

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

EFEITO DE SISTEMAS DE USO E MANEJO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM ARGISSOLO AMARELO DE TABULEIRO COSTEIRO⁽¹⁾

Apolino José Nogueira da Silva⁽²⁾, Mário Sérgio Vaz Cabeda⁽³⁾ & José Fernando Wanderley Fernandes Lima⁽⁴⁾

RESUMO

Os diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar em solos de tabuleiros costeiros podem causar alterações na estrutura original do solo. Os efeitos de diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo coeso foram estudados em quatro áreas selecionadas na usina Triunfo, no Estado de Alagoas. Os tratamentos consistiram de uma área não irrigada, uma área irrigada, uma com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa como condição original. As amostras foram retiradas das profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,8 m, para determinar as alterações na densidade do solo, distribuição de diâmetro dos poros, curvas de retenção de água no solo e condutividade hidráulica saturada. O maior grau de dispersão de argila nos solos cultivados com cana-de-açúcar promoveu maior acúmulo desta partícula nas camadas subsuperficiais do solo. Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar aumentaram a compactação do solo, com conseqüente redução da macroporosidade e condutividade hidráulica saturada, e aumento da retenção de água disponível do solo.

Termos de indexação: compactação do solo, adensamento, porosidade, cana-de-açúcar, condutividade hidráulica.

⁽¹⁾ Parte de Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Recebido para publicação em janeiro de 2004 e aprovado em agosto de 2005.

⁽²⁾ Professor da Escola Agrícola de Jundiá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Caixa Postal 07, CEP 59280-000 Macaíba (RN). E-mail: ajndas@ufrnet.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: mscabeda@uol.com.br

⁽⁴⁾ Engenheiro-Agrônomo do Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: jfwfl@uol.com.br

SUMMARY: EFFECT OF USE AND MANAGEMENT SYSTEMS ON THE PHYSICAL AND HYDRAULIC PROPERTIES OF A YELLOW ARGISOL OF COASTAL TABLELANDS

Different sugarcane management systems on soils of coastal tablelands can cause alterations in their original soil structure. Effects of the different sugarcane management systems on the properties of a cohesive Yellow Argisol were studied in four areas of the Triunfo sugar mill in Alagoas State, Brazil. The treatments consisted of a site with and without cultivation irrigation each, one site with vinasse application and another under undisturbed native forest. Samples were collected at depths of 0–0.2, 0.2–0.4 and 0.4–0.8 m to determine the alterations in the bulk density, soil pore size distribution, soil water retention curves, and saturated hydraulic conductivity. The highest degree of clay dispersion in sugarcane-cultivated soils promoted a greater accumulation of clay particles in the subsurface soil layers. Management systems with sugarcane increased soil compaction, with a consequent alteration of the soil pore size distribution, reduced the saturated hydraulic conductivity and increased the retention of available water.

Index terms: soil compaction, densification, porosity, sugarcane, hydraulic conductivity.

INTRODUÇÃO

A topografia plana dos solos de tabuleiros costeiros na região Nordeste do Brasil tem favorecido as operações mecanizadas no cultivo da cana-de-açúcar. Contudo, o tráfego de máquinas, desde o preparo do solo até à colheita, contribui para aumentar as áreas com problemas de compactação do solo (Silva, 2003), resultando num aumento da densidade e redução do volume dos poros (Hillel, 1980). A degradação da estrutura do solo tem provocado efeitos negativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, com prejuízos ao desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, na produção agrícola (Gupta et al., 1989; Camargo & Alleoni, 1997).

O arrançamento mais compacto de partículas do solo pode ser um fenômeno pedogenético, adquirido durante o processo de formação do solo, decorrente de ciclos de umedecimento e secagem, e, ou, expansão e contração da massa do solo (Hillel, 1980). Em solos utilizados na agricultura, no entanto, a pressão sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (Soane et al., 1981; Marsili et al., 1998). Segundo Hakansson (1990), fatores relacionados com as máquinas agrícolas, tais como: elevada carga por eixo, pequena largura do pneu e alta pressão de inflação do pneu, têm aumentado a compactação do solo. A seqüência de atividades com máquinas após o revolvimento do solo no preparo para o cultivo também constitui um fator que tem aumentado a compactação dos solos agrícolas (Camargo & Alleoni, 1997).

Além da compactação causada por pressões externas, o acúmulo de argila em subsuperfície pode

originar camadas mais adensadas e provocar mudanças importantes nas propriedades físicas do solo, como redução da condutividade hidráulica, aumento da coesão e restrição à penetração de raízes (Mullins et al., 1990). A deposição de argila nas paredes dos poros e sobre os grãos de quartzo causa um arrançamento mais compacto de partículas, aumentando o adensamento das camadas subsuperficiais (Mitchell, 1976). Este fenômeno é mais expressivo em solos cuja argila está num maior grau de dispersão, migrando facilmente sob condições de chuva ou irrigação (Helalia et al., 1988).

As principais conseqüências da compactação nas propriedades físicas do solo são o aumento da densidade, diminuição do tamanho dos poros e redução da condutividade hidráulica (Soane et al., 1981; Dexter, 1988; Klein & Libardi, 2002). A compactação pode promover um rearrançamento das partículas na matriz do solo, o que pode resultar não só em modificações na forma e continuidade dos poros do solo, mas também na degradação da sua estrutura (Lhotsky et al., 1991). As modificações nestas propriedades do solo podem limitar o desenvolvimento do sistema radicular, bem como aumentar o escoamento superficial, aumentando a erosão (Gupta et al., 1989).

A compactação devida ao cultivo também pode causar modificações na retenção de água do solo, decorrentes de alterações sofridas na distribuição de diâmetro dos poros, principalmente redução da macroporosidade (Hillel, 1980). O aumento da retenção de água no solo devida à compactação tem sido verificado por alguns autores (Corsini et al., 1986; Stone et al., 1994). Todavia, a disponibilidade de água para as plantas vai depender do nível de compactação e da distribuição de diâmetro dos poros resultante (Hillel, 1980).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos dos sistemas de manejo de sequeiro, aplicação de vinhaça e irrigação na cultura da cana-de-açúcar sobre as propriedades físico-hídricas do solo em relação à condição original de floresta.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Usina Triunfo Agroindustrial, localizada no município de Boca da Mata, no Estado de Alagoas. O solo estudado foi classificado como um Argissolo Amarelo coeso latossólico textura média/argilosa (Prosped, 1992) e provém do grupo Barreiras, composta por sedimentos arenarargilosos, constituídos principalmente por quartzo na fração areia e caulinita na fração argila, com baixos teores de óxidos de Fe, principalmente goethita (Jacomine et al., 1975). A área tem clima tropical chuvoso com verão seco, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual fica em torno de 1.200 mm (Nimer, 1989) e a temperatura média anual ao redor de 29 °C (Jacomine et al., 1975). O relevo predominante é plano e suave ondulado, característico da região de Tabuleiros Costeiros.

Foram utilizados três diferentes sistemas de manejos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.): um sob cultivo de sequeiro, um sob cultivo irrigado e uma área cultivada com aplicação de vinhaça. Estas formas de manejo foram comparadas entre si e em relação a uma testemunha, representada por solo virgem, sob floresta subperenifolia. Todos os tratamentos estão situados numa mesma posição na paisagem, em topo plano de platô costeiro.

No plantio da cana planta ou a cada 5-6 anos, quando da renovação do canavial, o preparo do solo consistiu em subsolagem realizada com subsolador de sete hastes, espaçadas 45 cm uma da outra e com ponteiros de 7 cm de largura, trabalhando a uma profundidade de 35 cm. Após a subsolagem, foram realizadas duas gradagens pesadas com grade de 18 discos de 30 polegadas, trabalhando a uma profundidade de 25 cm, com o objetivo de destruir a soqueira da cana. A abertura dos sulcos foi feita com sulcador de três linhas a 25 cm de profundidade. No plantio, as canas foram distribuídas manualmente no sulco e, na colheita, foram cortadas manualmente e carregadas para caminhão com carregadeira convencional. Nas áreas cultivadas, a cana-de-açúcar foi queimada antes da colheita.

No sistema de manejo com vinhaça (Quadro 1), foram aplicados anualmente 500 m³ ha⁻¹, sendo a aplicação feita por aspersor com vazão de 150 m³ h⁻¹. Também foram aplicados 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro na renovação do canavial. Este manejo vem sendo adotado há 25 anos consecutivos nesta área.

Na área com sistema de manejo irrigado, foi aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cultura, por meio de aspersor com vazão de 100 m³ h⁻¹, sendo esse tratamento adotado há 25 anos consecutivos. A água utilizada (Quadro 2) era proveniente de açudes próximos à área cultivada. A adubação da cana planta foi feita de acordo com análise do solo, sendo geralmente administrados, anualmente, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro, enquanto na cana soca foram aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O respectivamente.

Na área com regime de sequeiro (CS), o cultivo foi realizado há 30 anos e a área nunca foi irrigada

Quadro 1. Composição química média da vinhaça utilizada

pH	C.E.	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Fe ²⁺
	dS m ⁻¹	g L ⁻¹							mg L ⁻¹
5,71	3,60	9,3	0,56	0,19	0,96	0,28	0,13	3,11	1,14

C.E. = condutividade elétrica.

Quadro 2. Composição química da água utilizada na irrigação

pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe ²⁺	C.E.	R.A.S.
	mmolc L ⁻¹							mg L ⁻¹	dS m ⁻¹	
7,1	0,15	0,23	1,76	0,17	1,74	0,03	0,64	0,66	0,26	4,04

C.E. = condutividade elétrica; R.A.S = razão de adsorção de sódio.

nem recebeu vinhaça. Foram aplicados anualmente 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O respectivamente na cana planta e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro e, na cana soca, foram aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

As parcelas experimentais de cada sistema de uso e manejo apresentavam dimensões de 100 x 100 m, sendo a amostragem realizada ao acaso, com quatro repetições, coletando-se amostras nas camadas de 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,8 m. Nas parcelas dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar, as amostras foram retiradas num ponto situado a 40 cm da linha de plantio, seis meses após o primeiro corte da cultura.

A densidade do solo foi determinada com amostras indeformadas obtidas com anel volumétrico de Kopeck (Embrapa, 1997). O teor de argila total foi determinado pelo método da pipeta, usando-se solução de hexametáfosfato de sódio como agente dispersante. A argila dispersa em água foi obtida usando-se o mesmo procedimento para determinação da argila total, porém sem emprego do dispersante químico. O grau de dispersão foi determinado pela razão entre o teor de argila dispersa em água e o teor de argila total.

A curva característica de água no solo foi medida com amostras indeformadas de 8 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, sendo utilizadas seis repetições. Para as tensões de 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, usou-se um funil de placa porosa (tipo Haines) e, para as tensões de 33, 500 e 1500 kPa, utilizou-se a câmara de pressão (câmara de Richards). A curva característica de água no solo foi ajustada à equação de Van Genuchten (1980), dada pela equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\psi_m|)^n\right]^m} \quad (1)$$

em que θ = umidade do solo (m³ m⁻³), θ_r = umidade volumétrica residual (m³ m⁻³) determinada na tensão de 1.500 kPa, θ_s = umidade volumétrica de saturação (m³ m⁻³), ψ_m = potencial mátrico (kPa), α , m , n = valores empíricos da equação.

A distribuição de diâmetro de poros foi obtida a partir das curvas características de água no solo, conforme Danielson & Sutherland (1986). Foram determinados poros com diâmetro $\phi \geq 1.000 \mu\text{m}$ (megaporos), obtidos pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica do solo na tensão de -0,3 kPa; poros com diâmetro $50 \leq \phi < 1.000 \mu\text{m}$ (macroporos), determinados pela diferença entre as umidades volumétricas de -0,3 kPa e -6 kPa; poros com diâmetro $0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$ (microporos), obtidos a partir da diferença entre as umidades volumétricas de -6 kPa e -1.500 kPa, e poros de diâmetro $\leq 0,2 \mu\text{m}$ (criptoporos), obtidos a partir da umidade volumétrica na tensão de -1.500 kPa (Silva, 2003).

A condutividade hidráulica saturada foi obtida com amostras indeformadas, montadas em permeâmetro de carga constante e fluxo descendente (Embrapa, 1997). Para medir a argila no efluente, o volume total do efluente coletado no ensaio de condutividade hidráulica foi colocado em recipiente plástico. Após agitação com bastão para homogeneização da suspensão, uma amostra de 1.000 mL foi colocada em proveta e a argila foi separada pelo método da pipeta. A concentração da argila na suspensão do efluente foi determinada por gravimetria (Frenkel et al., 1978).

Os resultados foram analisados como um delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, sendo os dados submetidos à análise de variância e a comparação das médias feita pelo teste de Tukey a 5 %, usando-se o software SANEST. As análises de regressão linear múltiplas foram feitas com o software SigmaStat 2.03, usando-se o modelo $\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$, em que: \hat{y} = estimativa da variável dependente, $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ = coeficientes e x_1, x_2, \dots, x_k = variáveis independentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O grau de dispersão de argila aumentou nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa, na camada de 0–0,2 m (Quadro 3). O solo sob o sistema irrigado apresentou o maior grau de dispersão de argila, possivelmente pelos efeitos do íon Na⁺ da água de irrigação (Quadro 2). Dentre os solos cultivados, o solo com vinhaça apresentou os menores valores para o grau de dispersão, o que provavelmente está relacionado com cátions floculantes, tais como: Ca²⁺ e Mg²⁺ presentes na vinhaça (Quadro 1). Segundo Camargo et al. (1988), solos que recebem vinhaça apresentam aumento da concentração salina na solução do solo, o que diminui a dispersão da fração argila. Lopes et al. (1986) enfatizam que a maior atividade biológica em solos que recebem vinhaça diminui a dispersão de argila e favorece a agregação, graças à maior produção de mucilagens.

A concentração de argila no efluente (Quadro 3) coletado no ensaio de condutividade hidráulica saturada foi superior no solo irrigado em relação aos demais sistemas de uso e manejo, indicando maior migração de argila neste solo. Estes resultados estão de acordo com os resultados de grau de dispersão de argila, que foram superiores no solo irrigado. Frenkel et al. (1978) também verificaram maior concentração de argila no efluente coletado em colunas com solos caulíníticos, considerando a sodicidade da água utilizada na irrigação. No presente estudo, o tratamento que utilizou vinhaça apresentou os menores valores de argila no efluente entre os solos cultivados, refletindo os menores valores para o grau de dispersão neste solo.

Quadro 3. Grau de dispersão, argila no efluente, argila total e densidade do solo, considerando os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas

Camada	Sistema de uso e manejo			
	Mata	Sequeiro	Irrigado	Vinhaça
m	Grau de dispersão, %			
0–0,2	41,0 Da	52,8 Ba	65,2 Aa	48,9 Ca
0,2–0,4	39,5 Bb	39,9 Bb	52,6 Ab	39,3 Bb
0,4–0,8	22,6 Dc	26,1 Bc	30,7 Ac	24,4 Cc
	Argila no efluente, mg L ⁻¹			
0–0,2	415 Cb	509 Bc	611 Ab	441 Cb
0,2–0,4	533 Ca	787 Bb	1273 Aa	576 Ca
0,4–0,8	577 Ca	867 Ba	1149 Aa	613 Ca
	Argila total, g kg ⁻¹			
0–0,2	233,9 Ac	212,0 BCc	200,8 Cc	221,1 ABc
0,2–0,4	263,0 Bb	303,1 Ab	312,1 Ab	295,1 Ab
0,4–0,8	411,8 Ca	472,2 ABa	486,1 Aa	453,9 Ba
	Densidade do solo, Mg m ⁻³			
0–0,2	1,29 Cb	1,61 Aa	1,54 Ab	1,42 Ba
0,2–0,4	1,41 Ca	1,53 Ba	1,65 Aa	1,44 BCa
0,4–0,8	1,38 Bab	1,55 Aa	1,62 Aab	1,39 Ba

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste Tukey (5 %).

Verificou-se redução nos teores de argila total na camada de 0–0,2 m nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação ao solo sob mata nativa (Quadro 3). A redução do teor de argila na camada superficial resultou num aumento significativo nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m das três áreas cultivadas, com os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentando aumentos mais expressivos. O aumento dos teores de argila em profundidade pode promover um aumento da coesão dos solos de tabuleiros, já que esta propriedade influencia a coesão do solo (Chartres et al., 1990) e pode promover um adensamento dessas camadas (Mullins et al., 1990).

Verificaram-se aumentos significativos nos valores de densidade do solo nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa, nas camadas de 0,0–0,2 e 0,2–0,4 m (Quadro 3), o que está relacionado com o tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo. Cerri et al. (1991) também verificaram aumentos de densidade de Latossolos de Piracicaba cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa, associando a compactação do solo ao tráfego de máquinas nas atividades agrícolas.

Na camada de 0,2–0,4 m o aumento da densidade do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode está relacionado não só com o tráfego de máquinas na superfície do solo, onde os efeitos da pressão dos pneus podem atingir profundidades

maiores (Hakansson & Reeder, 1994), como também com os efeitos da grade pesada, a qual é utilizada na destruição da soqueira da cana na renovação do canal. Segundo Mantovani (1990), as grades pesadas são implementos que podem causar compactação em camadas subsuperficiais, principalmente quando a profundidade de trabalho é constante ao longo dos anos.

Os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram os maiores valores de densidade do solo na camada de 0,4–0,8 m em relação ao solo da mata, indicando que os efeitos das atividades de cultivo atingiram esta camada. O tráfego de máquinas pesadas na área cultivada, principalmente por ocasião da colheita, quando caminhões carregados com cana-de-açúcar atingem uma massa de 26 Mg, contribui para a compactação em profundidade (Silva, 2003). Barbieri et al. (1997), estudando os efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar em um Latossolo Roxo, verificaram que a compactação do solo atingiu a profundidade de 0,6 m, principalmente no preparo com grades pesadas.

O aumento dos teores de argila nas camadas subsuperficiais dos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado em relação ao solo sob mata nativa contribuiu, possivelmente, para o adensamento destes solos. Mitchell (1976) enfatiza que a argila dispersa migra através do perfil do solo e preenche os espaços porosos entre as unidades estruturais e

grãos de areia, podendo aumentar expressivamente a densidade do solo de camadas subsuperficiais.

Houve redução significativa na porosidade total dos solos cultivados sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação ao solo sob mata nativa na camada de 0–0,2 m (Quadro 4), com reduções mais expressivas nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, chegando a 20 e 17 % respectivamente, em relação ao solo da mata. Estas reduções na porosidade total refletem as mudanças na distribuição do diâmetro de poros do solo decorrente do cultivo com cana-de-açúcar nas áreas estudadas. Não houve diferença significativa entre os valores de porosidade total dos solos sob os sistemas mata nativa e vinhaça, nas camadas de 0,2–0,4 e 0,4–0,8 m (Quadro 4), refletindo a ausência de diferença significativa entre os valores de densidade destes solos nestas camadas (Quadro 3).

Verificou-se redução significativa nos valores de megaporos ($\phi \geq 1.000 \mu\text{m}$) e de macroporos ($50 \leq \phi < 1.000 \mu\text{m}$) nas três áreas cultivadas em relação ao solo da mata, nas camadas de 0–0,2m e 0,2–0,4 m (Quadro 4). Os macroporos tiveram redução de 55, 44 e 32 % nos solos sob os três sistemas sequeiro: irrigado e vinhaça, respectivamente, em relação ao solo da mata, na camada de 0–0,2 m. A redução dos poros de maior diâmetro nas áreas cultivadas reflete

a maior compactação destes solos, resultante do tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo da cana-de-açúcar. Segundo Hill et al. (1985), tal compactação do solo é devida principalmente ao colapso dos poros de maior diâmetro. Os efeitos negativos do cultivo na fauna do solo possivelmente contribuíram para a diminuição dos megaporos, já que grande parte desta classe de poros é de origem biológica (Hole, 1981).

Dentre os solos cultivados sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça, os maiores valores dos poros de maior diâmetro (mega e macroporos), na camada de 0–0,2 m, ocorreram no solo com vinhaça (Quadro 4), o que provavelmente está relacionado com um melhor desenvolvimento do sistema radicular da cultura neste sistema de manejo (Silva, 2003), que promove melhores condições químicas ao solo pela aplicação da vinhaça (Nunes et al., 1981).

Como consequência da redução dos poros de maior diâmetro, há um acréscimo significativo dos microporos ($0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$) nas camadas de 0–0,2 e 0,2–0,4 m das três áreas cultivadas com cana-de-açúcar, em relação ao solo da mata (Quadro 4). A semelhança nos valores de criptoporos ($\phi \leq 0,2 \mu\text{m}$) entre os tratamentos na camada de 0,0–0,2 m indica que a mudança na distribuição de poros nesta camada ocorreu com a redução da macroporosidade

Quadro 4. Distribuição de diâmetro de poros, considerando os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas

Camada	Sistema de uso e manejo			
	Mata	Sequeiro	Irrigado	Vinhaça
m	m ³ m ⁻³			
	Megaporos			
0–0,2	0,031 Aa	0,005 Ca	0,008 Ca	0,018 Ba
0,2–0,4	0,021 Ab	0,007 Ba	0,005 Bab	0,010 Bab
0,4–0,8	0,008 Ac	0,003 Aa	0,003 Ab	0,005 Ab
	Macroporos			
0–0,2	0,229 Aa	0,103 Da	0,128 Ca	0,156 Ba
0,2–0,4	0,195 Ab	0,103 Ca	0,079 Db	0,135 Bb
0,4–0,8	0,146 Ac	0,081 Cb	0,057 Dc	0,120 Bc
	Microporos			
0–0,2	0,155 Bb	0,192 Aab	0,179 ABab	0,178 ABb
0,2–0,4	0,144 Bb	0,179 Ab	0,160 Ab	0,173 Ab
0,4–0,8	0,228 ABa	0,222 ABa	0,207 Ba	0,243 Aa
	Criptoporos			
0–0,2	0,094 Aa	0,105 Ab	0,108 Ac	0,109 Ab
0,2–0,4	0,113 Ca	0,138 Ba	0,162 Aa	0,137 Ba
0,4–0,8	0,103 Ba	0,116 Bb	0,143 Ab	0,111 Bb
	Porosidade total			
0–0,2	0,509 Aa	0,405 Db	0,423 Ca	0,461 Bb
0,2–0,4	0,473 Ac	0,427 Ba	0,406 Cb	0,455 Ab
0,4–0,8	0,485 Ab	0,422 Ba	0,410 Cb	0,479 Aa

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste Tukey (5 %). Megaporos ($\phi \geq 1.000 \mu\text{m}$), macroporos ($50 \leq \phi < 1.000 \mu\text{m}$), microporos ($0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$), criptoporos ($\phi \leq 0,2 \mu\text{m}$).

para um aumento na porosidade de tamanho intermediário ($0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$) (Quadro 4).

Na camada de 0,2–0,4 m, houve aumento de criptoporos nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação à mata, e, na camada de 0,4–0,8 m, o maior valor foi observado no solo irrigado (Quadro 4). Os maiores valores desta classe de poros nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados podem estar associados à compactação do solo e ao preenchimento dos poros de maior diâmetro com argila iluvial, proveniente do horizonte superficial (Quadro 3). A migração da argila dispersa em solos cultivados pode resultar numa microporosidade adicional em camadas subsuperficiais, graças ao preenchimento dos macroporos com argila iluvial (Startsev & McNabb, 2001). No presente estudo, os maiores valores do grau de dispersão e o acúmulo de argila nas camadas subsuperficiais, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, podem estar relacionados com a diminuição dos poros de maior diâmetro e com o adensamento nas camadas subsuperficiais nestes solos.

As mudanças na distribuição de diâmetro de poros do solo atribuídos ao cultivo com cana-de-açúcar acarretaram alterações na retenção de água do solo (Figura 1). Os sistemas de manejo do solo alteraram o traçado das curvas características de água dos solos nas profundidades estudadas (Figura 1a, b e c), em virtude das alterações na densidade do solo. Nas camadas de 0–0,2 e 0,2–0,4 m, verificam-se valores significativamente superiores de retenção de água nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça entre os potenciais matriciais de -6 a -1.500 kPa, em relação ao solo sob mata nativa (Figuras 1a e b), decorrente do maior volume de poros com diâmetro $\phi < 50 \mu\text{m}$, como resultado da compactação do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Na camada de 0,4–0,8 m, constatou-se aumento significativo de retenção de água no solo sob o sistema irrigado entre os potenciais matriciais de -33 a -1.500 kPa, em relação ao solo da mata (Figura 1c), em virtude da redução mais expressiva de macroporos neste solo (Quadro 4).

As diferenças de retenção de água dos solos para um mesmo potencial mátrico comprovam as mudanças na distribuição de diâmetro de poros desses solos (Hillel, 1980). As mudanças na distribuição de diâmetro de poros nos solos cultivados com cana-de-açúcar, especialmente nos sistemas de sequeiro e irrigado, promoveram menor teor de água no solo no ponto de saturação (θ_s), em relação ao solo da mata (Quadro 5). O maior volume de microporos ($0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$) nas camadas de 0–0,2 e 0,2–0,4 m, devido ao aumento da densidade do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, resultou num incremento no teor de água disponível para as plantas (ψ_m entre -10 e -1.500 kPa

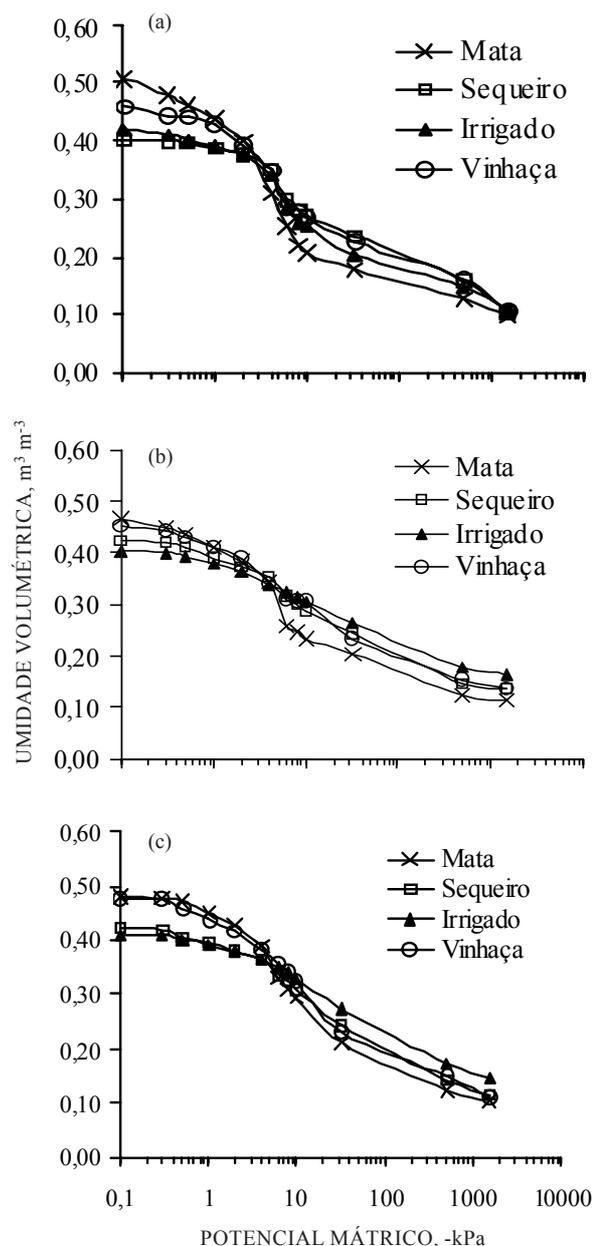


Figura 1. Curvas características de água nas camadas (a) 0–0,2 m, (b) 0,2–0,4 m e (c) 0,4–0,8 m para os sistemas de uso e manejo do solo estudado.

(Figura 2), que passou de $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no solo sob mata nativa, para $0,17$; $0,18$ e $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça, respectivamente, na camada de 0–0,2 m. A redução dos valores de α (Quadro 5) nos solos das três áreas cultivadas com cana-de-açúcar indica um aumento da retenção de água nestes solos em relação ao solo da mata. A maior retenção de água em solos cultivados deveu-se às modificações na distribuição de diâmetro dos poros, o que também foi verificado por outros autores (Hill et al., 1985; Carvalho et al., 1991).

Quadro 5. Valores de ajuste da equação de Van Genuchten e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os solos sob os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas

Camada	α	m	n	θ_r	θ_s	R^2
m	kPa ⁻¹			m ³ m ⁻³		
Mata						
0-0,2	2,982	0,349	1,536	0,119	0,509	0,926
0,2-0,4	1,763	0,404	1,678	0,126	0,473	0,901
0,4-0,8	1,213	0,387	1,633	0,128	0,483	0,942
Sequeiro						
0-0,2	0,868	0,433	1,765	0,122	0,405	0,906
0,2-0,4	0,672	0,474	1,899	0,129	0,427	0,888
0,4-0,8	0,492	0,453	1,828	0,134	0,422	0,928
Irrigado						
0-0,2	1,180	0,426	1,744	0,123	0,423	0,908
0,2-0,4	0,420	0,529	2,125	0,132	0,406	0,869
0,4-0,8	0,347	0,507	2,028	0,138	0,410	0,933
Vinhaça						
0-0,2	1,050	0,395	1,654	0,117	0,461	0,851
0,2-0,4	0,863	0,446	1,805	0,123	0,455	0,883
0,4-0,8	0,720	0,400	1,666	0,126	0,479	0,913

α , m, n = valores empíricos da equação 1; θ_r = umidade volumétrica residual (m³ m⁻³); θ_s = umidade volumétrica de saturação (m³ m⁻³).

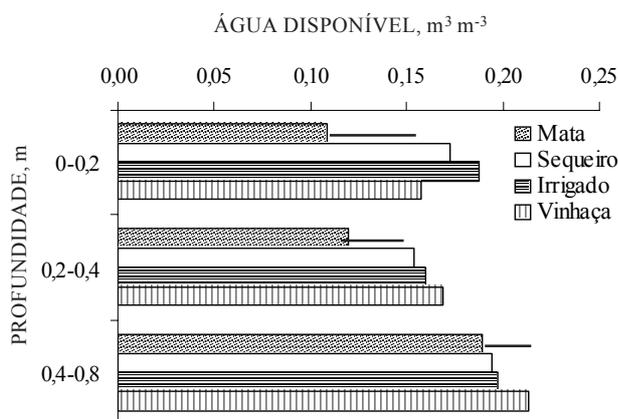


Figura 2. Água disponível para as plantas (ψ_m entre -10 e -1.500 kPa), considerando os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (5 %) e comparam médias dos sistemas de uso e manejo em cada profundidade.

Os valores de condutividade hidráulica saturada (K_s) reduziram significativamente nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, em relação ao solo sob mata nativa (Figura 3). A redução nos valores de K_s nos solos das áreas cultivadas reflete a redução dos poros de maior diâmetro ($\phi \geq 50 \mu\text{m}$) (Quadro 4). Estes poros são responsáveis pela aeração e pela drenagem da água no perfil do solo (Hillel, 1980), e a sua influência na condutividade hidráulica do solo tem

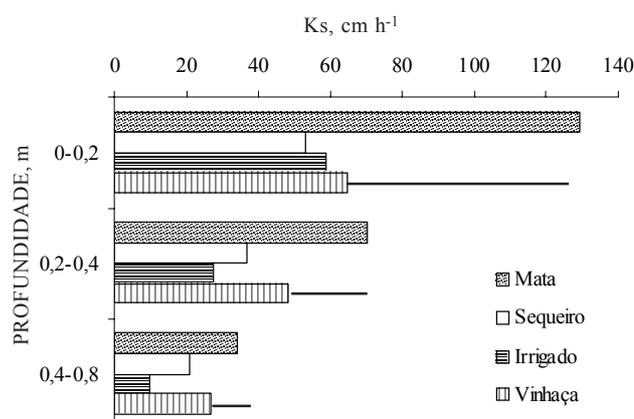


Figura 3. Condutividade hidráulica saturada (K_s), considerando os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (5 %) e comparam médias dos sistemas de uso e manejo em cada profundidade.

sido verificada na literatura (Logsdon et al., 1990; Azooz et al., 1996).

Não houve diferença significativa nos valores de K_s entre os solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça na camada de 0-0,2 m (Figura 3), apesar dos maiores valores de poros com diâmetro $\phi \geq 50 \mu\text{m}$ no solo com vinhaça (Quadro 4), o que pode indicar mudanças na geometria e continuidade dos poros dos solos cultivados em relação ao solo da mata. A condutividade hidráulica saturada do solo depende

não só da distribuição de diâmetro dos poros como também da geometria, orientação e continuidade desses poros no solo (Marsili et al., 1998).

Na camada de 0,4–0,8 m, os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram os menores valores de K_s (Figura 3), refletindo os maiores valores de poros com diâmetro $\phi < 50 \mu\text{m}$ (Quadro 4). O aumento do teor de argila na camada de 0,4–0,8 m destes solos em relação ao da mata (Quadro 3) possivelmente contribuiu para o menor valor de K_s , como reflexo do preenchimento e obstrução dos poros destas camadas. Frenkel et al. (1978) verificaram que a redução da condutividade hidráulica saturada de solos cauliniticos ocorreu como consequência do preenchimento de poros por partículas de argila dispersa em água.

A condutividade hidráulica é a propriedade do solo que mais reflete as mudanças na sua estrutura original (Logsdon et al., 1990). O quadro 6 mostra os efeitos combinados de diferentes propriedades do solo sobre a K_s , sendo avaliados pela regressão linear múltipla. O coeficiente de determinação é de $R^2 = 0,589$, quando a K_s é função apenas da densidade do solo, passando para 0,891, quando foram adicionados os efeitos de megaporos, macroporos, microporos e criptoporos. Observa-se que os teores de argila e de areia do solo não apresentaram nenhuma contribuição ao coeficiente de determinação, mostrando a maior influência da distribuição de diâmetro de poros e densidade do solo na condutividade hidráulica do solo.

CONCLUSÕES

1. Houve aumento no grau de dispersão de argila do solo e aumento dos teores de argila total nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados com cana-de-açúcar, em relação ao solo da mata.

2. Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar influenciaram as propriedades físicas do solo, resultando num aumento da densidade, com consequente redução do volume de mega e macroporos e aumento dos micro e criptoporos, em relação ao solo da mata.

3. As alterações na distribuição de diâmetro dos poros promoveram uma redução da condutividade hidráulica saturada e aumento da retenção de água do solo disponível para as plantas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Usina Triunfo, pelo apoio logístico; ao Engenheiro-Agrônomo Arnaldo Jugurta (Usina Triunfo) e aos laboratoristas Anacleto e Camilo (UFRPE).

LITERATURA CITADA

AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. & FRANZLUEBBERS, A.J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1197-1201, 1996.

Quadro 6. Coeficientes de determinação (R^2) para as relações entre a condutividade hidráulica saturada (Y) e as combinações de algumas propriedades estudadas (X)

Parâmetro	R^2	n
Densidade do solo	0,589*	32
Densidade do solo + megaporos	0,785*	32
Densidade do solo + megaporos + macroporos	0,804*	32
Densidade do solo + megaporos + macroporos + microporos	0,823*	32
Densidade do solo + megaporos + macroporos + microporos + criptoporos	0,891*	32
Densidade do solo + megaporos + macroporos + microporos + criptoporos + teor de argila	0,891*	
Densidade do solo + megaporos + macroporos + microporos + criptoporos + teor de argila + teor de areia	0,891*	32

*: Significativo a 1 %.

- BARBIERI, J.L.; ALLEONI, L.R.F. & DONZELLI, J.L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 21:89-98, 1997.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.; BERTON, R.S. & TEÓFILO SOBRINHO, J. Características físicas de solo que recebeu vinhaça. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1988, 12p.
- CARVALHO, S.R.; BRUAND, A.; HARDY, M.; LEPRUN, J.C. & JAMAGNE, M. Soil compaction of Ultisols (Podzólico Vermelho-Amarelo) under sugar cane crops (State of Rio de Janeiro, Brasil). Interest of a combined analysis of porosity and mineral constitution. Cah. Orstom, Sér. Ped., 26:195-212, 1991.
- CERRI, C.C.; FELLER, C. & CHAUVEL, A. Evolução das principais propriedades de um Latossolo Vermelho-Escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. Cah. Orstom, Sér. Ped., 26:37-50, 1991.
- CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M. & RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hardsetting soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1060-1067, 1990.
- CORSINI, P.C.; MALHEIROS, E.B. & SACHI, E. Sistemas de cultivo da cultura da cana-de-açúcar: Efeitos na retenção de água e na porosidade do solo. R. Bras. Ci. Solo, 10:71-74, 1986.
- DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. Part 1. p.443-460.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil Till. Res., 11:199-238, 1988.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O. & RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:32-39, 1978.
- GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P. & DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. Adv. Agron., 42:311-338, 1989.
- HAKANSSON, I. Soil compaction control objectives, possibilities and prospects. Soil Technol., 3:231-239, 1990.
- HAKANSSON, I. & REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle-load extent, persistence and crop response. Soil Till. Res., 29:277-304, 1994.
- HELALIA, A.M.; LETEY, J. & GRAHAM, R.C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:251-255, 1988.
- HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:1264-1270, 1985.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- HOLE, F.D. Effects of animals on soil. Geoderma, 25:75-122, 1981.
- JACOMINE, P.K.T. Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos de Estado de Alagoas. Recife, EMBRAPA/Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 26:857-867, 2002.
- LHOTSKY, J.; BERAN, P.; PARIS, P. & VALIGURSKÁ, L. Degradation of soil by increasing compression. Soil & Till. Res., 19:287-295, 1991.
- LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; WU, L.; SWAN J.B. & RANDALL G.W. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1096-1101, 1990.
- LOPES, E.S.; PERON, S.C.; PORTUGAL, E.P.; CAMARGO, O.A.; FREITAS, S.S. Atividade respiratória de solo tratado com vinhaça e herbicida. Bragantia, 45:205-210, 1986.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. Soil Till. Res., 49: 185-199, 1998.
- MITCHELL, J.K. Fundamentals of soil behavior. New York, John Wiley, 1976. 422p.
- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. V curso de uso e manejo da irrigação. Sete Lagoas, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, 1990. 11p.
- MULLINS, C.E.; MACLEOD, D.A.; NORTHCOLE, K.H.; TISDALL, J.M. & YOUNG, I.M. Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. Adv. Soil Sci., 11:37-108, 1990.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE-DERNA, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422 p.
- NUNES, M.R.; VELLOSO, A.C.X. & LEAL, J.R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. Pesq. Agropec. Bras., 16:171-176, 1981.
- PROSPED. Levantamento detalhado dos solos da Usina Triunfo na escala de 1:10.000. Boca da Mata, AL, 1992. (Relatório Geral)
- SILVA, A.J.N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 120p. (Tese de Doutorado)
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I - soil and wheel characteristics. Soil Till. Res., 16:207-237, 1981.
- STARTSEV, A.D. & McNABB, D.H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameter of boreal forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 65:224-231, 2001.
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. & ZIMMERMANN, F.J.P. Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. R. Bras. Ci. Solo, 18:533-539, 1994.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.