

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DE UM PLANOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO<sup>(1)</sup>

A. PEDROTTI<sup>(2)</sup>, E. A. PAULETTO<sup>(3)</sup>, S. CRESTANA<sup>(4)</sup>, M. M.  
FERREIRA<sup>(5)</sup>, M. S. DIAS JUNIOR<sup>(5)</sup>, A. S. GOMES<sup>(6)</sup> & A. L. TURATTI<sup>(3)</sup>

### RESUMO

O conhecimento das características e propriedades dos solos de várzea do RS, utilizados atualmente com a cultura do arroz irrigado, torna-se essencial para a adoção de práticas que envolvam irrigação, drenagem, correção da acidez e da fertilidade, principalmente quando se deseja obter altos níveis de produtividade, com menor custo e com menores possibilidades de degradação destes solos e do ambiente onde estão situados. Dentro deste panorama, avaliou-se a compactação de um Planossolo cultivado sob diferentes sistemas de manejo, através da resistência mecânica do solo à penetração. Camadas compactadas foram identificadas, de forma mais acentuada, na profundidade intermediária (0,10-0,20 m) nos sistemas com maior utilização da mecanização agrícola ( $T_2$  - sistema de cultivo contínuo de arroz e  $T_3$  - sistema de cultivo de arroz x rotação de culturas). Observou-se que, em todos os sistemas, houve aumento dos valores de resistência mecânica do solo à penetração em relação à testemunha ( $T_6$  - solo mantido sem cultivo), principalmente na camada intermediária (0,10-0,20 m), quando o solo foi submetido ao sistema de cultivo contínuo de arroz ( $T_2$ ). Os tratamentos  $T_3$  (sistema de cultivo de arroz x rotação de culturas) e  $T_5$  (sucessão de culturas: soja (sistema convencional) x arroz (sistema de semeadura direta)) apresentaram os valores mais altos de resistência à penetração, provavelmente em decorrência da baixa umidade e dos efeitos do cultivo e da utilização de máquinas responsáveis pela deformação da estrutura do solo.

**Termos de indexação:** compactação, várzea, manejo de solo, arroz irrigado, albaqualf.

<sup>(1)</sup> Trabalho extraído da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao CPGA da FAEM-UFPEL. Recebido para publicação em setembro de 1998 e aprovado em março de 2001.

<sup>(2)</sup> Professor do Departamento de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Sergipe - UFS. Av. Mal. Rondon s/n, Campus Universitário, Jardim Rosa Elze, CEP 49100-000 São Cristóvão (SE). E-mail: apedroti@ufs.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - FAEM, Universidade Federal de Pelotas - UFPEL. Caixa Postal 354, CEP 96001-970 Pelotas (RS).

<sup>(4)</sup> Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento da Instrumentação Agropecuária - CNPDIA/EMBRAPA. Caixa Postal 741, CEP 13560-970 São Carlos (SP).

<sup>(5)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG).

<sup>(6)</sup> Pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado - CPACT/EMBRAPA. Caixa Postal 403, CEP 96001-970 Pelotas (RS).

**SUMMARY:** *STRENGTH MECHANICAL PENETRANCE OF AN ALBAQUALF SOIL SUBMITTED TO DIFFERENT SYSTEMS OF TYLLAGE*

*Understanding the characteristics and properties of the soils of the state of Rio Grande do Sul low lands, which are being used now with the culture of irrigated rice, is indispensable for the adoption of practices involving irrigation, drainage, correction of acidity and fertility. Mainly when high productivity levels are desired with lower cost and with fewer possibilities of soil and air degradation. The objective of this work was to evaluate compaction of a Planossolo cultivated under different handling systems through the technique of mechanical resistance of the soil to penetration. The occurrence of compacted layers was identified, in the intermediary depth (0.10-0.20 m) in the systems with larger use of agricultural mechanization ( $T_2$  - Continuous rice cultivation system and  $T_3$  - rice x crop rotation cultivation system). An increase of the values of the soil's mechanical resistance to penetration was observed in relation to the control in all the systems ( $T_6$  - Soil without cultivation), mainly in the intermediary layer (0.10-0.20 m), when the soil was submitted to the continuous rice cultivation system ( $T_2$ ). The treatments  $T_3$  (rice x crop rotation) and  $T_5$  (succession of cultures: soybean (conventional system) x rice (zero tillage)) showed the highest values of resistance to penetration, probably due to low humidity and to the cultivation effects and the use of machines, causing deformation of the soil structure.*

*Index terms: soil resistance mechanics, crop tillage systems, soil compaction, albaqualf.*

## INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul apresenta cerca de 5.676.700 ha de solos de várzeas, encontrados principalmente nas regiões fisiográficas do litoral (planície costeira), da depressão central (depressão periférica) e da campanha (Costa, 1993; Pauletto et al., 1995). Deste total, cerca de 16% são anualmente cultivados com arroz irrigado, sendo o restante utilizado com pastagens e, em pequena escala, com culturas anuais, como milho e soja. Esta baixa utilização com o arroz irrigado tem sido atribuída à alta infestação de plantas daninhas e à diminuição da produtividade com o cultivo contínuo, tornando, assim, necessário o pousio da área por dois a três anos, (Pauletto et al., 1989). Isto é devido, principalmente, à ineficiência no controle das invasoras, seja pelo mau uso de herbicidas, seja pelo uso inadequado da rotação de culturas (Pedrotti et al., 2001).

Os solos de várzea são formados em condições de hidromorfismo (Klamt et al., 1985), sendo desenvolvidos de sedimentos que apresentam grande heterogeneidade, principalmente quanto à composição mineralógica e granulométrica. Isso acarreta grande variação nos seus parâmetros físicos, químicos e biológicos, fazendo com que se encontrem solos com diferentes aptidões de uso (Gomes et al., 1992).

O conhecimento das características e propriedades dos solos de várzea do Rio Grande do Sul, utilizados

atualmente com a cultura do arroz irrigado, torna-se essencial para a adoção de práticas que envolvam irrigação, drenagem, correção da acidez e da fertilidade, principalmente quando se deseja obter altos níveis de produtividade, com menor custo e com menores possibilidades de degradação destes solos e do ambiente onde estão situados (Pedrotti et al., 1995).

O preparo do solo, além de propiciar melhores condições de semeadura, visa controlar plantas daninhas, pragas e doenças e melhorar as condições físicas do solo, buscando principalmente maior infiltração da água e aeração e redução da resistência mecânica do solo à penetração - RP. No entanto, este objetivo nem sempre é alcançado, principalmente quando o cultivo é inadequado e intenso. Em tais circunstâncias, verifica-se uma deterioração da estrutura do solo, pela diminuição da porosidade, da condutividade hidráulica e da permeabilidade da água, proporcionada principalmente pelo aumento da sua resistência à penetração.

A resistência mecânica é um termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. Essa resistência geralmente aumenta com a compactação e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas, o que pode ocasionar uma redução no desenvolvimento do sistema radicular (Benghough & Mullins, 1990).

O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas verificados principalmente no preparo convencional do solo e os longos períodos de inundação, quando do cultivo do arroz irrigado, são alguns dos fatores que podem agravar, ainda mais, os problemas de estrutura já existentes nestes solos. Dentre os vários parâmetros físicos do solo, a resistência mecânica à penetração pode ser empregada para avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo (Bengough & Mullins, 1990; Dias Jr. & Pierce, 1996) por ser de fácil obtenção e de modo rápido.

Qualquer alteração significativa que ocorra na estrutura do solo, seja pela compactação, seja por outro processo, provocará mudanças nas relações solo-ar-água, na resistência mecânica e na própria temperatura do solo e, em conseqüência, na resposta do solo em termos de comportamento físico ao crescimento das plantas. Portanto, é de fundamental importância buscar práticas de manejo de solo, que mantenham ou melhorem as condições estruturais destes solos de várzea (Pedrotti & Dias Jr., 1996).

O presente trabalho objetiva avaliar o estado de compactação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado por meio da resistência mecânica à penetração.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado entre 1985 e 1993, na Estação Experimental de Terras Baixas-EETB, do Centro de Pesquisas Agropecuárias de Clima Temperado-CPACT – EMBRAPA, localizado no município de Capão do Leão, na planície costeira do RS, cujas coordenadas geográficas são: 31° 52' 00" de latitude sul e 52° 21' 24" de longitude oeste, com altitude média aproximada de 13,20 m. O solo da área do experimento, segundo IBGE (1986), foi classificado como Planossolo Solódico, com argila de atividade alta, textura média argilosa com relevo plano, pertencente à Unidade de Mapeamento Pelotas, e classificado segundo Soil

Survey Staff (1990) como um Albaqualf. Os valores de algumas características físicas do perfil modal descrito no local são mostrados no quadro 1.

Do total dos tratamentos que compunham o experimento, foram escolhidos os seguintes: T<sub>1</sub> - Sistema tradicional de cultivo de arroz irrigado: um ano com preparo convencional do solo (aração e gradagem), seguido de dois anos com pousio da área; T<sub>2</sub> - Sistema de cultivo contínuo de arroz, com preparo convencional do solo; T<sub>3</sub> - Sistema de cultivo de arroz com rotação de culturas, com preparo convencional: arroz x soja x milho; T<sub>4</sub> - Sucessão de culturas: azevém no inverno x arroz no verão em sistema de semeadura direta; T<sub>5</sub> - Sucessão de culturas: soja no sistema convencional x arroz no sistema de semeadura direta; T<sub>6</sub> - Testemunha: solo mantido sem cultivo.

O cronograma de execução dos tratamentos que compõem o experimento nas diferentes safras agrícolas é mostrado no quadro 2. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições. As parcelas de cada tratamento abrangiam uma área de 600 m<sup>2</sup> (20 x 30 m), dos quais somente os 200 m<sup>2</sup> centrais (10 x 20 m) foram utilizados nas avaliações.

O experimento foi feito de acordo com os sistemas de cultura. No preparo convencional, fez-se a aração (arado de discos reversível - normalmente em outubro), seguida de uma ou duas gradagens (grade niveladora de discos recortados e lisos) e a semeadura com plantadeira convencional. No sistema de semeadura direta empregado (semelhante a culturas de sequeiro), utilizou-se máquina apropriada para este fim, após a dessecação do azevém no T<sub>4</sub> e da flora de sucessão no T<sub>5</sub> (produtores de cobertura morta) com herbicida de ação total. A adubação empregada baseou-se no resultado da análise de solo (coletado nas parcelas de cada tratamento) e das exigências nutricionais das diferentes culturas plantadas. Realizou-se o controle de pragas e doenças quando necessário, e utilizaram-se na colheita as técnicas convencionais adotadas em experimentos.

**Quadro 1. Profundidade, composição granulométrica e classe textural nos diferentes horizontes do perfil característico do Planossolo**

Horizonte	Profundidade	Granulometria			Classe textural
		Areia	Silte	Argila	
	m	g kg <sup>-1</sup>			
A	0,00-0,20	423	478	98	Franco
AB	0,20-0,29	513	367	120	Franco
B	0,29-0,65	391	293	316	Franco-argilosa

Fonte: Vasconcelos (1993).

**Quadro 2. Cronograma do experimento para os diferentes sistemas de cultivo nas diferentes safras agrícolas**

Tratamento <sup>(1)</sup>	Safrá agrícola							
	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93
T <sub>1</sub>	Arroz	Pousio	Pousio	Arroz	Pousio	Pousio	Arroz	Pousio
T <sub>2</sub>	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz
T <sub>3</sub>	Arroz	Soja	Milho	Arroz	Soja	Milho	Arroz	Soja
T <sub>4</sub>	Arroz	Azevém	Arroz	Azevém/arroz	Azevém/arroz	Azevém/arroz	Azevém/arroz	Azevém/arroz
T <sub>5</sub>	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
T <sub>6</sub>	Solo mantido sem cultivo							

<sup>(1)</sup> T<sub>1</sub> - Sistema tradicional de cultivo de arroz; T<sub>2</sub> - Sistema de cultivo contínuo de arroz; T<sub>3</sub> - Sistema de cultivo de arroz x rotação de culturas; T<sub>4</sub> - Sucessão de culturas: azevém (inverno) x arroz (verão); T<sub>5</sub> - Sucessão de culturas: soja (sistema convencional) x arroz (sistema de semeadura direta); T<sub>6</sub> - Testemunha.

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada em maio/1993 (aproximadamente dois meses após a colheita das culturas da safra de verão 92/93), nas parcelas do experimento em estudo segundo Camargo et al. (1986), utilizando-se o Penetrômetro de Impacto - Modelo IAA/Planalsucar/Stolf, em 10 pontos de uma linha reta distanciados de 2,0 m, paralela à linha de cultivo, passando pelo centro da parcela experimental. Os dados originais de resistência mecânica à penetração obtidos pelo Penetrômetro de Impacto não foram submetidos à análise estatística por se apresentarem desiguais em relação à profundidade no perfil do solo, conforme Peña (1993).

O Penetrômetro de Impacto utilizado apresenta as seguintes características: peso da carga móvel: 4.000,0 g; curso da queda livre: 0,40 m; ângulo do cone da extremidade da haste: 30°; área da base da ponta da haste: 1,29 cm<sup>2</sup>; diâmetro da haste metálica: 0,95 cm e peso total do equipamento: 7,20 kg.

O número de impactos/dm obtidos no campo foram transformados em unidades de resistência do solo (kgf cm<sup>-2</sup>), utilizando-se a seguinte equação:  $R = 5,6 + 6,89 \times N$ ; em que: N - número de impactos/decímetro - impac./dm; R - resistência do solo - kgf cm<sup>-2</sup>. Para possibilitar a comparação com outros dados disponíveis na literatura, os resultados da resistência do solo, obtidos em kgf cm<sup>-2</sup>, foram convertidos para MPa (Stolf, 1991).

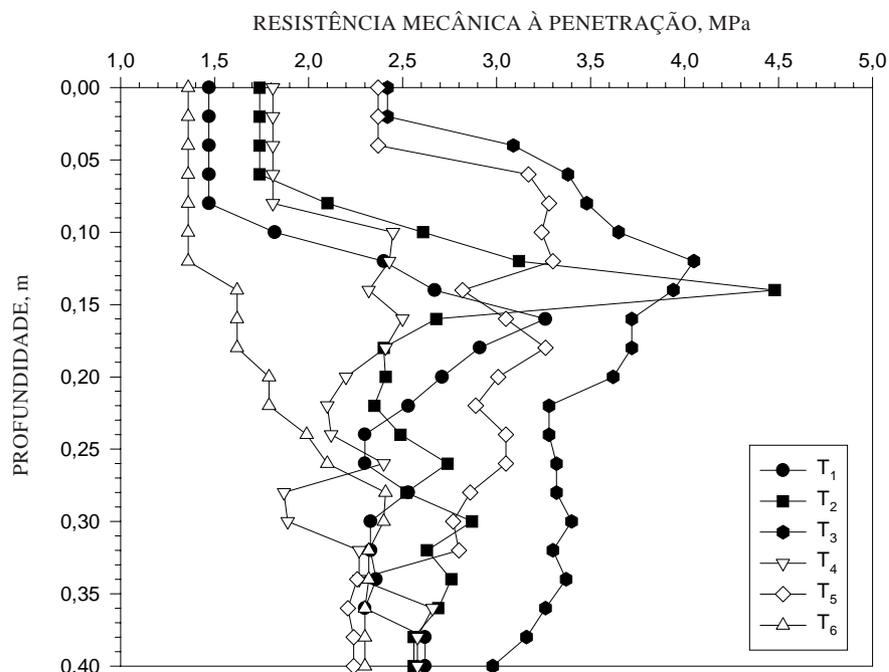
A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico no mesmo dia da avaliação da resistência mecânica do solo à penetração, em três pontos ao longo da linha de determinação, nas profundidades de 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, com três repetições; cujos dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas entre si pelo teste de Duncan.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da resistência mecânica do solo à penetração nos diferentes sistemas de cultivo estudados são apresentados na figura 1. O quadro 3 mostra os valores de umidade gravimétrica determinada por ocasião da determinação da resistência mecânica do solo à penetração. A análise de variância aplicada aos teores de água mostra que houve diferença significativa pelo Teste F para tratamentos, profundidades e para a interação destes dois fatores, mostrando que os tratamentos influem na umidade ao longo do perfil do solo por ocasião da coleta dos dados de resistência mecânica (Quadro 4).

Analisando a figura 1, observa-se, de maneira geral, em todos os sistemas de cultivo que adotaram alguma ação antrópica, o aumento dos valores da resistência mecânica do solo à penetração em relação à testemunha (T<sub>6</sub>), principalmente na camada compreendida entre as profundidades de 0,10-0,20 m, mais notadamente quando o solo foi submetido ao sistema de cultivo de arroz em rotação com culturas (soja e milho) - T<sub>3</sub> e em sucessão de culturas (arroz em PD e soja no sistema convencional) - T<sub>5</sub>; destacando-se que o valor máximo foi obtido no cultivo contínuo de arroz (T<sub>2</sub>) (Figura 1).

Segundo Centurion & Demattê (1992a,b), especialmente em condição de sequeiro, o sistema de cultivo contínuo pode levar à maior compactação na faixa de profundidade de 0,10-0,20 m, em virtude do maior uso e da ação dos implementos agrícolas utilizados principalmente no preparo do solo. Assim, pode-se, de maneira análoga, atribuir o comportamento em condição irrigada de igual forma à condição de sequeiro. Resultados semelhantes foram encontrados por Greenland (1985) em solos cultivados por longos anos com a cultura do arroz irrigado.



**Figura 1.** Resistência mecânica do solo à penetração ao longo do perfil do solo para os diferentes sistemas de cultivo estudados (média de 30 determinações). T<sub>1</sub> - Sistema tradicional de cultivo de arroz; T<sub>2</sub> - Sistema de cultivo contínuo de arroz; T<sub>3</sub> - Sistema de cultivo de arroz x rotação de culturas; T<sub>4</sub> - Sucessão de culturas: azevém (inverno) x arroz (verão); T<sub>5</sub> - Sucessão de culturas: soja (sistema convencional) x arroz (sistema de semeadura direta); T<sub>6</sub> - Testemunha.

**Quadro 3.** Umidade Gravimétrica do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos, obtida, por ocasião da determinação da resistência mecânica do solo à penetração, (média de nove repetições)<sup>(1)</sup>

Tratamento <sup>(2)</sup>	Profundidade (m)			Média
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
	$\text{kg kg}^{-1}$			
T <sub>1</sub>	0,162 bB	0,181 bA	0,184 bcA	0,176
T <sub>2</sub>	0,160 bcB	0,175 cA	0,172 cA	0,169
T <sub>3</sub>	0,124 c C	0,144 deB	0,181 bcA	0,150
T <sub>4</sub>	0,160 bcB	0,161 cdB	0,189 bA	0,170
T <sub>5</sub>	0,121 d B	0,151 dA	0,163 cdA	0,145
T <sub>6</sub>	0,201 a A	0,193 aA	0,198 aA	0,197

<sup>(1)</sup> Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, e maiúscula, na linha, não diferem pelo teste de Duncan a 5%.

<sup>(2)</sup> T<sub>1</sub> - Sistema tradicional de cultivo de arroz; T<sub>2</sub> - Sistema de cultivo contínuo de arroz; T<sub>3</sub> - Sistema de cultivo de arroz x rotação de culturas; T<sub>4</sub> - Sucessão de culturas: azevém (inverno) x arroz (verão); T<sub>5</sub> - Sucessão de culturas: soja (sistema convencional) x arroz (sistema de semeadura direta); T<sub>6</sub> - Testemunha (solo mantido sem cultivo).

Observa-se, ainda, que, nos primeiros 0,10 m de profundidade, os tratamentos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>4</sub> tiveram comportamentos semelhantes aos do tratamento em que o solo foi mantido em condições naturais (T<sub>6</sub>), embora registros na literatura (Machado & Brum, 1978; Abraão et al., 1979; Fernandes et al., 1983;) afirmem que o sistema plantio direto leva a maiores

valores de RP, traduzindo-se em compactação do solo próximo à superfície. Este fato não foi observado neste estudo, provavelmente pela presença contínua de cobertura vegetal, que age de modo conjunto para a manutenção de teores mais elevados de água na camada superficial (Quadro 3) e auxilia a redução dos valores de resistência mecânica à penetração.

**Quadro 4. Análise de variância dos valores de umidade do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), obtidos por ocasião da determinação da resistência mecânica do solo à penetração**

Causa da variação	GL	S.Q.	Q.M.	F	P > F
Blocos	8	0,035	0,004	1,12	0,340
Tratamento	5	0,194	0,038	9,72	0,000**
Profundidade	2	0,473	0,231	57,15	0,000**
Tratamentos x profundidade	10	0,164	0,016	3,91	0,000**
Resíduo	136	0,543	0,005	-	0,000**
Total	161	1,410	-	-	

\*\* significativo a 1%.

Já os tratamentos T<sub>3</sub> e T<sub>5</sub> apresentaram os valores mais altos de resistência à penetração nos primeiros 0,10 m de profundidade, embora tenham sido obtidos valores baixos em umidade por ocasião da coleta e com diferença significativa (Quadros 3 e 4).

A cultura da soja, por proporcionar menor cobertura do solo e sistema radicular pivotante (atingindo somente a linha de cultivo), mostrou menores valores de umidade na entrelinha de cultivo – local das determinações da resistência mecânica à penetração.

Os valores mais elevados da resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo, observados nesses tratamentos, com mais evidência no T<sub>3</sub>, podem também ser devidos à tendência de degradação da estrutura ao longo do perfil do solo provocado pelo uso intensivo da mecanização agrícola adotada no sistema convencional, causando a compactação do solo (Voorhees et al., 1978; Centurion & Demattê, 1992a,b).

Observa-se aumento acentuado dos valores de resistência mecânica à penetração nos tratamentos onde o preparo do solo foi feito no sistema convencional (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>), principalmente entre as profundidades de 0,02 a 0,16 m, passando, por exemplo, de valores de 1,7 MPa a 0,06 m de profundidade para valores de 4,5 MPa a 0,13 m de profundidade no T<sub>2</sub> (Figura 1), mesmo com os valores de umidade do solo diferindo significativamente entre a camada superficial (0-0,10 m) e a intermediária (0,10-0,20 m) nos três tratamentos (Quadro 3).

Os sistemas que envolveram preparo convencional do solo, especialmente o T<sub>2</sub> (pela obtenção do pico máximo de valores de RP), contribuíram para a degradação das condições físicas do solo quanto à resistência mecânica do solo à penetração dentro das condições estudadas, principalmente pelo surgimento da camada intermediária de pé-de-grade (Figura 1).

Tal conseqüência pode ser atribuída à aração (realizada a 0,20 m de profundidade) e às gradagens, podendo ter sido essas situações agravadas quando da sua realização em condição inadequada de umidade do solo (fora da faixa de friabilidade), facilmente encontrada em solos de várzea, marcadamente nos meses antecedentes ao inverno e, ou, final do cultivo do arroz irrigado.

Considerando o sistema de preparo reduzido do solo (T<sub>4</sub>), em média, este propiciou os menores valores de resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo, assemelhando-se com o comportamento do solo mantido sem cultivo (testemunha - T<sub>0</sub>), fato atribuído à contribuição maior do azevém na estruturação do solo, destacando-se seu denso sistema radicular fasciculado e produção de abundante quantidade de matéria seca, responsáveis pela elevação da matéria orgânica e atividade biológica.

De maneira geral, estes resultados são coincidentes com os obtidos por Peña (1993) que encontrou os menores valores de resistência mecânica do solo à penetração antes da semeadura no sistema convencional devido ao próprio revolvimento do solo. Este efeito pode ser considerado temporário, pois, com o passar do tempo, o solo recupera a sua estruturação (diminui a degradação física) de modo natural e, segundo Carter (1988) e Lamarca (1992), este processo é iniciado após a semeadura.

Os trabalhos de Fernandes et al. (1983) e Albuquerque et al. (1995) também revelaram, após várias safras agrícolas, uma inversão no comportamento deste parâmetro. Estes autores enfatizaram que, com o passar do tempo, a resistência mecânica do solo à penetração tendia a aumentar com os sucessivos preparos do solo, o que não se constatou no sistema plantio direto, embora inicialmente apresentasse valores mais elevados. No presente trabalho, verificou-se que, após os sete anos

de cultivo, o sistema plantio direto apresentou valores mais baixos de resistência mecânica à penetração, quando comparado com os sistemas que adotaram alguma ação antrópica.

A ocorrência de valores mais elevados de resistência mecânica à penetração abaixo dos 0,25 m de profundidade, com relação à superfície, é provavelmente promovida em parte à presença do horizonte B com elevados teores de argila (Brasil, 1973) e menos permeável, conforme características texturais e localização do horizonte superficial (Quadro 1). Isto conduz a um menor efeito lubrificante da água ao redor das partículas do solo (Quadro 3) e, conseqüentemente, a valores mais elevados de resistência mecânica à penetração. Baver et al. (1972) destacaram que a resistência à penetração do solo está relacionada com a textura, apresentando os solos arenosos menor resistência à penetração do que os solos argilosos graças à menor manifestação da coesão entre as partículas de areia em relação às de argila.

Os diferentes sistemas de cultivo influenciaram a resistência mecânica do solo à penetração de forma mais acentuada, na camada de aproximadamente 0,08 a 0,20 m (Figura 1). Também observa-se a existência de um pé-de-grade nesta região, principalmente nos tratamentos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>, cujos valores máximos coincidem com os obtidos por Greenland (1985).

O tratamento T<sub>6</sub>, comparado aos demais tratamentos, revela um perfil mais homogêneo e de menor amplitude em termos de valores de resistência mecânica à penetração (Figura 1), não se observando diferença significativa dos valores médios de umidade do solo obtidos nas três camadas estudadas (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), conforme o quadro 3. É provável que essa observação esteja associada ao solo mantido em condições inalteradas, propiciando a ação da micro e mesofauna e a consolidação natural quando este deixa de sofrer manipulação mecânica (mobilização), contribuindo também para a obtenção dos valores mais elevados de umidade do solo (Quadro 3).

Já o perfil de valores mais heterogêneos foi observado no sistema de cultivo contínuo (T<sub>2</sub>), o qual mostra maior amplitude de valores (Figura 1) e diferença significativa dos valores médios das três camadas (Quadro 3), provavelmente pela tendência de degradação da estrutura ao longo do perfil do solo provocado pelo uso intensivo da mecanização agrícola nestes sistemas (Centurion & Demattê, 1992b). Ressalta-se que as camadas compactadas de subsuperfície são mais prejudiciais ao desenvolvimento radicular das plantas do que perfis homogêneos com elevados valores de resistência mecânica à penetração, conforme conclusões de Bacchi (1976).

A grande variabilidade da resistência mecânica à penetração apresenta uma série de implicações no crescimento das raízes e na parte aérea da planta

(Corrochel, 1996). Ao encontrar uma zona de impedimento, a raiz imediatamente emite sinais hormonais à parte aérea que interrompe seu crescimento. Inicia-se a brotação excessiva de raízes laterais que se mantêm confinadas em um pequeno volume de solo. Se há um aumento na resistência do solo na camada superficial, as raízes não conseguem desenvolver-se satisfatoriamente em profundidade no perfil. As plantas, ao explorarem um volume reduzido de solo, ficam sujeitas à subnutrição (embora existam quantidades adequadas de elementos essenciais no solo), ao tombamento ou ao déficit hídrico, por exemplo. Para sobreviver, a planta precisa gastar energia extra. Assim, a resistência mecânica à penetração em uma área agrícola pode vir a comprometer a sua produtividade por reduzir ou impedir o crescimento do sistema radicular e, conseqüentemente, da parte aérea das plantas.

Os valores críticos experimentais e citados na literatura de resistência mecânica à penetração nos quais ocorre impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular são divergentes e variam com o tipo de solo, equipamento utilizado na avaliação e espécie em estudo. Genericamente, são apresentados valores que vão de 1.5 até 3.0 Mpa, conforme Grant & Lafond (1993) e Tormena & Roloff (1996).

Assim, a partir destas avaliações, pode-se deduzir que valores mais elevados de resistência mecânica à penetração na camada intermediária (0,10-0,20 m) deste solo poderão restringir o crescimento do sistema radicular de culturas de sequeiro quando cultivadas sob esta condição.

## CONCLUSÕES

1. De maneira geral, todos os sistemas de cultivo aumentaram os valores de resistência mecânica do solo à penetração em relação à testemunha (T<sub>6</sub>); mais notadamente na camada compreendida entre as profundidades de 0,10 e 0,20 m, principalmente quando o solo foi submetido ao sistema de cultivo contínuo de arroz (T<sub>2</sub>).

2. Os tratamentos T<sub>3</sub> (Sistema de cultivo de arroz com rotação de culturas, com preparo convencional: arroz x soja x milho) e T<sub>5</sub> (Sucessão de culturas: um ano soja no sistema convencional x arroz no sistema de semeadura direta) foram os que apresentaram os valores médios mais elevados de resistência mecânica do solo à penetração ao longo do perfil.

3. O sistema de preparo reduzido do solo (T<sub>4</sub>) - plantio direto sob a resteva do azevém favoreceu a obtenção de condições físicas do solo mais favoráveis quanto à resistência mecânica do solo à penetração ao longo do perfil. Já os sistemas de preparo convencional de solo, especialmente o T<sub>2</sub>, contribuíram para a degradação física do solo, propiciando o surgimento de camadas compactadas.

## LITERATURA CITADA

- ABRÃO, P.R.; GOEFERT, C.F.; GUERRA, M.; ELTZ, F.L.F. & CASSOL, E.A. Efeito de Sistemas de Preparo do solo sobre características de um Latossolo Roxo distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 3:169-172, 1979.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo de solo: efeito sobre a forma de estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.
- BACCHI, O.O.S. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1976. 67p. (Tese de Mestrado)
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.H. Física de suelos. 4.ed. México, Union Topográfica Editorial Hispano Americano, 1972. 529p.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth responses: a review of experimental techniques and root growth responses. J. Soil Sci., 41:341-358, 1990.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 431p.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (IAC - Boletim Técnico, 106)
- CARTER, M.R. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. Can. J. Soil Sci., 68:657-68, 1988.
- CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Sistemas de Preparo de Solo de Cerrado: Efeito nas propriedades físicas e na cultura do milho. Pesq. Agropec. Bras., 27:315:324, 1992a.
- CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. R. Bras. Ci. Solo, 9:263-66, 1992b.
- CORROCHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & SANCHEZ, A.C. Resistência de um Latossolo Roxo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo do solo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO. 23., Águas de Lindóia, 1996. Resumos Expandidos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. (CD Rom)
- COSTA, A.E.M. Quantificação de atributos físicos de solos de várzea relacionados com a disponibilidade de água, espaço aéreo e a consistência do solo. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1993. 129p. (Tese de Mestrado)
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D. & MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (*Typic Argiaquoll* e *Typic Hapludalf*). R. Bras. Ci. Solo, 7:329-33, 1983.
- GOMES, A.S.; CUNHA, N.G.; PAULETTO, E.A.; SILVEIRA, R.J.C. & TURATTI, A.L. Solos de várzea: uso e manejo. In.: MARCÂNTONIO, G., coord. Solos e irrigação. Porto Alegre, UFRGS, FEDERACITE, 1992. p.64-79.
- GRANT, C.A. & LAFOND, G.P. The Effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. Can. J. Soil Sci. 73:223-32, 1993.
- GREENLAND, D.J. Physical aspects of soil management for rice-based cropping systems. In.: INTERNACIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE - IIRI. Soil physical and rice. Manila, pgs. 1985.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro, 1986. v.33. 796p.
- KLAMT, E.; KAMPF, N. & SCHENEIDER, P. Solos de Várzea no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. (Boletim Técnico de Solos, 4)
- LAMARCA, C.C. Rastrojos sobre el suelo. Uma introducción a la cero labranza. Chile, Sur, 1992. 301p.
- MACHADO, J.A. & BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. R. Bras. Ci. Solo, 2:81-84, 1978.
- PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. & NACHTIGALL, G.R. Produtividade do Arroz Irrigado em Sistemas de Cultivo Contínuo e em Rotação com Soja e Milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18, Porto Alegre, 1989. Anais. Porto Alegre, IRGA, 1989. p.150-60.
- PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; FRANZ, A.F.H. & SOUZA, R.O. Manejo de solo e água em arroz irrigado. In.: PRODUÇÃO DE SEMENTES DE ARROZ. PESKE, S.; NEDEL, J. & BARROS, A. eds., Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1995. v.1. p.64-144.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. & CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. Pesq. Agropec. Bras., 36:709-715, 2001.
- PEDROTTI, A. & DIAS Jr., M.S. Compactação do solo: como evitá-la. Agropec. Catarinense, 9:50-52, 1996.
- PEDROTTI, A. Compactação do Solo: um problema oculto. Lav. Arroz, 48:18-21, 1995.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; VAZ, C.M.P.; CRUVINEL, P.E. & CRESTANA, S. Avaliação da densidade global em Planossolo pelo método padrão e por tomografia computadorizada. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, Viçosa, 1995. Resumos Expandidos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Viçosa, 1995. p.125-127.
- PEÑA, Y.A. Efeito de diferentes sistemas de cultivo sobre atributos físicos de um solo de várzea, cultivado com arroz irrigado. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas. 1993. 97p. (Tese de Mestrado)
- SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. 4.ed. Blacksburg, 1990. 422p. (SMSS technical monograph, 6)

- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo R. Bras. Ci. Solo, 15:229-235, 1991.
- TORMENA, C.A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 20:333-339, 1996.
- VASCONCELOS, E.B. Levantamento dos atributos físicos e hídricos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1993. 79p. (Tese de Mestrado)
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G. & NELSON, W.W. Compaction and Soil Structure Modification by Wheel Traffic in the Northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:344-349, 1978.

