

Comissão 3.2 - Manejo e conservação do solo e da água

ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO⁽¹⁾

Eduardo Torres Viana⁽²⁾, Marcelo Augusto Batista⁽³⁾, Cássio
Antonio Tormena⁽⁴⁾, Antonio Carlos Saraiva da Costa⁽⁴⁾ &
Tadeu Takeyshi Inoue⁽⁵⁾

RESUMO

A compreensão e a quantificação do impacto dos sistemas de uso e manejo nos teores de C orgânico do solo (COS) e em propriedades físicas são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações em alguns atributos físicos e COS de um Latossolo Vermelho da região noroeste do Paraná sob diferentes sistemas de uso e manejo: mata nativa, pastagem e as culturas de mandioca e de cana-de-açúcar. Foram coletadas amostras deformadas para determinação da textura, da densidade de partículas, do ensaio de Proctor normal e dos teores de matéria orgânica; e amostras indeformadas, para determinação da densidade do solo (Ds) e porosidade do solo. Os resultados indicaram que os sistemas de manejo estudados induziram alterações nos atributos físicos do solo em relação à mata nativa, o que foi verificado pelos maiores valores de Ds, densidade relativa do solo e densidade máxima do solo e menores valores de macroporosidade, porosidade total, COS e estoque de C do solo, na seguinte ordem crescente: pastagem, mandioca e cana-de-açúcar. Contudo, as áreas não são consideradas fisicamente degradadas. Os valores de densidade máxima do solo foram de 1,91, 1,93, 2,00 e 2,03 Mg m⁻³, e os de estoque de C do solo, de 17,8, 16,6, 12,8 e 12,1 Mg ha⁻¹, para mata nativa, pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente.

Termos de indexação: ensaio de Proctor, porosidade, densidade do solo, degradação do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 20 de janeiro de 2011 e aprovado em 15 de setembro de 2011.

⁽²⁾ Eng. Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Campus do Arenito, Rodovia PR 182, CEP 87820-000 Cidade Gaúcha (PR). E-mail: eduaviana@hotmail.com

⁽³⁾ Eng.-Agrônomo, Professor Adjunto, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Campus Universitário, Av. Colombo 5790, Bloco J-45, CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: mabatista@uem.br

⁽⁴⁾ Eng.-Agrônomo, Professor Associado, Departamento de Agronomia, UEM. E-mails: catormena@uem.br; antonioescosta@gmail.com

⁽⁵⁾ Eng.-Agrônomo, Professor Adjunto, Departamento de Agronomia, UEM. E-mail: ttinoue@uem.br

SUMMARY: PHYSICAL PROPERTIES AND ORGANIC CARBON OF AN OXISOL AFFECTED BY DIFFERENT LAND USE AND SOIL MANAGEMENT SYSTEMS

Understanding and quantifying the impact of land use and soil management on soil organic carbon (SOC) levels and physical properties is essential for the development of a sustainable agriculture. The purpose of this study was to evaluate some physical properties and SOC of an Oxisol in the Northwest of the state of Paraná, under different use and soil management systems, i.e., under native forest, pasture, cassava, and sugarcane. Disturbed soil samples were collected for particle size, particle density, proctor and organic carbon analyses and undisturbed samples (rings) to determine bulk density (Ds) and soil porosity. Results indicated that the land use and management systems induced changes in the soil physical properties in comparison to native forest. This was inferred from the higher values of soil Ds, maximum bulk density, and relative bulk density, and the lower values of macroporosity, total porosity, SOC and soil carbon stock, in the following growing order: pasture, cassava and sugarcane. However, the areas are not considered physically degraded.

Index terms: proctor test, porosity, bulk density, soil degradation.

INTRODUÇÃO

A região noroeste do Estado do Paraná apresenta uma área composta por 107 municípios, totalizando 16 % do território estadual (Fonseca & Czuy, 2005). Uma das classes de solo de maior representatividade nessa região é o Latossolo Vermelho (Bhering & Santos, 2008). Esses solos são derivados do Arenito Caiuá, apresentam textura média a arenosa, são distróficos, apresentam reduzidos teores de C orgânico e são muito suscetíveis à erosão (Carvalho, 1994). Nessa região, a degradação física e química dos solos tem ocorrido devido à fragilidade destes (Fidalski, 1997), aos baixos teores de matéria orgânica (Cardoso et al., 1992), à reduzida estabilidade dos agregados e à capacidade de retenção de água do solo (Costa et al., 1997).

Os sistemas de uso e manejo dos solos podem influenciar a sustentabilidade e a produtividade dos ecossistemas agrícolas por meio da degradação de propriedades do solo que determinam o desenvolvimento e a produtividade das culturas, com impactos na produção agrícola e no meio ambiente (Pagliai et al., 2004). Sistemas de uso e manejo que reduzem e controlam a degradação são necessários para manter a sustentabilidade agrônômica e econômica dos solos. O solo é considerado degradado se os processos naturais ou antropogênicos proporcionarem redução da quantidade e qualidade de biomassa, bem como aumento nos custos de produção (Lal, 1997). A degradação física é um dos componentes do processo de degradação do solo, geralmente associado às perdas de matéria orgânica e da integridade estrutural dos solos. Como consequência da degradação física, há alterações em propriedades do solo que controlam processos fundamentais relacionados com a dinâmica de água, ar e calor (Feddema, 1998).

Alguns atributos físicos estão ligados à forma e estabilidade estrutural do solo, como a densidade do solo (Stone & Silveira, 2001), resistência do solo à penetração (Tormena & Roloff, 1996) e porosidade do solo (Oliveira et al., 2001), os quais são utilizados para estudar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo.

O C orgânico do solo (COS) não é propriamente uma propriedade física do solo, mas influencia direta e indiretamente a maioria delas, de modo que a redução do COS está relacionada com a degradação física dos solos (Cardoso et al., 1992). A vulnerabilidade do solo à compactação pode ser modificada pelos sistemas de uso e manejo do solo (Blanco-Canqui et al., 2009) via modificações nos teores de COS e, por consequência, na capacidade de suporte de carga dos solos. Estudos recentes indicam que o aumento no teor de COS amplia a capacidade de suporte de carga dos solos, bem como a resiliência do solo às cargas aplicadas (Braida et al., 2010). Entre outras técnicas, a suscetibilidade do solo à compactação pode ser avaliada por meio do ensaio de Proctor (Dias Junior, 2000). A compactação do solo promove redução significativa da macroporosidade (Dias Junior & Pierce, 1996; Reichert et al., 2009).

O presente trabalho tem como objetivo quantificar as modificações impostas por diferentes sistemas de uso e manejo nos teores de matéria orgânica e em atributos físicos de um Latossolo Vermelho localizado na região noroeste do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em áreas cultivadas no município de Cidade Gaúcha, região noroeste do

Paraná (latitude de 23° 20' S e longitude de 52° 54' W). O solo utilizado foi identificado como Latossolo Vermelho, Embrapa (2006). O material de origem desse solo provém de resíduos intemperizados do Arenito Caiuá, da série São Bento, do período Cretáceo. Nessa região, o tipo climático dominante é o Cfa, na classificação de Köppen. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade de aproximadamente 5 %; todas as áreas encontravam-se no terço superior da encosta e com altitude de 370 m (Embrapa, 1984).

A amostragem de material de solo foi realizada em abril de 2010. Foram selecionadas quatro áreas próximas: uma área sob mata nativa (Floresta estacional semidecidual) com aproximadamente 3,6 ha; uma área cultivada com pastagem (*Brachiaria brizantha* Hochst Stapf) por dez anos (12 ha), cuja taxa de lotação foi de aproximadamente 1,7 Unidade Animal por hectare em sistema de pastejo contínuo; uma área de 4,2 ha cultivada com mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) variedade Fécula Branca pelo período de dois anos e tendo como preparo prévio a passagem de grade rome seguida de grade niveladora, cultivada anteriormente com pastagem; e outra área de aproximadamente 9,7 ha, cultivada com cana-de-açúcar cultivar RB 72454, no quinto ano de cultivo, cultivada anteriormente com a mesma cultura (aproximadamente 11 anos). Todas essas áreas eram vizinhas. O preparo do solo para a cana-de-açúcar foi o convencional, com aração e gradagem. Todos os anos, foram realizadas queimadas da palhada da cana-de-açúcar, independentemente do tipo de colheita. Nos últimos dois anos a colheita foi mecanizada, utilizando uma colhedora Cameco A7700, com massa de aproximadamente 18.500 kg. Os transbordos com carga utilizados durante o processo de colheita pesavam aproximadamente 13.000 kg. Essas culturas foram escolhidas com base na sua representatividade na região de estudo.

As áreas foram escolhidas utilizando como critérios a proximidade das culturas desejadas, a presença de área de mata nativa, por estarem na mesma microbacia e sob a mesma classe de solo. Foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0–0,10 m (quatro amostras por sistema de uso e manejo), as quais foram usadas na determinação do COS, da textura do solo, da densidade de partículas e da curva normal de Proctor. O COS total foi determinado pela oxidação da matéria orgânica, utilizando dicromato de potássio 0,2 mol L⁻¹, em meio sulfúrico, e titulação pelo sulfato ferroso amoniacal 0,1 mol L⁻¹ (Embrapa, 1997). Os estoques de C (EC) foram calculados pela expressão (Veldkamp, 1994):

$$EC = (COS \times Ds \times h)/10 \quad (1)$$

em que EC = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹); COS = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g dm⁻³); Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm⁻³); e h = espessura da camada considerada (cm).

A caracterização da textura foi realizada por dispersão das amostras com NaOH 0,1 mol L⁻¹ e agitação lenta durante 16 h, sendo o conteúdo de areia obtido por peneiramento e o teor de argila, pelo método da pipeta, conforme Embrapa (1997). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico com álcool etílico, conforme Embrapa (1997).

O ensaio Proctor normal foi realizado utilizando-se um aparelho marca Soiltest modelo CN-4230, sendo a amostra compactada em um anel metálico de aproximadamente 0,001 m³, em três camadas de solo, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg, caindo de uma altura de 0,305 m, semelhantemente ao que é preconizado na Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986) e correspondendo à energia de 60,2 kJ m⁻³. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em seis teores de água com intervalos de 0,025 kg kg⁻¹, partindo de um teor de água que permitisse que o terceiro ponto da curva se apresentasse próximo ao teor de água crítico. Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo de prova (topo e fundo), para determinação do teor de água do solo (Ug). Assim, para cada amostra, foram obtidos seis valores de teor de água (Ug) e densidade do solo (Ds), com os quais foi ajustado um modelo matemático quadrático (Equação 2).

$$Ds = b_0 + b_1 U + b_2 U^2 \quad (2)$$

sendo, b₀, b₁ e b₂ os estimadores dos parâmetros ajustados.

As coordenadas do ponto de máxima densidade foram obtidas derivando-se a equação de segundo grau, igualando-se a zero e resolvendo em x (U no ponto de máximo). Esse valor substituído na equação 2 resulta em y, ou seja, a densidade máxima (Dsmax).

Para obtenção de amostras indeformadas, em cada área foram selecionados, aleatoriamente, 11 pontos de amostragem; em cada ponto, no centro da camada de 0–0,10 m de profundidade, coletou-se uma amostra com estrutura não deformada, utilizando amostrador com anel metálico de 50 mm de diâmetro e de altura, perfazendo um total de 44 amostras. Após a coleta, as amostras foram envoltas em papel-alumínio e acondicionadas em sacos plásticos. No laboratório, as amostras foram preparadas para as análises, retirando-se o excesso de solo das suas extremidades. Em seguida, foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de dois terços da altura das amostras.

A porosidade total foi calculada como o conteúdo de água do solo saturado. A quantificação dos valores de macroporosidade (Poros ≥ 50 µm de diâmetro) e microporosidade (Poros < 50 µm de diâmetro) foi obtida submetendo as amostras saturadas ao potencial de -0,006 MPa utilizando uma mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979). Macroporos foram estimados como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e

o conteúdo de água do solo após a aplicação do potencial de -0,006 MPa. O volume de microporos foi estimado como sendo o conteúdo de água retido no potencial de -0,006 MPa. Após a drenagem das amostras, estas foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, para determinação da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986). A densidade de solo (Ds) foi determinada conforme Embrapa (1997).

Para determinar a densidade relativa (Dsrel), empregou-se a equação 3:

$$Dsrel = (Ds/Dsmax) \times 100 \quad (3)$$

A comparação das propriedades matéria orgânica do solo, resistência do solo à penetração, densidade de partículas, densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade foi feita usando o intervalo de confiança (95 %). Todas as análises foram executadas usando o software SAS/STAT (SAS, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da análise textura e da densidade de partículas dos solos sob mata nativa e nas áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar estão apresentados no quadro 1. Observaram-se variações nos teores de areia, silte e argila entre as áreas estudadas. Os maiores valores de argila na área de cana-de-açúcar podem estar associados ao intenso revolvimento do solo durante o seu preparo, mas também é provável que o solo das áreas avaliadas apresente diferença na granulometria, em razão de serem áreas relativamente grandes (3,6 a 9,7 ha). Nas áreas sob mata nativa, pastagem e mandioca, os resultados da análise textura da camada de 0 a 0,10 m indicaram a classe textural areia e, na área de cana-de-açúcar, como areia franca (Embrapa, 2006). Os valores de densidade de partículas (Dp) não diferiram entre si, indicando a homogeneidade entre as áreas, bem como a ausência de modificações desse atributo com o manejo ou uso do solo. Os valores médios estão abaixo de 2,65 g cm⁻³, e os valores inferiores devem-se, em parte, às diferentes quantidades de COS (Díaz-Zorita & Grosso, 2000). Independentemente do sistema

de uso e manejo do solo, destaca-se a maior proporção de areia fina do que areia grossa na fração areia dos solos.

O teor de COS dos solos estudados (Figura 1) apresentou ordem decrescente: mata nativa > pastagem > mandioca > cana-de-açúcar, fato que pode refletir diretamente a intensificação da movimentação do solo pelo preparo, bem como o histórico de uso das áreas. De acordo com Costa & Oliveira (1998), os teores de COS são considerados médios para mata nativa e pastagem e baixos para os solos cultivados com mandioca e cana-de-açúcar.

Em relação ao solo sob mata nativa, nos solos das demais áreas estudadas verificaram-se perdas no EC (Figura 1), seguindo o mesmo comportamento do COS. As perdas das áreas de pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, em relação à área de mata nativa foram de 7, 28 e 32 %, respectivamente. O uso do solo altera a quantidade de C estocada no solo, o que se deve ao tipo de uso e manejo do solo em cada condição. A utilização e preparo intensos do solo, com revolvimento da camada superficial, favorecem a exposição da fração lábil da MOS a agentes oxidantes, causando sua mineralização. Destaca-se também o favorecimento

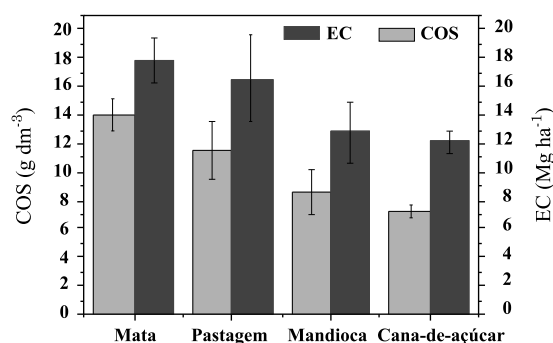


Figura 1. Teores de carbono orgânico do solo (COS) e estoques de carbono (EC) de um Latossolo Vermelho sob mata nativa e em áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, na camada de 0 a 0,10 m. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

Quadro 1. Teores de argila, silte e areia fina e grossa, e densidade de partículas (Dp) nos solos sob mata nativa e em áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar

Tratamento	Argila	Silte	g kg ⁻¹		Dp Mg m ⁻³
			Areia fina	Areia grossa	
Mata Nativa	90	10	510	390	2,18
Pastagem	90	40	590	280	2,24
Mandioca	90	40	510	360	2,16
Cana-de-açúcar	150	10	570	270	2,27
Média	105	25	545	325	2,21
CV (%)	28,6	69,3	7,6	18,2	2,3

ao ataque de microrganismos, pela maior superfície específica exposta do COS, resultando em maiores emissões de CO₂ (Six et al., 1999), o que justifica os menores valores de EC nas áreas de mandioca e cana-de-açúcar. Além disso, o fornecimento de N principalmente nas áreas de pastagem e cana-de-açúcar pode ter causado a reativação da biomassa microbiana no solo, com conseqüente mineralização da MOS. O fornecimento de N ao solo pode acelerar ou retardar a ciclagem de MOS, dependendo do estímulo à biomassa microbiana, com posterior liberação de N-inorgânico e maior emissão de CO₂ para a atmosfera (Kuz'yakov et al., 2000).

As curvas de compactação dos solos estudados são apresentadas na figura 2. Verificou-se o ajuste das curvas ao modelo quadrático com coeficiente de determinação (R²) acima de 0,92 (Quadro 2). O ponto de máximo da curva indica o valor da densidade máxima do solo (D_{smax}) e do teor de água crítico (TAC) à compactação, conforme Pacheco & Dias Junior (1990). Em reduzidos conteúdos de água no solo, existe por parte do material mineral do solo elevado atrito interno, que não permite melhor arranjo das partículas; no entanto, conforme adiciona-se água, esta age como agente lubrificante, melhorando o arranjo entre as partículas e aumentando a densidade do solo. Contudo, com acréscimos de água, esta começa a ocupar os espaços e, por ser um fluido incompressível, mesmo com uma mesma solicitação mecânica externa não há acréscimos de densidade (Weirich Neto et al., 2002). As curvas de compactação apresentaram diferenças entre os distintos usos e manejos, provavelmente relacionadas.

Os coeficientes de regressão das equações, relacionando a densidade do solo com o teor de água nos solos sob mata nativa e sob as áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, estão apresentados no quadro 2. Os valores de D_{smax} aumentaram em 1,91, 1,93, 2,00 e 2,03 Mg m⁻³ para as áreas de mata nativa, pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente. A D_{smax} foi subestimada usando-se a equação ajustada aos dados, e isso também alterou a TAC. Blanco-Canqui et al. (2009) observaram que os valores de D_{smax} aumentam com

a intensidade do manejo adotado, sendo isso atribuído aos maiores teores de COS nos sistemas de manejo mais conservacionistas (como o plantio direto), aumentando a habilidade do solo em resistir à compactação.

O TAC variou com os sistemas de manejo e uso, na seguinte ordem decrescente: pastagem > mata nativa > mandioca > cana-de-açúcar (Quadro 2). Esse atributo não seguiu rigidamente a mesma ordem do teor de COS (Figura 1). De acordo com Silva et al. (1986), maiores teores de argila e matéria orgânica do solo provocam redução na amplitude das curvas de compactação, diminuindo, conseqüentemente, a D_{smax} e aumentando o TAC. Isso ocorre pelo fato de a argila e a matéria orgânica influenciarem o poder de adsorção de água do solo (Silva et al., 1986). Segundo Ekwue & Stone (1995), a redução da D_{smax} e o aumento do TAC com o aumento da matéria orgânica são atribuídos ao seu baixo valor de densidade e ao aumento da umidade do solo promovida por sua adição. O maior valor do TAC da área de pastagem pode ser atribuído aos teores de areia fina e silte (Quadro 1), que foram superiores aos dos solos das demais áreas estudadas, e, conseqüentemente, à maior capacidade de reter água, devido ao arranjo que essas partículas podem assumir.

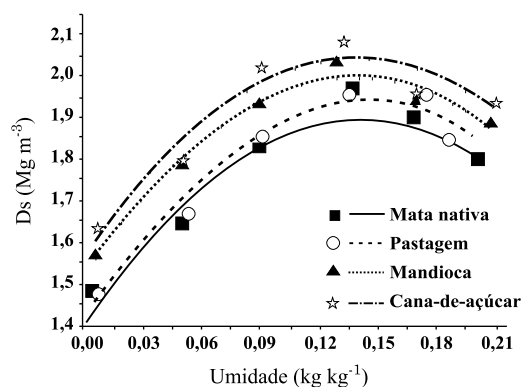


Figura 2. Curva de compactação de um Latossolo Vermelho sob mata nativa e em áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, na camada de 0 a 0,10 m.

Quadro 2. Coeficiente de regressão das equações de densidade do solo em função do teor de água, da densidade do solo máxima (D_{smax}) e do teor de água crítico (TAC) para os solos sob mata nativa e em áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar

Tratamento	b ₀	b ₁	b ₂	R ²	p <	D _{smax}	TAC
						Mg m ⁻³	kg kg ⁻¹
Mata nativa	1,4273	6,8698	-24,304	0,94	0,014	1,91	0,1413
Pastagem	1,4180	7,0161	-23,916	0,96	0,008	1,93	0,1467
Mandioca	1,5210	6,8887	-25,013	0,98	0,003	2,00	0,1377
Cana-de-açúcar	1,5675	6,8091	-25,512	0,92	0,024	2,03	0,1334

A correlação negativa entre a D_{smax} e as concentrações de COS nas diferentes áreas estudadas sugere que o aumento do COS é o principal responsável pelo decréscimo da D_{smax} (Figura 3a). O principal mecanismo para a redução da D_{smax} com o aumento da concentração do COS deve-se a sua baixa densidade, elevada área superficial específica, propriedades elásticas e elevada capacidade de adsorção de água pela matéria orgânica do solo (Soane, 1990). Díaz-Zorita & Grosso (2000) e Blanco-Canqui et al. (2009) observaram o mesmo comportamento de diminuição da D_{smax} com o aumento da COS. Os parâmetros da regressão linear entre D_{smax} e COS são diferentes daqueles reportados por Díaz-Zorita & Grosso (2000) para solos da Argentina e Ball et al. (1988) para solos da Escócia, que observaram redução na D_{smax} de 0,015 e 0,175 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente para cada 1 % de incremento de COS. Nos Latossolos estudados, observou-se decréscimo de 0,018 $Mg\ m^{-3}$ na D_{smax} para cada 1 % de aumento do COS. O TAC indica a umidade em que o solo está mais suscetível à compactação (Braida et al., 2006), ou seja, solos com maiores TAC têm menor capacidade de compactação ou maior intervalo para realização das operações motomecanizadas.

A correlação entre os valores de TAC e as concentrações de COS pode ser observada na figura 3b. Verifica-se aumento de TAC com o aumento da concentração do COS. Comportamento semelhante foi verificado por Braida et al. (2006) e Díaz-Zorita & Grosso (2000). Devido aos baixos índices encontrados na correlação ($R^2 = 0,29$ e $p < 0,27$), o aumento da TAC neste experimento pode ser explicado em parte pelo aumento do COS. A matéria orgânica apresenta uma área superficial específica (ASE), variando de 8×10^5 a $9 \times 10^5\ m^2\ kg^{-1}$ (Meurer et al., 2000), resultando em uma capacidade de retenção de água muito maior do que a da areia, cuja ASE é menor que $60\ m^2\ kg^{-1}$.

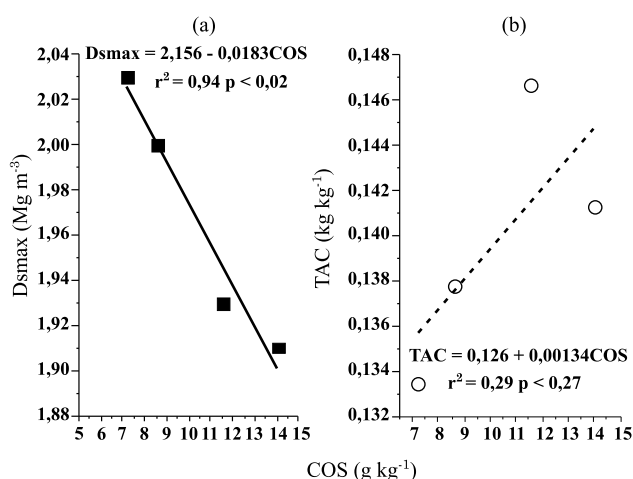


Figura 3. Correlação entre a densidade do solo máxima (D_{smax}) e os teores de carbono orgânico do solo (COS) (a); correlação entre os teores de água crítico (TAC) e os teores de COS nas áreas estudadas (b).

Assim, na partição da água adicionada ao solo, a COS acaba retendo maior quantidade que a retida pela areia. Dessa maneira, a água adicionada fica concentrada próximo das partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia (Braida et al., 2006).

Os valores de D_s nos solos sob mata nativa e cultivados com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar são apresentados na figura 4. O solo com maior D_s foi o cultivado com cana-de-açúcar, seguido daqueles cultivados com mandioca e pastagem, que não diferiram entre si. O menor valor de D_s foi verificado no solo sob mata nativa. Tem-se observado que, com o aumento da intensidade de uso, há aumento da D_s (Centurion & Demattê, 1985), o que também foi verificado neste trabalho, provavelmente devido ao intenso tráfego de máquinas e, ou, animais em condições favoráveis à compactação do solo e em razão da perda excessiva de COS, como já indicado pelas figuras 2 e 3a. Resultados similares também foram obtidos por Araújo et al. (2004), que observaram D_s significativamente maior na área cultivada, em comparação com a área sob mata nativa. Também Silva & Ribeiro (1992) obtiveram resultados similares comparando solo cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa. Sanches et al. (1999) constataram que, independentemente da posição de amostragem, seja na linha ou entrelinha da cultura da laranja, a D_s foi maior do que no solo sob mata nativa. A maior D_s nos solos cultivados está relacionada com a compactação do solo pelo tráfego de máquinas e implementos (Cavenage et al., 1999), com a redução dos teores de matéria orgânica (Dalal & Chan, 2001; Keller & Håkansson, 2010) e com a menor estabilidade da estrutura do solo (Horn et al., 1995). O aumento da densidade do solo na área cultivada também pode ser explicado pela redução nos teores de matéria orgânica, em comparação com o solo sob mata nativa.

A densidade do solo relativa (D_{srel}) é obtida pela relação entre a D_s e a D_{smax} , obtida pelo teste de Proctor normal, cujos resultados estão apresentados na figura 4. A D_{srel} tem sido utilizada para caracterizar o estado de compactação, sendo menos influenciada por alguns atributos, como tipo de minerais, granulometria e teor de matéria orgânica do solo (Håkansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Håkansson & Lipiec, 2000; Klein, 2006). Ela consiste na divisão da densidade do solo atual pela densidade máxima do solo obtida pelo teste de Proctor (Carter, 1990). Assim, a utilização da D_{srel} é uma forma de evitar essas diferenças entre os solos, permitindo compará-los quantitativamente (Arvidsson & Håkansson, 1991). Os valores de D_{srel} para as diferentes áreas estudadas foram de 66, 75, 74 e 82 % para a área de mata nativa e para as áreas cultivadas com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente. A D_{srel} da área de mata nativa apresenta o mesmo valor obtido por Klein (2006), que foi de 66 %, em um Latossolo Vermelho de textura argilosa (70 % de argila).

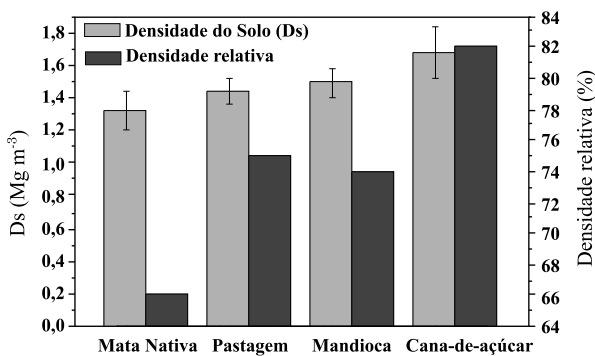


Figura 4. Valores de densidade do solo e de densidade relativa do solo em solos sob mata nativa e cultivados com pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, na camada de 0 a 0,10 m. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

Segundo Lindstron & Voorhees (1994), os valores de Dsrel acima de 86 % são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, e abaixo de 80 % eles podem alterar a produtividade de alguns cereais, em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo. Nenhum dos valores de Dsrel obtidos foi superior ao valor crítico proposto (86 %). Contudo, a área de cana-de-açúcar apresentou os maiores índices – muito próximos do valor crítico. Os efeitos das alterações das propriedades físicas do solo sobre as culturas são difíceis de ser mensurados, pois, mesmo com aumento da densidade, as culturas mantêm rendimentos aceitáveis, o que muitas vezes é obtido pelo efeito dos mecanismos de preparo (cana-de-açúcar e mandioca) e pelas condições meteorológicas favoráveis vigentes (Klein, 2006). Carter (1990) constatou que a produtividade máxima de trigo e cevada esteve associada a Dsrel de 81 % em solo arenoso de clima temperado. No Brasil, estudos de Torres & Saraiva (1999), em Latossolo Roxo cultivado durante dois anos com soja, em clima tropical, mostraram que, a partir da Dsrel de 84–87 %, houve decréscimo da produtividade da cultura da soja. Esses valores baixos podem ser explicados pelo fato de camadas mais compactadas estarem abaixo da camada amostrada – fato observado pelos dados de resistência à penetração (dados não apresentados).

Os valores de porosidade total (Pt) foram mais altos na área de mata nativa (Figura 5). As áreas de pastagem, mandioca e cana-de-açúcar apresentaram valores médios de Pt variando de 35 a 26, 34 a 28 e 26 a 18 %, respectivamente, enquanto na área de mata nativa eles variaram de 43 a 30 %. Apesar da queda gradual da Pt nas áreas cultivadas (pastagem, mandioca e cana-de-açúcar) em relação à área de mata nativa, nas áreas de pastagem e mandioca não se observou diferença (IC = 95 %) em comparação com a área de mata nativa, diferindo, esta, da área de cana-de-açúcar. Souza et al. (2004) observaram que a

porosidade total nos sistemas de uso com guaraná, capoeira e floresta não mostrou diferenças nas profundidades de 0,0–0,2 e 0,2–0,4 m. Entretanto, o efeito da ação antrópica refletiu em aumento da densidade do solo, a qual afetou a macroporosidade, não alterando a microporosidade; verificou-se que a redução da porosidade total é caracterizada inicialmente pela redução da macroporosidade. Por sua vez, Araújo et al. (2004) observaram diferenças significativas entre a Pt de solos cultivados e a dos solos de mata.

Os valores médios da porosidade total, macro e microporosidade são mostrados na figura 5. A área de mata nativa apresentou o maior valor de macroporosidade, diferindo das áreas cultivadas (Figura 5). Nenhuma das áreas apresentou porosidade inferior a 10 %, que é a porosidade restritiva para o bom desenvolvimento radicular, segundo Grable & Siemer (1968). Araújo et al. (2004) e Silva & Ribeiro (1992) observaram que os valores de macroporos do solo foram significativamente menores no solo cultivado, em comparação com os do solo sob mata nativa – fato também observado neste experimento. A drástica redução da macroporosidade nos solos cultivados decorre do aumento da compactação do solo, que é evidenciada pelo aumento da densidade do solo (Kay & Angers, 1999). Observou-se a seguinte ordem decrescente nos valores de microporosidade: pasto > mandioca > mata nativa > cana-de-açúcar (Figura 5). A microporosidade tem comportamento complementar e antagônico ao da macroporosidade. Silva & Ribeiro (1992) observaram redução no volume de poros totais e macroporosidade do solo, porém não constataram alteração substancial no volume de microporos quando ele foi cultivado com cana-de-açúcar. Já Araújo et al. (2004) não observaram diferença significativa (p < 0,05) na

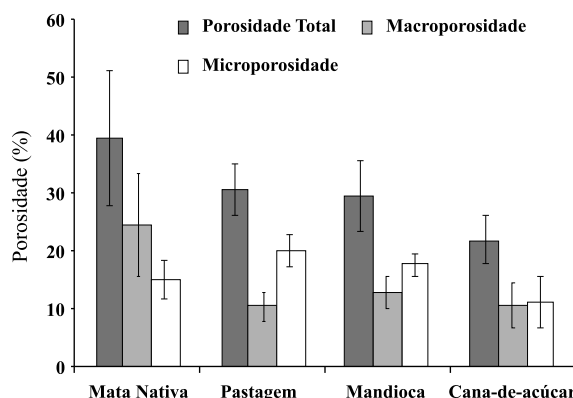


Figura 5. Valores de porosidade total, macro e microporosidade do solo em áreas de mata e áreas cultivadas com pasto, mandioca e cana-de-açúcar, na camada de 0 a 0,10 m. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

microporosidade entre os dois sistemas de uso avaliados. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e pelo teor de C orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada do tráfego de máquinas, implementos, etc.

Fica evidente por meio da grande redução da macroporosidade e aumento da microporosidade que o solo de área de pastagem pode apresentar as maiores limitações quanto ao arranjo dos poros. Isso pode estar associado ao preparo do solo realizado tanto nas áreas de cana-de-açúcar quanto nas de mandioca. Já nas áreas de pastagens, o intenso pisoteio do gado, principalmente sob umidade inadequada, proporcionou redução drástica de macroporos e aumento de microporos na camada estudada.

As alterações na estrutura do solo devido a pressões ou decomposição acelerada do COS podem causar diferentes efeitos nas culturas, os quais são difíceis de serem medidos, pois, mesmo com o aumento da Ds ou diminuição do teor de COS, por exemplo, podem-se manter rendimentos aceitáveis, como já descrito por Klein (2006).

CONCLUSÕES

Os sistemas de uso e manejo caracterizados no solo estudado induziram alterações dos atributos físicos do solo em relação à mata, quantificadas a partir de maiores valores de Ds, D_{smax} e D_{srel} do solo e menores valores de macroporosidade, Pt, COS e EC, na seguinte ordem crescente: pastagem, mandioca e cana-de-açúcar. No entanto, as áreas não são consideradas fisicamente degradadas.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação - ABNT. 1986. NBR 3. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- ARAUJO, 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.
- ARVIDSSON, J. & HÅKANSSON, I. A Model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. Soil Tillage Res., 20:319-332, 1991.
- BALL, B.C.; LANG, R.W.; O'SULLIVAN, M.S. & FRANKLIN, M.S. Cultivation and nitrogen requirements for continuous winter barley on a gleysol and a cambisol. Soil Tillage Res., 13:333-352, 1988.
- BHERING, S.B. & SANTOS, H.G. Mapa de solos do Estado do Paraná. Legenda atualizada. Rio de Janeiro, Embrapa Florestas/Embrapa Solos/Instituto Agrônomo do Paraná, 2008. 74p.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., org. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, America Society of Agronomy, 1986. p.363-375.
- BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W. & RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 73:1871-1879, 2009.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; DALVAN, J.; REINERT, D.J. & VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 14:131-139, 2010.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; DA VEIGA, M. & REINERT, D. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.
- CARDOSO, A.; POTTER, R. & DEDECEK, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no Noroeste do estado do Paraná. Pesq. Agropec. Bras., 27:349-353, 1992.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci., 70:425-433, 1990.
- CARVALHO, A.P. Solos do arenito Caiuá. In: CARVALHO, A.P. Solos altamente susceptíveis à erosão. Jaboticabal, FCAVUNESP/SBCS, 1994. p.39-50.
- CAVENAGE, 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.
- CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. R. Bras. Ci. Solo, 9:263-266, 1985.
- COSTA, A.C.S.; NANNI, M.R. & JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente por diferentes metodologias. R. Unimar, 19:827-844, 1997.
- COSTA, J.M. & OLIVEIRA, E.F. Fertilidade do solo e nutrição de plantas. Campo Mourão, COAMO/COODETEC, 1998. 89p.
- FONSECA, F.P. & CZUY, D.C. Formação Arenito Caiuá: Uso, ocupação do solo e problemas ambientais na região noroeste do Paraná. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA, 3., SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA JORNADA ARIIVALDO UMBELINO DE OLIVEIRA, 2., Presidente Prudente, 2005. Anais... Presidente Prudente, 2005
- DALAL, R.C. & CHAN, K.Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. Aust. J. Soil Res., 39:435-464, 2001.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & SCHAEFER, C.E.G.R., org. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. V.1. p.55-94.
- DÍAZ-ZORITA, M. & GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.*, 54:121-126, 2000.
- EKWUE, E.I. & STONE, R.J. Organic matter effects on strength properties of compacted agricultural soils. *Trans. ASAE*, 38:357-367, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Curitiba, 1984.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FEDDEMA, J.J. Estimated impacts of soil degradation on the african water balance and climate. *Climate Res.*, 10:127-141, 1998.
- FIDALSKI, J. Fertilidade do solo sob pastagens, lavouras anuais e permanentes na região noroeste do Paraná. *R. Unimar*, 19:853-861, 1997.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.
- HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.*, 53:71-85, 2000.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.*, 16:105-120, 1990.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.*, 35:23-36, 1995.
- KAY, B.D. & ANGERS, D.A. Soil structure. In: A. SUMNER, M.E., org. Handbook of soil science. Boca Raton, CRC Press, 1999. p.229-276.
- KELLER, T. & HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154:398-406, 2010.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia - relações solo-planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- KLEIN, V.A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *R. Ci. Agrovet.*, 5:26-32, 2006.
- KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J.K. & STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.*, 32:1485-1498, 2000.
- LAL, R. Soil quality and sustainability. In: LAL, R. et al., eds. Methods of assessment of soil degradation. Boca Raton, CRC Press, 1997. p.17-30.
- LINDSTRON, M.J. & VOORHEES, W.B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London, Elsevier, 1994. p.265-286. (Developments in Agricultural Engineering, 2)
- LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S. & KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.*, 19:307-317, 1991.
- MEURER, E.J. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre, Gênese, 2000. 174p.
- OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, MG.; SCAPIM, C.A.; MUNIZ, A.S. & SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:443-450, 2001.
- PACHECO, A.A.R.C. & DIAS JUNIOR, M.S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. *Ci. Prática*, 14:176-190, 1990.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. & PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Tillage Res.*, 79:131-143, 2004.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102:242-254, 2009.
- SANCHES, A.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & RIGOLIN, A.T. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:91-99, 1999.
- SAS - Institute Incorporation. SAS/GRAPH. Software: Reference. Version 8. Cary, 2000. 1272p.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.
- 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.S.L. & RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:397-402, 1992.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1350-1358, 1999.

- SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.*, 16:179-201, 1990.
- SOUZA, Z.M.; LEITE, J.A. & BEUTLER, A.N. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. *Eng. Agríc.*, 24:654-662, 2004.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:395-401, 2001.
- TORMENA, C.A. & ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339, 1996.
- TORRES, E. & SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:175-180, 1994.
- WEIRICH NETO, P.H.; ROSA, A.L.T. & GOMES, J.A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 6:349-353, 2002.