no sistema de preparo convencional. Os valores de Ds crítica determinados foram mais elevados que os relatados em literatura para solos de classe textural semelhante, indicando que mais estudos são necessários para verificar a relação entre a produtividade e a densidade crítica obtida a partir da resistência à penetração determinada com minipenetrômetros dinâmicos.

Termos para indexação: compactação do solo, resistência mecânica do solo, perfil do solo, penetrômetro dinâmico.

¹ Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

² Eng. Agrôn., D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

³ Eng. Agrôn., Ph.D., Pesquisador da Embrapa Cerrados, leo@cpac.embrapa.br

Least Limiting Water Range Assessment and its Relationship with Beans Productivity and Root Mass in no Till and Disk Plowed Soil

Abstract

The aim of this work was to determine least limiting water range, with a dynamic minipenetrometer in no till and disk plowed irrigated soil.

Undisturbed soil samples were collected in 0,80 m x 0,50 m trenches, 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m layers.

Seven samples were collected in each layer. Least limiting water range (LLWR), soil density (Ds), soil mechanical resistance (cone index - CI), beans productivity and root mass were determined. Ds and CI values were higher in no-till than in disk plowed soil surface layers. However, crop productivity and root mass were not affected by Ds and CI in no till. In this work, critical Ds values were higher than literature values for same textural class soils, showing that most studies are necessary to verify crop productivity and critical Ds relationships in soil mechanical resistance determined by dynamic minipenetrometers.

Index terms: soil compaction, soil mechanical resistance, soil profile, dynamic penetrometer.

Introdução

A caracterização da compactação do solo e sua relação com o crescimento das raízes apresentam limitações, pois a resistência à penetração expressa pelo índice de cone (IC) varia em função do teor de água (θ), densidade do solo (D_s), textura e teor de matéria orgânica ([BUSSCHER et al., 1997](#); [IMHOFF et al., 2000](#)). O aumento de θ diminui o IC, devido ao efeito lubrificante da água ao redor das partículas de solo ([PEDROTTI et al., 2001](#)), enquanto o aumento da densidade, em decorrência da compactação e degradação da estrutura, aumenta o IC. Quanto à textura, solos muito argilosos apresentam IC mais elevado, em virtude da maior coesão entre as partículas, e a matéria orgânica está relacionada com a agregação e a estrutura do solo, o que também afeta o IC ([BUSSCHER, 1990](#)). Alguns autores têm proposto modelos empíricos para descrever o IC, sendo o mais utilizado o de Busscher (1990), que propõe uma relação potencial do IC em função do teor de água e densidade: $IC = a\theta^{-b} D_s^c$, onde a , b e c são parâmetros da regressão. Uma vez estabelecida essa relação, ela será válida para um solo específico, ou solos com textura, mineralogia e teores de matéria orgânica semelhantes. Entretanto, a maioria das informações disponíveis na literatura diz respeito a solos de clima temperado ou a regiões brasileiras que não pertencem ao Bioma Cerrado.

A relação entre o IC e o crescimento radicular depende da espécie vegetal ou mesmo cultivar em estudo. Valores de IC de 2,0 MPa são citados por [Spivey et al. \(1986\)](#) como limitantes, enquanto, para [Unger e Kaspar \(1994\)](#), esses valores seriam de 2,5 MPa. [Beutler e Centurion \(2003\)](#) sugerem como limitantes valores entre 1,3 e 4,0 MPa. Sendo o IC variável em função da D_s e θ , surge o conceito de “Densidade crítica”, que é a densidade cujo valor de IC limita o crescimento radicular em função de θ ([IMHOFF et al., 2000](#)). Nessa densidade, o intervalo hídrico ótimo é igual a zero. Considera-se o solo como compactado quando o IC apresenta valor limitante num teor de água próximo à capacidade de campo. A interpretação de uma simples avaliação de resistência à penetração feita no campo requer o conhecimento de uma série de atributos do solo e suas inter-relações, principalmente se o objetivo for a tomada de decisão sobre a

necessidade ou não de alguma operação para descompactação. Também, muitas vezes, o solo apresenta valores altos de resistência à penetração com raízes crescendo ao longo de bioporos, formados pela meso e macrofauna e por raízes mortas ([WILLIAMS; WEIL, 2004](#)).

A compactação do solo pode ser considerada como um sintoma decorrente do manejo, o qual pode influenciar a resistência à penetração de maneira diferenciada no perfil. Em sistemas convencionais de preparo, o revolvimento excessivo pode causar compactação subsuperficial, logo abaixo de onde atua o implemento ([MULLER et al., 2001](#)), o que impede o crescimento das raízes em profundidade ([ROSOLEM et al., 1994](#)). Essa condição pode tornar as plantas mais susceptíveis aos veranicos ([FIORIN et al., 1997](#)), ou mesmo causar deficiência de oxigênio em condições de excesso de chuvas ([MARSCHNER, 1995](#)). Contudo, em sistemas de semeadura direta, o solo pode apresentar compactação próxima à superfície ([FERNANDES et al., 1983](#)).

Tendo em vista as dificuldades apresentadas, foram propostas novas abordagens metodológicas na avaliação da qualidade física do solo, tendo-se destacado o intervalo hídrico ótimo (IHO), segundo [Silva et al. \(1994\)](#). Hipoteticamente, os sistemas de manejo que permitam um IHO mais amplo terão menor probabilidade de redução da produtividade das plantas, por deficiência hídrica ([SILVA; KAY, 1997b](#)). [Silva e Kay \(1996\)](#) observaram quedas na taxa de crescimento de milho com a diminuição da amplitude do IHO. Também, o teor de carbono orgânico e a densidade do solo variaram com as práticas de manejo e alteram o IHO ([SILVA; KAY, 1997a](#)). Em solo cultivado e sob mata nativa ([ARAÚJO et al., 2004](#)) e, em pastagens no Cerrado ([LEÃO et al., 2004](#)), bem como em solos sob florestas da Nova Zelândia ([ZOU et al., 2000](#)), observou-se que o IHO é mais sensível às mudanças impostas pelo manejo do solo do que à água disponível, e pode ser utilizado como indicativo da qualidade física do solo. Porém, não se estudou a relação do IHO com a produtividade das culturas estudadas. A avaliação do IHO em sistemas irrigados se justifica em razão do aumento da frequência de irrigação necessária em solo compactado, bem como para sua caracterização.

Um fator que tem limitado a utilização do intervalo hídrico ótimo é a necessidade da determinação da resistência à penetração em laboratório com penetrômetros de bancada estáticos. Esses equipamentos são compostos por sistemas elétrico-eletrônicos complexos, como atuador linear elétrico com motor de passo, sistema para controle de velocidade e deslocamento, célula de carga para registro da força e microcomputador para decodificação e processamento dos dados ([TORMENA et al., 1998](#)). Tais características construtivas apresentam custo elevado, razão pela qual [Sá et al. \(2007\)](#) propuseram um minipenetrômetro dinâmico de bancada, o qual é confiável, preciso e apresenta custos relativamente mais baixos.

O objetivo deste trabalho foi determinar o intervalo hídrico ótimo utilizando-se um minipenetrômetro dinâmico em sistema de semeadura direta e preparo convencional do solo, cultivado com a cultura do feijão em sistema irrigado, num Latossolo Vermelho textura argilosa de Planaltina, DF.

Material e métodos

O trabalho foi conduzido na área experimental da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, em parcelas cultivadas com feijão irrigado, no período seco de 2007, sob sistema de preparo convencional (aração e gradagem) e semeadura direta, em Latossolo Vermelho textura argiloso. A área experimental foi desmatada em 1999, recebendo calcário e adubação com macro e micronutrientes, três cultivos sucessivos de milho, um cultivo de soja, ficando, posteriormente, em pousio. Em setembro de 2006, foi aplicado calcário dolomítico a lanço, sendo incorporado com aração e gradagem. Posteriormente, foi aplicada adubação corretiva de fósforo, potássio e micronutrientes, também incorporada com aração e gradagem. Em dezembro de 2006, foi plantado o milheto, que foi cortado com triton na época do florescimento, deixando a palhada sobre a superfície do solo. O milheto produziu, em média, 10,6 toneladas de matéria seca por hectare. Na área do preparo convencional, a palhada foi removida e o solo foi preparado com uma aração e gradagem. No período seco de 2007 e 2008, cultivou-se o feijão, sob semeadura direta e sob preparo convencional, com irrigação por aspersão. No dia 10 de maio de 2007, foi semeada a cultivar de feijão BRS-Horizonte, com

espaçamento entre linhas de 0,4 m e densidade de semeadura de 10 plantas/metro linear de sulco (250.000 plantas/ha). O solo possui textura argilosa, com 590 g dm^{-3} de argila, 80 g dm^{-3} de silte e 330 g dm^{-3} de areia. Antes do plantio do feijão, o solo apresentava as seguintes características: pH em água (1:2,5) = 6,2; $\text{Al}^{3+} = 0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = 3,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{K}^+ = 33 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{P} = 9 \text{ mg dm}^{-3}$; saturação por bases (V) = 61 %.

A amostragem de solo e raízes do feijão foi realizada em 10/07/2007, por ocasião do florescimento. Em cada parcela, foram abertas trincheiras de 0,80 m de largura por 0,50 m de profundidade, dispostas perpendicularmente à linha de plantio do feijão, onde foram coletadas amostras indeformadas (anéis volumétricos) de 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro. Foi avaliada a porção central das camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Em cada camada, as amostras foram coletadas perpendicularmente à linha de plantio em intervalos regulares de 0,10 m, até os 0,30 m, perfazendo 7 amostras por camada, num total de 35 amostras por trincheira ([Fig. 1](#)). No presente trabalho, a área definida pela profundidade de amostragem e distância perpendicular à linha de plantio foi definida como perfil do solo.

No laboratório, as amostras foram agrupadas por camadas dentro de cada sistema de manejo, saturadas e submetidas às tensões de 0,003; 0,006; 0,010; 0,033; 0,060; 0,100 e 1,500 MPa, em câmaras de pressão com placa porosa. Atingido o equilíbrio, as mesmas foram submetidas ao teste de resistência à penetração, com três repetições por anel ([LEÃO et al., 2004](#)), utilizando-se para tanto, um minipenetrômetro de impacto descrito por [Sá et al. \(2007\)](#). O índice de cone (IC) foi calculado conforme metodologia de [Stolf \(1991\)](#), baseada em procedimento adaptado para o minipenetrômetro dinâmico proposto por [Sá et al. \(2007\)](#).

A determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) seguiu metodologia descrita em [Silva et al. \(1994\)](#). A relação entre IC e conteúdo volumétrico de água (θ) e densidade do solo (D_s) foi ajustada conforme [Busscher \(1990\)](#) pela equação 1 abaixo:

$$\text{IC} = a\theta^b D_s^c \quad (1)$$

Em que: IC é o índice de cone (MPa) e a, b, c são parâmetros de ajuste do modelo.

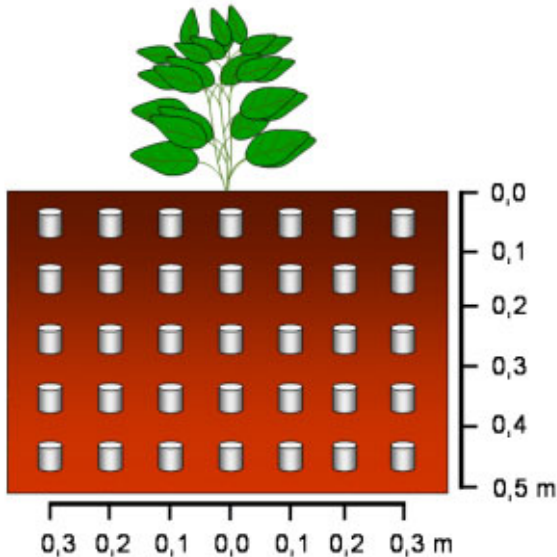


Fig. 1. Esquema de amostragem em trincheira nos sistemas de manejo do solo avaliados, onde cada cilindro representa uma amostra indeformada e sua posição espacial na trincheira.

A variação do conteúdo de água na capacidade de campo ($\Psi = 0,006$ MPa), e no ponto de murcha permanente ($\Psi = 1,5$ MPa) com a Ds foi feita pela equação 2, segundo [Leão et al. \(2005\)](#):

$$\theta = \text{EXP}^{(d + eDs)} \Psi^f \quad (2)$$

A mesma equação foi utilizada para cálculo da variação do limite inferior de irrigação, que, no presente estudo, foi considerado como sendo $\Psi = 0,040$ MPa, conforme sugerido por [Guerra et al. \(2003\)](#). Foi assumido como limitante o valor de IC de 2,0 MPa ([BEUTLER; CENTURION, 2003](#)) e 3,5 MPa ([TORMENA et al., 2007](#)). A variação do conteúdo de água em que o IC atinge o limite crítico (ICc) com a Ds foi definida por:

$$\theta_{ICc} = \frac{ICc}{aDs^c} \frac{1}{b} \quad (3)$$

Em que ICc é o índice de cone crítico de 2,0 ou 3,5 MPa.

A porosidade de aeração mínima considerada para adequada taxa de difusão de oxigênio no solo foi de 10 %, e o conteúdo de água volumétrico correspondente a esta porosidade ($\theta_{PAR10\%}$) foi calculado por meio da equação 4:

$$\theta_{PAR10\%} = 1 - \frac{Ds}{Dp} \quad 0,1 \quad (4)$$

Como a Ds é a única variável independente nos modelos, o IHO foi definido em seu limite superior pelo conteúdo de água na qual a porosidade de aeração atinge 10 % ou pelo θ_{CC} e, no seu limite inferior, pelo conteúdo de água em que o IC atinge 2,0 ou 3,5 MPa ou pelo θ_{PMP} . Foi utilizado para ajuste das equações o pacote estatístico SAS ([SAS INSTITUTE, 2000](#)), com base no algoritmo relatado por [Leão et al. \(2005\)](#). No presente estudo, por se tratar de cultura irrigada, a densidade na qual o IC crítico ocorre em conteúdo de água igual ao limite inferior de irrigação foi considerado como referência para a tomada de decisão sobre a necessidade de operações descompactadoras do solo.

Os valores de Ds e IC na capacidade de campo ($\Psi = 0,006$ MPa) obtidos em cada uma das posições espaciais nos perfis de solo ([Fig. 1](#)) foram utilizados para a confecção dos mapas dessas variáveis no perfil do solo, pelo método de interpolação do inverso da distância. Para tanto, foi utilizado o aplicativo Arc-View v.3.2, conforme procedimentos descritos em [Shiratsuchi et al. \(2005\)](#).

A produtividade de grãos foi avaliada na frente de cada perfil, colhendo-se quatro fileiras de 1,5 m de comprimento por 0,40 m de largura, com área

útil de 2,4 m². A concentração de raízes foi avaliada pela relação entre a massa de raízes (g) e a massa de solo seco (g), utilizando-se o procedimento descrito por [Kanno et al. \(1999\)](#).

Resultados e discussão

A distribuição estatística das variáveis utilizadas para ajuste dos modelos de resistência à penetração e retenção de água é apresentada na Tabela 1. As amplitudes, bem como os valores médios determinados para IC, foram mais elevados do que os observados por [Tormena et al. \(1999\)](#) para um Latossolo Vermelho férrico textura muito argilosa de Guaíra, SP, e por [Leão \(2002\)](#) para um Latossolo Vermelho textura argilosa de Campo Grande, MS. Porém, estão próximos aos observados por [Tormena et al. \(2007\)](#) para um Latossolo Vermelho distroférico textura muito argilosa de Campo Mourão, PR. Os valores de θ e Ds observados no presente estudo estão próximos aos observados por esses autores.

Tabela 1. Distribuição estatística das variáveis físicas do solo, densidade do solo (Ds), conteúdo volumétrico de água (θ) e índice de cone (IC) utilizadas nos ajustes dos modelos.

Variável	N	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo
Ds	70	1,092	0,090	0,946	1,338
θ	70	0,326	0,062	0,244	0,462
IC	70	2,611	2,191	0,503	11,377

N: número de dados utilizados para ajuste dos modelos.

A curva de resistência à penetração ajustada no presente estudo apresentou R² de 0,92 e todos os coeficientes significativos ([Tabela 2](#)), uma vez que o intervalo de confiança para os mesmos não incluiu o valor zero ([GLANTZ; SLINKER, 1990](#); [LEÃO, 2002](#)). Esse valor de R² é próximo ao encontrado por outros autores que utilizaram o mesmo modelo, como 0,87 a 0,92 ([BUSSCHER, 1990](#)); 0,88 (TORMENA et al., 1999); 0,83 ([LEÃO et al., 2004](#)).

Com relação à curva de retenção de água no solo (Tabela 2), o modelo ajustado apresentou R^2 de 0,76, inferior ao valor de 0,91 observado por [Tormena et al. \(2007\)](#) para o mesmo modelo. Provavelmente, isso se deve ao fato de terem sido utilizadas 7 tensões para ajuste da curva no presente estudo, enquanto os autores utilizaram 11 tensões, o que pode ter contribuído para um ajuste mais preciso. Entretanto, semelhante ao observado pelos autores, os parâmetros do modelo foram significativos, uma vez que seus respectivos intervalos de confiança não incluem o valor zero.

Observa-se, na [Fig. 2](#), que, com o aumento na D_s , ocorre um ligeiro aumento nos valores de θ correspondentes à capacidade de campo, limite inferior de irrigação e ao ponto de murcha. Porém, as retas são aproximadamente paralelas, apresentando um ligeiro distanciamento entre si com o aumento da D_s do solo ([Fig. 2 A](#)). Com relação à porosidade de aeração, esta diminui em função do aumento na D_s do solo, conseqüência da redução no volume de macroporos, que são poros maiores do que 50 mm, correspondentes à tensão 0,006 MPa ([OLIVEIRA et al., 2004](#)). Para o solo estudado, a macroporosidade é reduzida à zero na densidade 1,26 g cm⁻³, quando a reta da porosidade de aeração intercepta a capacidade de campo ([Fig. 2A](#)).

Tabela 2. Coeficientes resultantes do ajuste não linear das curvas de resistência do solo à penetração ($IC = a\theta^b D_s^c$) e retenção de água no solo ($\theta = \text{EXP}^{(d+eD_s)} \Psi^f$).

Parâmetro	Valor	Erro padrão	Intervalo de confiança	
			Inferior	Superior
..... $IC = a\theta^b D_s^c$			$R^2 = 0,92$	
a	0,0161	0,0063	0,0036	0,0285
b	-3,4492	0,2854	-4,0189	-2,8794
c	9,8648	0,3990	9,0684	10,6612
..... $\theta = \text{EXP}^{(d+eD_s)} \Psi^f$			$R^2 = 0,76$	
d	-2,2786	0,1436	-2,5653	-1,9919
e	0,7666	0,1247	0,5176	1,0155
f	-0,0904	0,0067	-0,1038	-0,0770

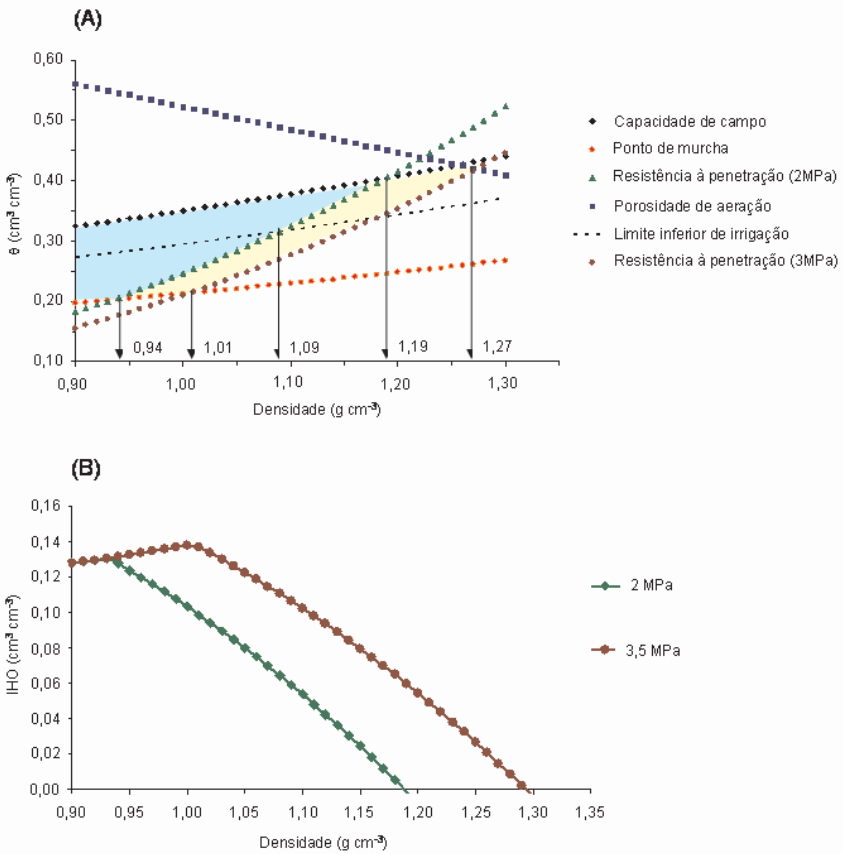


Fig. 2. Variação do conteúdo de água com a densidade do solo dos limites críticos na capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade de aeração, resistência à penetração e limite inferior de irrigação. (A) A área em cor azul representa o IHO considerando IC de 2,0 MPa, e a soma das áreas em amarelo e azul representa o IHO considerando IC de 3,5 MPa. (B) Variação do IHO considerando-se IC limitante a 2,0 e 3,5 MPa em função da densidade.

Quando se considera o valor de IC de 2,0 MPa como limitante, observa-se que esta passa a ocorrer em conteúdos de água mais elevados do que o ponto de murcha a partir da densidade $0,94 \text{ g cm}^{-3}$, quando as duas curvas se interceptam ([Fig. 2 A](#)). De acordo com [Leão et al. \(2004\)](#), a partir dessa densidade, precauções com relação ao manejo do solo devem ser tomadas. Assim, para o solo em questão, culturas sensíveis ao limite de 2,0 MPa de resistência à penetração de raízes começariam a sentir o efeito da compactação do solo a partir dessa densidade, pois essa limitação já ocorreria dentro do limite considerado como água disponível, que compreende a água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Entretanto, considerando que os sistemas estudados são irrigados, no presente estudo seria esperado efeito negativo na produtividade em densidades superiores a $1,09 \text{ g cm}^{-3}$, onde a curva de resistência a 2,0 MPa intercepta o limite inferior de irrigação. Para esse valor de resistência à penetração, a densidade limitante seria $1,19 \text{ g cm}^{-3}$, valor onde a curva de resistência intercepta a reta da capacidade de campo, sendo o intervalo hídrico ótimo, neste caso, a área em azul ([Fig. 2 A](#)).

Em trabalhos recentes, o limite de 2,0 MPa tem sido questionado como resistência à penetração limitante para a maioria das culturas, tendo sido propostos outros, como de 3 MPa para soja ([KLEIN; CÂMARA, 2007](#)) e 3,5 MPa para trigo e soja ([TORMENA et al., 2007](#)). Assim, considerando-se o valor de 3,5 MPa como limitante, para o solo estudado, o intervalo hídrico ótimo passa a ser representado pela soma das áreas hachuradas azul e amarela ([Fig. 2 A](#)), tendo como limite inferior o ponto de murcha permanente em densidades inferiores a $1,01 \text{ g cm}^{-3}$. A partir desse valor, a resistência à penetração passa a ser limitante em sistemas de sequeiro até a Ds de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$, a partir da qual passa a limitar sistemas irrigados, sendo o valor de $1,27 \text{ g cm}^{-3}$ nesse caso considerado como Ds crítica, onde a curva de resistência à penetração de 3,5 MPa intercepta a reta de porosidade de aeração.

A variação do IHO em função da densidade do solo, considerando-se a resistência limitante de 2,0 MPa (área em azul) e 3,5 MPa (áreas azul + amarela) da [Fig. 2 A](#), pode ser melhor visualizada na [Fig. 2 B](#). Em ambos os

casos, o IHO aumenta ligeiramente com o aumento da D_s até o ponto onde a curva de resistência intercepta a reta do ponto de murcha, o que ocorre na D_s 0,95 g cm⁻³ e 1,01 g cm⁻³, respectivamente para resistência limitante a 2,0 e 3,5 MPa. Esse aumento do IHO em função da D_s ocorre em virtude do distanciamento das retas de capacidade de campo e ponto de murcha, que são aproximadamente paralelas. A partir dessa D_s , o IHO sofre acentuada redução até chegar a zero nas respectivas D_s limitante.

Os valores de D_s limitante encontrados no presente estudo estão abaixo dos valores relatados por outros autores. Considerando a resistência à penetração limitante de 2,0 MPa, [Collares et al. \(2006\)](#) determinaram um valor de 1,75 g cm⁻³ para o horizonte superficial de um Argissolo com textura arenosa (89 g kg⁻¹ de argila). [Beutler et al. \(2004\)](#) determinaram uma D_s crítica de 1,62 g cm⁻³ para um Latossolo textura média (270 g kg⁻¹ de argila), e [Leão et al. \(2004\)](#) o valor de 1,44 g cm⁻³ para um Latossolo Vermelho distrófico com 399 g kg⁻¹ de argila, que se encontra próximo ao limite entre textura média e argilosa, que é de 350 g kg⁻¹ de argila. Entretanto, a D_s crítica varia em função da textura ([KLEIN; CÂMARA, 2007](#)), apresentando valores mais elevados na medida em que o teor de areia aumenta. Mesmo assim, os valores encontrados no presente estudo estão abaixo dos que foram relatados para solos de classe textural argilosa e muito argilosa, como os valores de 1,26 g cm⁻³ para um Latossolo Vermelho férrico com 800 g kg⁻¹ de argila ([TORMENA et al., 1999](#)) ou 1,33 g cm⁻³ para um Latossolo Vermelho férrico com 610 g kg⁻¹ de argila ([KLEIN; CÂMARA, 2007](#)). Considerando a resistência à penetração limitante de 3,5 MPa, o valor determinado no presente estudo está abaixo do valor 1,30 g cm⁻³ observado por [Tormena et al. \(2007\)](#) para um Latossolo Vermelho férrico com 800 g kg⁻¹ de argila.

Com relação à distribuição das variáveis físico-hídricas no perfil do solo nos dois sistemas avaliados, constatou-se que, no sistema de semeadura direta, houve uma tendência de diminuição da densidade e no índice de cone com a profundidade do solo ([Tabela 3](#)). O IHO 2,0 MPa apresentou tendência de aumentar com a profundidade nos dois sistemas, tendência essa que não foi tão acentuada para o IHO 3,5 MPa. De maneira geral, os valores de D_s e IC

foram mais elevados no sistema de semeadura direta, sobretudo nas camadas superficiais, concordando com observações de [Tormena et al. \(1999, 2007\)](#). Quanto ao IHO, tanto a 2,0 MPa quanto a 3,5 MPa, o sistema de semeadura direta apresentou valores substancialmente mais baixos do que o sistema de preparo convencional em todas as profundidades (Tabela 3). Isso pode ser atribuído ao revolvimento do solo no sistema de preparo convencional, o que também foi observado em menor intensidade em sistema de semeadura direta com escarificação, quando comparado ao sistema de semeadura direta sem escarificação ([KLEIN; CÂMARA, 2007](#)).

Tabela 3. Valores médios e erro padrão observados para densidade do solo (Ds), intervalo hídrico ótimo (IHO) e índice de cone na capacidade de campo (IC), em cada sistema de manejo do solo e camada estudados.

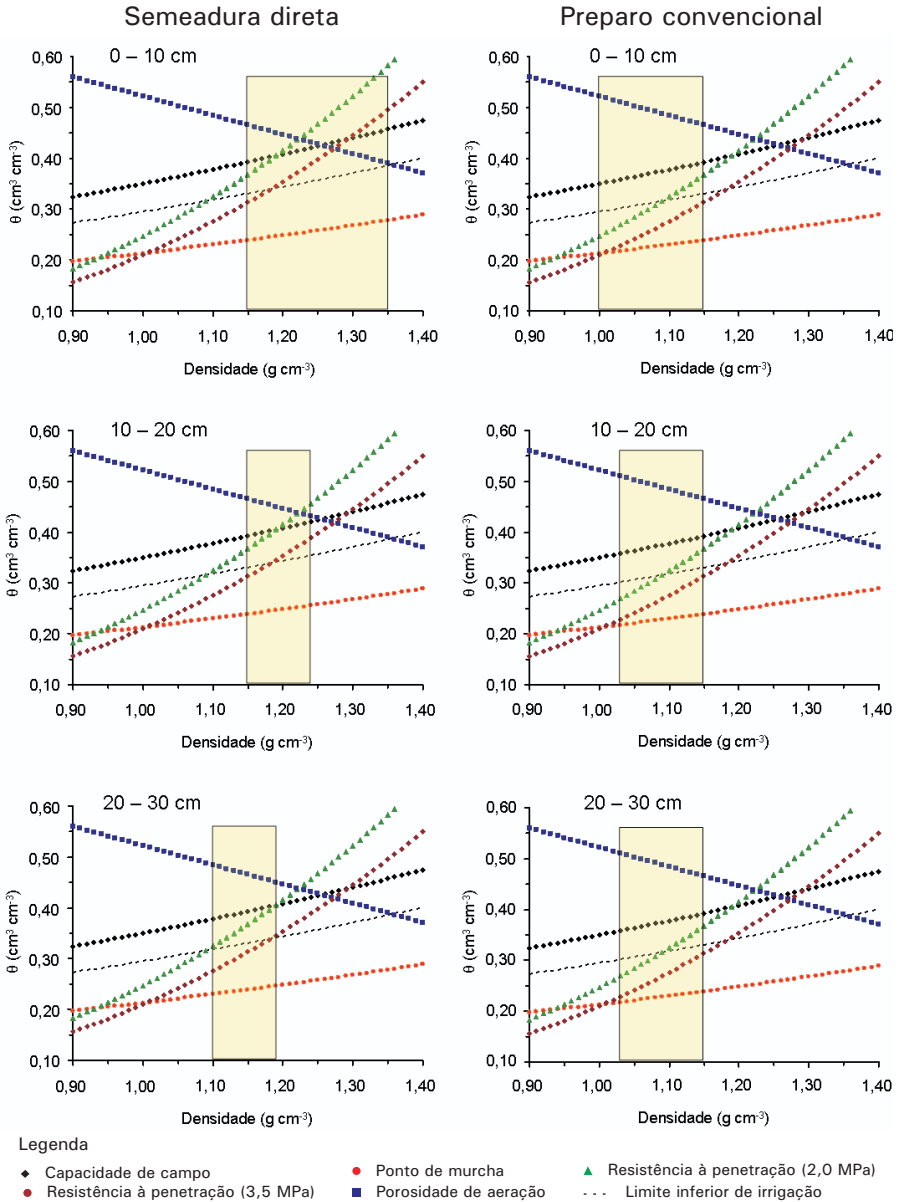
Camada	Ds		IHO (2,0 MPa)		IHO (3,5 MPa)		IC	
	Média	Erro	Média	Erro	Média	Erro	Média	Erro
..... Semeadura direta								
0 - 10	1,248	0,102	0,008	0,024	0,077	0,050	2,947	1,400
10 - 20	1,194	0,047	0,008	0,014	0,084	0,051	2,102	0,548
20 - 30	1,147	0,045	0,027	0,023	0,075	0,056	1,602	0,436
30 - 40	1,072	0,022	0,068	0,012	0,077	0,053	0,991	0,148
40 - 50	1,045	0,028	0,082	0,014	0,094	0,047	0,831	0,168
..... Preparo convencional.....								
0 - 10	1,075	0,073	0,065	0,038	0,105	0,031	1,057	0,487
10 - 20	1,087	0,059	0,059	0,033	0,123	0,018	1,128	0,460
20 - 30	1,075	0,042	0,066	0,023	0,132	0,007	1,027	0,297
30 - 40	0,980	0,023	0,112	0,010	0,120	0,020	0,522	0,087
40 - 50	0,993	0,017	0,106	0,007	0,119	0,030	0,574	0,068

Essas tendências podem ser melhor visualizadas na [Fig. 3](#), onde são apresentados os diagramas de IHO para cada profundidade em cada sistema de manejo do solo. Se considerarmos 2,0 MPa como resistência limitante, para o sistema de semeadura direta, as camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m

apresentariam limitação acentuada ao crescimento de raízes, quando comparado ao sistema convencional, uma vez que, no primeiro, a D_s estaria acima da D_s crítica na maior parte dessas camadas. Essas limitações seriam menores na camada 0,20-0,30 m no sistema de plantio direto e inexistentes abaixo de 0,30 m, considerando-se que o sistema é irrigado. Para sistemas de sequeiro nessas condições, ainda teríamos algumas limitações. Se considerarmos 3,5 MPa como limitante, as restrições ocorreriam na camada 0,00-0,10 m no sistema de semeadura direta.

A distribuição espacial da densidade do solo nos dois sistemas pode ser observada na [Fig. 4 A](#). No sistema de semeadura direta, os valores mais elevados foram observados entre 0,1 m e 0,2 m da linha de plantio na camada 0,00–0,10 m, acima de $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, o que seria a densidade crítica quando se considera 3,5 MPa como resistência à penetração limitante ([Fig. 2](#)). Na maior parte dessa camada, foi observada densidade entre $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, crítica quando se considera a resistência à penetração limitante de 2,0 MPa. Se esse valor for considerado como referência, a cultura apresentaria limitações de crescimento até a profundidade de 0,30 m no sistema de semeadura direta. No sistema de preparo convencional, os valores de densidade foram substancialmente mais baixos, não caracterizando limitações quando se considera 2,0 MPa como limite de resistência à penetração.

Na [Fig. 4B](#), pode ser observada a distribuição espacial no perfil do solo da resistência à penetração expressa pelo índice de cone corrigido para conteúdo de água volumétrico equivalente à capacidade de campo, condição em que o crescimento e produtividade vegetal seriam comprometidos ([IMHOFF et al., 2000](#); [LEÃO et al., 2004](#)). Nesse caso, no sistema de semeadura direta, a maior parte da camada 0,00–0,20 m apresentou resistência à penetração entre 2,00 MPa e 3,50 MPa, considerado como limitante por diversos autores ([BEUTLER et al., 2004](#); [COLLARES et al., 2006](#); [KLEIN; CÂMARA, 2007](#)). Abaixo dessa camada, ocorre um decréscimo nos valores de resistência. No sistema de preparo convencional, todo o perfil do solo apresenta valores de resistência à penetração abaixo de 2,0 MPa.



Continua...

Fig. 3. Diagramas de intervalo hídrico ótimo para os sistemas de sementeira direta e preparo convencional, onde as barras amarelas representam o intervalo de confiança para a densidade do solo observada em cada camada do Latossolo Vermelho estudado.

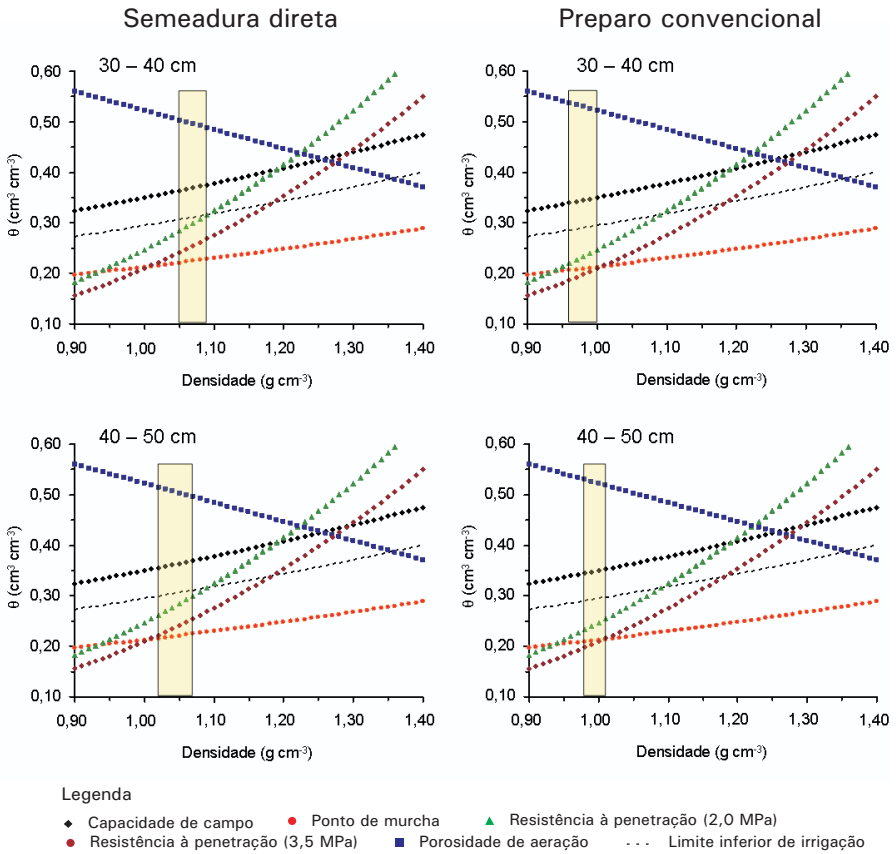


Fig. 3. Continuação.

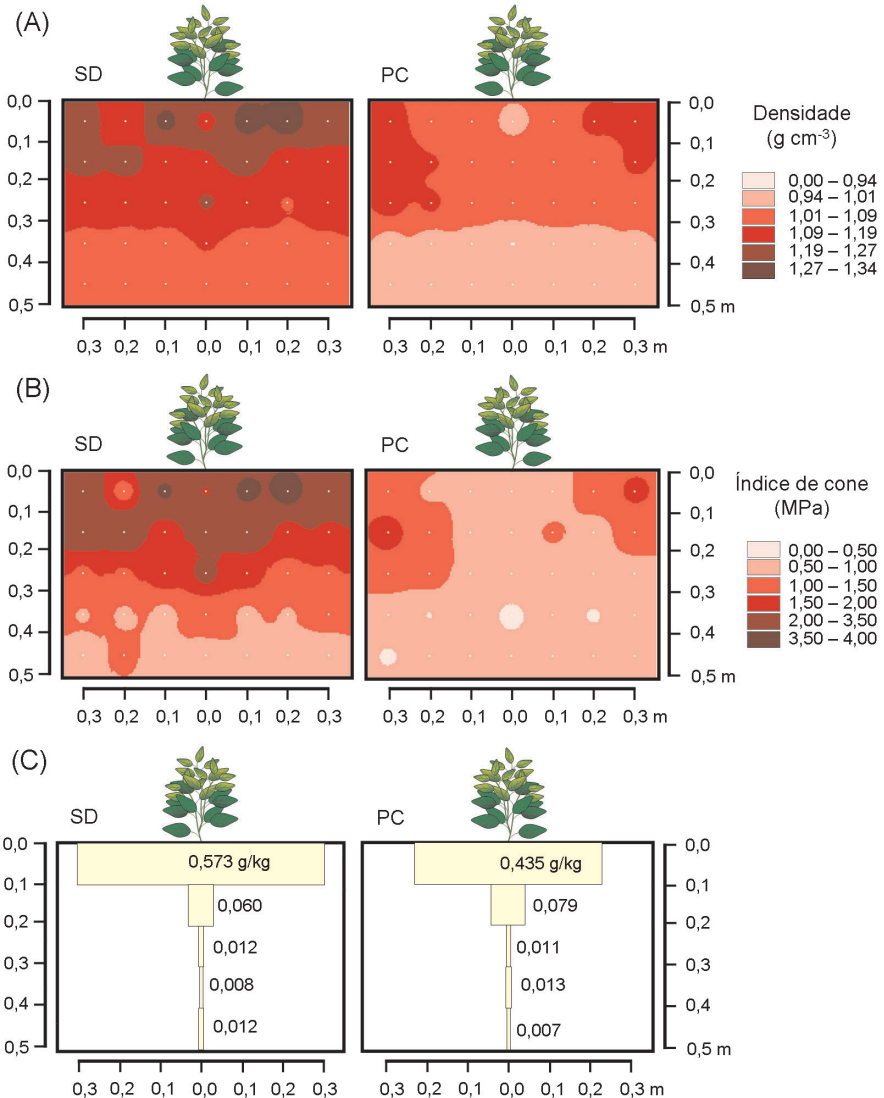


Fig. 4. Distribuição espacial no perfil do solo de: (A) Densidade (g cm^{-3}); (B) Índice de cone (MPa) corrigido para conteúdo volumétrico de água na tensão 0,006 MPa equivalente à capacidade de campo; (C) Concentração de raízes (g kg^{-1}) nas camadas do solo, em sistemas de semeadura direta e preparo convencional num Latossolo Vermelho argiloso.

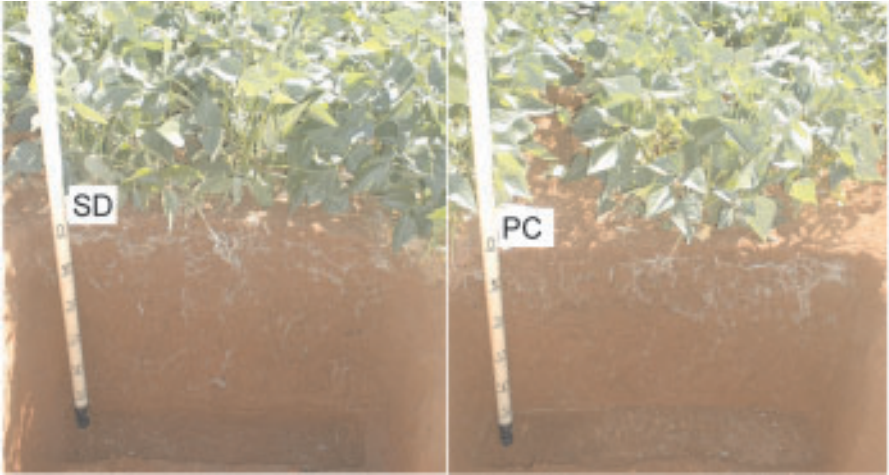


Fig. 5. Distribuição espacial das raízes num Latossolo Vermelho do Cerrado sob sistema de semeadura direta (SD) e preparo convencional (PC).

Desse modo, seria de se esperar produtividade mais baixa em sistema de semeadura direta, o que não foi verificado, uma vez que a produtividade nesse sistema foi em média 3.428 kg ha^{-1} , substancialmente mais elevada do que no sistema de preparo convencional, que foi de 2.734 kg ha^{-1} . O peso total das raízes, de todas as camadas avaliadas, foi de $0,665 \text{ g kg}^{-1}$ no sistema de semeadura direta e $0,545 \text{ g kg}^{-1}$ no preparo convencional. Nos dois sistemas, a concentração das raízes foi mais elevada na camada $0,00\text{-}0,10 \text{ m}$, com $0,573 \text{ g kg}^{-1}$ para SD e $0,435 \text{ g kg}^{-1}$ para PC (Fig. 4C). Nas outras camadas, o peso das raízes foi semelhante para os dois sistemas de plantio, embora na Fig. 5 se possa notar uma tendência de melhor distribuição radicular no perfil do solo sob semeadura direta. O feijoeiro tem um sistema radicular pouco desenvolvido e explora um pequeno volume de solo (INFORZATO; MYASAKA, 1963; ROSOLEM, 1987), resultando, inclusive, em menor aproveitamento dos fertilizantes fosfatados aplicados a lanço (MIRANDA et. al., 2002). Conseqüentemente, o seu crescimento radicular no perfil do solo poderia não refletir adequadamente a influencia das condições decorrentes dos sistemas de plantio. Dessa forma, é possível inferir que os valores de densidade e índice de cone determinados no presente estudo não afetaram o crescimento e a produtividade do feijoeiro. Embora, para essa

cultura, ainda não existam muitas informações com relação ao valor de resistência à penetração limitante, o valor 2,0 MPa, tido como restritivo ao crescimento de raízes da maioria das culturas, tem sido utilizado, como por exemplo, no trabalho de [Collares et al. \(2006\)](#). Porém, o mesmo tem sido recentemente questionado para outras culturas. [Klein e Câmara \(2007\)](#) constataram que, para a cultura da soja, esse valor não se mostrou impeditivo ao desenvolvimento, tendo sido proposto 3,0 MPa. Beutler e Centurion (2003) constataram que a produção de grãos de soja foi reduzida em valores de IC entre 1,66 MPa e 3,05 MPa, dependendo da cultivar estudada. [Tormena et al. \(2007\)](#) utilizaram como limitante o valor de 3,5 MPa, baseado em estudo de [Ehlers et al. \(1983\)](#). Em pastagens, tem sido adotado o valor de 3,0 MPa ([LEÃO et al., 2004](#)). Assim, mais pesquisas devem ser feitas no intuito de se determinar valores de resistência à penetração limitante não apenas para a cultura do feijão, mas também para as demais culturas.

Com relação à densidade crítica, uma provável explicação para as diferenças entre os valores observados no presente estudo em relação à literatura e, para a aparente discrepância com relação à produtividade, pode ser atribuída ao fato de que os autores citados utilizaram penetrômetros de bancada estáticos para determinação da resistência à penetração, enquanto, nessa pesquisa, foi utilizado um minipenetrômetro dinâmico. De acordo com [Stolf \(1991\)](#) e [Beutler et al. \(2007\)](#), penetrômetros dinâmicos ou de impacto tendem a determinar valores de índice de cone mais elevados do que penetrômetros estáticos para solos de textura argilosa ou muito argilosa. Embora os autores tenham utilizado penetrômetros dinâmicos para uso em campo – modelo Planalsucar-Stolf (STOLF, 1991) – é provável que essa tendência se repita com minipenetrômetros dinâmicos, pelo fato de terem sido observados valores de resistência à penetração limitantes para valores de densidade considerados baixos em outros estudos conduzidos em solos de classe textural semelhante ([TORMENA et al., 1999](#); [KLEIN; CÂMARA, 2007](#); [TORMENA et al., 2007](#)). Isso sugere que mais estudos devem ser feitos no intuito de se verificar esse fato e também de se definir valores de resistência à penetração limitante também para penetrômetros dinâmicos, uma vez que estes apresentam custo relativamente mais baixo do que os penetrômetros estáticos, o que justifica o seu uso conforme relatado por [Sá et al. \(2007\)](#).

Conclusões

O sistema de semeadura direta estudado apresenta densidade e resistência à penetração mais elevada, sobretudo nas camadas superficiais do solo do que o sistema de preparo convencional.

A resistência mecânica do solo à penetração de 2,0 MPa determinada com minipenetrômetro dinâmico não se mostrou restritiva ao desenvolvimento e à produtividade do feijoeiro irrigado.

Mais estudos são necessários no intuito de se verificar a relação entre a produtividade e a densidade crítica obtida a partir da resistência à penetração determinada com minipenetrômetros dinâmicos.

Agradecimentos

Aos acadêmicos: Raul do Vale Fonseca - Física (USP – SP) e Gustavo Borges Cornélio - Agronomia (UPIS – DF) pelo auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Referências

- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 849-856, 2003.
- 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**, v. 39, p. 575-580, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 146-151, 2007.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v. 3, p. 261-275, 1983.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSOM, R. D.; MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo de solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 329-333, 1983.

FIORIN, J. E.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A. Armazenamento de água no solo e produtividade da cultura do milho em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 249-255, 1997.

GLANTZ, S. A.; SLINKER, B. K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw-Hill, 1990. 770 p.

GUERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; ROCHA, O. C.; EVANGELISTA, W. **Necessidade hídrica no cultivo de feijão, trigo milho e arroz sob irrigação no Bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003, 15 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 100).

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

INFORZATO, R.; MYASAKA, S. Sistema radicular do feijoeiro em dois solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 477-482, 1963.

KANNO, T.; MACEDO, M. C. M.; EUCLIDES, V. P. B.; BONO, J. A.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; ROCHA, M. C.; BERETTA, L. G. R. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savannas. **Grassland Science**, v. 45, p. 9-14, 1999.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 221-227, 2007.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

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**, v. 28, p. 415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.

MIRANDA, L. N. de; AZEVEDO, J. A. de; MIRANDA, J. C. C. de; GOMES, A. C. Calibração de métodos de análise de fósforo e resposta do feijão ao fósforo no sulco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1621-1627, 2002.

MULLER, M. M.; CECCON, G.; ROSOLEM, C. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 531-538, 2001.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; RESCK, D. V.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

ROSOLEM, C. A. **Nutrição e adubação do feijoeiro**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fosfato, 1987. 93 p. (Boletim Técnico).

ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M. H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 491-497, 1994.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G.; RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FRANZ, C. A. B. Minipenetrômetro dinâmico para determinação da resistência à penetração em amostras de solo indeformadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1659-1662, nov. 2007.

SAS INSTITUTE. **SAS software**: user's guide: version 8.2. Cary, 2000. 291 p.

SHIRATSUCHI, L. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S. **Manual de utilização das principais funções do programa computacional Arc View 3.2 no apoio à agricultura de precisão**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 47 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 138).

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 877-883, 1997a.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 884-888, 1997b.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v. 184, p. 323-329, 1996.

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

SPIVEY, L. D.; BUSSCHER, W. J.; CAMPBELL, R. B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils. **Soil and Tillage Research**, v. 6, p. 351-363, 1986.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

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**, v. 22, p. 573-581, 1998.

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

UNGER, P.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1403-1409, 2004.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 947-958, 2000.