

COMPORTAMENTO DE ATRIBUTOS RELACIONADOS COM A FORMA DA ESTRUTURA DE LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE PREPARO E PLANTAS DE COBERTURA⁽¹⁾

**Jeferson Argenton⁽²⁾, Jackson Adriano Albuquerque⁽³⁾, Cimélio
Bayer⁽⁴⁾ & Leandro do Prado Wildner⁽⁵⁾**

RESUMO

Os sistemas de preparo de solo e de culturas têm influência significativa na estrutura do solo e nos fluxos de água e ar. Este trabalho objetivou avaliar os efeitos do manejo do solo sobre as propriedades relacionadas com estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com milho intercalado com plantas de cobertura de verão. Dois experimentos foram realizados em Chapecó (SC), em preparo reduzido (PR), de 1993 a 1998, e preparo convencional (PC), de 1994 a 1998, nos quais foram avaliados três sistemas de cultura: milho + guandu anão, milho + mucuna cinza e milho isolado. Adjacente aos experimentos, foi avaliada uma mata nativa. Em comparação com a mata nativa, os sistemas de preparo modificaram a estrutura do solo, com aumento da densidade e da resistência do solo à penetração e redução da macroporosidade e da porosidade total. Após cinco anos de uso, o PR com milho isolado não recuperou as propriedades relacionadas com a forma da estrutura; entretanto, no sistema milho intercalado com mucuna cinza, notou-se aumento da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica saturada, bem como a redução da densidade do solo. Estas melhorias, advindas do uso de plantas de cobertura, não foram observadas no sistema de preparo convencional. O uso de culturas intercalares foi adequado para melhorar a qualidade física desse Latossolo Vermelho argiloso, especialmente pelo maior aporte de resíduos de culturas.

Termos de indexação: manejo de solo, porosidade, densidade do solo, qualidade física.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado, apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em julho de 2003 e aprovado em abril de 2005.

⁽²⁾ Mestre em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Pesquisador do CNPq. E-mail: jargenton@fischerfraburgo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, UDESC. E-mail: jackson.albuquerque@bol.com.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Pesquisador do CNPq. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁵⁾ Pesquisador do Centro de Pesquisa para Agricultura Familiar – EPAGRI. Caixa Postal 791, CEP 89901-970 Chapecó (SC). E-mail: lpwild@epagri.rct-sc.br

SUMMARY: *STRUCTURAL ATTRIBUTES OF A CLAYEY HAPLUDOX CULTIVATED UNDER DISTINCT TILLAGE METHODS AND COVER CROPS*

Soil tillage and crop systems have significant influence on the soil structure, affecting water and air flow. The objective of this study was to evaluate the effects the management has on the soil properties of a Hapludox cultivated with maize intercropped with summer cover crops. Two experiments were carried out in Chapecó, State of Santa Catarina, Brazil under reduced tillage (RT) from 1993 to 1998 and conventional tillage (CT) from 1994 to 1998. Three cropping systems were evaluated under each tillage system: maize + Cajanus cajan (pigeon pea), maize + Stilozobium niveum (mucuna) and maize in monoculture. For comparison purposes the soil of a adjacent native forest was also sampled. In comparison to the native forest, the tillage systems modified the soil structure by increasing the bulk density and penetration resistance and reducing macroporosity and total porosity. After five years of soil use, the reduced tillage with maize in monoculture had not recovered the properties of soil related to its structure while the use of intercropped maize-Stilozobium niveum increased the soil macropores, total porosity and saturated hydraulic conductivity and reduced the bulk density. These improvements through the use of summer cover crops were not observed under conventional tillage. The use of intercropped systems improved the soil physical quality of this clayey Hapludox, especially due to the increase in crop residue inputs.

Index terms: soil management, porosity, bulk density, soil physical quality.

INTRODUÇÃO

A utilização de práticas conservacionistas de manejo do solo tem recebido grande ênfase atualmente, basicamente no que se refere à manutenção e à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos cultivados e suas implicações no rendimento das culturas. A cobertura do solo por plantas e, ou, seus resíduos determina também maior conteúdo de água no solo, pelo aumento da capacidade de retenção e redução da evaporação (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990; Campos et al., 1994). Como conseqüência, a maior umidade e a menor temperatura em solos cobertos por resíduos de culturas (Salton & Mielniczuk, 1995) favorecem a germinação das sementes e o desenvolvimento inicial das plantas.

O uso e o manejo do solo também influem na estrutura do solo. Normalmente, solos de mata e campo nativo apresentam maior macroporosidade (Albuquerque et al., 2001), conteúdo de matéria orgânica e estabilidade dos agregados (Silva et al., 1998) e menor temperatura máxima e amplitude térmica comparativamente aos solos cultivados (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990; Salton & Mielniczuk, 1995; Costa et al., 2003).

Em solos agrícolas, a pressão exercida na superfície do solo pelo tráfego de máquinas nas operações de preparo aumenta normalmente a densidade do solo e diminui a porosidade total, em especial a macroporosidade (Tsegaye & Hill, 1998). Essa degradação na estrutura é agravada, quando as operações de preparo de solo e tráfego de máquinas nas lavouras são realizadas em solos com

consistência plástica associadas a pressões superiores à pressão de pré-consolidação (Figueiredo et al., 2000; Silva et al., 2000; Silva et al., 2003). Por outro lado, a redução do tráfego de máquinas e do revolvimento do solo, associado ao uso de plantas de cobertura, pode preservar e até mesmo recuperar a estrutura do solo, mantendo, desta forma, o sistema agrícola mais produtivo (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990).

Em preparos com baixo grau de mobilização como o plantio direto, observam-se menor macroporosidade e porosidade total na superfície e maior em subsuperfície, quando comparadas com as do preparo convencional (Oliveira et al., 2003; Bertol et al., 2004; Oliveira et al., 2004). As alterações causadas na porosidade do solo, além de modificar as taxas de trocas gasosas, alteram a disponibilidade de água para as plantas. Neste sentido, Silva et al. (1986) (em Latossolo Roxo textura argilosa e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média) e Oliveira et al. (2004) (em Latossolo Vermelho distrófico) constataram que o uso do solo em relação a uma condição natural modifica a retenção de água, por alterar a distribuição do tamanho dos poros e os teores de matéria orgânica.

Silva et al. (1986) também observaram acentuada queda da condutividade hidráulica saturada com a compactação, provavelmente por causa da redução de poros maiores que 0,05 mm de diâmetro. No estudo de Cintra & Mielniczuk (1983), observou-se que o sistema radicular das plantas tem capacidade diferenciada de se desenvolver em solos compactados. Considerando que o cultivo intensivo normalmente degrada o solo, pela redução de sua

cobertura, estoque de matéria orgânica, estabilidade de agregados, promove a compactação, a erosão e, assim, a queda da produtividade, é necessário avaliar espécies adequadas para superar restrições químicas e físicas, bem como recuperar a qualidade do solo, principalmente quando submetido a diferentes sistemas de preparo.

Este trabalho objetivou avaliar: as propriedades físicas relacionadas com a forma da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com milho, no sistema PR e PC, bem como o efeito da utilização de plantas de cobertura de verão, intercalares ao milho.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado no Centro de Pesquisa para Agricultura Familiar da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), em Chapecó (SC), em um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, com 65 g kg⁻¹ de areia, 265 g kg⁻¹ de silte e 670 g kg⁻¹ de argila. A declividade média do local é de 0,10 m m⁻¹. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo mesotérmico úmido com verão quente (Cfa) (Santa Catarina, 1986). A precipitação pluviométrica anual é de 2.039 mm, variando de 183 mm em janeiro a 148 mm em agosto. A temperatura média anual atinge em torno de 18,1 °C, variando mensalmente de 14,1 a 23,0 °C.

Foram realizados dois experimentos, ambos adjacentes a uma mata nativa, a qual se considerou como condição original do solo. Antes da instalação dos experimentos, as áreas foram cultivadas com preparo convencional durante 25 anos, porém com culturas e adubações diferentes, o que resultou em características químicas distintas (Quadro 1). O experimento I, instalado em 1993, foi realizado no sistema de preparo reduzido (PR), com abertura de sulcos para semeadura do milho com arado estreito (0,1 m) de fabricação artesanal. O experimento II, instalado em 1994, foi realizado no sistema de preparo convencional (PC), com uma aração e duas gradagens. As parcelas no PR foram de 5 x 24 m e no PC de 6 x 24 m.

Cada experimento consistiu de cinco sistemas de cultura, dos quais três foram avaliados neste estudo: milho + guandu anão (*Cajanus cajan* L.) cv. roxo; milho + mucuna cinza (*Stilobolus niveum* Kuntze) e milho isolado. Durante o inverno, as áreas permaneceram em repouso. O manejo do solo iniciou em junho, após a ocorrência das primeiras geadas, com a rolagem dos resíduos do cultivo anterior. Em agosto, anualmente, foi realizada a dessecação no sistema PR e, em setembro, a aração e gradagem no PC. A adubação de manutenção com N, P e K foi feita a lanço, com uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio nas doses recomendadas pela CFS-RS/SC (1995), objetivando o rendimento de 3 a 6 t ha⁻¹ de milho.

A semeadura do milho, cultivar Cargil 701, foi efetuada na primeira quinzena de outubro, com espaçamento de 1,0 m entre linhas e população de 50.000 plantas ha⁻¹. O guandu anão foi semeado 15 dias após a emergência do milho, com uma linha de leguminosa por entre linha de milho e a mucuna cinza, semeada 45 dias após, pelo seu rápido desenvolvimento inicial e hábito de crescimento trepador, nas densidades recomendadas para cada espécie (Monegat, 1996). As ervas espontâneas foram controladas com capinas manuais. As plantas de milho foram dobradas no estágio de maturação fisiológica para favorecer a entrada de luz e o desenvolvimento das leguminosas.

Na primeira amostragem de solo, em junho de 1998, nos sistemas milho + guandu, milho + mucuna e milho isolado, foram coletadas amostras indeformadas em duplicata, nas camadas de 0–0,025, 0,025–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,15 e 0,15–0,20 m, com cilindros metálicos com volume de 50 e 100 cm³, conforme a espessura da camada, 0,025 e 0,05 m, respectivamente. Em seguida, os cilindros foram acondicionados em latas hermeticamente fechadas e levados ao laboratório para determinar densidade do solo, macro e microporosidade, umidade e condutividade hidráulica saturada (Embrapa, 1997).

Na segunda amostragem, realizada em janeiro de 1999, nos sistemas PR, PC e mata, foram coletadas amostras indeformadas em duplicata, a cada 0,05 até 0,40 m, com cilindros metálicos com volume de 100 cm³ e analisadas em relação às mesmas

Quadro 1. Valores de pH_{H2O}, Al, Ca + Mg e K trocáveis, P disponível e matéria orgânica (MO), na camada de 0–0,20 m, e teores de argila, silte e areia, na camada de 0–0,10 m, para o Latossolo Vermelho distroférico, nos experimentos com sistema de preparo reduzido (PR) e preparo convencional (PC)

Sistema	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	K ⁺	P	MO	Argila	Silte	Areia
		————— cmol _c kg ⁻¹ —————			mg kg ⁻¹	————— g kg ⁻¹ —————			
PR	5,4	0,0	8,7	0,72	34	44	669	255	76
PC	5,5	0,3	10	0,47	12	34	687	251	62

propriedades supramencionadas. Adicionalmente, foi avaliada em campo a resistência do solo ao penetrômetro (Bradford, 1986), medida horizontalmente nas trincheiras abertas para coleta de solo, utilizando-se um penetrômetro de bolso da marca Soiltest, com escala de 0 a 5 kg cm⁻², sendo efetuadas cinco leituras em cada camada de 0,05 m. Determinou-se, nos dias 05 e 06 de janeiro de 1999, das 07:00 as 19:00 h, de hora em hora, a temperatura da camada de 0 a 0,05 m com uso de geotermômetros, nos sistemas PR e PC, ambos no sistema com milho isolado e na mata.

Para avaliar o efeito do uso do solo nas propriedades físicas (dados obtidos em janeiro de 1999), foram realizadas comparações relativas ao sistema mata. Em cada sistema de uso, foi feita a análise da variância num modelo experimental de blocos ao acaso, sendo a profundidade de amostragem a causa da variação.

Para avaliar o efeito das plantas de cobertura de verão nas propriedades do solo (amostragem de junho de 1998), em cada sistema de preparo do solo, foi realizada a análise da variância num modelo experimental de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com culturas nas parcelas principais e profundidades nas subparcelas.

Quando os efeitos testados foram significativos, a comparação entre médias foi avaliada pelo teste de Duncan a 5 %. A relação entre densidade do solo e macroporosidade foi testada pela significância dos coeficientes da regressão linear (SAS, 1990).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modificação nos atributos físicos pelo cultivo

Para medir o efeito do cultivo do solo, as propriedades foram avaliadas no sistema com milho isolado, portanto sem o efeito das plantas de cobertura intercalares à cultura principal. Nos dois sistemas de cultivo, a densidade do solo aumentou da superfície até 0,15 m, sendo maior na camada de 0,05 a 0,15 m e a partir dessa diminuiu (Figura 1). Em relação à mata, o aumento da densidade foi observado até 0,35 m, sendo de 71 % no PR e 86 % no PC, na camada de 0,05 a 0,10 m, e 16 % no PR e 10 % no PC, de 0,30 a 0,40 m. Essa compactação, em comparação à condição original, foi devida às pressões exercidas sobre o solo pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, durante 25 anos, antes da instalação e mais cinco anos durante o experimento, conforme constatado também por Oliveira et al. (2003) para um Latossolo Vermelho.

Em alguns pontos avaliados, quando a densidade do solo estava próxima de 1,30 Mg m⁻³, a macroporosidade foi próxima a 0,10 m³ m⁻³ (Figura 2), mínimo adequado para as trocas líquidas

e gasosas dentre o ambiente externo e o solo considerado crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas (Taylor & Ashcroft, 1972; Glinski & Lipiec, 1990; Xu et al., 1992). Entretanto, Grable & Siemer (1968), em um solo franco-argilo-siltoso, avaliando os efeitos da densidade, tamanho de agregados e sucção da água no solo na difusão de O₂, potencial redox e elongação das raízes do milho, concluíram que a porosidade de aeração devia ser de 0,10 a 0,15 m³ m⁻³ para os níveis de O₂ serem adequados para a cultura. Além disso, discutiram que, quanto maior for a demanda de O₂, maior deve ser a porosidade de aeração. Portanto, baseado no critério da porosidade de aeração mínima para as trocas gasosas, quando a densidade do solo for superior a 1,30 Mg m⁻³, indica-se o uso de práticas de cultivo para reduzir a densidade e favorecer o crescimento radicular, principalmente, pela introdução de culturas que aportam grande quantidade de resíduos orgânicos.

Baseados em estudos realizados em lavouras com solos de textura argilosa do Rio Grande do Sul, Reinert et al. (2001) afirmaram ser a densidade crítica ao crescimento radicular quando acima de 1,45 Mg m⁻³, caracterizando, dessa forma, um solo como compactado. Na revisão de Rosenberg (1964), em estudos que envolvem e relação entre densidade

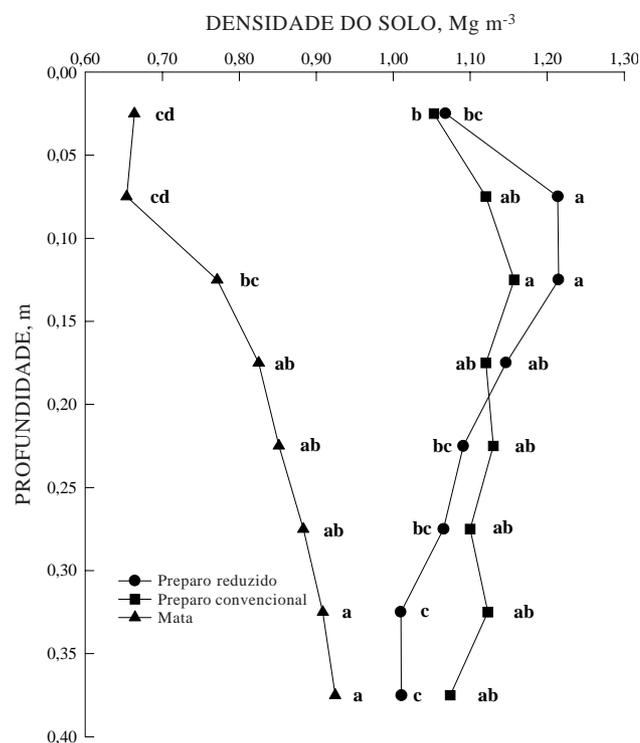


Figura 1. Densidade do solo no sistema de preparo reduzido, preparo convencional e na mata, na profundidade de 0–0,40 m (janeiro de 1999). Letras diferentes indicam diferença estatística entre as profundidades em cada sistema de cultura (Duncan, 5 %).

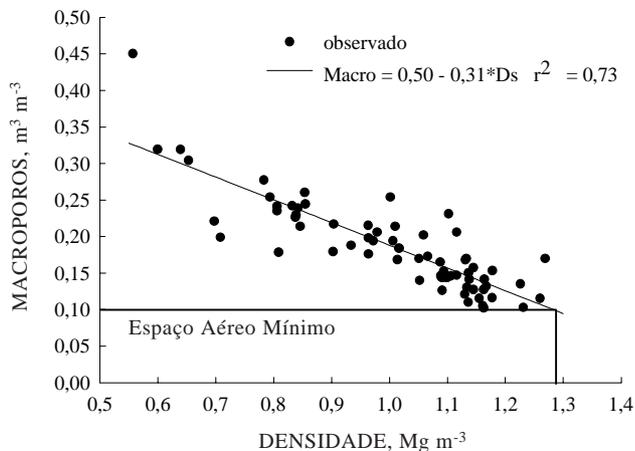


Figura 2. Relação entre macroporosidade e densidade do solo nos sistemas de preparo reduzido, preparo convencional e na mata nativa.

do solo com raízes de plantas, vários níveis de densidade foram citados como limitantes, indicando que, além da densidade, outros fatores interferem no crescimento radicular. Neste sentido, Hakansson & Lipiec (2000) evidenciam que o grau de compactação é uma propriedade adequada para indicar compactação do solo, por constituir um índice que apresenta relação com outras propriedades do solo que restringem o crescimento das raízes, como resistência à penetração e porosidade de aeração do solo.

Para monitorar a qualidade do solo e avaliar a necessidade de alterações no sistema de cultivo, deve ser considerada, além da densidade do solo e, ou, resistência à penetração, a distribuição do sistema radicular, já que, em algumas situações, as culturas conseguem crescimento radicular satisfatório mesmo em solos com um grau maior de compactação, principalmente em períodos de maior umidade do solo e em zonas de menor densidade ou em fendas no solo (Dexter, 1988). Além disso, parte do sistema radicular que não está sob impedimento pode compensar o crescimento, acarretando, desta forma, mudanças na distribuição radicular e não no comprimento total (Unger & Kaspar, 1994).

O aumento da densidade do solo nos sistemas de cultivo foi acompanhado pela redução da microporosidade apenas na camada de 0,05 a 0,15 m, enquanto a macroporosidade reduziu, em média, 35 % em relação à mata (Figura 3). De 0,05 a 0,10 m, camada com maior compactação, apenas 44 % da macroporosidade existente na mata ainda estava preservada quando o sistema utilizado foi o PC. Isso demonstra que a degradação do solo pelo cultivo ocorreu, principalmente, pela redução da macroporosidade, corroborando com resultados observados por Cavanage et al. (1999), quando compararam os sistemas com pinus, pastagem, eucalipto, milho, mata ciliar e cerrado num Latossolo Vermelho-Escuro em Ilha Solteira (SP). Albuquerque et al. (2001) avaliaram, em um Nitossolo Vermelho,

os efeitos da integração lavoura-pecuária em sistemas PC e plantio direto (PD) e observaram drástica redução da macroporosidade em relação à mata nativa, principalmente na camada de 0–0,05 m no PD com pisoteio durante o inverno.

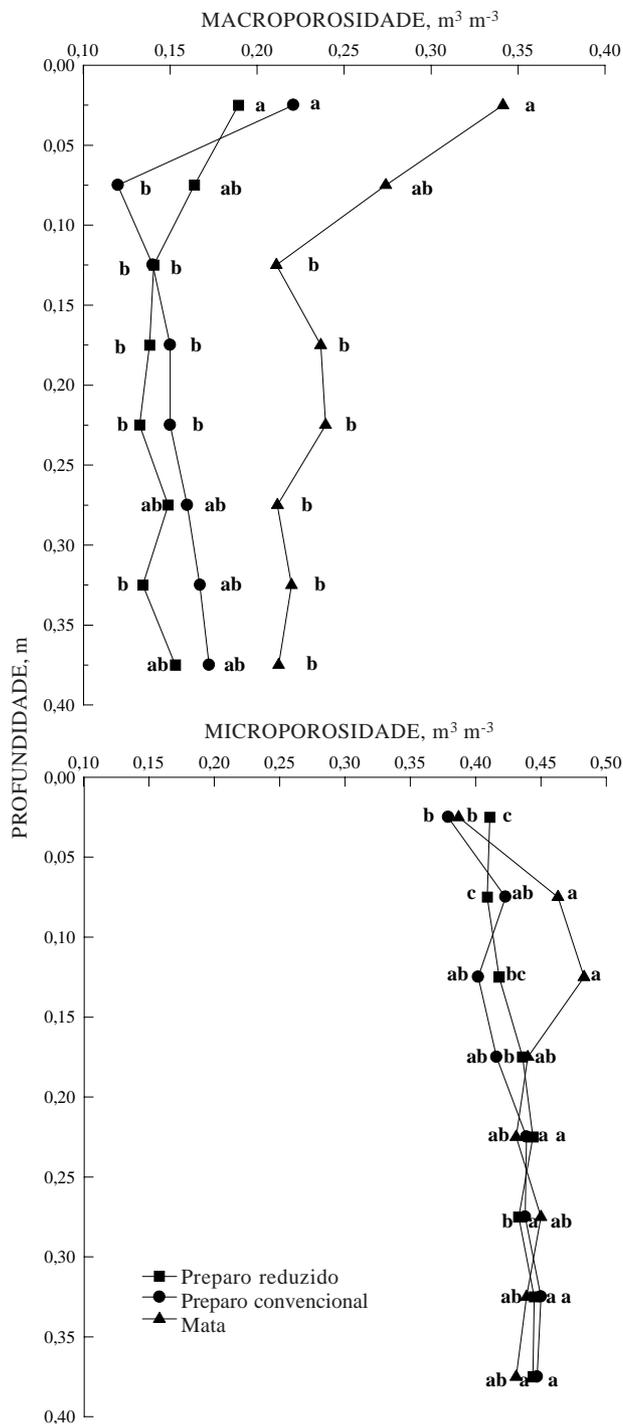


Figura 3. Macro e microporosidade do solo no sistema de preparo reduzido, preparo convencional e mata na profundidade de 0–0,40 m (janeiro de 1999). Letras diferentes indicam diferença estatística entre as profundidades em cada sistema de cultura (Duncan, 5 %).

A umidade volumétrica do solo variou de acordo com a profundidade amostrada (Figura 4). A menor umidade, $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, foi observada na camada de 0–0,025 m na mata nativa e a maior, $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ocorreu na camada de 0,10 a 0,15 m no PC (Figura 4). A queda da umidade verificada de 0 a 0,025 m no PC, em relação às profundidades maiores, pode ser devida a maiores macroporosidade, menores microporosidade e cobertura por resíduos vegetais e maior temperatura do solo que ocorre nesse sistema, durante praticamente todo o dia (Figura 5). As temperaturas máximas registradas próximo das 15 h no dia 05 de janeiro foram de $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ na mata, $26,3 \text{ }^\circ\text{C}$ no PR e $28,3 \text{ }^\circ\text{C}$ no PC e, no dia 06 de janeiro, foram de: $26,2 \text{ }^\circ\text{C}$ no PR e $30,2 \text{ }^\circ\text{C}$ no PC. Normalmente, nos solos cultivados em sistemas conservacionistas, com resíduos mantidos na superfície, a temperatura máxima e a amplitude térmica são menores com reflexos na umidade, especialmente nos primeiros centímetros do solo, conforme relatado por Bragagnolo & Mielniczuk (1990), Salton & Mielniczuk (1995) e Costa et al. (2003). Estas alterações no perfil interferem nas taxas de decomposição da matéria orgânica (Silva et al., 1998) e, conforme Rosenzweig & Hillel (2000), na emissão para a atmosfera de gases como CO_2 , metano e óxido nitroso os quais interferem no clima global.

A lâmina de água armazenada até 0,40 m de profundidade, obtida pela multiplicação da umidade

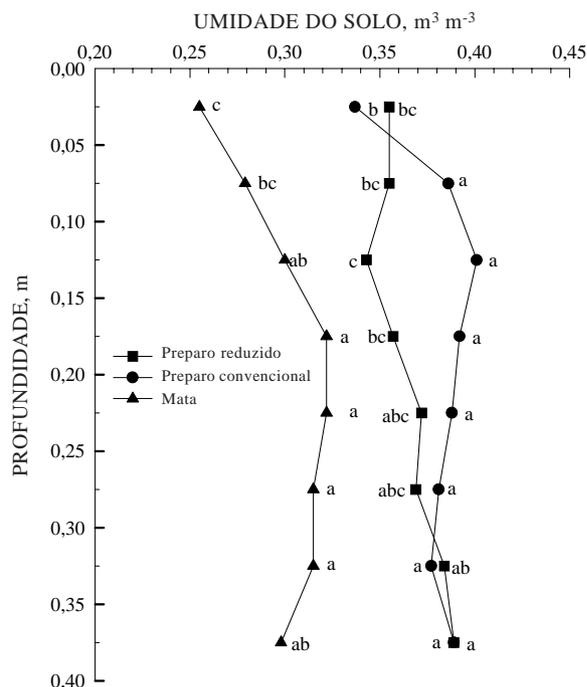


Figura 4. Umidade volumétrica do solo no sistema de preparo reduzido, preparo convencional e mata, na profundidade de 0–0,40 m (janeiro de 1999). Letras diferentes indicam diferença estatística entre as profundidades em cada sistema de uso. (Duncan, 5 %).

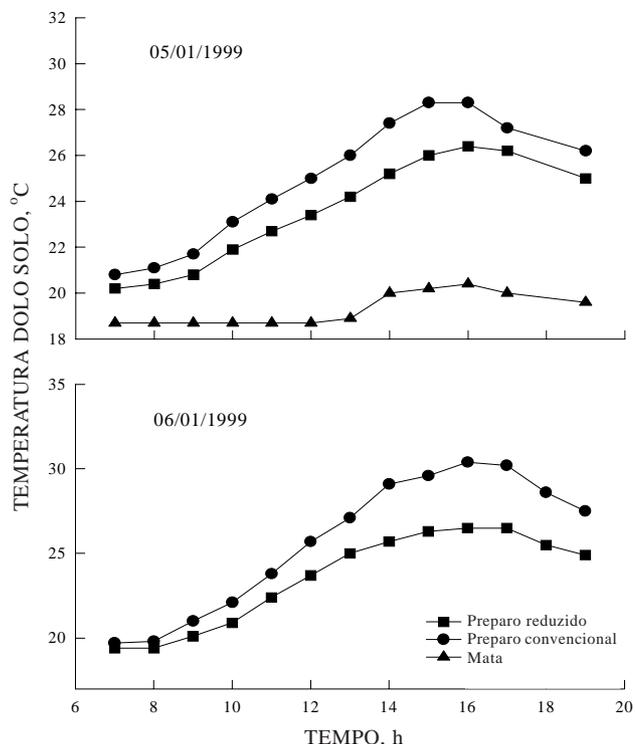


Figura 5. Oscilação da temperatura do solo na profundidade de 0,05 m, das 7 às 19 h, no sistema de preparo reduzido, preparo convencional e mata nativa. Determinações realizadas nos dias 05 e 06 de janeiro de 1999.

volumétrica de cada camada pela sua espessura, foi de 120 mm na mata, 146 mm no PR e 152 mm no PC. O menor volume de água observado na mata em comparação ao dos solos cultivados deveu-se à maior interceptação da precipitação na vegetação, percolação de água no perfil e transpiração, visto que a mata apresentou maior massa verde da parte aérea e macroporosidade e menor densidade do solo. Na mata, os macroporos responsáveis pelo fluxo preferencial determinaram rápida percolação (Bouma, 1991), a qual variou de acordo com a quantidade e intensidade da chuva, textura do solo, microrrelevo e conteúdo de água na superfície do solo.

O aumento na densidade do solo nos sistemas cultivados refletiu-se na resistência do solo à penetração. Comparado à mata, este aumento foi, em média, 2,6 vezes maior no PR e 2,1 no PC, em razão do tráfego de máquinas e equipamentos nos sistemas cultivados. Na camada de 0–0,05 m, a resistência à penetração foi baixa, já que esta foi intensamente revolvida nas operações de lavração, gradagem e, ou, semeadura. No PR, a resistência à penetração aumentou até os 0,20 m e, a partir daí, diminuiu, enquanto no PC e na mata aumentou gradativamente até 0,40 m (Figura 6).

A resistência do solo à penetração na camada de 0,15 a 0,40 m foi superior a $2,0 \text{ kg cm}^{-2}$ nos dois sistemas de cultivo do solo, indicando a formação de

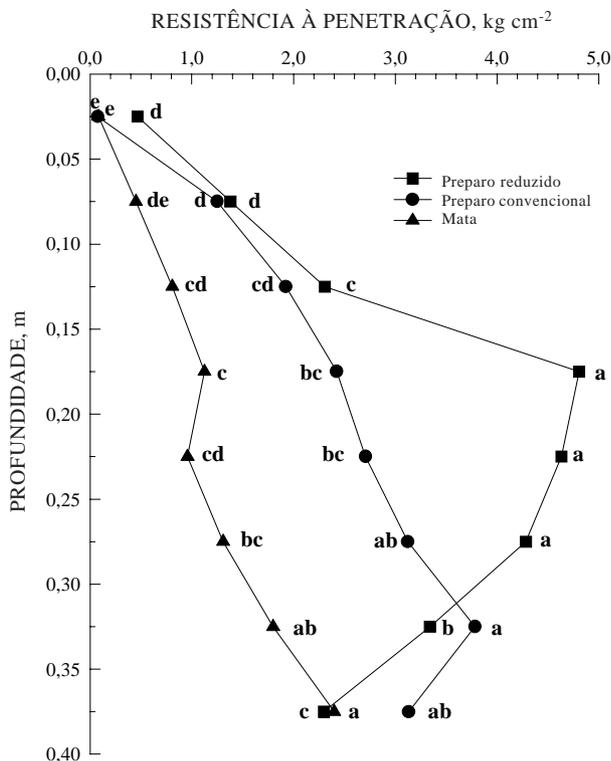


Figura 6. Resistência do solo à penetração no sistema de preparo reduzido, preparo convencional e mata, na profundidade de 0-0,40 m (janeiro de 1999). Letras diferentes indicam diferença estatística entre as profundidades em cada sistema de cultura (Duncan, 5 %).

uma camada subsuperficial compactada, que pode limitar a penetração de raízes. É importante salientar que, no dia da determinação da resistência à penetração, a umidade volumétrica estava, em ambos os sistemas, próximo de 0,37 m³ m⁻³ com pequena variação entre as camadas avaliadas. Outra constatação é a camada que está sendo influenciada pelo preparo: em ambos os sistemas, observou-se aumento da densidade do solo até próximo de 0,35 m e da resistência à penetração até próximo de 0,30 m. Estas medições consideram o efeito cumulativo de uso do solo com culturas anuais por aproximadamente 30 anos.

A maior resistência do solo à penetração no sistema PR de 0,15–0,30 m (Figura 6) pode ocorrer pela interação de vários fatores que agem concomitantemente, a saber: aumento da densidade do solo, maior coesão entre e intra-agregados e menor umidade no momento da medição; no entanto, estas suposições necessitam de comprovação. Esta mesma tendência da resistência à penetração foi observada em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e com mata nativa por Araújo et al. (2004), onde o cultivo elevou a resistência em relação à mata, principalmente nos locais de maior densidade do solo e menor umidade.

Costa (2001), em um Latossolo Bruno do Paraná, verificou que a resistência do solo à penetração variou de 1,3 a 2,4 kg cm⁻² no plantio direto e de 0,3 a 1,1 kg cm⁻² no PC, apesar de não observar diferenças na densidade do solo entre os dois sistemas. Argumentou que a maior resistência à penetração pode ter ocorrido pela maior coesão e estabilidade dos agregados no plantio direto.

A resistência do solo à penetração apresentou relação inversa com a porosidade total (r = -0,51; p < 0,01) e macroporosidade (r = -0,59; p < 0,01) e direta com densidade do solo (r = 0,51; p < 0,01) (Quadro 2), corroborando com o estudo de Voorhees (1982). Como a umidade volumétrica apresentou relação positiva com a densidade do solo, a redução esperada na RP com o aumento da umidade foi contrabalanceada pelo aumento da densidade do solo.

Plantas de cobertura de verão e atributos físicos do solo

Com a introdução de plantas de cobertura intercalares ao milho, eram esperadas alterações em alguns atributos físicos do solo, principalmente pelo maior aporte de resíduos orgânicos na superfície e pelo sistema radicular em subsuperfície. A densidade do solo no PR variou de 1,00, na camada de 0–0,05 m no sistema milho mais mucuna, a 1,18 Mg m⁻³, na de 0,025 a 0,05 m no sistema milho mais guandu (Quadro 3). Na média das camadas, o sistema de cultura milho mais mucuna teve menor densidade do solo, 1,04 Mg m⁻³, comparado aos sistemas com milho mais guandu e milho isolado, ambos com 1,13 Mg m⁻³, evidenciando o efeito benéfico do sistema radicular da mucuna em aliviar a compactação, quando o sistema de preparo é realizado com mínima mobilização do solo. No estudo de Cintra & Mielniczuk (1983), a colza e

Quadro 2. Coeficientes de correlação (r) e probabilidade (p) entre atributos físicos do Latossolo Vermelho para as determinações realizadas em janeiro de 1999

		Macro	Micro	PT	Ds	RP
UV ⁽¹⁾	r	-0,76	0,09	-0,75	0,77	0,47
	p	0,01	0,44	0,01	0,01	0,01
Macro	r		-0,37	0,85	-0,85	-0,59
	p		0,01	0,01	0,01	0,01
Micro	r			0,18	-0,14	0,21
	p			0,14	0,23	0,07
PT	r				-0,99	-0,51
	p				0,01	0,01
Ds	r					0,51
	p					0,01

⁽¹⁾ UV = umidade volumétrica; Macro = macroporos; Micro = microporos; PT = porosidade total; Ds = densidade do solo e; RP = resistência à penetração.

Quadro 3. Carbono orgânico (CO) e atributos físicos do solo nos sistemas de preparo reduzido e preparo convencional com milho mais guandu anão, milho mais mucuna cinza e milho isolado, na camada de 0–0,20 m (junho de 1998)

Sistema de cultura	Profundidade	CO ⁽¹⁾	UV ⁽²⁾	Macro	Micro	PT	Ksat	Ds
	m	g dm ⁻³	m ³ m ⁻³				cm h ⁻¹	Mg dm ⁻³
Preparo reduzido								
Milho + guandu	0,0–0,025	31,8	0,42 ^{ns} (3)	0,15 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,59 a	1,4 ^{ns}	1,07 b
	0,025–0,05	28,3	0,42	0,12	0,43	0,55 b	0,6	1,18 a
	0,05–0,10	24,5	0,40	0,14	0,43	0,57 ab	0,7	1,13 ab
	0,10–0,15	26,5	0,41	0,14	0,43	0,57 ab	6,0	1,14 ab
	0,15–0,20	24,0	0,43	0,11	0,45	0,56 ab	0,1	1,14 ab
	Média			0,41 B	0,13 B	0,44 ^{ns}	0,58 B	1,7 AB
Milho + mucuna	0,0–0,025	37,0	0,44 ^{ns}	0,16 ab	0,45 ab	0,61 a	2,0 ^{ns}	1,01 b
	0,025–0,05	34,4	0,43	0,19 a	0,42 ab	0,61 a	6,6	1,00 b
	0,05–0,10	31,1	0,42	0,17 ab	0,43 ab	0,60 ab	4,9	1,06 ab
	0,10–0,15	29,9	0,42	0,18 a	0,42 b	0,60 ab	2,9	1,05 ab
	0,15–0,20	26,7	0,44	0,11b	0,45 a	0,56 b	0,7	1,13 a
	Média			0,43 A	0,16 A	0,44	0,60 A	3,4 A
Milho	0,0–0,025	28,5	0,40 c	0,16 a	0,42 b	0,58 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,09 ^{ns}
	0,025–0,05	28,3	0,42 b	0,12 ab	0,44 ab	0,56	0,5	1,15
	0,05–0,10	25,5	0,41 bc	0,13 ab	0,44 ab	0,57	0,1	1,14
	0,10–0,15	24,0	0,42 b	0,12 b	0,44 ab	0,56	0,1	1,16
	0,15–0,20	23,3	0,44 a	0,12 b	0,46 a	0,58	0,0	1,14
	Média			0,42 B	0,13 B	0,44	0,57 B	0,3 B
Preparo convencional								
Milho + guandu	0,0–0,025	29,1	0,44 ^{ns} A	0,13 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,9 Bb	1,13 ^{ns}
	0,025–0,05	26,7	0,40 A	0,18	0,40	0,58	16,3 Aa	1,09
	0,05–0,10	27,5	0,40 A	0,14	0,42	0,56	1,2 Ab	1,13
	0,10–0,15	26,5	0,42 A	0,12	0,43	0,55	0,3 Ab	1,16
	0,15–0,20	26,1	0,44 A	0,09	0,46	0,55	0,0 Ab	1,16
	Média			0,42 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,56 ^{ns}	3,9 ^{ns}
Milho + mucuna	0,0–0,025	26,7	0,41 ^{ns} AB	0,16 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,57 ^{ns}	3,0 ^{ns} B	1,13 ^{ns}
	0,025–0,05	27,3	0,41 A	0,15	0,42	0,57	2,4 A	1,14
	0,05–0,10	26,4	0,42 A	0,12	0,44	0,56	0,4 A	1,15
	0,10–0,15	25,0	0,44 A	0,11	0,45	0,56	0,0 A	1,17
	0,15–0,20	24,5	0,44 A	0,11	0,45	0,56	0,5 A	1,16
	Média			0,43	0,13	0,43	0,56	1,3
Milho	0,0–0,025	30,7	0,36 Bb	0,20 a	0,40 c	0,60 ^{ns}	13,3 Aa	1,05 b
	0,025–0,05	26,6	0,42 Ba	0,13 ab	0,43 b	0,56	2,4 Ab	1,17 ab
	0,05–0,10	27,6	0,43 Aa	0,10 b	0,45 ab	0,55	0,2 Ab	1,18 a
	0,10–0,15	27,0	0,44 Aa	0,10 b	0,45 a	0,55	0,1 Ab	1,18 a
	0,15–0,20	24,7	0,45 Aa	0,09 b	0,47 a	0,56	0,1 Ab	1,15 ab
	Média			0,42	0,12	0,44	0,56	3,2

⁽¹⁾ Dados de carbono orgânico obtidos em Spagnollo (2000). ⁽²⁾ UV = Umidade volumétrica; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; Ksat = condutividade hidráulica saturada e; Ds = densidade do solo. ⁽³⁾ Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística entre sistemas de cultura em cada profundidade e minúsculas indicam diferença estatística entre as profundidades em cada sistema de cultura. (Duncan, 5 %).

o tremoço foram mais hábeis em crescer em solo compactado do que a cevada, a soja e o trigo.

No PC, a densidade variou de 1,05, na camada de 0–0,025 m, a 1,18 Mg m⁻³, na de 0,05 a 0,15 m, ambos no sistema com milho isolado (Quadro 3). Não foram detectadas diferenças entre os sistemas de culturas, visto que o efeito do revolvimento do solo,

ao contrário do que se observou no PR, interrompeu a gênese dos macroagregados, os quais dependeriam de CO, raízes e hifas de fungos para manter sua estabilidade, constituintes que são afetados pelo manejo do solo (Tisdall & Oades, 1982). Albuquerque et al. (1995) num Latossolo Vermelho-Escuro, observaram que a densidade do solo variou de 1,00

a 1,26 Mg m⁻³, sendo menor nos sistemas de plantio direto com rotação de culturas do que no PC com sucessão de culturas, evidenciando as melhorias na densidade do solo com o uso de sistemas conservacionistas associado à rotação de culturas.

Com as alterações na densidade do solo, os sistemas também influenciaram a distribuição de tamanho dos poros. No PR, a macroporosidade e a porosidade total foram maiores no sistema com milho mais mucuna e menores no sistema milho mais guandu e milho isolado, enquanto a microporosidade não diferiu entre as culturas. Na média das camadas, no sistema com milho mais mucuna, a macroporosidade e a porosidade total foram maiores, 0,16 e 0,60 m³ m⁻³, enquanto no milho isolado foram menores, 0,13 e 0,57 m³ m⁻³, respectivamente (Quadro 3). No geral, tanto a macroporosidade como a porosidade total diminuíram com a profundidade, enquanto a microporosidade aumentou. Nos três sistemas de culturas, a macroporosidade estava acima de 0,10 m³ m⁻³, portanto superior ao nível considerado crítico para as trocas gasosas (Xu et al., 1992).

No PC, a macroporosidade, microporosidade e porosidade total não diferiram entre os sistemas de cultura, com valores médios, respectivamente, de 0,13, 0,43 e 0,56 m³ m⁻³ (Quadro 3). No sistema de cultura com milho isolado, com o aumento da profundidade, a macroporosidade reduziu de 0,20 para 0,09 m³ m⁻³ e a microporosidade aumentou de 0,40 para 0,47 m³ m⁻³. Em três camadas avaliadas, a macroporosidade foi igual ou inferior a 0,10 m³ m⁻³, valor considerado limitante ao crescimento radicular, pois os espaços para o crescimento das raízes e a difusão de gases mostravam-se reduzidos, enquanto aumentava a concentração de gás carbônico (Xu et al., 1992).

Em ambos os sistemas de preparo, o solo apresentava, no momento da coleta, umidade volumétrica semelhante ao volume de microporos (Quadro 3). A umidade do solo no PR variou de 0,40 m³ m⁻³, no sistema com milho isolado, a 0,44 m³ m⁻³, no sistema com mucuna cinza, ambos na camada de 0–0,025 m (Quadro 3), e na média das camadas foi maior no sistema milho mais mucuna cinza. No PC, a umidade variou mais, de 0,36, na camada de 0–0,025 m, a 0,45 m³ m⁻³, na camada de 0,15 a 0,20 m, ambos no sistema com milho isolado. A umidade no sistema com milho mais guandu na camada de 0–0,025 m foi maior do que no milho isolado.

Campos et al. (1994) salientaram que a umidade do solo devia ser avaliada por longos períodos para trazer resultados confiáveis e que a percentagem de solo coberto e o hábito de crescimento das espécies, ereto ou prostrado, interferiam nos processos de evapotranspiração. Destacaram também que a cobertura vegetal do solo favorecia a infiltração de água e diminuía as perdas por evaporação, mantendo a umidade da camada superficial em períodos de

estiagem, efeito atribuído principalmente às gramíneas, as quais, em decorrência de sua alta relação C/N, permaneciam por mais tempo cobrindo o solo.

A melhoria na estrutura do solo no sistema PR com milho mais mucuna cinza refletiu no aumento da condutividade hidráulica saturada (3,4 cm h⁻¹), comparada ao sistema com milho isolado (0,3 cm h⁻¹), e não diferiu do sistema com milho mais guandu anão (1,7 cm h⁻¹). No sistema PC, a condutividade hidráulica saturada foi maior na camada de 0,025 a 0,05 m no sistema milho mais guandu (Quadro 3). Salienta-se que é uma propriedade que apresenta coeficiente de variação alto, dificultando, dessa forma, a comparação entre os tratamentos (Albuquerque et al., 1995; Costa et al., 2003).

As melhorias nas propriedades físicas do solo no PR com plantas de cobertura podem advir do maior aporte de resíduos orgânicos e da baixa taxa de mineralização (Spagnollo et al., 2002). Os teores de CO variaram de 23,3 na camada de 0,15 a 0,20 m, no sistema com milho isolado, até 37,0 g dm⁻³ na camada de 0 a 0,025 m, no sistema com milho mais mucuna, ambos no PR. Em geral, o CO foi maior na camada de 0–0,05 m no sistema PR do que no PC (Quadro 3). Na média de quatro safras, a mucuna cinza e o guandu anão incorporaram, respectivamente, 4,29 e 5,01 Mg ha⁻¹ no sistema PR e 4,99 e 5,48 Mg ha⁻¹ no sistema PC (Spagnollo et al., 2002), portanto o maior teor de CO no PR deve estar relacionado com a menor taxa de mineralização e não ao maior aporte.

O aumento do CO em sistemas conservacionistas é, geralmente, acompanhado pelo aumento dos teores de nutrientes, principalmente N, adicionados pelos resíduos das plantas de cobertura, com conseqüente aumento da produtividade da cultura principal (Heinrichs et al., 2001; Spagnollo et al., 2002; Giacomini et al., 2003). Portanto, além dos benefícios observados na estrutura do solo, as culturas intercalares nos sistemas conservacionistas aportam mais nutrientes, controlam a erosão, reduzem a ocorrência de plantas indesejáveis e, assim, melhoram a qualidade do solo.

CONCLUSÕES

1. O cultivo do solo, independentemente do sistema de preparo, modificou a estrutura do solo comparativamente à condição original com mata nativa. Compactou a camada até os 0,35 m, reduziu a macroporosidade e a porosidade total e elevou a resistência do solo à penetração.

2. Até o quinto ano de utilização, o preparo reduzido sem o uso de plantas de cobertura do solo não recuperou as propriedades relacionadas com a estrutura do Latossolo Vermelho anteriormente

cultivado com PC; no entanto, quando utilizado com plantas de cobertura, a qualidade do solo melhorou.

3. A introdução de plantas de cobertura intercalares ao milho demonstrou ser uma prática benéfica para as propriedades relacionadas com a estrutura do solo. Dentre as espécies utilizadas, a mucuna cinza no sistema de preparo reduzido apresentou resultados mais promissores, visto que aumentou a macroporosidade, a porosidade total e a condutividade hidráulica saturada e reduziu a densidade do solo, quando comparada com o sistema milho isolado.

4. No Latossolo Vermelho avaliado, quando a densidade do solo for superior a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, podem ser utilizadas práticas de cultivo para reduzir a densidade, principalmente, pela introdução de culturas que aportam grande quantidade de resíduos orgânicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq, pela concessão de bolsas de estudo, e à EPAGRI e UDESC, pelo apoio institucional para a realização deste estudo.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.
- ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. R. Bras. Ci. Solo, 25:717-723, 2001.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.S.; LEITE, D.; AMARAL, A. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. R. Bras. Ci. Solo, 28:155-163, 2004.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. Adv. Agron., 46:1-37, 1991.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.463-477.
- BRAGAGNOLO, N. & MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. R. Bras. Ci. Solo, 14:91-98, 1990.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J.A. & NICOLODI, R. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. Ci. Rural, 24:459-463, 1994.
- CAVANAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. R. Bras. Ci. Solo, 23:997-1003, 1999.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. R. Bras. Ci. Solo, 7:197-201, 1983.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, SBRS-Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.
- COSTA, F.S. Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo em experimento de longa duração. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001. 98p. (Tese de Mestrado)
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 27:527-535, 2003.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil Till. Res., 11:199-238, 1988.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Serviço de Produção de Informação, 1997. 212p.
- FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo, 24:487-493, 2000.
- GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E.R.O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R.S. & FRIES, M.R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em mistura de plantas de cobertura de solo. R. Bras. Ci. Solo, 27:325-334, 2003.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Florida, CRC Press, 1990. 250p.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32:180-186, 1968.
- HAKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Till., 53:71-85, 2000.
- HEINRICHES, R.; AITA, C.; AMADO, T.J.C. & FANCELLI, A.L. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação C/N da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. R. Bras. Ci. Solo, 25:331-340, 2001.
- MONEGAT, C. Plantas de cobertura de solo: Características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó, Edição do Autor, 1996. 337p.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N. & RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 27:773-781, 2003.

- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 28:327-336, 2004.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. & CERETTA, C.A., eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, 2001. p. 114-133.
- ROSENBERG, N.J. Response of plants to the physical effects of soil compaction. Adv. Agron., 16:181-196, 1964.
- ROSENZWEIG, C. & HILLEL, D. Soil and global climate change: Challenges and opportunities. Soil Sci., 165:47-56, 2000.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173p.
- SALTON, J.C. & MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). R. Bras. Ci. Solo, 19:313-319, 1995.
- SAS INSTITUTE - STAT Procedures guide for personal computers. 3.ed. Cary, 1990. 705p.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 10:91-95, 1986.
- SILVA, M.L.N.; BLANCANEAU, P.; CURI, N.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M. & CARVALHO, A.M. Estabilidade e resistência de agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. Pesq. Agropec. Bras., 33:97-103, 1998.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 24:239-249, 2000.
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. Influência do tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 27:973-983, 2003.
- SPAGNOLLO, E. Plantas de cobertura intercalares ao milho em sistema de cultivo mínimo e convencional. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2000. 121p. (Tese de Mestrado)
- SPAGNOLLO, E.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. & PROENÇA, M.M. Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho, no sul do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 26:417-423, 2002.
- TAYLOR, S.A. & ASHCROFT, G.L. Physical edaphology - The physics of irrigated and non irrigated soils. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1972. 532p.
- TISDALL, J. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci., 33:141-163, 1982.
- TSEGAYE, T. & HILL, R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. Soil Sci., 163:143-154, 1998.
- UNGER, W.P. & KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. Agron. J., 86:759-766, 1994.
- VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., 129-133, 1982.
- XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:1743-1750, 1992.

