

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**INDICADORES DE QUALIDADE DE UM LATOSSOLO
VERMELHO APÓS ONZE ANOS EM SISTEMAS DE
CULTIVOS**

Fabiana de Souza Pereira
Engenheira Agrônoma

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CAMPUS DE JABOTICABAL

**INDICADORES DE QUALIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO
APÓS ONZE ANOS EM SISTEMAS DE CULTIVOS**

Fabiana de Souza Pereira

Orientador: Prof. Dr. Itamar Andrioli

Co-orientador: Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Maio de 2009

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FABIANA DE SOUZA PEREIRA – Nasceu no dia 20 de março do ano de 1978, em Ipameri – GO. Coursou todo o Ensino Médio na Escola Estadual Professor Eduardo Mancini, no período de 1993 a 1996. Em julho de 2000, ingressou no curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, e em julho de 2005, obteve o título de Engenheira Agrônoma. Iniciou em março de 2007 o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP. No dia 29 de maio de 2009, submeteu-se à banca para a defesa da dissertação e obteve o título de Mestre em Agronomia.

*Não desanimeis nunca,
embora venham ventos contrários.*

Santa Paulina.

À minha amada família,
Geraldo, Helena, Fabio, Fausto, Faber
por todo amor, carinho, apoio e incentivo

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado.

À minha família, que é a base da minha vida, pelo apoio, incentivo, confiança, que tanto ajudaram a alcançar meu objetivo. Tenho vocês como um exemplo de vida.

Ao Prof. Dr. Itamar Andrioli, pela orientação e amizade, que tanto contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler, pela amizade e apoio recebido.

Às minhas cunhadas, que na verdade são minhas irmãs, Gleciely, Michelle e Mariana, por todo carinho e amizade.

Aos meus sobrinhos Ana Laura e Matheus, e afilhados Edu, Gustavo, Mariana e Maria Fernanda, pelo fato de vocês existirem e fazerem parte da minha vida.

Aos meus tios, tias, primos, primas que sempre me deram força, em especial à minha querida prima Maristela, amiga e conselheira de todas as horas.

Às minhas queridas amigas Cinara e Amanda, por toda atenção, apoio e companheirismo. Obrigada por fazerem parte da minha vida.

Aos meus amigos Ricardo, Marcus, Leandro, Valdeci, Daniela Abreu e Liliam pelos momentos inesquecíveis juntos, por todo carinho, companheirismo, pelos ensinamentos, muito obrigada!!

Aos amigos da pós-graduação Alba, Cristiano, Adolfo, Tatiana, Anderson Silva, Anderson Luiz e a todos os outros, pela amizade durante essa caminhada.

À república kioco house, valeu Erika, aprendi muito com você, minha amiga!!

À república “eta nós”, pelos maravilhosos momentos juntas, valeu meninas!

A todos os professores da pós-graduação que contribuíram para a minha formação profissional.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Célia Regina Muniz, Maria Inês Bueno, Martha dos Santos, Cláudia Cirilo, Luis Souza, Orivaldo Rosa, Orivaldo Gomes, Dejair Silva, Ademir Silva, Anderson Silva, Mauro Alves, Wanderlei Dibeli, pela prontidão nos momentos que precisei e pela amizade.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção, pela ajuda e atenção recebida.

Às funcionárias da seção de Pós-Graduação e aos funcionários da Biblioteca da FCAV, pelo atendimento e auxílio.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Indicadores da qualidade física do solo	4
2.2. Densidade e porosidade do solo.....	5
2.3. Agregação do solo	5
2.4. Resistência do solo à penetração das raízes.....	6
2.5. Intervalo hídrico ótimo.....	7
2.6. Índice S.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5. CONCLUSÕES	25
6. REFERÊNCIAS	26

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha (θ_{PMP}) no Latossolo Vermelho.....	19
Figura 2. Curvas de retenção de água de um Latossolo Vermelho em sistemas de manejo.....	21

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Matéria orgânica avaliada em diferentes tratamentos e camadas de um Latossolo Vermelho distrófico	15
Tabela 2. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes sistemas de manejo	16
Tabela 3. Densidade do solo nos sistemas de manejo para a camada de 0-0,20m.....	18
Tabela 4. Índice S para os sistemas de manejo estudados nas camadas de 0-0,05 e 0,10-0,15m e a produtividade do milho	23
Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores da qualidade física do solo MO (matéria orgânica), Ds (densidade do solo), PT (porosidade total), Ma (macroporosidade), S (índice S) e Prod (produtividade)	23

INDICADORES DE QUALIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO APÓS ONZE ANOS EM SISTEMAS DE CULTIVOS

RESUMO – O monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físicos é importante para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Um atributo indicador da qualidade do solo deve ser sensível às variações do manejo ao qual está sendo submetido. O intervalo hídrico ótimo (IHO) permite visualizar os efeitos dos sistemas de manejo na melhoria ou na degradação da qualidade física do solo. O índice S é um indicador de qualidade física do solo que indica a distribuição do tamanho dos poros. Objetivou-se com este estudo avaliar a qualidade física do solo utilizando como parâmetros a porosidade, a densidade do solo, o IHO, o índice S, a agregação e a produtividade de milho em um Latossolo Vermelho distrófico, após 11 anos de cultivo de plantas de cobertura em pré-safra ao milho, em sistema de plantio direto com as seguintes plantas de cobertura: crotalária (SDC), milheto (SDM), labe-labe (SDL) e sistema convencional (SC). O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro tratamentos e seis repetições. Os sistemas de plantio direto resultaram em um incremento da porosidade total. O SC não diferiu do SDL e do SDC quanto à macroporosidade. O SC e o SDC apresentaram menor densidade do solo. O intervalo hídrico ótimo nos sistemas de plantio direto foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo, e na parte inferior pela resistência do solo à penetração. O solo apresentou boa qualidade física, verificado através do IHO. Os sistemas de plantio direto apresentaram maior teor de matéria orgânica em relação ao SC nas camadas de 0-0,05 m. Maiores valores de diâmetro médio ponderado e geométrico dos agregados também foram observados nesse sistema. O solo apresentou boa qualidade física determinada pelo índice S, não apresentando valores inferiores a 0,035.

Palavras chave – sistemas de manejo, atributos físicos, índice S

Indicators of quality of an Oxisol after eleven years in cropping systems

SUMMARY – The monitoring of soil quality by physical attributes is important for the evaluation of the sustainability of agricultural systems. An attribute indicator of soil quality should be sensitive to changes in management which is being submitted. The Least limiting water range (LLWR) will see the effects of management systems or in improving the degradation of soil physical quality. The parameter S is an index of soil physical quality that shows the size distribution of pores. The objective of this study to evaluate the soil physical quality parameters using the porosity, the density of the soil, the LLWR, the index S, the aggregation and productivity in an Oxisol after 11 years of cultivation of plant cover in pre-harvest maize in the conventional system and no tillage with cover plants, sunn hemp (*Crotalaria juncea*), millet (*Pennisetum americanum sin.thiphoydes*), lab-lab (*Dolichus lablab*). The experimental design was a randomized block design with four treatments with split-plot and six replications. The tillage systems resulted in an increase in total porosity. The conventional system did not differ from lab-lab and sunn hemp on macroporosity. The sunn hemp and the conventional system showed lower bulk density. The least limiting water range of tillage systems has been limited in part by the higher water content at field capacity, and in part by lower resistance to penetration. The soil showed a good physical quality, verified by the LLWR. The tillage systems had higher organic matter content in the layers of the conventional system 0-0.05 m. Higher mean weight diameter of aggregates were also observed in this system. The soil showed a good physical quality determined by the index S, which could not be less than 0.035.

Keywords – management systems, physical attributes, S index

1. INTRODUÇÃO

A adoção de sistemas adequados de uso e manejo dos solos agrícolas é essencial para a sua conservação, contribuindo para o aumento da produtividade das culturas, além da preservação do meio ambiente.

O cultivo intensivo do solo e seu preparo em condições inadequadas alteram os fatores de crescimento das culturas. Tais alterações são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo que nos conservacionistas, sendo que estas se manifestam nas modificações que ocorrem na estrutura do solo, que são evidenciadas por alterações nos valores de densidade do solo, resistência mecânica à penetração, porosidade total, porosidade de aeração, armazenagem e disponibilidade de água às plantas.

Entre os sistemas de manejo utilizados no cultivo de culturas anuais, o sistema plantio direto cresce anualmente e foi consolidado como um modelo de agricultura sustentável economicamente. Introduzido inicialmente no sul do Brasil, esse sistema caracteriza-se por um pequeno revolvimento superficial do solo apenas no sulco de semeadura e manutenção de restos culturais na superfície.

Entretanto, as regiões norte e nordeste do Estado de São Paulo, bem como a região do cerrado que abrange outros estados, apresentam inverno seco, o que compromete o cultivo de plantas de cobertura com finalidade de produção de fitomassa e melhoria das propriedades do solo, da forma que tem sido realizado com sucesso no Sul do país. Uma das alternativas é o cultivo de espécies de cobertura no início da primavera, aproveitando as primeiras chuvas e parte do verão, antecedendo as culturas comerciais. Entretanto, há necessidade de maiores estudos sobre a utilização de plantas de cobertura em pré-safra, nas condições de clima tropical com verão quente e chuvoso e inverno seco.

Além de alguns atributos físicos utilizados para monitorar a qualidade física do solo, foi sugerido o *Least Limiting Water Range* (LLWR). Segundo LETEY (1985), o crescimento das plantas está diretamente relacionado a quatro fatores físicos: água,

aeração, resistência do solo à penetração e temperatura. Baseado nisso, SILVA et al. (1994) aprimoraram o LLWR, traduzido como intervalo hídrico ótimo (IHO), que integra os três primeiros atributos em função da densidade do solo. O IHO é definido como a faixa de conteúdo de água em que as limitações às plantas por água, resistência do solo à penetração e aeração são mínimas.

Na modelagem do IHO, a resistência do solo à penetração (RP) é um dos atributos físicos considerados, cujo valor de 2,0 MPa comumente utilizado tem sido questionado como valor limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea para as diferentes culturas, sistemas de manejo e classes de solos.

Em relação às propriedades físicas do solo, as plantas de cobertura, bem como seu tempo de utilização, têm papel na melhoria da estrutura do solo, a qual segundo LETEY (1985) exerce grande influência na movimentação e infiltração de água, transferência de calor e aeração. Por sua vez, a melhor qualidade estrutural do solo coincide com maior agregação.

A formação e manutenção de um alto grau de agregação do solo é uma das mais importantes e difíceis tarefas em seu manejo. A formação de agregados na superfície provoca diminuição da densidade e aumento da macroporosidade do solo.

Em muitos solos, a matéria orgânica é o principal agente responsável pela formação e estabilidade dos agregados, devido ao fato de fornecer substrato energético.

A qualidade física do solo é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários e deve ser avaliada por meio de parâmetros que descrevem o seu comportamento.

DEXTER (2004) sugeriu a utilização do parâmetro “S”, definido como a inclinação da curva de retenção de água no ponto de inflexão. Assim, “S” > 0,035 foi estabelecido, utilizando resultados experimentais, como favorável para o crescimento das raízes, e abaixo desse valor restritivo. Ou seja, valores > 0,035 indicam uma adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independente do tipo de solo, em clima temperado. Objetivou-se com este estudo avaliar a qualidade física do solo utilizando como parâmetros a porosidade, a densidade do solo, o IHO, o

índice S, a agregação e a produtividade do milho em um Latossolo Vermelho distrófico, após 11 anos de cultivo de plantas de cobertura em pré-safra ao milho em sistema de plantio direto e em sistema convencional (SC).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Indicadores da qualidade física do solo

Para avaliar a qualidade física do solo, faz-se necessário selecionar algumas de suas propriedades que são consideradas como atributos indicadores (DORAN & PARKIN, 1994). Um eficiente indicador deve ser sensível às variações do manejo, bem correlacionado com as funções desempenhadas pelo solo, capaz de elucidar os processos do ecossistema, ser compreensível e útil para o agricultor e, preferencialmente, de fácil e barata mensuração (DORAN & ZEISS, 2000).

A avaliação dos efeitos de sistemas de preparo na qualidade física do solo tem sido feita com a utilização de diferentes atributos do mesmo. A densidade e a porosidade do solo têm sido comumente utilizadas (CORSINI & FERRAUDO, 1999). A resistência do solo à penetração também tem sido muito utilizada pela facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas. No entanto, preconiza-se que a avaliação da qualidade física do solo deva integrar diferentes propriedades em um reduzido número de parâmetros que expresse o ambiente físico a que as plantas são submetidas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

Várias estratégias de avaliação da qualidade física do solo têm sido propostas. Dentre elas, destacam-se as que consideram a necessidade de um conjunto de atributos químicos, físicos e biológicos para a obtenção de um índice confiável de qualidade do solo (DORAN & PARKIN, 1994).

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (DEXTER & YOUNGS, 1992).

A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um desequilíbrio no ecossistema, modificando as propriedades do solo, cuja intensidade

varia com as condições de clima, uso e manejos adotados, e a natureza do solo (GODEFROY & JACQUIN, 1975).

2.2. Densidade e porosidade do solo

A densidade e a porosidade do solo refletem o impacto dos estresses aplicados ao solo pelos sistemas de preparo e pelo tráfego de máquinas na área (KAY & ANGERS, 2000).

Mudanças na densidade do solo são facilmente medidas e podem ser um indicador de alterações em sua qualidade. De acordo com LIEBIG & DORAN (1999), devem ser escolhidos indicadores que possam ser utilizados em áreas distintas, independentemente da diversidade de situações. Os indicadores a serem utilizados devem ser facilmente quantificados e seus efeitos de fácil interpretação, de forma a viabilizar sua utilização para os agricultores e técnicos.

Aumentos na densidade geralmente implicam diminuição na qualidade do solo para crescimento radicular, redução da aeração e mudanças indesejáveis no comportamento da água no solo. Altas densidades podem ocorrer naturalmente no perfil do solo ou podem ser decorrentes da compactação proveniente da ação humana.

STONE et al. (2002) relataram, em várias situações, a ocorrência do aumento da densidade do solo e da diminuição da macroporosidade em sistema de plantio direto.

Cruz et al. (2003), avaliando as propriedades físicas de um solo submetido ao sistema de plantio direto com três anos de condução e ao sistema de preparo convencional, observaram que o solo, sob o preparo convencional, apresentou maior porosidade total e macroporosidade na camada de 0-0,10 m e maior microporosidade na camada de 0,10-0,20 m, e os maiores valores de densidade do solo foram observados na camada de 0-0,10 m sob o sistema de plantio direto.

2.3. Agregação do solo

Em sistemas conservacionistas de manejo de solo, o uso de plantas de cobertura apresenta-se como uma prática básica, pois protege a superfície contra os agentes erosivos (SCHICK et al., 2000), além de destacar o efeito físico das raízes sobre a formação e manutenção dos agregados do solo (TISDALL & OADES, 1980; SILVA et al., 1998).

WOHLENBERG et al. (2004) observaram que a maior estabilidade estrutural ocorreu no solo sob campo natural e a menor em campo descoberto, em virtude do intenso preparo do solo e da redução do teor de matéria orgânica, aumentando os agregados de menor tamanho.

Para um mesmo tipo de solo, diferentes práticas de manejo poderão afetar diretamente suas propriedades, incluindo os processos de agregação. O sistema de plantio direto, ao manter os resíduos culturais na superfície, poderá aumentar a matéria orgânica e melhorar a agregação do solo em relação ao sistema convencional (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990). Por outro lado, no sistema convencional, a ruptura dos agregados ocasionada pelo preparo do solo poderá acelerar as perdas de C-orgânico pela oxidação da matéria orgânica (MENDONÇA & ROWELL, 1994).

SOUZA NETO et al. (2008) observaram que a substituição do preparo convencional pelo plantio direto favoreceu a estabilidade dos agregados do solo.

Os mecanismos de formação das diferentes classes de tamanho dos agregados são influenciados pela matéria orgânica, cuja quantidade irá permitir maior ou menor agregação, resultando em menor ou maior perda de solo (CASTRO FILHO & LOGAN, 1991).

2.4. Resistência do solo à penetração das raízes

A resistência do solo à penetração é um atributo físico adotado como indicativo da compactação do solo (IMHOFF et al., 2000) por apresentar relações diretas com o

crescimento das plantas (HOAD et al., 2001) e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à densidade do solo (SILVA, 2003). A resistência do solo à penetração é influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela sua condição estrutural (TARDIEU, 1994), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos às plantas.

A compactação do solo é um processo que leva ao aumento de sua resistência, redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água.

Em um trabalho realizado por TORMENA et al. (2002), foi verificado maiores valores de resistência do solo à penetração no plantio direto e preparo mínimo, independente da época de avaliação e da umidade do solo.

Segundo BEUTLER et al. (2006), o valor de resistência do solo à penetração, a partir do qual ocorreram reduções de produtividade, variou entre as cultivares de soja de 2,24 a 2,97 MPa, para um Latossolo Vermelho textura média.

FREDDI et al. (2006) observaram que valores de resistência do solo à penetração variando de 0,90 a 2,00 MPa não diminuíram a produtividade do milho.

As modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor compactação, o que poderá interferir na resistência do solo à penetração, densidade e porosidade do solo influenciando o crescimento radicular e por fim a produtividade das culturas (FREDDI et al., 2007).

2.5. Intervalo Hídrico Ótimo

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo (DE MARIA et al., 1999), porosidade do solo (BEUTLER et al., 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (DE MARIA et al., 1999; BEUTLER et al., 2001).

Neste sentido, Lal (1994) sugere que estas avaliações utilizem medidas integradoras do comportamento físico do solo, fazendo menção ao IHO. Os valores médios de propriedades, como densidade, água disponível e porosidade do solo, permitem comparar os efeitos dos sistemas de manejo e, por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a utilização do IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, aeração e resistência do solo à penetração, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Nesse contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por TORMENA et al. (1998), a partir do trabalho de SILVA et al. (1994), incorpora num único dado à amplitude de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que ele está submetido. Dessa maneira, o IHO é utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo, como proposto por SILVA et al. (1994).

CAVALIERI et al. (2006) constataram que o solo, sob diferentes sistemas de preparo, apresentou valores distintos em relação ao IHO. TORMENA et al. (1998), BEUTLER et al. (2004a) e FREDDI et al. (2007) verificaram, em solos tropicais, que o IHO foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo, e na parte inferior pela resistência do solo à penetração.

Embora cada solo apresente problemas únicos, determinados princípios são relevantes no manejo do solo, para que suas propriedades físicas não sejam afetadas e não afetem conseqüentemente a produtividade.

2.6. Índice S

A qualidade física do solo é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários e deve ser avaliada por meio de parâmetros que descrevem o seu comportamento.

Outro indicador utilizado para a avaliação da qualidade física do solo para fins agrícolas é o índice “S”, que foi sugerido por DEXTER (2004). Dessa forma, fatores que alteram a distribuição do diâmetro dos poros, como o uso e manejo do solo, podem ser avaliados e comparados diretamente por esse parâmetro, no entanto, há necessidade de estudos com o parâmetro “S” em solos tropicais.

Segundo TORMENA et al (1998), o índice S diferenciou os sistemas de preparo e as posições de amostragem, sendo $S_{PD} < S_{PC}$ (índice “S” em plantio direto e índice “S” em plantio convencional, respectivamente), independente das posições de amostragem linha e entrelinha. Na posição linha verificaram-se maiores valores de S tanto em PD como em PC. O valor de S diminuiu com o aumento da densidade do solo, indicando redução da sua qualidade física, associada à compactação do mesmo.

SILVA et al. (2008) mostrou que a área de mata nativa apresentou melhor qualidade física do solo, determinada pelo índice S, em relação às áreas de plantio direto.

Em um trabalho realizado por MARCHÃO et al (2007), verificou-se que o parâmetro S variou em função dos sistemas de manejo e da profundidade de amostragem, demonstrando ser um índice sensível às alterações na estrutura do solo. Os resultados confirmam a hipótese estabelecida e sugerem que mais estudos devem ser conduzidos para quantificar o índice S em diferentes solos e sistemas de manejo sob condições tropicais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Jaboticabal – SP (21°15' S e 48°18' W; 595 m de altitude), em uma área com 11 anos de adoção de sistemas de manejo do solo. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas moderadas (média de 22,4°C), verão quente e chuvoso e precipitação média anual de 1285 mm.

A área do experimento é representada por um Latossolo Vermelho distrófico textura média típico (LVd) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999), cuja composição granulométrica foi determinada na camada de 0-0,20 m em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O LVd apresentou 310 g kg⁻¹ de argila, 48 g kg⁻¹ de silte e 642 g kg⁻¹ de areia. O solo da área do sistema convencional apresentou uma saturação por bases de 53%, o sistema direto crotalária 63%, o sistema direto milho 60%, e o sistema direto labe-labe 61%.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro tratamentos e seis repetições, constituídas de 4,5 m de largura e 20 m de comprimento.

A área experimental foi cultivada desde 1995 sob sistema convencional e sistemas de semeadura direta com plantas de cobertura em pré-safra (setembro a dezembro). As culturas anuais foram o milho durante os anos de 1995 a 1997, a soja entre 1998 a 2000, e o milho de 2001 a 2007. Desde o ano de 2001, a área vem sendo cultivada anualmente com milho (*Zea mays*), sob o sistema de semeadura direta com as seguintes plantas de cobertura: crotalária (*Crotalaria juncea*) (SDC), milho (*Pennisetum americanum*) (SDM), labe-labe (*Dolichus lablab*) (SDL), e sistema convencional (gradagem aradora e duas niveladoras) (SC).

A semeadura das plantas de cobertura foi realizada do início das primeiras chuvas até a segunda quinzena de setembro. Utilizou-se uma semeadora de plantio

direto provida de sulcador, no espaçamento de 0,45 m entrelinhas e 50, 20 e 30 kg ha⁻¹ de sementes de crotalária, milho e labe-labe, respectivamente. No início de dezembro, foram realizadas as dessecações mediante a aplicação de herbicida glifosate (2,4 kg ha⁻¹ de i.a.), e, em seguida, foram realizadas as semeaduras de milho nos sistemas convencional e direto.

As amostras de solo foram coletadas na primeira quinzena de março de 2007, aproximadamente três meses após a semeadura do milho. Foram coletadas duas repetições de seis amostras indeformadas de solo, por meio de cilindros de 53,16.10⁻⁶ m³, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m nas entrelinhas, totalizando 48 amostras em cada tratamento, para determinação do intervalo hídrico ótimo. Para a determinação do índice S, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, foram coletadas amostras nas mesmas profundidades citadas anteriormente, sendo que o índice S foi determinado nas camadas de 0-0,05 e 0,10-0,15 m. As amostras foram saturadas e submetidas às tensões de 0,001, 0,006, 0,01, 0,033, 0,06 e 0,3 MPa, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Ao atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), em duas repetições por amostra, perfazendo 100 leituras por repetição, que foram utilizadas para a obtenção da RP média. A RP em cada tensão foi determinada com o penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 0,01 m min⁻¹, cone com ângulo de 30° e com área de base de 2,96 x 10⁻⁶ m², equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998).

Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a 105°C, durante 24 horas, para a determinação do conteúdo de água em cada tensão e da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986). A microporosidade foi determinada por secagem na tensão de 0,006 MPa, em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986), a porosidade total segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), e a macroporosidade obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), a curva de retenção de água foi ajustada utilizando o modelo não linear empregado por SILVA et al. (1994), na forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln\theta = \ln a + b \ln D_s + c \ln \Psi \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}), Ψ é a tensão de água no solo (hPa) e a, b, c são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

A curva de resistência do solo à penetração foi ajustada utilizando o modelo não linear proposto por BUSSCHER (1990), na forma log-transformada, a seguir:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln D_s \quad (2)$$

em que d, e, e f são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

A partir dos valores estimados dos parâmetros aplicou-se o antilogaritmo e foram obtidos os valores estimados dos atributos físicos. Assim, assumindo-se o conteúdo de água na capacidade de campo equivalente à tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente de 15000 hPa, o θ_{CC} e θ_{PMP} foram estimadas pelas equações (3) e (4), respectivamente, obtidas da equação (1):

$$\theta_{CC} = \exp^{a \cdot D_s^b \cdot 100^c} \quad (3)$$

$$\theta_{PMP} = \exp^{a \cdot D_s^b \cdot 15000^c} \quad (4)$$

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi obtido pela equação (5), obtida da equação (2):

$$\theta_{RP} = (RP_{(crí.t.)} / (\exp^d (D_s^e)))^{1/f} \quad (5)$$

O conteúdo de água, cuja porosidade de aeração é igual a 10%, foi calculado pela equação (6) a seguir:

$$\theta_{PA} = 1 - (D_s / D_p) - 0,1 \quad (6)$$

Os ajustes dos modelos das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração foram obtidos por meio do programa SAS[®] (SAS, 1999).

Também foram coletadas, nas mesmas camadas, amostras deformadas para determinação do conteúdo da matéria orgânica, conforme metodologia descrita por RAIJ et al. (1987).

A avaliação da estabilidade de agregados foi feita segundo KEMPER & ROSENAU (1986), nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,010 m. O diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) foram calculados segundo KEMPER & CHEPIL (1965).

As curvas de retenção de água foram ajustadas pelo modelo proposto por GENUCHTEN (1980), a partir do qual foi obtido a inclinação e, conseqüentemente, o índice S, como se segue:

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}})[1 + 1/m]^{-(1+m)}$$

onde: n e m são parâmetros que governam o formato da curva; θ_{sat} e θ_{res} são a umidade na saturação e residual, respectivamente.

A adubação do milho foi feita com 350 kg da fórmula 4-20-20, e a produtividade de grãos de milho foi determinada na safra 2007/2008, em uma área de 22,5 m². A umidade dos grãos foi corrigida para 0,13 kg kg⁻¹.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando esta indicou diferença entre médias, foi utilizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode ser observado na tabela 1 que os sistemas de semeadura direta, com cultivo de crotalária (SDC), milho (SDM) e labe-labe (SDL), em pré-safrá, apresentaram maior valor de matéria orgânica na camada de 0-0,05m, sendo que esses sistemas não diferiram. Segundo SOUZA NETO et al. (2008), o menor revolvimento do solo no sistema de semeadura direta reduz o contato do solo com os materiais vegetais diminuindo assim a velocidade de decomposição, quando comparado ao SC, no qual ocorre revolvimento do solo, fragmentação, incorporação e exposição dos restos vegetais à ação mais intensa dos microorganismos que atuam na sua decomposição.

Dessa forma, a substituição do preparo convencional pelo plantio direto durante 11 anos resultou em uma recuperação dos teores de matéria orgânica, provavelmente devido às menores perdas por erosão e redução da taxa de decomposição.

ALBUQUERQUE et al. (2005) verificaram em um Latossolo Vermelho distroférrico muito argiloso que as plantas de cobertura aumentaram o teor de matéria orgânica. Segundo esses pesquisadores, em períodos mais longos, as plantas de cobertura, associadas aos preparos conservacionistas, pelo aumento da matéria orgânica, podem melhorar as características físicas do solo.

Tabela 1. Matéria orgânica avaliada em diferentes tratamentos e camadas de um Latossolo Vermelho distrófico

Camada	SC	SDC	SDM	SDL	Média
m	Matéria Orgânica, g dm ⁻³				
0-0,05	16,33 B a	22,50 A a	24,16 A a	22,66 A a	21,41
0,05-0,10	15,33 A b	15,83 A b	16,16 A b	15,16 A b	15,62
0,10-0,15	13,83 A bc	14,33 A bc	14,66 A bc	13,83 A b	14,16
0,15-0,20	12,83 A c	13,50 A c	13,00 A c	13,50 A b	13,20
Média	14,58	16,54	17,00	16,29	
C.V. (%) Parcela	13,51	C. V. (%) Subparcela		8,16	

SC: Semeadura convencional; SDC: Semeadura Direta crotalária; SDM: Semeadura direta milho; SDL: Semeadura direta labe-labe. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam as médias na linha, e minúsculas na coluna.

Os tratamentos diferiram quanto à macroporosidade somente na camada de 0-0,05 m, em que os maiores valores foram verificados no sistema de semeadura direta labe-labe (SDL) e no sistema convencional (SC), sendo que o último não diferiu do sistema direto crotalária (SDC) (Tabela 2). O SC apresentou altos valores de macroporosidade, esse fato se deve a maior mobilização na camada superficial, nas demais camadas os tratamentos não diferiram.

O SDL apresentou menor macroporosidade nas camadas inferiores em relação à camada de 0-0,05m. Já o SDM não apresentou diferenças entre as camadas. No entanto, o SDC apresentou diferença apenas entre as camadas de 0-0,05m. Apesar do maior conteúdo de matéria orgânica nos sistemas de semeadura direta, na camada de 0-0,05m, esse não resultou na melhoria da macroporosidade, exceto para o SDL.

O SC apresentou maior macroporosidade nas duas primeiras camadas (0-0,05 e 0,05-0,10 m). Segundo CRUZ et al (2003), esse fato deve-se provavelmente às operações de preparo do solo. SCHAFFER et al. (2001) constataram que o uso da grade pesada resultou em diminuição aparente da macroporosidade e em aumento da compactação na superfície do solo, evidenciando a presença de “pé de grade”.

Tabela 2. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes sistemas de manejo

Camada (m)	SC	SDC	SDM	SDL	média
Macroporosidade (m^3m^{-3})					
0,0-0,05	0,15 AB a	0,12 BC ab	0,10 C a	0,18 A a	0,14
0,05-0,10	0,14 A a	0,15 A a	0,14 A a	0,12 A b	0,14
0,10-0,15	0,09 A b	0,11 A b	0,10 A a	0,08 A b	0,09
0,15-0,20	0,09 A b	0,13 A ab	0,12 A a	0,11 A b	0,11
Média	0,12	0,13	0,11	0,12	
CV (%) Parcela		15,88	CV (%) Subparcela		22,3
Microporosidade (m^3m^{-3})					
0,0-0,05	0,25 C b	0,30 B a	0,33 A a	0,27 C b	0,29
0,05-0,10	0,25 A b	0,26 A b	0,25 A c	0,26 A b	0,25
0,10-0,15	0,30 A a	0,30 A a	0,30 A b	0,29 A a	0,30
0,15-0,20	0,28 A a	0,27 AB b	0,25 B c	0,27 AB b	0,27
Média	0,27	0,28	0,28	0,27	
CV (%) Parcela		5,07	CV (%) Subparcela		5,42
Porosidade total (m^3m^{-3})					
0,0-0,05	0,37 B b	0,43 A a	0,44 A a	0,45 A a	0,42
0,05-0,10	0,41 A a	0,40 AB ab	0,40 AB b	0,37 B b	0,39
0,10-0,15	0,39 A ab	0,38 A b	0,39 A b	0,38 A b	0,38
0,15-0,20	0,37 A b	0,40 A ab	0,38 A b	0,37 A b	0,38
Média	0,38	0,40	0,40	0,39	
CV (%) Parcela		3,81	CV (%) Subparcela		5,96
Diâmetro Médio Geométrico dos Agregados (DMG) (mm)					
0,0-0,05	2,73 B a	4,84 A a	5,31 A a	5,51 A a	4,60
0,05-0,10	2,53 B a	4,37 A a	4,05 A a	4,92 A a	3,97
Média	2,63	4,60	4,68	5,21	
CV (%) Parcela		16,01	CV (%) Subparcela		15,40
Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados (DMP) (mm)					
0,0-0,05	2,65 B a	5,41 A a	5,66 A a	5,34 A a	4,76
0,05-0,10	2,52 B a	4,74 A a	4,92 A a	5,16 A a	4,33
Média	2,58	5,07	5,29	5,25	
CV (%) Parcela		9,94	CV (%) Subparcela		9,16

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas comparam as médias na linha e minúsculas na coluna. SC: Semeadura convencional; SDC: Semeadura direta crotalária; SDM: Semeadura direta milheto; SDL: Semeadura direta labe-labe.

A microporosidade foi maior no SDM em relação aos outros tratamentos na camada de 0-0,05 m, sendo que esse sistema foi o que apresentou menor valor de macroporosidade nessa camada, justificando em partes esse resultado. O SC apresentou um aumento significativo da microporosidade, na camada de 0-0,05 m em relação à camada de 0,15-0,20 m.

A porosidade total foi maior nos sistemas de plantio direto, sendo que com o aumento da profundidade os seus valores reduziram nesses tratamentos. Segundo SPERA et al (2004), esse maior valor para porosidade total na camada superficial reflete menor densidade do solo.

Os sistemas conservacionistas apresentaram maiores valores de DMG em relação ao sistema convencional. CAMPOS et al. (1995); SILVA et al. (1998); BEUTLER et al. (2001), em Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, observaram aumento do DMG em sistemas conservacionistas. Resultados semelhantes foram encontrados por COSTA et al. (2003) em Latossolo Bruno em Guarapuava (PR), onde observaram aumento do DMG na camada de 0-0,05 m de 1,6 mm em SC para 3,7 mm nos sistemas conservacionistas após 21 anos de instalação do experimento.

Verifica-se, pela tabela 2, que o diâmetro médio ponderado (DMP) foi superior nas áreas de sistemas conservacionistas em relação às áreas sob sistema convencional, demonstrando que 11 anos após a implantação do sistema foram suficientes para demonstrar seu aumento. Resultados semelhantes foram obtidos por SILVA et al. (2008) após 6 anos da implantação do sistema de plantio direto.

Não houve interação significativa entre os sistemas de manejo e as camadas analisadas em relação à densidade do solo (Tabela 3). O SC apresentou menor valor de densidade do solo em relação aos sistemas de plantio direto, não diferindo significativamente do SDC. Os menores valores da densidade do solo podem ser atribuídos ao intenso revolvimento do solo e à incorporação de resíduos culturais. CENTURION & DEMATTÊ (1985) também observaram maiores valores de densidade do solo no sistema de plantio direto comparado com outros sistemas de preparo. Entre os sistemas de manejo estudados, a camada de 0-0,05 m foi a que apresentou menor

densidade do solo, sendo que a camada de 0,05-0,10 m não diferiu da camada de 0,15-0,20 m.

Tabela 3. Densidade do solo nos sistemas de manejo para a camada de 0-0,20 m

Sistemas (S)	Densidade do solo
SC	1,26 b
SDC	1,28 ab
SDM	1,32 a
SDL	1,31 a
Teste F	5,84**
DMS (5%)	0,045
Camadas (C)	
0-0,05	1,15 c
0,05-0,10	1,33 ab
0,10-0,15	1,32 b
0,15-0,20	1,38 a
Teste F	40,06**
DMS (5%)	0,060
Interação S x C	0,82 ^{ns}

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. SC: Semeadura convencional; SDC: Semeadura direta crotalária; SDM: Semeadura direta milho; SDL: Semeadura direta labe-labe

Na Figura 1, são apresentados os gráficos com o intervalo hídrico ótimo (IHO) traçado para todos os sistemas de manejo. Em todos os tratamentos, à medida que ocorre aumento da densidade do solo, simultaneamente ocorre aumento na retenção de água na tensão de 0,01 MPa, e em menor intensidade na tensão de 1,5 MPa, como pode ser verificado pelas suas respectivas curvas θ_{CC} e θ_{PMP} , o que corrobora os resultados obtidos por TORMENA et al. (1998), BEUTLER et al. (2004a). KLEIN (2008) afirma que o solo, reservatório de água para as plantas, é afetado pelo manejo e práticas culturais, sofrendo alteração da dinâmica e retenção de água nos seus poros em consequência das alterações na sua estrutura. Com o aumento da densidade, há também um aumento no conteúdo de água para a resistência do solo à penetração crítica de 2 MPa (θ_{RP}). Entretanto, o conteúdo de água para a porosidade de aeração (θ_{PA}) considerada limitante (> 10%) é reduzido, conforme constatado por ARCHER & SMITH (1972), SILVA et al. (1994).

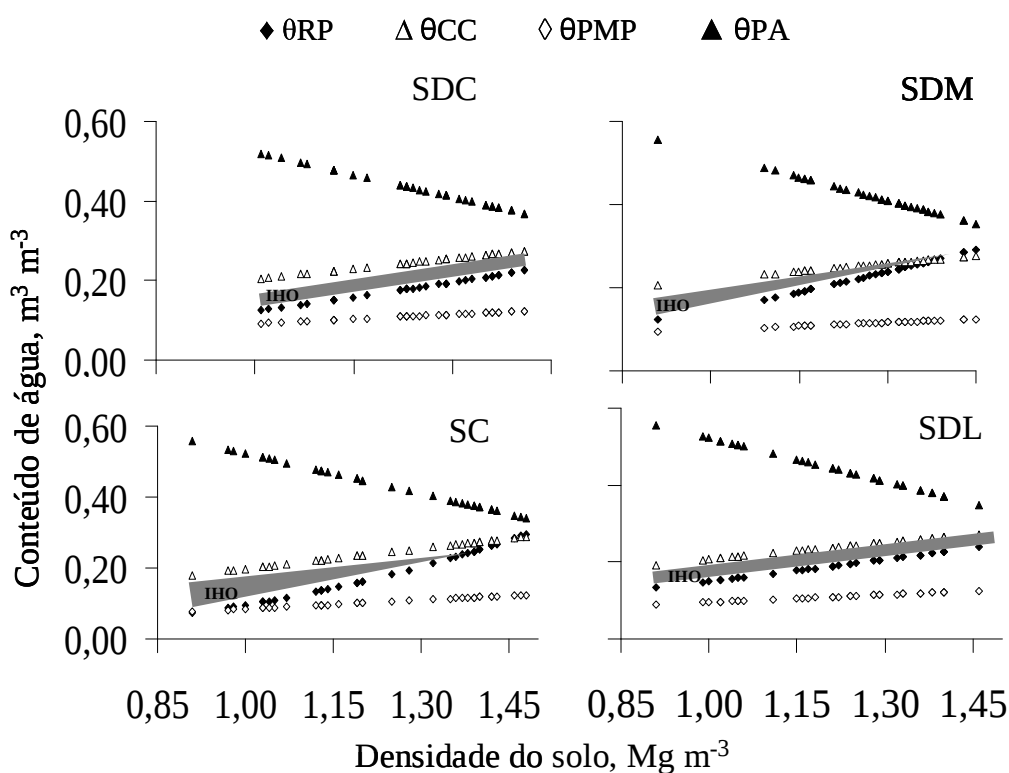


Figura 1. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no Latossolo Vermelho distrófico.

Não ocorreu porosidade de aeração = 10% em nenhum dos tratamentos, indicando que as plantas não tiveram seu desenvolvimento limitado pela difusão de oxigênio e trocas gasosas. Assim, o valor do θ_{PA} manteve-se acima do θ_{CC} para todas as densidades.

Nos sistemas de manejo conservacionistas, o θ_{RP} foi superior ao θ_{PMP} em toda a extensão dos valores de densidade do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por IMHOFF et al., (2001) e BENJAMIM et al., (2003), nos quais a resistência do solo à penetração foi o fator que mais frequentemente reduziu o IHO, em solos de granulometrias variadas submetidos a diferentes sistemas de manejo.

No SC, o θ_{RP} substituiu o θ_{PMP} nos valores de densidade do solo menores que $0,97 \text{ Mg m}^{-3}$, ou seja, nesse sistema a resistência do solo à penetração não foi limitante com o solo estando em menores densidades, corroborando os resultados obtidos por SILVA et al., (1994) e TORMENA et al., (1998). Conforme, ALMEIDA et al. (2008), a resistência do solo à penetração sofre grande influência do conteúdo de água e da densidade do solo.

A densidade do solo crítica (Dsc) é definida como o valor de densidade do solo em que o limite superior do IHO se iguala ao limite inferior, ou seja, quando o IHO é igual a zero (SILVA et al., 1994). Neste estudo, a Dsc foi de $1,36$ e $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ para SDM e SC, respectivamente. Segundo CAMARGO & ALLEONI (1997), valores superiores a $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ são considerados críticos para solos franco-argilosos.

Valores de densidade do solo maiores que a Dsc indicam condições físicas severamente restritivas para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, para a produtividade das culturas. Como pode ser observado na figura 1, o sistema direto crotalária e o sistema direto labe-labe não apresentaram Dsc, demonstrando que as raízes do milho não tiveram seu desenvolvimento limitado por esse parâmetro. De acordo com FREDDI et al. (2007), as modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor compactação, que poderá interferir na resistência do solo à penetração, densidade e porosidade do solo influenciando o crescimento radicular e, por fim, a produtividade das culturas.

O IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, aeração e resistência do solo à penetração, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Na Figura 2, são apresentadas as curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) nos sistemas de manejo e nas diferentes camadas, ajustadas segundo o modelo matemático proposto por VAN GENUCHTEN (1980).

Na tensão de $0,01 \text{ MPa}$, correspondente à capacidade de campo, todas as camadas e sistemas de manejo apresentaram retenção de água semelhantes, exceto o SDM que obedeceu ao volume de microporos apresentados, ou seja, esse tratamento

apresentou a maior retenção de água nessa tensão devido à maior microporosidade observada na camada de 0-0,05m, concordando com ARAÚJO et al., 2004, que também constataram que o aumento da água retida foi devido à alteração na distribuição do tamanho de poros, com o aumento de poros de menor diâmetro.

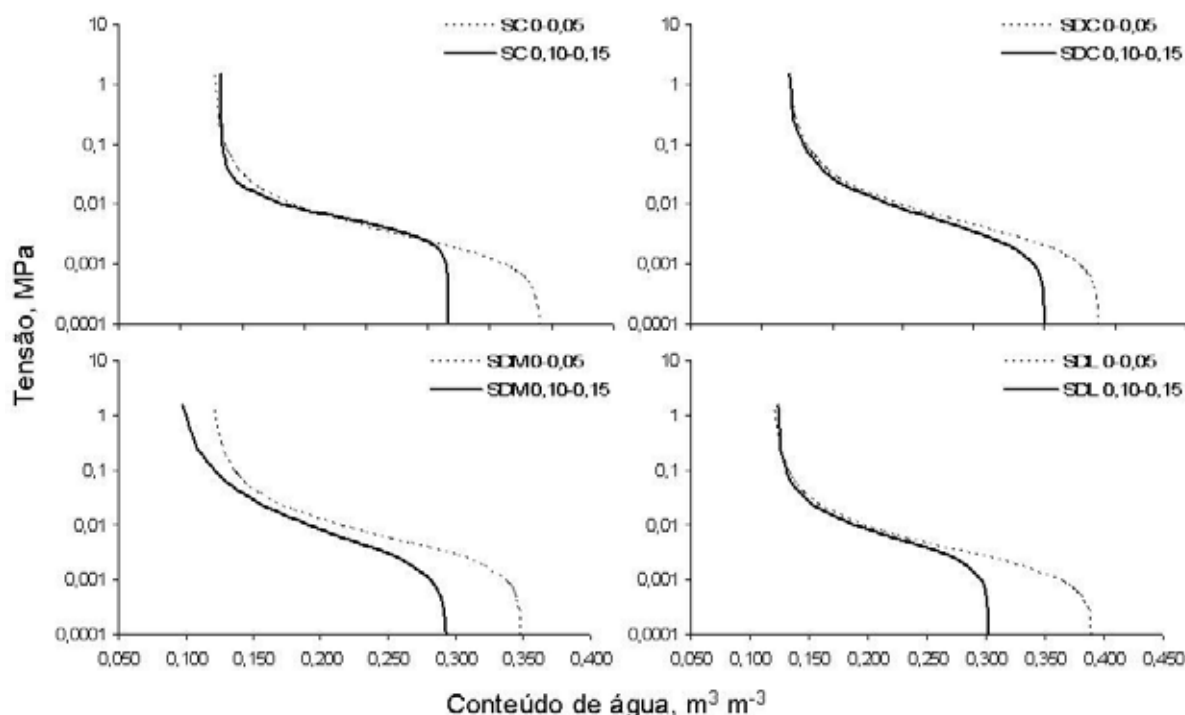


Figura 2. Curvas de retenção de água de um Latossolo Vermelho em sistemas de manejo.

As variações que podem ser observadas entre as curvas podem ser relacionadas à influência da composição dos materiais em termos de matéria orgânica, o que pode determinar alterações na quantidade e distribuição de poros. CARVALHO et al. (1999) observaram que em um Podzólico Vermelho-Amarelo, sob diferentes sistemas de preparo do solo, a maior retenção de água ocorreu no plantio direto devido à manutenção da matéria orgânica.

Na tabela 4, está apresentado o Índice S, podendo observar que o SDC e SDM apresentaram maiores índices com relação aos demais tratamentos; entretanto, como pode ser constatado, nenhum tratamento apresentou valor de S inferior a 0,035,

podendo afirmar que esse solo possui boa qualidade física para o crescimento de plantas. Porém, resultados diferentes foram encontrados por SILVA et al. (2008), que apresentaram valores de S inferiores a 0,035, possuindo, assim, uma estrutura física degradada, concordando com DEXTER (2004).

O SC apresentou maior índice S na camada de 0-0,05m, fato decorrente do revolvimento do solo e, conseqüentemente, do aumento de poros de maior diâmetro. O mesmo não ocorreu nas camadas inferiores, o que, segundo DEXTER (2004), a redução do S nas áreas cultivadas pode estar associada a uma diminuição do pico da distribuição de frequência de poros, resultando em um “achatamento” vertical da curva de retenção de água, pela redução dos poros estruturais.

O SDL apresentou o menor índice S em profundidade, mas demonstrou que se encontra em boas condições físicas para o crescimento radicular, pois não apresentou valor de índice S inferior a 0,035.

Tabela 4. Índice S para os sistemas de manejo estudados nas camadas de 0-0,05 e 0,10-0,15 m e a produtividade do milho

Tratamentos	Camada (m)	Índice S	Produtividade (Kg ha ⁻¹)
SC	0-0,05	0,056 A a	5280 b
	0,10-0,15	0,039 AB b	
SDC	0-0,05	0,048 AB a	5920 a
	0,10-0,15	0,047 AB a	
SDM	0-0,05	0,047 AB a	5489 ab
	0,10-0,15	0,045 AB a	
SDL	0-0,05	0,041 AB a	5596 ab
	0,10-0,15	0,035 B a	

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. SC: Semeadura convencional; SDC: Semeadura direta crotalaria; SDM: Semeadura direta milheto; SDL: Semeadura direta labe-labe.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores da qualidade física do solo MO (matéria orgânica), Ds (densidade do solo), Pt (porosidade total), Ma (macroporosidade), Mi (microporosidade), S (índice S) e Prod (produtividade do milho).

Indicadores	MO	Ds	Pt	Ma	Mi	S	Prod
MO	-	-0,6173*	0,9226**	0,5019	0,2251	0,2357	0,2271
Ds	-	-	-0,3777	-0,7717*	0,5000	-0,6858*	0,0794
Pt	-	-	-	0,4980	0,2687	-0,0574	0,2065
Ma	-	-	-	-	-0,6667*	0,3523	-0,0394
Mi	-	-	-	-	-	-0,2524	0,2626
S	-	-	-	-	-	-	-0,0200
Prod	-	-	-	-	-	-	-

**, * Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Na tabela 5, estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores da qualidade física do solo.

Foram observadas correlações significativas a 5% de probabilidade entre MO e Ds e entre MO e Pt. Resultados diferentes foram encontrados por SILVA et al, 2008, em que densidade do solo e a porosidade total não apresentaram correlação significativa com o teor de matéria orgânica. A matéria orgânica é um dos fatores responsáveis pela formação e estabilidade de agregados, sendo que a formação de agregados na

superfície provoca diminuição da densidade do solo. Aumentos na densidade do solo geralmente implicam diminuição na qualidade do solo para crescimento radicular e redução da aeração.

Em relação à correlação entre Ds e Ma, significativa a 5% de probabilidade, é fato que à medida que a densidade do solo aumenta, diminui a macroporosidade. BEUTLER et al. (2003) verificaram que o aumento da densidade do solo refletiu na redução da macroporosidade. Apesar do valor da correlação entre Ds e Mi não ter sido significativo, apresentou magnitude relevante (0,50) (Tabela 5).

A correlação entre a Ds e S se mostrou significativa a 5%. De acordo com DEXTER (2004), a declividade S da curva de retenção da água do solo no ponto de inflexão deve-se, principalmente, à porosidade microestrutural e, portanto, S avalia muitos dos principais atributos físicos do solo. Assim, a presença de poros estruturais implica um alto valor de S, que é essencial para uma boa qualidade do solo.

Referente à correlação entre Ma e Mi significativa a 5%, é sabido que, à medida que uma dessas variáveis diminui, ocorre um incremento da outra. O solo submetido ao cultivo tende a perder a estrutura original pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, com conseqüente redução de macroporos e um aumento de microporos (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990).

Não foram observados valores significativos da correlação entre indicadores da qualidade do solo e produtividade. Como esses indicadores apresentaram valores considerados adequados, a baixa produtividade está, provavelmente, relacionada a outros fatores.

Conclusões

1. O cultivo do solo em sistema de plantio direto durante 11 anos resultou em um incremento da matéria orgânica e da porosidade total nas camadas de 0-0,05 m. O maior diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico dos agregados também foi observado nesse sistema de manejo.
2. O sistema de cultivo convencional não diferiu do sistema de plantio direto labe-labe e do sistema de plantio direto crotalária quanto à macroporosidade nas camadas de 0-0,05 m. O sistema de cultivo convencional e o sistema de plantio direto crotalária apresentaram menor densidade do solo.
3. Os tratamentos estudados mostraram que o solo possui boa qualidade física, verificada através do IHO.
4. Nenhum dos sistemas de manejo estudados apresentaram valores de índice S menores que 0,035, e o sistema convencional foi o que apresentou a menor produtividade.
5. Foram observadas correlações significativas a 5% de probabilidade entre MO e Ds, MO e Pt, Ds e Ma e Ds e S. Não foram observados valores significativos da correlação entre indicadores da qualidade do solo e produtividade.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; ARGENTON, J.; BAYER, C. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p.415-424, 2005.
- ALMEIDA, C.X.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; JORGE, R.F. & BARBOSA, J.C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 32:2235-2243, 2008.
- ANDRIOLI, I.; CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Brasília, 1999. Brasília: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1999. p.1-4.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 28:337-345, 2004.
- ARCHER, J.R. & SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. **The Journal of Soil Science.**, 23:475-480, 1972.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, 116:137-148, 2003.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, N. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. N.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência a penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1 p.167-177, 2001.

BEUTLER, A.N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agronômicas de soja e arroz de sequeiro**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003. 126 f.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; da SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 48, p. 863-871, 2005.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.639-45, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.557-580, 2004a.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986a. v.1, p.377-382.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, 33:519-524, 1990. CAMARGO, O.A.;

ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132p.

CAMPOS, R.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14:99-105, 1990.

CARVALHO, E.J.M.; FIGUEIREDO, M.S.; COSTA, L.M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.257-265, 1999.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T.J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.1407-1413, 1991.

CENTURION, J.F.; DEMATÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, p.263-266, 1985.

CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.289-298, 1999

COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetados pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.3, p.527-535, 2003.

CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, V.27, n.6, p.1105-1112, 2003.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p. 443-461.

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

DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physics toward 2000. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.2, p. 443-460.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: part 1. theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120:201-14, 2004.

DORAN, J. W. & ZEISS, M. R. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, **15**:3-11.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America Special Publication Number 35**, 1994. p.1-20.

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V. & CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**. 26:113-121, 2006.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.3, p.477-486, 2007.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size Analysis. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2. ed., Madison, 1986. p.383-411.

GENUCHTEN, M.T.A. van. A closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p. 892-897, 1980.

GODEFROY, J. & JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et le apports organiques en conditions tropicales; comparasion avec les sols forestiers. **Fruits**, 30:595-612, 1975.

HOAD, S. P.; RUSSEL, G; LUCAS, M. E.; BINGHAM, I. J. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, v.74, p.195-254, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 25:11-18, 2001.

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

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p.229-276.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates: In:BLAKE, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.;CLARK, F.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agromony, 1965. p.499- 510.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2 ed. Madison: American Society of Agromony, 1986. v.1, p.499-509.

KLEIN, V. A. Física do solo. Passo fundo: **Universidade de Passo Fundo**, 2008. 212 p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1. p.635-62.

LAL, R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. **Soil Management Support Service**, USDA, U.S. Agency for International Development. Ohio, Ohio State University, 1994. 78p. (Technical Monograph n.21)

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, 1:277-294, 1985.

LIEBIG, M.A. & DORAN, J.W. Impact of organic production practices on soil quality indicators. *J. Environ. Qual.*, 28:1601-1609, 1999.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.873-882, 2007.

MENDONÇA, E.S. & ROWELL, D.L. Dinâmica do alumínio e de diferentes frações orgânicas de um latossolo argiloso sob cerrado e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 18:295-303, 1994. p, 1965.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, 1999.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, n.2, p.431-441, 2001.

SCHICK, J., BERTOL, I., BATISTELA, O., *et al.* Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminoso submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo – I: Perdas de

solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.427-436, 1999.

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

SILVA, F.F.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R. G.; ANDRIOLI, F. F & ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga Botucatu**, v.13, n.2, p.191-2004, abril-junho, 2008.

SILVA, M.L.N.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M.; CARVALHO, A.M. Estabilidade e resistência de agregados de Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.97-103, 1998.

SILVA, V. R. da. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003. 171p.

SOUZA NETO, E. L.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A. N. & CENTURION, J. F. Atributos físicos do solo e produtividade de milho em resposta a culturas de pré-safra. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2 p. 255-260. 2008.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.533-542, 2004.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p. 207-212, 2002.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, p.217-243, 1994.

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.*, 18:415-422, 1980.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S. Densidade, porosidade e resistência a penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sciencia Agrícola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:891-900, 2004.