

# RENDIMENTO DA SOJA E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO ESCARIFICADO<sup>(1)</sup>

Vilson Antonio Klein<sup>(2)</sup> & Rodrigo Kurylo Camara<sup>(3)</sup>

## RESUMO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um método que integra vários fatores que afetam o desenvolvimento das plantas, e corresponde ao intervalo de umidade do solo no qual não ocorre restrição de aeração (porosidade de aeração mínima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) nem de resistência mecânica à penetração das raízes (RP) dentro da faixa de água disponível às plantas, isto é, entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). O objetivo deste trabalho foi determinar o IHO em um Latossolo Vermelho sob plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE), bem como o rendimento de grãos de soja. Avaliou-se a densidade do solo, o IHO, a variação da umidade do solo durante o ciclo da soja e o rendimento de grãos. Os resultados indicaram que a densidade do solo foi menor no PDE, o que acarretou maior amplitude do IHO. A densidade crítica, na qual  $\text{IHO} = 0$ , foi semelhante entre o PD e o PDE. Durante o ciclo da cultura da soja, em vários momentos, a sua umidade ficou fora do IHO, quando assumida RP limitante de 2 MPa. Como o rendimento de grãos da soja não apresentou diferença significativa, deduz-se que a RP de 2 MPa não é limitante para a soja.

**Termos de indexação:** intervalo hídrico ótimo, plantio direto, escarificação, compactação.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do segundo autor apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, FAMV/UPF, Projeto financiado pela Fapergs. Recebido para publicação em abril de 2006 e aprovado em janeiro de 2007.

<sup>(2)</sup> Professor Titular da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo – FAMV/UPF. Caixa Postal 611, CEP 99001-970 Passo Fundo (RS). E-mail: vaklein@upf.br

<sup>(3)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Mestre em Agronomia, FAMV/UPF. Bolsista do CNPq. E-mail: rodrigokurylo@yahoo.com.br

**SUMMARY: SOYBEAN GRAIN YIELD AND LEAST LIMITING WATER RANGE IN AN OXISOL UNDER CHISELED NO-TILLAGE**

*The least limiting water range (LLWR) was used to determine several factors that influence plant growth. The LLWR is defined as the water content range in which aeration (AFP) and soil resistance to root penetration (RP) are not restrictive, within the field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP). The aim of the present study was to determine the LLWR and soybean grain yield in an Oxisol under non-tillage (NT) and chiseled no-tillage (CNT) systems. The soil density, LLWR, soil water content range throughout the soybean crop cycle and grain yield were assessed. Soil density was lower in the CNT system, which resulted in a wider LLWR. Critical density (LLWR=0) was similar in the NT and CNT systems. The soil water content decreased to values outside the LLWR at different periods during the crop cycle when a limiting RP of 2 MPa was considered. It was concluded that an RP of 2 MPa is not limiting for soybean because there were no significant differences in grain yield between the two tillage systems.*

*Index terms: Least limiting water range, no-tillage, chiseling, soil compaction.*

## INTRODUÇÃO

O manejo do solo para fins agrícolas é responsável por grandes alterações na estrutura do solo, o que afeta as propriedades físico-hídricas do mesmo. Em razão disso, a quantidade de água retida a determinadas tensões varia, o que torna o conceito de água no solo disponível às plantas não tão simples de ser interpretado. Em solos compactados, a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes (RP), comumente, são limitantes ao desenvolvimento das plantas, mesmo havendo água disponível (Klein & Libardi, 2000).

Vários autores relatam que a porosidade livre de água, ou seja, a porosidade de aeração (PA), deve ser em torno de 10 %, para que não restrinja o desenvolvimento radicular e não ocorra redução na difusão de gases (Taylor, 1950; Vomocil & Flocker, 1961; Baver et al., 1972).

Segundo Borges et al. (1999), o incremento da compactação acarreta o aumento da umidade do solo e a redução da PA, que podem alterar o suprimento de oxigênio e a disponibilidade de nutrientes e aumentar o nível de elementos tóxicos às plantas e aos microrganismos. Por sua vez, o aumento da compactação do solo aumenta a RP, acarretando situações em que, mesmo havendo água disponível às plantas, o sistema radicular cessa o crescimento, afetando o desenvolvimento das plantas e sua produção.

Tentando analisar de forma integrada os vários fatores que afetam o desenvolvimento das plantas, Letey (1985) propôs o "Least limiting water range", que no Brasil recebeu a denominação de intervalo hídrico ótimo (IHO) (Tormena et al., 1998). Esse método integra os atributos físicos diretamente ligados ao desenvolvimento das plantas. Esse intervalo está compreendido entre o limite superior, que é a umidade do solo na condição de capacidade de campo (CC) ou a umidade na qual a porosidade de aeração é de 10 %, e

o limite inferior, que é a umidade do solo equivalente ao ponto de murcha permanente (PMP) (1,5 MPa) ou a resistência à penetração das raízes de 2 ou 3 MPa.

O IHO, definido como a amplitude de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas relacionadas com a disponibilidade da água, a aeração e a RP, quantifica a interação entre estas variáveis, sendo utilizado como indicador de qualidade física do solo (Klein, 1998; Araújo et al., 2003).

Dos fatores que integram o IHO, a umidade em que há resistência do solo à penetração, 2 MPa, é a propriedade que mais freqüentemente reduz o IHO (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2001). Klein & Libardi (2000) observaram, em estudo com Latossolo Roxo, que, em condições de mata e áreas de sequeiro, a CC é o fator mais limitante no limite superior da umidade e que, em condições de mata, o limite inferior é somente o PMP, não havendo ação da resistência à penetração, enquanto para o sequeiro, nos valores baixos de densidade do solo (abaixo de 1,11 Mg m<sup>-3</sup>), o fator limitante é o PMP. Estes autores concluíram que a PA e a RP são as propriedades que mais variam com as mudanças de densidade do solo.

Um dos poucos trabalhos que relacionaram a redução no rendimento do milho com o número de dias em que a cultura permaneceu fora dos limites do IHO foi o de Silva & Kay (1996). Vários outros trabalhos estabeleceram os limites críticos para o IHO, sem, no entanto, validá-los com produção vegetal.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o intervalo hídrico ótimo em solo sob plantio direto e plantio direto escarificado e o rendimento de grãos de soja.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em área experimental da Universidade de Passo Fundo (Passo Fundo – RS,

Brasil), região com altitude média de 684 m e clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo Cfa 1 (subtropical chuvoso), em um Latossolo Vermelho distrófico típico relevo ondulado e substrato basalto, com composição média de 0,61 kg kg<sup>-1</sup> de argila, 0,10 kg kg<sup>-1</sup> de silte e 0,29 kg kg<sup>-1</sup> de areia.

A área vinha sendo conduzida sob sistema plantio direto contínuo por um período de seis anos, com a seguinte seqüência de culturas: 1997/98 (soja-trigo), 1998/99 (soja-aveia), 1999/00 (milho-aveia), 2000/01 (soja-aveia), 2001/02 (milho silagem e milho). Em razão de indícios de compactação, após a colheita do milho, no mês de maio, realizou-se escarificação em parte da área, utilizando escarificador equipado com cinco hastes de formato parabólico, discos de corte e rolo destorroador/nivelador, a uma profundidade média de 25 cm. Após a escarificação, sem preparo complementar, semeou-se aveia preta, com a finalidade de adubação verde, utilizando semeadora-adubadora equipada com duplos-discos desencontrados. Após a aveia ter sido dessecada, no momento da semeadura da soja, 94 % da superfície do solo estava coberta com restos culturais. Realizou-se análise química do solo, tendo-se verificado que todos os nutrientes estavam em níveis satisfatórios; a adubação de base foi determinada de acordo com as necessidades da cultura da soja. Na semeadura da soja utilizou-se uma semeadora-adubadora de precisão, com sulcadores de duplos-discos desencontrados, tanto para o adubo como para a semente.

O delineamento experimental foi em faixa com parcelas subdivididas e sete repetições, tendo como parcelas principais os sistemas plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE); as subparcelas foram constituídas pelas profundidades de coleta das amostras, para determinação das propriedades do solo. As profundidades foram de 2,5; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 e 25,0 cm, considerando o meio da amostra como referência.

As amostras com estrutura preservada, utilizadas na determinação da densidade do solo, retenção de água e resistência do solo à penetração, foram coletadas, com auxílio de um amostrador do tipo "Uhland", utilizando cilindros de aço inoxidável com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura.

A resistência do solo à penetração foi determinada em laboratório nas amostras coletadas com os cilindros volumétricos, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de 0,1667 mm s<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento. As determinações foram realizadas em amostras com estrutura preservada submetidas a diferentes tensões de água no solo (0; 6; 10; 14,5; 25; 50; 100 e 200 kPa). Para cada amostra foram obtidos 250 valores, eliminando-se os valores iniciais e finais.

Os valores de RP foram ajustados a um modelo não-linear proposto por Busscher (1990), que correlaciona a RP com a densidade e umidade do solo.

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), utilizou-se o método descrito por Klein (1998). Foram calculadas a porosidade de aeração (PA) mínima de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, que é obtida pela subtração de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> da porosidade total (Sojka, 1992); a umidade do solo no ponto de murcha permanente (PMP) na tensão de 1.500 kPa; a umidade do solo na capacidade de campo (CC) na tensão de 6 kPa; e a umidade do solo para cada densidade na qual se atinge a resistência à penetração (RP) de 2 MPa (Taylor et al., 1966; Nesmith, 1987) e de 3 Mpa, em razão das evidências de que para a cultura da soja esse valor seja mais apropriado (Mielniczuk et al., 1985; Petter, 1990; Beutler et al., 2003). A PA, a CC e o PMP tiveram seus valores linearizados de acordo com a densidade do solo.

Durante todo o ciclo da cultura da soja foi determinado o potencial da água no solo, utilizando sensores modelo WMSM (Water Moisture Sensor Meter) da Watermark, conectados a um Datalogger modelo DL2 da AT Delta Device, para aquisição e armazenagem dos dados. Com os valores do potencial mátrico da água no solo e das curvas características de retenção, obteve-se a umidade do solo.

A colheita da soja nas três linhas centrais de cada unidade experimental foi realizada com uma colhedora de parcelas, sendo a massa dos grãos corrigida para umidade de 13 %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de densidade do solo (Quadro 1) apresentaram diferença significativa entre os manejos, nas amostras coletadas seis meses após a escarificação, evidenciando efeito duradouro da escarificação em reduzir a densidade do solo sob plantio direto.

A RP, no IHO, aumentou com o incremento da densidade do solo e a redução da umidade do solo e, tanto na RP limitante de 2 MPa (Figura 1) como na de 3 MPa (Figura 2), apresentou-se como limite inferior do IHO em todas as densidades, indicando que, mesmo antes de o solo atingir a umidade do PMP, a planta já poderia apresentar restrições ao desenvolvimento do sistema radicular por impedimento mecânico.

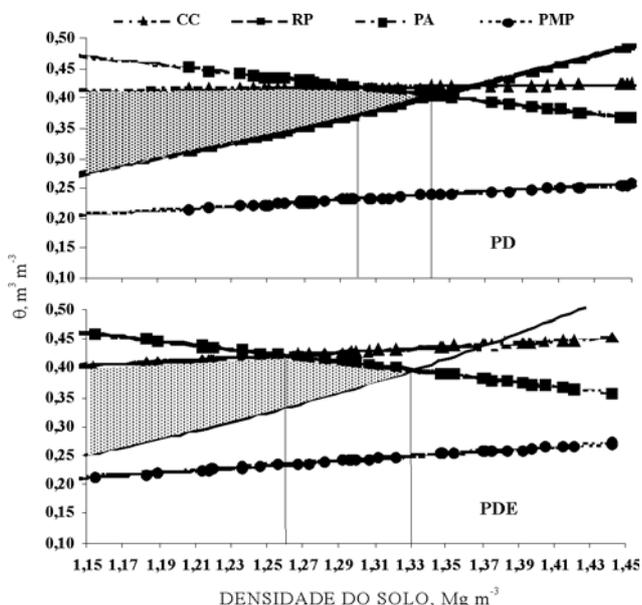
Constatou-se que, quando se assume 3 MPa como RP limitante (Figura 2), essa limitação se aproxima mais do PMP. No entanto, em densidades baixas, ela é semelhante à RP de 2 Mpa; conforme aumenta a densidade, a diferença entre as duas linhas é ampliada, concordando com Busscher (1990), para o qual o modelo não é linear, e com Klein et al. (1998), segundo os quais a RP varia muito com pequenas variações na umidade e na densidade do solo.

**Quadro 1. Densidade do solo de acordo com o manejo e a profundidade, seis meses após a escarificação**

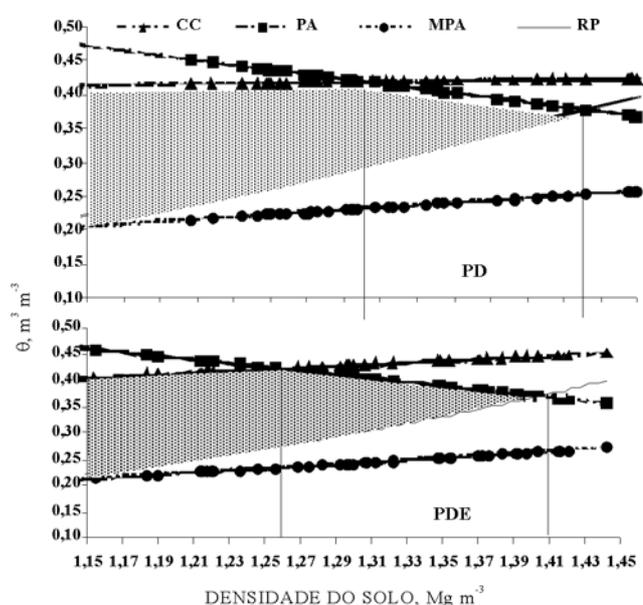
Profundidade	PD	PDE	Média
cm	Mg m <sup>-3</sup>		
2,5	1,284	1,171	1,227 b
5,0	1,340	1,241	1,291 a
10,0	1,346	1,293	1,320 a
15,0	1,339	1,316	1,328 a
20,0	1,314	1,298	1,306 a
25,0	1,277	1,287	1,282 a
Média	1,317 A	1,268 B	
CV (%)		5,19	

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5 %.

PD: plantio direto; PDE: plantio direto escarificado.



**Figura 1. Variação da umidade volumétrica de acordo com a densidade do solo para os níveis críticos de capacidade de campo na tensão de 6 kPa (CC), porosidade de aeração de 10 % (PA), ponto de murcha permanente (PMP) na tensão de 1.500 kPa e resistência mecânica do solo à penetração de 2 MPa (RP). A área hachurada representa o IHO.**



**Figura 2. Variação da umidade volumétrica de acordo com a densidade do solo para os níveis críticos de capacidade de campo na tensão de 6 kPa (CC), porosidade de aeração de 10 % (PA), ponto de murcha permanente (PMP) na tensão de 1.500 kPa e resistência mecânica do solo à penetração de 3 MPa (RP). A área hachurada representa o IHO.**

O limite superior do IHO foi a CC até a densidade de 1,30 Mg m<sup>-3</sup> no PD e de 1,26 Mg m<sup>-3</sup> no PDE, passando então a PA a ser limitante, indicando redução significativa dos macroporos responsáveis pela aeração. Essa alteração no valor da densidade do solo entre o PD e o PDE, a partir da qual ocorrem limitações de aeração, mostra que a escarificação altera o arranjo dos poros e, por conseqüência, a retenção de água e o fluxo de gases.

A densidade crítica, isto é, em que o IHO é igual a zero, foi de 1,34 Mg m<sup>-3</sup> para o PD e de 1,33 Mg m<sup>-3</sup> para o PDE quando a RP limitante foi de 2 MPa e de 1,42 Mg m<sup>-3</sup> no PD e 1,41 Mg m<sup>-3</sup> no PDE com RP de 3 MPa (Quadro 2). A igualdade nos valores entre o PD e o PDE, independentemente da resistência limitante adotada, confirma que esse limite é inerente ao solo, independentemente do manejo adotado. Esses dados concordam em parte com a proposta apresentada

**Quadro 2. Densidade crítica do solo no IHO com RP de 2 e 3 MPa, nos manejos de solo**

Manejo do solo	IHO = 0 (RP= 2 MPa)	IHO = 0 (RP= 3 MPa)
PD	1,34	1,42
PDE	1,33	1,41

PD: plantio direto; PDE: plantio direto escarificado.

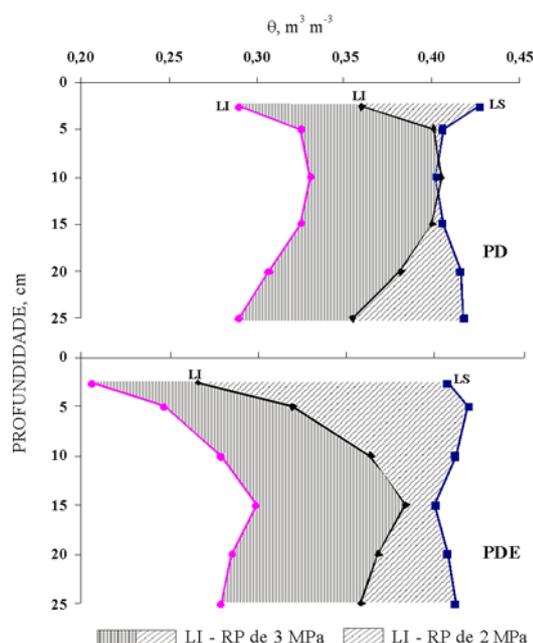
por Reichert et al. (2003) de uma classificação da densidade limitante de acordo com o teor de argila do solo, sugerindo para solos muito argilosos (> 60 % argila) valores críticos entre 1,25 e 1,3 Mg m<sup>-3</sup>, quando se assume RP limitante de 2 MPa. De qualquer modo, essa constatação é importante, uma vez que corrobora o fato de a densidade crítica de um solo ser dependente da textura e de operações mecânicas de preparo do solo reduzirem a densidade, ampliando os valores de umidade do solo dos limites críticos, aumentando assim o IHO.

**Variação do IHO de acordo com a profundidade**

A variação do IHO em profundidade (Figura 3) com RP de 2 MPa no PD foi de 0,0 a 0,07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; nas profundidades de 2,5 e 25 cm ocorreram os maiores intervalos, enquanto na de 10 cm o IHO foi zero, mostrando ser uma camada de solo restritiva ao desenvolvimento das plantas. No PDE, a amplitude do IHO variou de 0,02 a 0,14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Na profundidade de 2,5 cm ocorreu o maior IHO e, na de 15 cm, o menor. Esse incremento no IHO proporcionado pela escarificação é decorrente da diminuição da RP proporcionada pela redução na compactação no PD, que apresentava densidade relativa, nas camadas de maior densidade do solo, superior a 0,86 (Camara & Klein, 2005), o que já é considerado solo compactado.

Com a adoção de 3 MPa como RP limitante, ocorreu aumento da amplitude do IHO; no PD ela foi de 0,07 a 0,14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, inferior à do PDE, que foi de 0,10 a 0,20 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

O PDE apresentou, em todas as profundidades, IHO superior ao do PD, evidenciando o efeito da escarificação, mesmo após seis meses da operação. A escarificação tem por objetivo diminuir a RP e aumentar o volume de água facilmente disponível à cultura. Em relação a este volume, isto é, a amplitude do IHO, Tormena et al. (1998) e Klein & Libardi (2000) encontraram valores máximos de IHO de 0,12 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para um Latossolo com mais de 70 % de argila, enquanto Reichert et al. (2003) apresentaram um IHO de 0,14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para um Latossolo com 45 % de argila. Nesse sentido, a obtenção de IHO de 0,20 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para o PDE é um importante indicador de que, com práticas mecânicas, é possível melhorar as propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos sob plantio direto, as quais,



**Figura 3. Variação do IHO em profundidade.**

porém, podem não resultar necessariamente em melhoria na produção vegetal.

**Variabilidade temporal da umidade do solo e do potencial mátrico durante o ciclo da cultura da soja no IHO**

A variação diária da umidade do solo (Figura 4), durante o ciclo da cultura da soja, é apresentada em relação aos limites críticos do IHO, observando-se intervalo de umidade bastante restrito para o PD, enquanto no PDE este é mais amplo.

No PD, durante todo o ciclo da cultura da soja não ocorreu limitação pelos fatores que determinam o limite superior do IHO (CC ou PA). Por sua vez, no limite inferior com a RP de 2 MPa, em várias profundidades, o desenvolvimento da soja deu-se fora do IHO durante todo o ciclo. Já com limite de 3 MPa o desenvolvimento permaneceu dentro do IHO durante todo o ciclo. No PDE, o limite superior do IHO foi limitante nas profundidades de 20 e 25 cm, enquanto nas demais profundidades não ocorreu limitação.

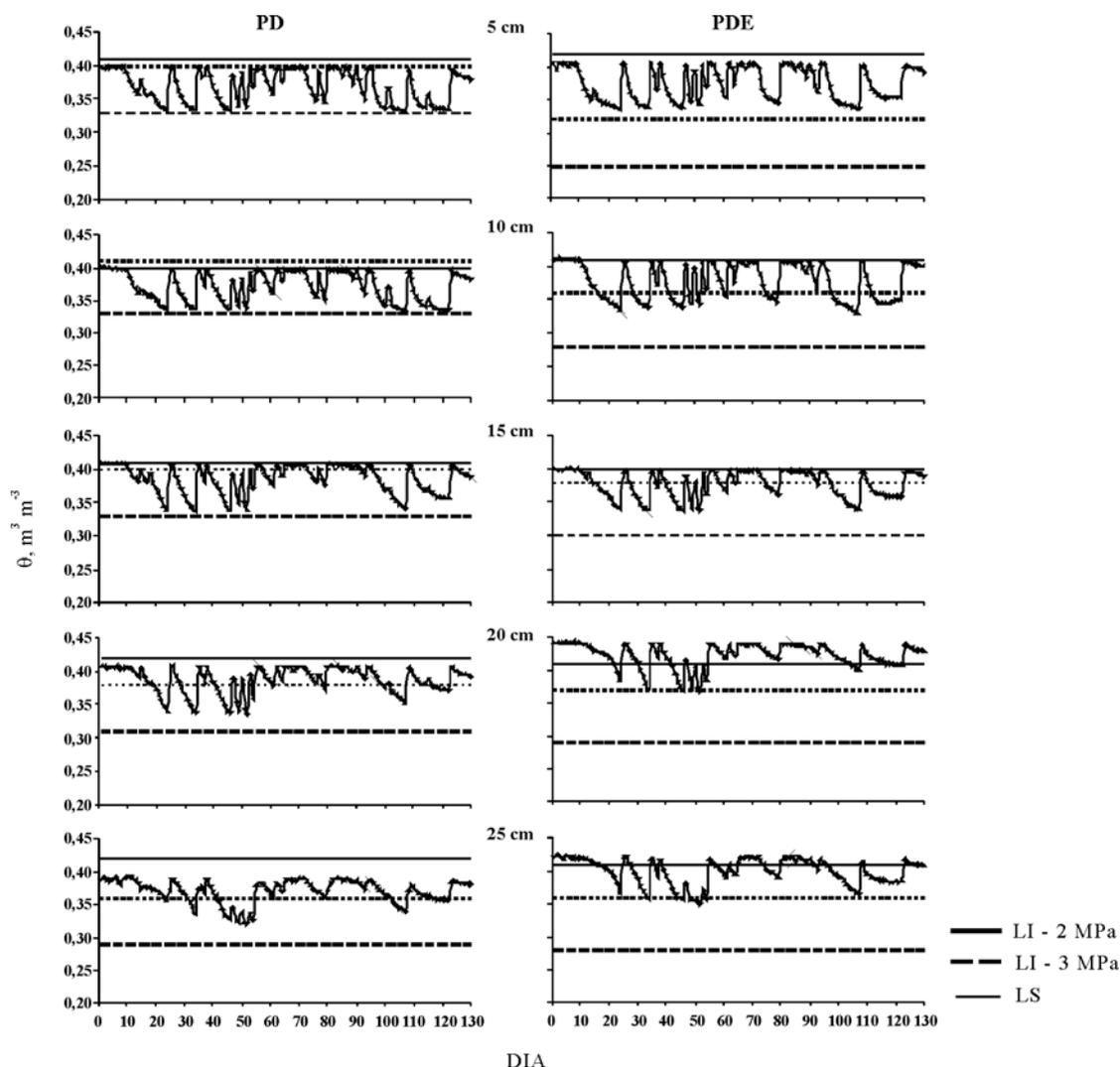


Figura 4. Variação temporal da umidade do solo com limites do IHO.

No PD, o limite inferior com RP de 2 MPa no IHO apresentou grandes restrições principalmente na profundidade de 10 cm, ao passo que no PDE a restrição não foi significativa.

O limite da RP com 2 MPa – muito utilizado como limite inferior da umidade – foi efetivamente restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, pois tanto no PD como no PDE, quando se assumiu essa resistência como limitante, em várias profundidades a umidade do solo durante todo o ciclo da cultura permaneceu fora do IHO.

Quando foi assumida a RP de 3 MPa, o intervalo ótimo foi ampliado, e a umidade do solo no PD permaneceu sempre dentro do intervalo de umidade ótima do IHO. O PDE apresentou limitações nas profundidades de 20 e 25 cm com o limite superior, porém temporariamente.

Como o rendimento de grãos não diferiu entre os sistemas de manejo do solo (média de 2.988 kg ha<sup>-1</sup>),

constata-se que a RP de 2 MPa não deve ser assumida como limite de desenvolvimento das plantas de soja, uma vez que no PD em diversas profundidades, durante praticamente todo o ciclo da cultura da soja, a umidade do solo permaneceu fora do IHO.

Utilizando RP de 3 MPa, ocorreu melhor enquadramento dos limites nas profundidades, não havendo limitações no IHO. Não foi possível avaliar o comportamento da soja em RP superior a 3 MPa, pelo fato de esse valor não ter ocorrido durante todo o ciclo da cultura em razão da elevada umidade do solo. Se esta ocorresse, provavelmente seria limitante, como já constatado por Petter (1990) e Beutler et al. (2003).

Em relação à PA, assumida como limitante quando inferior a 10 %, é importante destacar a alta variabilidade espacial e temporal desse parâmetro, o que pode, em curtos intervalos de tempo, até restringir o desenvolvimento radicular em camadas específicas. No entanto, as outras camadas com aeração adequada poderão compensar essa limitação (Jong van Lier, 2001).

## CONCLUSÕES

1. Uma escarificação esporádica em solos sob plantio direto proporciona condições físico-hídrico-mecânicas mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, especificamente pela redução na resistência mecânica do solo à penetração.

2. As possíveis limitações estudadas não afetaram o desenvolvimento e o rendimento de grãos da cultura da soja, em razão das condições climáticas favoráveis durante todo o ciclo da cultura.

3. A resistência mecânica do solo à penetração de 2 MPa não se mostrou impeditiva ao desenvolvimento das plantas de soja.

## LITERATURA CITADA

- ARAÚJO, M.A.; INOUE, T.T. & TORMENA, C.A. Qualidade física do solo avaliada pelo intervalo ótimo de potencial da água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Resumo expandido. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil physic. New York, John Wiley, 1972. 498p.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & ROQUE, C.G. Resistência à penetração em Latossolos: limitante à produção de grãos de soja In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia, 2003. Resumo expandido. Goiânia, CONBEA, 2003. CD-ROM
- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊIA, G.F. & BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:1663-1667, 1999.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. *Ci. Rural*, 35:813-819, 2005
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*. 25:11-18, 2001.
- JONG VAN LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *R. Bras.Ci. Solo*, 25:233-238, 2001.
- KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1998. 150p. (Tese de Doutorado)
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ci. Rural*, 30:959-964, 2000.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. & SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Eng. Agric.*, 18:45-54, 1998.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- MIELNIZUCK, J.; CARPENEDO, V. & PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. *Lav. Arroz.*, 38:42-43, 1985.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Sci. Am. J.*, 51:183-186, 1987.
- PETTER, R.L. Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1990. 144p. (Tese de Mestrado)
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.
- SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 154:269-80, 1992.
- TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 102:18-22, 1966.
- TAYLOR, S.A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, 14:55-61, 1950.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras.Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 4:242-246, 1961.