

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DO FEIJÃO

LAURA FERNANDA SIMÕES DA SILVA¹; MARA DE ANDRADE MARINHO²;
RAQUEL STUCCHI BOSCHI³ E EDSON EIJI MATSURA²

¹Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural / CCA / UFSCar Rodovia Anhanguera, km 174 – SP-330 - Araras - SP - Brasil - CEP: 13600-970, email: laurafsimoes@yahoo.com

²Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Avenida Candido Rondon, n 501, Barão Geraldo, Campinas – SP, Brasil - CEP 13083-875, Brasil, email: mara.feagri@gmail.com; matsura@feagri.unicamp.br

³Secretaria de Gestão Ambiental e Sustentabilidade/ UFSCar Rod. Washington Luis, km 235 - São Carlos - SP - Brasil - CEP:13565-905, Brasil, email: raboschi@gmail.com

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi compreender o efeito de dois sistemas de produção agrícola, com e sem irrigação, sobre atributos físicos do solo e sobre o rendimento do feijão, utilizando o conceito de intervalo hídrico ótimo (IHO). A pesquisa foi conduzida em parcelas experimentais situadas na região de Campinas, cultivadas com feijão sob Sistema Plantio Direto (SPD) e Sistema Convencional com Grade (SC). Para determinação do IHO, os atributos densidade do solo (D_s), curva de retenção de água (CRA), curva de resistência do solo à penetração (RP) e porosidade de aeração foram determinados para camada do solo 0-0,20 m, a partir de amostras indeformadas extraídas de diferentes locais, de modo a representar uma faixa ampla de variação da densidade do solo. O monitoramento da qualidade do solo e do desempenho dos sistemas de produção foi efetuado com base em dados de: D_s , umidade volumétrica e produtividade da cultura de feijão, irrigado e não irrigado para uma safra agrícola de inverno. Os limites do IHO foram definidos pelo $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ (limite superior) e pelo $\theta_{-1,5\text{MPa}}$ (limite inferior), para os valores de D_s até $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$. A partir deste valor de D_s , o limite inferior passa a ser definido pelo θ_{RP} . O período de dias em que o solo permaneceu fora das condições ideais de umidade estabelecidas pelo IHO foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade do feijoeiro nos tratamentos não irrigados, com vantagem para o SPD. O IHO representa um importante indicador na avaliação da qualidade estrutural do solo submetido a diferentes sistemas de manejo. Ainda, o IHO pode ser utilizado no monitoramento da qualidade física do solo associado a uma maior ou menor frequência de ocorrência da umidade do solo fora dos limites estabelecido pelo mesmo.

Palavras-chave: manejo de irrigação, densidade do solo, sistema plantio direto, sistema convencional, qualidade física.

SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A.; BOSCHI, R. S.; MATSURA, E. E.
LEAST LIMITING WATER RANGE TO ASSESS BEAN MANAGEMENT
SYSTEMS AND YIELD

2 ABSTRACT

The objective of this study was to understand the effect of two management systems, with and without irrigation, on soil physical properties and bean yield, using the concept of least limiting water range (LLWR). The study was conducted in experimental plots located in Campinas, planted with beans under no tillage system (NTS) and conventional system (SC). To determine the LLWR, bulk density (BD), water retention curve (WRC), soil resistance to penetration curve (SRPC) and macroporosity were determined for the layer 0-0.20 m, from undisturbed soil samples extracted from different locations to represent a wide range of bulk density. Monitoring of soil quality and performance of production systems was made based on the following data: BD, water content and productivity of bean crops, irrigated and non-irrigated, for a harvest of winter. The $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ determined the upper limit of the LLWR and $\theta_{-1,5\text{MPa}}$ the lower limit to BD equal to 1.2 kg dm^{-3} from which the lower limit is set by SRPC. The period of days that the soil remained outside the ideal conditions of moisture established by the LLWR was enough to differentially affect bean yield in non-irrigated treatments, with better results for NTS. The LLWR is an important indicator for assessing the soil structural quality under different management systems. Additionally, the LLWR can be used to monitor the soil physical quality associated with a higher or lower frequency of occurrence of soil moisture outside the limits set by LLWR.

Keywords: irrigation management, bulk density, direct drilling system, conventional system, soil physical quality.

3 INTRODUÇÃO

Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nos atributos físicos do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Dentre os atributos físicos, a estrutura é uma característica sensível ao manejo, cuja funcionalidade pode ser avaliada por meio de parâmetros relacionados com sua forma, estabilidade e resiliência (KAY; RASIAH; PERFECT, 1994). A estrutura do solo é responsável por inúmeros processos, incluindo o transporte e armazenamento de matéria e energia e o suporte para o crescimento de plantas e micro-organismos (DEXTER, 2002; YOUNG; CRAWFORD; RAPPOLDT, 2001). O uso intensivo do solo altera negativamente a estrutura, ocasionando degradação da qualidade multifuncional do solo. O declínio da estrutura do solo cada vez mais é visto como uma forma de degradação do solo (BRONICK; LAL, 2005).

O espaço aéreo, a retenção, a disponibilidade de água e a resistência mecânica do solo estão diretamente associados à condição estrutural do solo e, por consequência, associados ao estado atual de um solo submetido a um dado sistema de manejo. As modificações nestas propriedades ocasionadas pelo manejo inadequado resultam em decréscimo de produção (RADFORD et al., 2001; BEUTLER et al., 2008), aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo do solo (CANILLAS; SALOKHE, 2002).

Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e/ou sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Acerca de indicadores de qualidade física do solo para produção de culturas, Singer e Ewing (2000) elencam os atributos resistência do solo à deformação, porosidade de aeração e capacidade de água disponível. O efeito integrado dos

componentes água e ar do solo e resistência do solo ao crescimento das plantas pode ser descrita por um único parâmetro, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (LETEY, 1985; TOPP et al., 1994; SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; BENJAMIN; NIELSEN; VIGIL, 2003; VERMA; SHARMA, 2008).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é definido como sendo o volume de água retido no solo no qual as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração são mínimas. O IHO tem se mostrado uma ferramenta útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade do sistema agrícola (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; SILVA; KAY, 1996; SILVA; KAY, 1997; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; SHARMA; BHUSHAN, 2001; IMHOFF, SILVA E TORMENA, 2000; LEAO, 2002; ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; BEUTLER et al., 2004; GUIMARÃES et al., 2013; GUBIANI et al., 2013; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; LIMA et al., 2015). Araujo et al. (2004) compararam o IHO de um solo sob mata nativa e de um solo cultivado e constataram que no solo cultivado, o aumento da densidade do solo (Ds) condicionou redução do valor do IHO decorrente do efeito simultâneo sobre a porosidade de aeração (PA) e sobre a resistência do solo à penetração (RP). O decréscimo do IHO caracteriza a perda da qualidade física do solo, considerando a maior probabilidade de as culturas serem expostas a estresses físicos. Silva e Kay (1996) verificaram que o crescimento de milho foi correlacionado positivamente com o IHO e negativamente com a frequência de dias que o conteúdo de água no solo ficou fora dos limites do IHO. Como ressaltam Silva e Mielniczuk (1998), diferentes sistemas de manejo condicionam diferentes condições de equilíbrio físico do solo, podendo afetar desfavoravelmente a conservação do solo e a produtividade das culturas.

Em função do exposto, o objetivo deste trabalho foi compreender o efeito de dois sistemas de produção agrícola, plantio direto e convencional, com e sem irrigação, sobre atributos físicos do solo e sobre a produção do feijoeiro, utilizando o conceito de intervalo hídrico ótimo (IHO).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em um Campo Experimental da Universidade Estadual de Campinas, situado no município de Campinas (SP), com coordenadas geográficas 22° 48'57" de latitude sul e 47°03'33" de longitude oeste, e altitude média local de 640 m. Nessa região, o tipo climático dominante, segundo a classificação de Köppen, é uma transição entre os tipos Cwa e Cfa, que significa subtropical úmido mesotérmico, com médias anuais de temperatura e precipitação de 22,4 °C e 1382 mm, respectivamente (CEPAGRI, 2017). O solo da área experimental foi identificado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Rhodic Hapludox) (OLIVEIRA; CAMARGO; CALDERANO FILHO, 1999).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os seguintes tratamentos: sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); sistema plantio direto irrigado (SPDI); sistema convencional não irrigado (SCNI) e sistema convencional irrigado (SCI). Cada parcela experimental, num total de quatro, possui área útil de 600 m², sendo 30 m de comprimento por 20 m de largura, e declividade de 0,9 m m⁻¹.

Para estimar o IHO, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, em anéis volumétricos do tipo Köpeck com aproximadamente 50 mm de altura por 50 mm de diâmetro interno, na camada de 0-0,20 m de profundidade, em diferentes condições de uso e manejo. A amplitude de variação de densidade foi atingida pela estratégia de, na coleta das

amostras, as quais totalizaram 40 anéis, extrair os anéis dos mais variados locais, dentro do mesmo tipo de solo. No laboratório, depois do preparo de rotina, as amostras foram divididas em 4 grupos de 10 amostras e submetidas aos seguintes potenciais: -0,002; -0,004; -0,006; -0,008; -0,01; -0,03; -0,05; -0,07; -0,1 e -1,5 MPa para determinação da curva de retenção, segundo o procedimento descrito em Silva et al. (1994). Após atingir o equilíbrio em cada potencial, as amostras foram pesadas; em seguida, foi feita a determinação da resistência do solo à penetração (RP), utilizando o penetrômetro eletrônico descrito por Tormena et al. (1998). Após a determinação da RP, as amostras foram levadas para estufa para secagem a 105° C por 24 horas, determinando-se o conteúdo de água em base gravimétrica (θ_g , kg kg⁻¹) e a densidade do solo (D_s , kg m⁻³), conforme Embrapa (1997). A umidade volumétrica (θ_v , m³ m⁻³) foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade relativa do solo ($\rho_{\text{solo}}/\rho_{\text{água}}$).

Para determinação do IHO foram descritas matematicamente a curva de resistência do solo à penetração (CRS) e a curva de retenção de água (CRA). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não linear, proposto por Busscher (1990), e utilizado com êxito por Silva, Kay e Perfect (1994) e Leao (2002). A CRS é utilizada para determinar o conteúdo de água (θ_{RP}) no solo em que a resistência do solo à penetração atinge 2,0 MPa (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966), valor considerado o limite crítico do IHO (RP). A CRA foi estimada utilizando a função proposta por Ross et al. (1991) e empregada por Silva, Kay e Perfect (1994).

Para determinação do IHO adotaram-se os procedimentos descritos nos trabalhos de Silva, Kay e Perfect (1994) e Tormena, Silva e Libardi (1998). Os valores críticos de umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) foram determinados respectivamente nas tensões de -0,01 MPa ($\theta_{-0,01\text{MPa}}$) (HAISE; HAAS; JENSEN, 1955) e de -1,5 MPa ($\theta_{-1,5\text{MPa}}$) (RICHARDS; WEAVER, 1944); para resistência do solo à penetração (θ_{RP}) foi determinado o valor de umidade na qual a resistência à penetração atinge 2,0 MPa (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966); o valor crítico de umidade para porosidade de aeração (θ_{PA}) foi determinado considerando o valor de macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³ (GRABLE; SIEMER, 1968). Os valores de $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ e $\theta_{-1,5\text{MPa}}$ foram obtidos utilizando a CRA; e os valores do teor de água em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge o valor crítico de 2,0 MPa foram obtidos por meio da CRS. O valor de teor de água no solo em que a porosidade de aeração é de 0,1 m³ m⁻³ (θ_{PA}) foi obtido pela expressão $[(1 - D_s / D_p) - 0,1]$, em que D_p corresponde à densidade de partículas, assumida como sendo de 2,650 kg dm⁻³.

Os ajustes dos modelos das CRA e CRS foram feitos pelo método de regressão linear com base na rotina PROC REG do sistema SAS/STAT® (SAS INSTITUTE, 1999) e o gráfico pelo sistema SAS/GRAPH® (SAS INSTITUTE, 2000). Em ambas as curvas, o ajuste foi realizado por regressão não linear, empregando o algoritmo de Leverberg-Marquardt. Para quantificação do IHO foi utilizado um algoritmo simplificado, desenvolvido no programa SAS (SAS INSTITUTE, 1999) por Leao et al. (2005).

Para o monitoramento dos sistemas de manejo, foram analisados dados de D_s , umidade volumétrica e produtividade biológica da cultura de feijão, irrigado e não irrigado, no período de uma safra agrícola de inverno (90 dias).

A partir do IHO gerado para o LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico foi possível quantificar a condição física do solo para o crescimento de plantas em cada um dos tratamentos (SPD e SC) estudados em função da distribuição dos valores de D_s dentro da amplitude de variação do IHO. Para tal procedimento, optou-se por representar sob o gráfico

do IHO colunas verticais que representam o valor mínimo e máximo de D_s obtido em cada tratamento, como também o histograma de cada conjunto de dados que permite visualizar a distribuição e frequência de ocorrência dos valores observados.

Para o monitoramento e quantificação da variação de umidade do solo sob sistema plantio direto (SPD) e sob sistema convencional (SC), irrigado e não irrigado, foram instaladas sondas TDR para registro da variação temporal do conteúdo de água em cada parcela ao longo do ciclo da cultura, e calculado o número de dias em que o feijoeiro permaneceu fora das condições ideais de disponibilidade hídrica para seu crescimento e desenvolvimento, seja por falta seja por excesso de água.

A D_s e a umidade solo foram determinadas na camada de 0,00 – 0,20 m em uma malha regular de amostragem de 3 x 3 m, totalizando 60 pontos amostrais. A produtividade foi calculada para as três plantas localizadas mais próximas de cada ponto amostral, utilizando-se a média para estimar a produtividade por planta de cada ponto, totalizando 180 plantas amostradas por tratamento.

Os valores de D_s e produtividade para cada tratamento foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), utilizando a rotina do PROC ANOVA num delineamento inteiramente casualizado, e as médias foram comparadas pelo teste de TUKEY, com ($p < 0,05$). Para realização das análises, foi utilizando o programa computacional SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

5 RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados os coeficientes obtidos no ajuste da CRS e da CRA para a profundidade de 0-0,20 m.

Tabela 1. Equações da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água obtida a partir dos modelos ajustados.

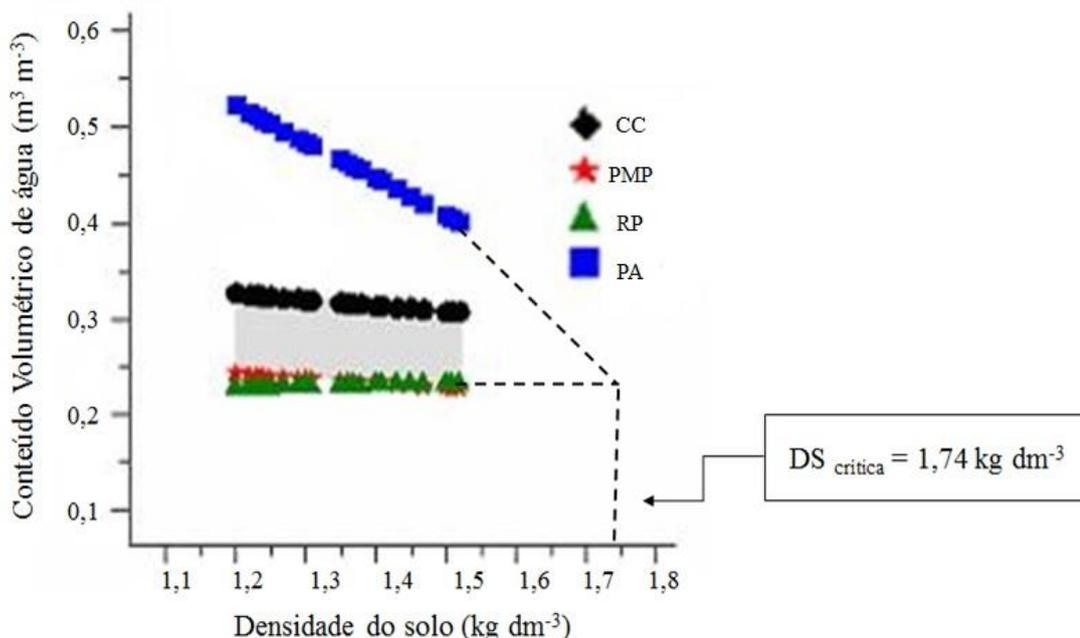
Profundidade	Equações	R ²	F
Curva de resistência do solo (CRS)			
0 – 0,20 m	$RP = 0,3285 * \theta^{-1,2394} * D_s^{0,0894}$	0,85	68,03
Curva de retenção de água no solo (CRA)			
0 – 0,20 m	$\theta_1 = (\exp(-1,1961 - 0,1914 * D_{s1})) * \psi ^{-0,0585}$	0,98	624,10

RP: resistência a penetração; θ : umidade volumétrica; D_s : densidade do solo; ψ : potencial matricial do solo.

As estimativas dos coeficientes de regressão para a RP foram estatisticamente significativas ($p < 0,0001$) e o modelo ajustado aos dados explicou 85% da variabilidade da RP nesta profundidade. Os coeficientes do ajuste indicaram que a RP é positivamente correlacionada com a D_s e negativamente com a θ . A elevação da RP com a redução de θ e o aumento de D_s pode ser atribuída ao aumento na coesão e fricção entre as partículas, sendo maior no solo cultivado (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999).

Em relação à CRA, os coeficientes indicam que a umidade do solo variou negativamente com a densidade do solo e com o potencial de água no solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Araujo et al. (2004) em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico sob sistema convencional de preparo do solo com aração e gradagem e mata nativa (Floresta estacional semidecidual) na região noroeste do Paraná. O IHO está representado pela área hachurada da Figura 1.

Figura 1. Variação do teor de água (θ) em função da densidade do solo (D_s) nos limites críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) do solo para a profundidade 0,0-0,2 m.



A variação da D_s teve pouca influência no $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ e no $\theta_{-1,5\text{MPa}}$, e conseqüentemente na água disponível, comumente determinada pela diferença entre esses dois valores (Figura 1). A quantidade de água nestes dois pontos ($\theta_{-0,01\text{MPa}}$ e $\theta_{-1,5\text{MPa}}$) apresentou correlação negativamente com a D_s . Tal comportamento pode ser justificado pela redução da macroporosidade e redistribuição de poros, decorrentes da diminuição da D_s (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; CAVALIERI et al., 2006). Com o aumento da D_s , observa-se que $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ determinou o limite superior do IHO e que $\theta_{-1,5\text{MPa}}$ o limite inferior do IHO até a D_s de aproximadamente $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, quando então θ_{RP} passou a definir o limite inferior do mesmo (Figura 1).

Assim, somente θ_{PA} não é limitante, em toda faixa de variação de D_s . Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Tormena, Silva e Libardi (1998) e Beutler et al. (2004), que em solos tropicais constataram que o IHO é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela RP. Comumente a RP é relatada como o fator de maior restrição no IHO (TOPP et al., 1994; SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; CAVALIERI et al., 2006).

Silva, Kay e Perfect (1994) definiram densidade crítica do solo (D_{sc}) como sendo a interseção dos limites, superior e inferior do IHO ou o ponto onde o mesmo se torna nulo. Neste estudo, os limites críticos nos quais o solo não apresenta mais condições para o desenvolvimento das raízes correspondem D_s de aproximadamente $1,74 \text{ kg dm}^{-3}$ (0,0-0,20 m), quando a RP limitante foi de 2MPa. O valor de D_{sc} na camada de 0-0,20 m é superior àqueles encontrados por Tormena, Silva e Libardi (1998, 1999) em um LATOSSOLO de textura muito argilosa, que também adotaram o valor de 2MPa como valor limitante de RP.

A partir do valor de D_s de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, a θ_{RP} passou a constituir o limite inferior do IHO, substituindo a $\theta_{-1,5\text{MPa}}$. Assim, valores iguais ou superiores a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$ para D_s condicionaram diminuição do IHO, indicando a ocorrência de degradação da qualidade estrutural do mesmo nessa profundidade (Figura 1). Neste trabalho, para todos os valores de D_s abaixo da D_{sc} , o limite superior do IHO foi sempre definido por $\theta_{-0,01\text{MPa}}$, revelando que a θ_{PA} não foi um fator limitante no solo. Tal resultado pode ser atribuído à elevada porosidade total, geralmente presente nos LATOSSOLOS, em que problemas de aeração são observados em casos de compactação severa, excesso de umidade ou elevado conteúdo de argila. Leão (2002) avaliou o IHO em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico de textura argilosa e também constatou que a θ_{PA} não foi o fator limitante.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva para a D_s na profundidade de 0-0,20 m, nos dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI).

Tabela 2. Estatística descritiva e teste de comparação de médias para os dados de densidade do solo (kg dm^{-3}) sob sistema de plantio direto (SPD) e sistema convencional (SC), com (I) e sem (NI) irrigação na profundidade de 0,00-0,20 m.

Profundidade 0,00-0,20 m						
Tratamentos	Média	Mediana	s	Min.	Máx.	CV (%)
SPDNI	1,29	1,29	0,091	1,04	1,63	7,02
SPDI	1,33	1,33	0,082	1,17	1,64	6,16
SCNI	1,24	1,25	0,103	1,00	1,57	8,33
SCI	1,25	1,28	0,092	1,05	1,46	7,38

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Min.: valor mínimo; Max.: valor máximo; D_s : densidade do solo.

Os coeficientes de variação obtidos permitem caracterizar este atributo como de baixa variabilidade ($CV < 12\%$), de acordo com o critério de Warrick e Nielsen (1980). Os valores de D_s variaram de $1,04$ a $1,63 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); de $1,17$ a $1,64 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema plantio direto irrigado (SPDI); de $1,00$ a $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema convencional não irrigado (SCNI) e de $1,05$ a $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema convencional irrigado (SCI), revelando uma ampla variação de condições estruturais e de dinâmica da água no solo.

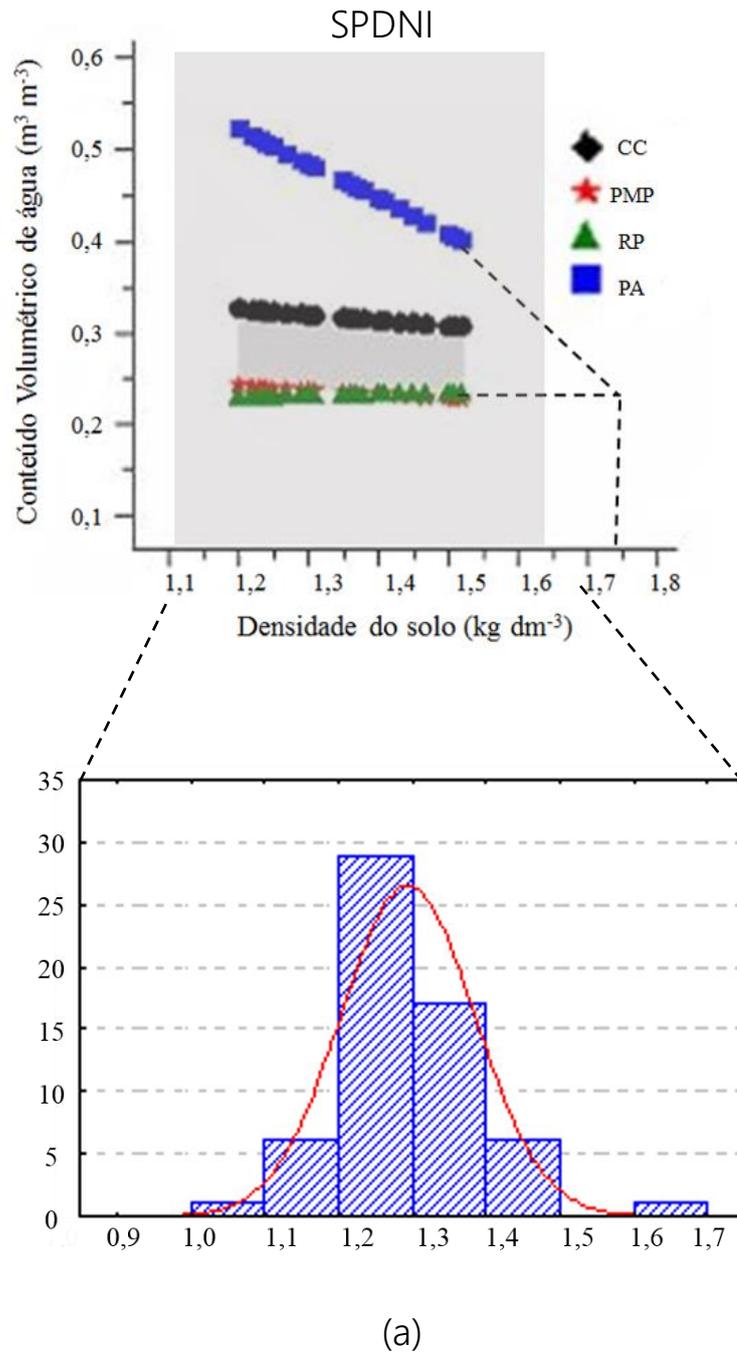
Os resultados da análise de variância mostram que a D_s foi significativamente superior ($p < 0,05$) no solo sob SPD irrigado (SPDI) em relação ao SPD não irrigado (SPDNI). E que as D_s em ambos os casos foram significativamente superiores em relação às do SC, com (I) e sem (NI) irrigação, que não diferiram entre si (Tabela 2). Diversos outros trabalhos relataram que a D_s na camada de 0-0,20 m de profundidade no sistema plantio direto é maior que o sistema convencional (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999; TORMENA; ROLOFF, 1996).

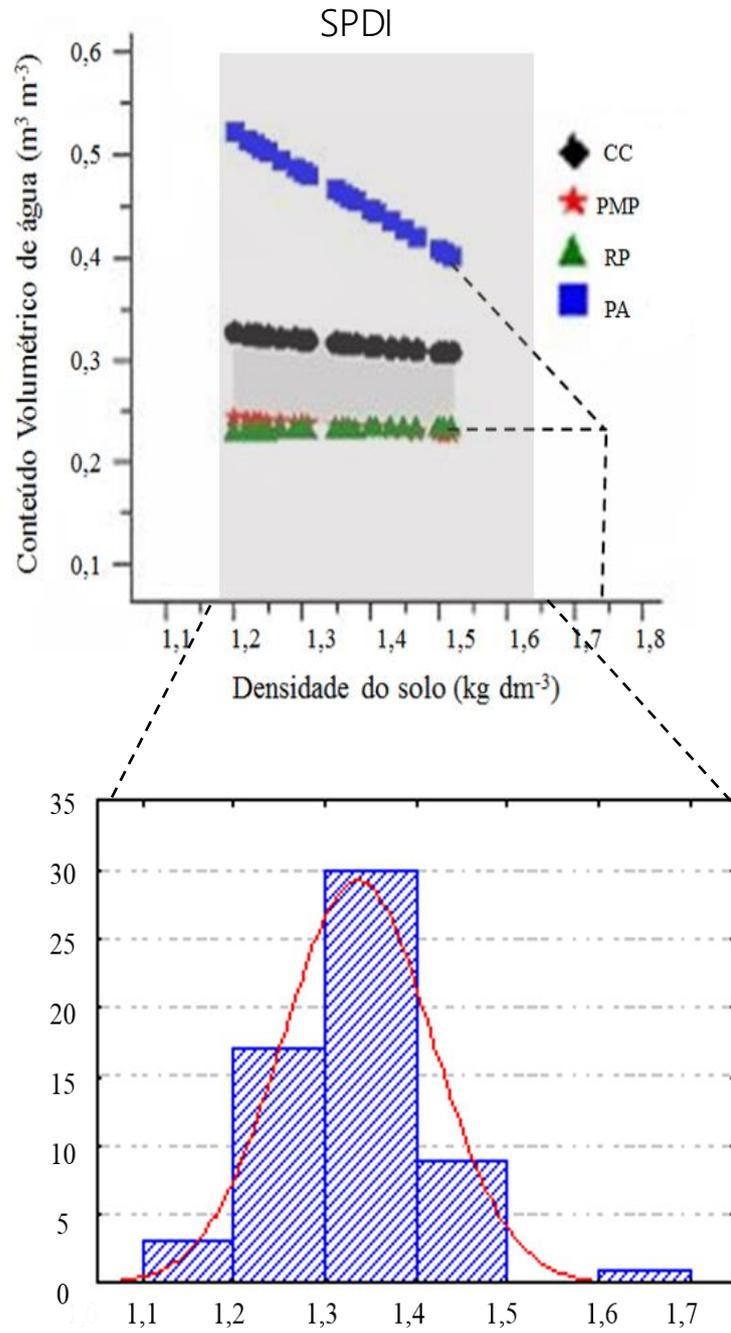
Para valores de D_s acima do valor crítico de $1,74 \text{ kg dm}^{-3}$ as condições físicas do solo são altamente restritivas, independentemente da umidade do solo, seja pela reduzida aeração ou pela excessiva resistência do solo a penetração. No entanto, os valores máximos obtidos foram inferiores ao valor crítico definido pelo IHO, sendo $1,63 \text{ kg dm}^{-3}$ no SPDNI; $1,64 \text{ kg dm}^{-3}$ no SPDI; $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ no SCNI e $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$ no SCI.

Na condição do experimento, não tendo sido atingida a D_{sc} de $1,74 \text{ kg dm}^{-3}$, as limitações decorrentes da variação da D_s se relacionam com o aumento da RP (D_s superior a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$). Neste sentido, para a avaliação e quantificação da condição física do solo para o crescimento de plantas nos dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI)

optou-se por analisar a distribuição dos valores de D_s dentro da amplitude de variação do IHO (Figura 2 e Figura 3).

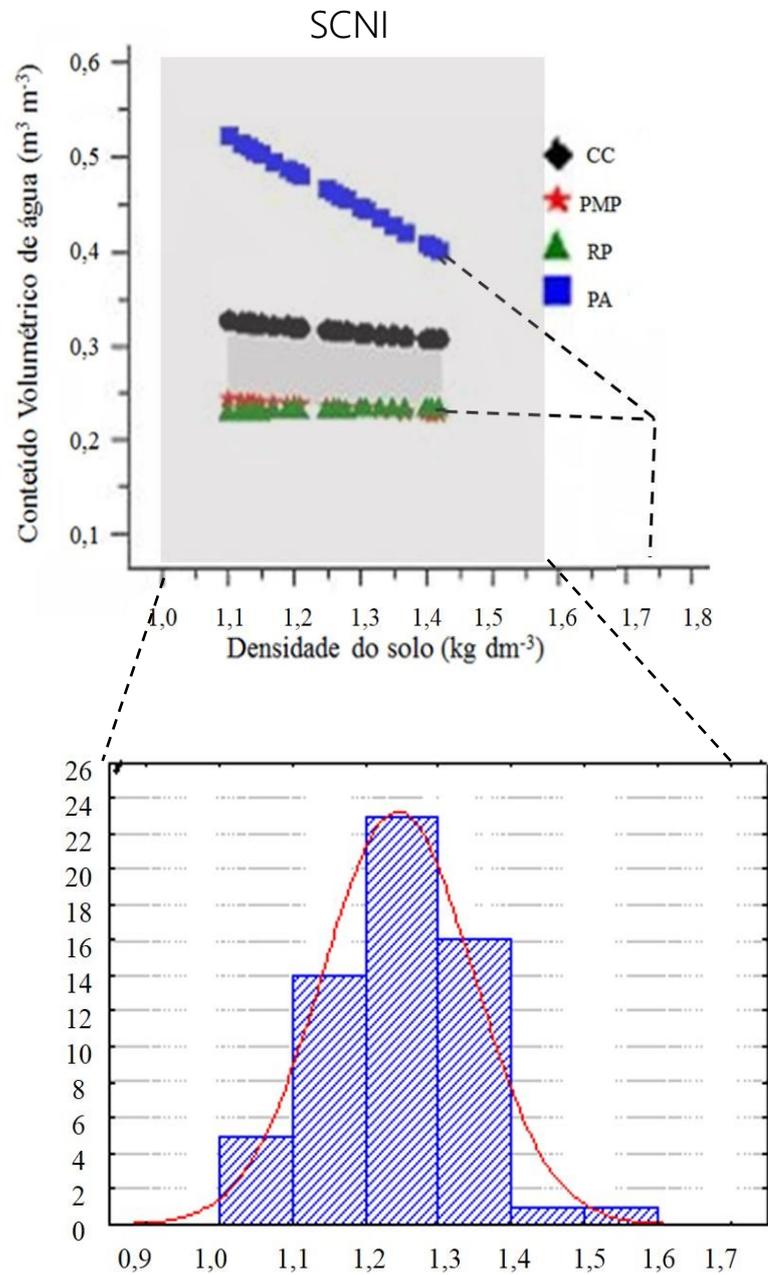
Figura 2. Valores de densidade do solo na profundidade de 0-0,20 m: a) no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); (b) sistema de plantio direto irrigado (SPDI). A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo.



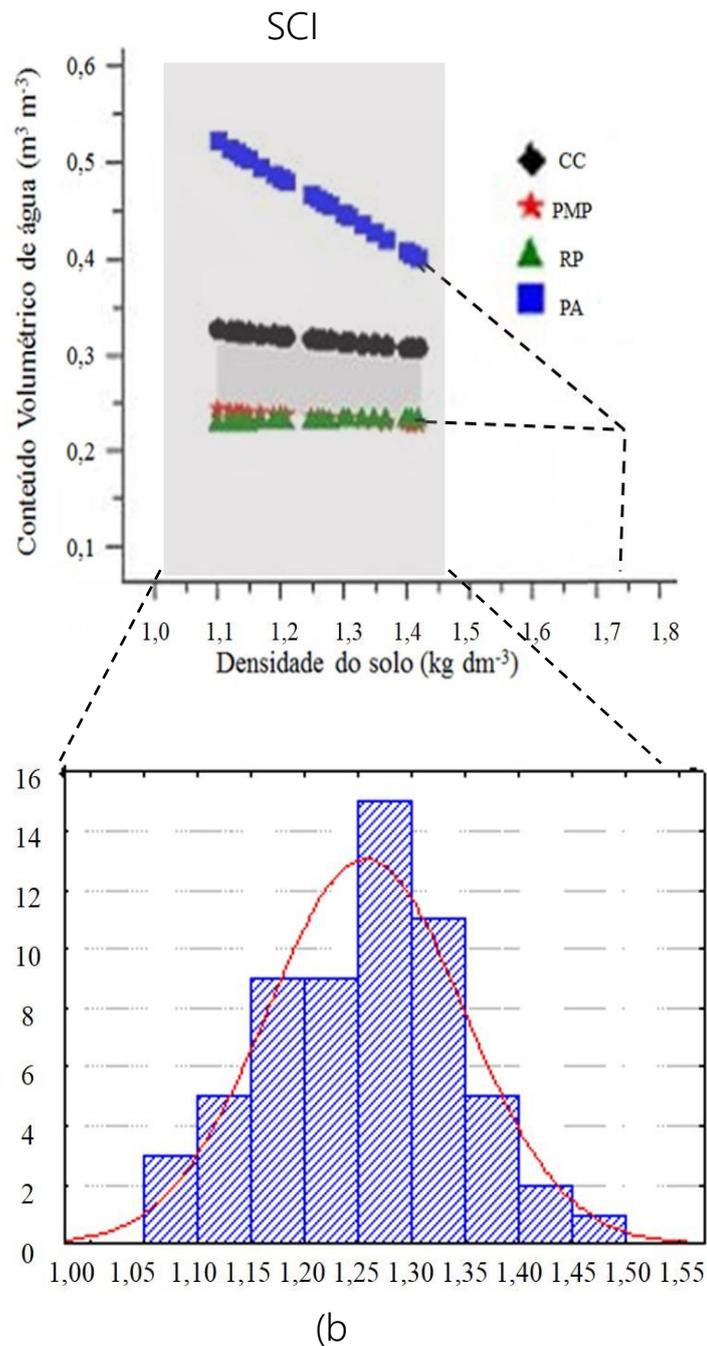


(b)

Figura 3. Valores de densidade do solo na profundidade de 0-0,20 m: a) sistema convencional não irrigado (SCNI); b) sistema convencional irrigado (SCI). A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo.



(a)



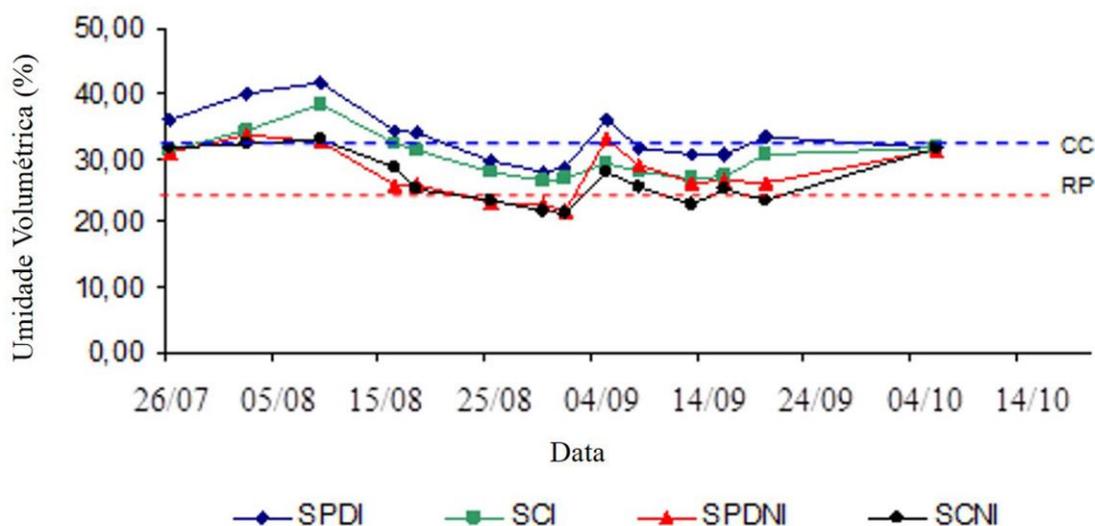
Observa-se que, por este critério, o SPDNI e o SPDI apresentariam condição física do solo mais restritiva para o crescimento de plantas, uma vez que 90% e 97% dos valores de D_s configuraram limitações quanto à RP ($D_s > 1,2 \text{ kg dm}^{-3}$), respectivamente (Figura 2a, b). Já os sistemas SCNI e SCI apresentariam menor restrição ao crescimento das plantas, uma vez que aproximadamente 75% e 27% dos valores, configuravam limitações à RP, respectivamente (Figura 3a, b).

Para a avaliação e quantificação da variação de umidade do solo sob sistema plantio direto (SPD) e sob sistema convencional (SC), irrigado e não irrigado, foram selecionados os

valores de umidade no limite superior e inferior do IHO, definidos pelo $\theta_{-0,01\text{MPa}}$ e pelo teor de água em que a RP foi superior a 2MPa, respectivamente.

Na Figura 4, pode-se observar o limite superior “linha tracejada azul” e inferior “linha tracejada vermelha” do IHO, nos dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI). A partir do monitoramento da umidade do solo foi calculado o número de dias em que a umidade esteve abaixo do limite inferior do intervalo, quando o feijoeiro ficou submetido a restrições em seu crescimento e desenvolvimento por falta de água, ou acima do limite superior, quando as restrições se relacionaram com falta de oxigênio. Observaram-se problemas quanto à aeração, em virtude de teores de água muito elevados, para as duas parcelas irrigadas (SPDI e SCI). No entanto, ao longo do ciclo não foram observados valores de restrição por excessiva RP, ficando a maior parte dos valores de umidade dentro dos limites do IHO. Durante aproximadamente 49 dias do ciclo do feijoeiro, a umidade do solo permaneceu dentro dos limites do IHO para o tratamento SCI, e por 38 dias para o tratamento SPDI. De modo geral, o SPDI apresentou maior conteúdo de água em relação ao SCI, praticamente durante todo o ciclo da cultura (Figura 4), em função da presença da palhada na superfície do solo, que previniu as perdas de água por evapotranspiração, aumentando a retenção de água no solo. Este fato contribuiu para que tal sistema apresentasse maior produtividade nominal (Figura 5), sem, no entanto, diferir estatisticamente da produtividade do SCI, que apresentou aproximadamente 9,65% a menos quando comparado ao SPDI.

Figura 4. Variação temporal do teor de água ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para cada um dos tratamentos analisados: sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); sistema plantio direto irrigado (SPDI); sistema convencional não irrigado (SCNI) e sistema convencional irrigado (SCI).



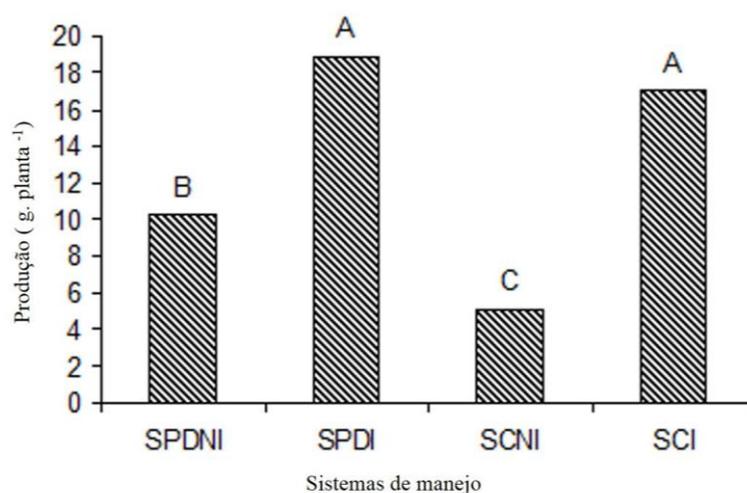
Com relação à Ds, o SPDI apresentou valor médio de $1,33 \text{ kg dm}^{-3}$, enquanto o SCI de $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$. Tais valores poderiam reduzir a produtividade da cultura, porém como a umidade do solo, na maior parte do ciclo, esteve dentro dos limites definidos pelo IHO, ou seja, em condições de umidade ótima, a Ds, aparentemente, não foi restritiva ao desenvolvimento das plantas.

Em relação aos sistemas não irrigados, o SPDNI esteve por aproximadamente 27 dias fora do IHO, enquanto que o SCNI esteve por aproximados 39 dias, configurando limitações

em ambos os sistemas devido a condições excessivas de RP (Figura 4). No período avaliado, foi verificado secamento do solo suficiente para que ocorressem valores de umidade abaixo do limite correspondente a RP crítica (25/8 a 4/9).

Entretanto, o SPDNI apresentou um maior conteúdo de água e menor número de dias fora do IHO em relação ao SCNI, praticamente durante todo o ciclo da cultura (Figura 4), provavelmente em função da presença da palhada na superfície do solo. Este fato contribuiu para a maior produção em relação ao SCNI (Figura 5).

Figura 5. Rendimento da cultura do feijoeiro obtido nos diferentes sistemas de manejo (sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); sistema plantio direto irrigado (SPDI); sistema convencional não irrigado (SCNI) e sistema convencional irrigado (SCI)). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).



Os resultados obtidos indicam que o período de dias em que o solo permaneceu fora das condições ideais foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade do feijoeiro.

Fica claro que a diferença não significativa da produtividade entre o SPDI e SCI pode ser atribuída à manutenção da umidade do solo nos limites do IHO, possibilitando, desse modo, maior produtividade e evitando a ocorrência de valores de umidade abaixo do limite correspondente a RP crítica. O SPD conserva maior umidade no solo, favorecendo a cultura em sistema não irrigado.

O monitoramento da umidade do solo é fundamental para futuras pesquisas envolvendo o IHO e sistemas de manejo, visto que a frequência de ocorrência de umidade dentro dos limites do IHO depende do manejo do solo e tem relação com o crescimento das plantas.

6 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo confirmam que com o aumento da densidade do solo ocorre uma diminuição da amplitude do intervalo hídrico ótimo. Além disso, com a diminuição da amplitude do intervalo hídrico ótimo aumentam as restrições físicas para o desenvolvimento vegetal, associadas a uma maior frequência de ocorrência da umidade do solo fora dos limites estabelecido pelo intervalo hídrico ótimo. O período de dias em que o solo permaneceu fora

das condições ideais de umidade estabelecidas pelo intervalo hídrico ótimo foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade do feijoeiro nos tratamentos não irrigados, com vantagem para o sistema de plantio direto.

7 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production, **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1-2, p. 137-148, 2003.
BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, 2008.

BEUTLER, A. N.; CENTURIÓN, 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.575-580, 2004.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1/2, p. 3-22, 2005.

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

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, 2002.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S. V.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA – CEPAGRI. Clima de Campinas. Campinas. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-de-campinas.html>>. Acesso em: 02 Fev. 2016.

DE MARIA, I.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Campinas, v. 23, n. 3, p. 703-709, 1999.

DEXTER, A. R. Soil structure: the key to soil function. **Advances in GeoEcology**, Reino Unido, v. 35, p. 57-69, 2002.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1502-1511, 2013.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207-208, p. 99-110, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1512-1521, 2013.

HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil Moisture Studies of Some Great Plains Soils: II. Field Capacity as Related to 1/3-Atmosphere Percentage, and "Minimum Point" as Related to 15- and 26-Atmosphere Percentages. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 19, p. 20-25, 1955.

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**, (online), v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

KAY, B. D.; RASIAH, V.; PERFECT, E. Structural aspects of soil resilience. In: GREENLAND, D.J.; SZABOLCS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CABI, 1994. p. 449-469.

LEAO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
LEAO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils using a statistical analysis system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Columbus, v. 1, p. 227-294, 1985.

LIMA, C. L. R.; SUZUMI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Least limiting water range and degree of compactness of Soils under no-tillage. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 4, p. 1071-1080, 2015.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999. 64 p.

RADFORD, B. J.; YULE, D. F.; MCGARRY, D.; PLAYFORD, C. Crop response to applied soil compaction and to compaction repair treatment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 155-170, 2001.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, p. 331-339, 1944.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, p.923-927, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS/GRAPH Software**: Reference. Version 8. Cary: SAS Institute, 2000. 2 v. 1272 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: User's guide. Version 8. Cary, 1999.

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

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

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

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 22, p. 311-317, 1998.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 271-298.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TOPP, G. C.; GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C.; CULLEY, J. L. B. **Non limiting water range (NLWR)**: an approach for assessing soil structure. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36 p. (Technical Report, 2).

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**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 333-339, 1996.

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**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.

VERMA, S.; SHARMA, P. K. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, p. 1-10, 2008.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academia Press, 1980.

YOUNG, I. M.; CRAWFORD, J. W.; RAPPOLDT, C. New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 33-45, 2001.