

LIMITES DE CONSISTÊNCIA E PROPRIEDADES QUÍMICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO SOB APLICAÇÃO DE DIFERENTES RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos⁽²⁾, José Ramon Barros Cantalice⁽³⁾, Apolino José Nogueira da Silva⁽⁴⁾, Veronildo Souza de Oliveira⁽⁵⁾ & Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva⁽⁶⁾

RESUMO

Os solos dos tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar, durante longo período de tempo, sob sistemas de manejo com diferentes aportes de matéria orgânica podem apresentar alterações nas propriedades físicas e químicas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do aporte de matéria orgânica pelos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Foram selecionadas áreas em talhões de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa experimental três áreas, representativas de três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira: uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área sob sistema de manejo com aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha-padrão, representada por um fragmento de Mata Atlântica nativa (MN). Para avaliar as propriedades físicas e químicas, amostras de solo foram coletadas ao acaso, nas áreas submetidas aos diferentes sistemas de manejo, nas profundidades de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, sendo retiradas num ponto situado

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Recebido para publicação em abril de 2009 e aprovado em março de 2010

⁽²⁾ Professor do Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: romerofalcao@hotmail.com

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agronomia, UFRPE. E-mail: cantalic@terra.com.br

⁽⁴⁾ Professor da Escola Agrícola de Jundiá – UFRN. CEP 59280-900 Macaíba (RN). E-mail: ajndas@ufrnet.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Tecnologia Rural, UFRPE. E-mail: verofat@dtr.ufrpe.br

⁽⁶⁾ Graduando em Engenharia Agrônoma, UFRPE. E-mail: yuri_jacques@hotmail.com

nas entrelinhas da cana-de-açúcar. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 %. Estudos de correlações simples foram realizados entre algumas variáveis medidas. Os resultados permitiram concluir que os diferentes sistemas de manejo investigados promoveram alterações nas propriedades físicas e químicas do solo. As medidas de consistência do solo apresentaram tendência de aumento em seus valores com o incremento do carbono orgânico total (COT) do solo, promovido pela adição de resíduos da cana-de-açúcar. Os sistemas de manejo que receberam adição de resíduos da cana-de-açúcar denotaram menor degradação nas propriedades físicas e químicas do solo.

Termos de indexação: consistência do solo, manejo da cana-de-açúcar, solos coesos.

SUMMARY: *LIMITS OF CONSISTENCY CHEMICAL PROPERTIES OF A DYSTROPHIC COHESIVE YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT SUGARCANE RESIDUES*

The physical and chemical properties of coastal plain soils cultivated with sugarcane for a long period under different management systems may undergo changes. The objective of this study was to evaluate the effects of different sugarcane management systems on the chemical and physical properties of a dystrophic cohesive Yellow Latosol of coastal tablelands in the state of Alagoas. Three experimental plots were selected in sugarcane growing areas, representing the three management systems used for ethanol production, namely: a cultivated area under irrigation management, an area under fertirrigation with vinasse and an area with application of vinasse + filter cake. The management systems were compared with each other and with a control area of native forest. To assess physical and chemical properties, soil samples were randomly collected in the areas under different management systems at depths of 0–0.20; 0.20–0.40 and 0.40–0.60 m, from the sugarcane interrows. The results were subjected to analysis of variance and the means compared by the Tukey test at 5 %. Simple correlation analysis was performed between some variables. Results showed changes in the soil physical and chemical properties due to the different management systems. The soil consistency parameters tended to increase with the increase of total organic carbon, resulting from the application of sugar cane waste. In the management systems with application of sugar cane waste the deterioration in soil physical and chemical properties was reduced.

Index terms: soil consistency, sugarcane management, cohesive soils.

INTRODUÇÃO

As propriedades físico-químicas das argilas – e por consequência os solos argilosos – podem sofrer alterações em função das mudanças ambientais devido à alta afinidade por água das argilas. Por exemplo, a contaminação do lençol freático pode alterar os limites de consistência, a condutividade hidráulica, a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento de solos argilosos (Oren & Kaya, 2003).

A consistência do solo é consequência das manifestações de forças físicas de adesão e coesão que atuam de acordo com a variação da umidade. Segundo Forsythe (1985), essas forças são expressas por meio do comportamento do solo ante a ação da gravidade,

das tensões de tração e de compressão, do empuxo e da tendência do solo em aderir à superfície dos órgãos ativos dos implementos agrícolas. De forma geral, o conceito de consistência do solo inclui a resistência à compressão e ao esforço cisalhante, friabilidade, plasticidade e pegajosidade, propriedades que se manifestam conforme a variação das forças de adesão e coesão. Atterberg foi quem introduziu os conceitos de limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade. Para Caputo (2000), as definições desses limites são convencionais, embora tenham sido fundamentadas em extensas investigações experimentais. Uma pequena porcentagem de matéria orgânica pode aumentar o limite de plasticidade, sem necessariamente elevar simultaneamente o limite de liquidez.

Um solo argiloso com baixo teor de umidade apresenta-se duro e muito coeso, devido a um efeito cimentante entre as partículas secas. Nessas condições, caso venha a ser mobilizado mecanicamente, haverá a formação de blocos grandes de solo, deixando este numa condição desfavorável para o preparo periódico secundário e, provavelmente, exigindo maior número de operações de gradagens. No caso de o solo encontrar-se muito úmido, sua massa apresentará característica de plasticidade, isto é, a capacidade de não recuperar sua forma original ao cessar a ação da força externa deformante, e também uma forte característica de pegajosidade. A zona de consistência friável representa a faixa ótima para a mobilização mecânica, e a friabilidade será avaliada pela facilidade de esboroamento da massa de solo quando submetido a pressões provocadas pelos órgãos ativos dos implementos agrícolas (Corrêa, 1982).

Silva et al. (2006), estudando os efeitos dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos limites de consistência e na agregação do solo, concluíram que os sistemas de manejo sequeiro e irrigado reduziram os valores do limite de plasticidade nas camadas de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, em relação ao solo sob mata nativa. Os sistemas de manejo conservacionistas aumentam os estoques de matéria orgânica e a estabilidade de agregados (Balesdent et al., 2000). Os resíduos orgânicos diminuem a densidade do solo e criam poros de diâmetro grande, que favorecem a entrada de ar e a drenagem de água.

A agregação do solo é influenciada por atributos químicos, como cátions trocáveis, óxidos e matéria orgânica do solo (Munner & Oades, 1989). A predominância do íon Ca no complexo de troca, além de proporcionar a floculação adequada das argilas, contribui para o aumento da atividade biológica, que favorece a formação de agregados. Já a predominância de Na ou K no complexo de troca acarreta dispersão dos colóides e, conseqüentemente, redução da estabilidade dos agregados (Meurer et al., 2000).

A adição de resíduos com baixa taxa de decomposição é mais recomendada para a manutenção dos teores de matéria orgânica dos solos, enquanto resíduos com elevada taxa de decomposição estimulam a redução dos estoques da matéria orgânica nativa dos solos (Levi-Minzi et al., 1990).

O solo, quando submetido a cultivos intensivos, tende a perder a estrutura original, pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, tendo, como conseqüência, diminuição de macroporos e aumento de microporos e da densidade (Carpenedo & Mielniczuk, 1990). Com a remoção da vegetação natural e os subsequentes anos de cultivo, ocorre redução gradativa da aptidão agrícola do solo, pela alteração de suas propriedades físicas.

Diversas pesquisas abordando diferentes sistemas de manejo de solo têm confirmado a importância do fornecimento de matéria orgânica para a manutenção e melhoria de suas propriedades físicas, químicas e

biológicas (Gomes et al., 1978; Oliveira et al., 1983; Oades, 1984; Cerri et al., 1991). Na cultura da cana-de-açúcar, a prática de manejo mais simples e que pode apresentar resultados técnicos e econômicos a curto e médio prazo é a colheita sem queimar as folhas, deixando-as sobre o solo.

Bertol et al. (2004), avaliando as alterações nas propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, concluíram que o teor de carbono orgânico é maior na semeadura direta e no campo nativo do que no preparo convencional, especialmente na superfície, diminuindo com a profundidade, em todos os sistemas de manejo.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do aporte de matéria orgânica pelos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo distrocioso dos tabuleiros costeiros de Alagoas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda Pau Amarelo, de propriedade da Usina Santa Clotilde S/A, compreendida entre as coordenadas 9° 27' 31" S, 35° 51' 09" W; 9° 27' 13" S, 35° 51' 12" W; 9° 27' 13" S, 35° 50' 56" W; e 9° 27' 32" S, 35° 50' 54" W, que têm como referência horizontal o datum WGS84, localizada no município de Rio Largo, litoral do Estado de Alagoas. O clima do local onde foi realizada a pesquisa é tropical chuvoso com verão seco, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1.752 mm, e a temperatura média anual, de 29 °C.

As áreas experimentais são cultivadas com a cana-de-açúcar há mais de anos, em relevo variando de plano a suave ondulado, característico dos solos dos Tabuleiros Costeiros. O solo estudado foi classificado como Latossolo Amarelo distrocioso (Embrapa, 2006) relevo plano textura média/argilosa, formado por sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras, característico da unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros (Jacomine et al., 1975).

Os tratamentos avaliados consistiram de três sistemas de manejo da cana-de-açúcar que promovem diferentes aportes e resíduos vegetais ao solo, quais sejam: uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI); uma área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV); uma área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT); e uma área sob um fragmento de Mata Atlântica. Os três sistemas de manejo estudados na pesquisa experimental foram adotados na unidade sucroalcooleira desde a safra 2003/2004.

Na área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI) foi aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cana-de-açúcar. A água utilizada em todos

os tratamentos tem a composição química média apresentada no quadro 1. A adubação química da área sob sistema de manejo irrigado (SMI) da cana-planta foi realizada de acordo com a análise do solo, sendo aplicados 40, 120 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e na cana-soca foram aplicados 80, 50 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Na área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) foram aplicados, por ciclo da cana-de-açúcar, 300 m³ ha⁻¹ de vinhaça diluída, utilizando sistema de aspersão. A composição química média da vinhaça diluída encontra-se no quadro 2. Na adubação química da cana-planta dessa área foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de N e, na cana-soca, 80 kg ha⁻¹ de N.

Na área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT) foram aplicados 30 Mg ha⁻¹ de torta, associada com vinhaça, utilizando sistema de aspersão. A torta de filtro foi misturada em um tanque, conjuntamente com a vinhaça, e em seguida aplicada por aspersão. A composição química média do produto encontra-se no quadro 3. Nessa área, a adubação química da cana-planta foi realizada com a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de N na cana-soca.

Para caracterização física e química do solo, amostras foram coletadas ao acaso num ponto situado

Quadro 1. Composição química média da água de irrigação nas áreas cultivadas

pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	CE
	mmol _e L ⁻¹					dS m ⁻¹
6,9	0,13	0,21	1,4	0,16	1,63	0,23

CE: condutividade elétrica.

Quadro 2. Composição química média da vinhaça diluída aplicada

CE	pH	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg
dS m ⁻¹		g L ⁻¹					
3,1	5,9	8,9	0,53	0,17	0,92	0,26	0,12

CE: condutividade elétrica.

Quadro 3. Composição química média da torta de filtro aplicada

C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	H ₂ O
g kg ⁻¹						kg kg ⁻¹
60,4	3,2	1,4	2,1	14,6	3,3	0,71

nas entrelinhas da lavoura da cana-de-açúcar, no mês de fevereiro de 2007, nas profundidades de 0–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m. As análises físicas e químicas do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo e no Laboratório de Solo da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina, ambos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Na análise granulométrica utilizou-se o método do densímetro de Boyoucos e, na dispersão física do solo, empregou-se um agitador mecânico durante 15 min, sendo usado também dispersante químico (Embrapa, 1997). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico, e a densidade do solo, obtida por meio do anel volumétrico (Embrapa, 1997). O teor de matéria orgânica foi estimado com base no teor de carbono orgânico do solo, conforme método descrito pela Embrapa (1997).

Os cátions trocáveis foram determinados conforme Tedesco et al. (1995), sendo o Na⁺ e o K⁺ por fotometria de chama, o Ca²⁺ e o Mg²⁺ por espectrofotometria de absorção atômica e o Al³⁺ por volumetria.

Na determinação da argila dispersa em água utilizou-se o mesmo procedimento da argila total, porém sem emprego do dispersante químico. Durante o ensaio de condutividade hidráulica saturada foi coletado o efluente, e a concentração da argila na suspensão do efluente foi determinada por gravimetria. O grau de floculação foi calculado por meio da razão entre a argila naturalmente dispersa e a argila total (Embrapa, 1997).

Durante o período do trabalho experimental, foi executado um rígido controle de tráfego de máquinas nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar. O manejo cultural no plantio e na renovação do canavial e a mobilização mecânica do solo nas áreas estudadas são descritos a seguir. O preparo periódico do solo foi feito pelo uso de subsoladores de três elementos ativos de hastes parabólicas, cuja forma de mobilização é constituída por cortes verticais com intensa vibração no interior do solo. Em seguida, usaram-se grades de discos de dupla ação, com a finalidade de destruir a socaria velha e, ao mesmo tempo, provocar o deslocamento horizontal do solo, deixando-o em condições para o plantio, quando então foram abertos sulcos até aproximadamente 25 cm de profundidade. O plantio foi realizado manualmente, sendo colocadas no fundo do sulco as canas-sementes, que posteriormente foram cobertas com solo. Em todas as áreas cultivadas, a lavoura da cana-de-açúcar foi queimada antes da operação de colheita.

O limite de liquidez (LL), que corresponde à umidade do solo na fronteira entre os estados líquido e plástico, foi determinado conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984a).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade do solo na fronteira entre os estados plástico e semissólido, foi determinado conforme a ABNT

(1984b). O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, constituindo uma indicação da plasticidade do solo.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %, utilizando o programa SAEG (2005). Estudos de correlações foram executados entre algumas variáveis medidas, utilizando o programa Statística 6.0 (2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas da consistência do Latossolo sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar

Constam do quadro 4 os limites de consistência do Latossolo estudado sob a aplicação dos diferentes resíduos da cana-de-açúcar. Houve diferença significativa para a interação sistemas de manejo e profundidades no tocante às medidas relacionados com a consistência do solo.

Observa-se que na camada superficial de 0 a 20 cm não houve alteração do limite de plasticidade do solo para as adições de resíduos orgânicos dos tratamentos, devido à prática da queima da cana-de-açúcar, que não permitiu a permanência, nessa camada, da vinhaça e torta de filtro aplicadas. Já nas camadas de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm, o aporte de resíduos orgânicos, ou seja, as áreas com adição de vinhaça e vinhaça mais torta de filtro, foi eficiente na elevação dos limites de plasticidade (LP), com o maior valor para o solo sob mata. Também se percebe que a vinhaça foi mais eficiente no aumento do limite de plasticidade. Nessas camadas (20 a 40 e de 40 a 60 cm), a ação mais eficiente da vinhaça deveu-se à capacidade de, em sua forma líquida, infiltrar-se mais no solo, pela ausência dos resíduos de torta de maior tamanho. Consequentemente, a área sob o sistema de manejo apenas irrigado apresentou os menores valores de limite de plasticidade.

Essa elevação do limite de plasticidade do solo para as adições de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar atesta a importância da matéria orgânica na definição dos valores dos limites de consistência para os solos cultivados, pela maior área de superfície específica (ASE) da matéria orgânica (Hillel, 1980; Meurer et al., 2000), o que proporciona grande capacidade de retenção de água e aumenta a necessidade de quantidades maiores para a formação de filmes de água ao redor das partículas minerais, resultando assim em aumento dos limites de consistência. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2006) e Braida et al. (2006).

Quanto ao limite de liquidez (LL), em todas as camadas estudadas o comportamento foi o mesmo: as adições de vinhaça mais torta e só de vinhaça elevaram

Quadro 4. Valores médios de umidade do solo nos limites de plasticidade (LP) e de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) e razão entre umidade crítica de compactação e limite de plasticidade (Ucc/LP), em função dos sistemas de manejo e profundidade estudados

Camada	Sistemas de manejo			
	MN	SMI	SMVT	SMV
m	LP (kg kg ⁻¹)			
0–0,20	0,215Ab	0,178Bc	0,189Bc	0,187Bc
0,20–0,40	0,233Aa	0,188Cb	0,205Bb	0,226Ab
0,40–0,60	0,242Aa	0,201Ba	0,217Ba	0,241Aa
	LL (g kg ⁻¹)			
0–0,20	0,416Aa	0,221Ca	0,275Bc	0,273Bc
0,20–0,40	0,417Aa	0,271Cb	0,312Bb	0,318Bb
0,40–0,60	0,405Ab	0,301Ca	0,335Ba	0,341Ba
	IP (g kg ⁻¹)			
0–0,20	0,201Aa	0,043Cc	0,086Bc	0,086Bb
0,20–0,40	0,184Ab	0,083Cb	0,107Bb	0,092Cab
0,40–0,60	0,163Ac	0,100Ca	0,119Ba	0,100Cab
	Ucc/LP			
0–0,20	1,13 Aab	0,82Bb	0,85Ba	0,87Bab
0,20–0,40	1,07Aab	0,91Ba	0,91Bab	0,83Cab
0,40–0,60	1,03Ab	0,78Cb	0,88Bab	0,79Cbb

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5 %). Média de quatro repetições. MN: mata nativa; SMI: área irrigada; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça.

a liquidez igualmente em todas as profundidades, ficando novamente a área sob mata com os maiores valores, em decorrência do seu maior teor de matéria orgânica (Quadro 8). Como o índice de plasticidade (IP) consiste numa diferença algébrica entre os limites de plasticidade e de liquidez, seu comportamento é decorrente dos efeitos já discutidos.

A tendência dos resultados foi semelhante à observada por Baver (1966), ao verificar que, de modo geral, aumentos no teor de matéria orgânica tendem a elevar o limite de plasticidade. Para Caputo (2000), uma pequena percentagem de matéria orgânica eleva o limite de plasticidade, sem que este ocorra, simultaneamente, no limite de liquidez.

A relação entre a umidade crítica de compactação desse solo no teste de Proctor normal e o limite de plasticidade, que expressa o limite de compactação suportado pelo solo no limite de plasticidade, também por conta da queima, foi igual na superfície em todas as situações avaliadas, com exceção do solo de mata, por não ter sofrido a queima (Quadro 4). Também se percebe que o solo sob mata nativa apresentou valor médio de 1,08 para a razão Ucc/LP, representativo das três profundidades, que significa uma Ucc 8 % acima do LP. Como a zona de consistência friável representa a faixa ótima de umidade para a

mobilização mecânica do solo, constata-se que o solo com limite de plasticidade próximo daquele sob mata nativa apresenta baixo risco de compactação, reforçando assim a recomendação de elevar e manter adequados os teores para a matéria orgânica do solo.

Todas as correlações entre os limites de consistência e o carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0 a 20 cm foram significativas ($p < 0,01$) e positivas e apresentaram valores elevados de r , comprovando assim a influência do COT nos limites de consistência do solo (Figuras 1, 2, 3 e 4).

O efeito do carbono orgânico total sobre as medidas de consistência do solo decresceu na seguinte ordem: $U_{cc}/LP > LL > IP > LP$, como demonstram os valores dos coeficientes angulares das equações que descrevem as relações $U_{cc}/LP = f(COT)$; $LL = f(COT)$; $IP = f(COT)$; e $LP = f(COT)$, iguais a 0,169; 0,098; 0,079; e 0,018, respectivamente (Figuras 1 a 4).

Cátions trocáveis e propriedades químicas

Os resultados obtidos para os cátions trocáveis e a saturação por sódio, em função dos sistemas de ma-

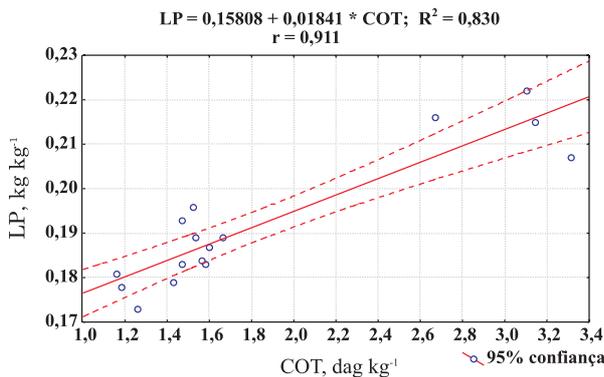


Figura 1. Relação entre o limite de plasticidade (LP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0–0,20 m.

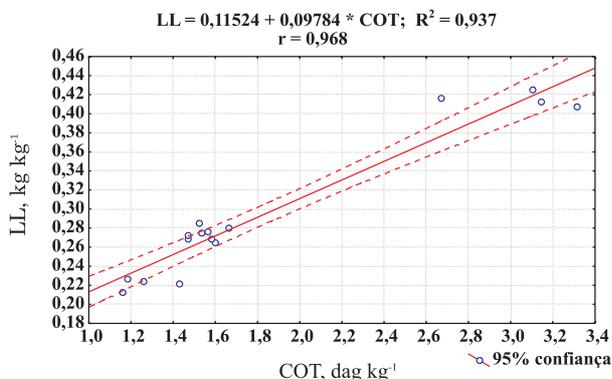


Figura 2. Relação entre o limite de liquidez (LL) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0–0,20 m.

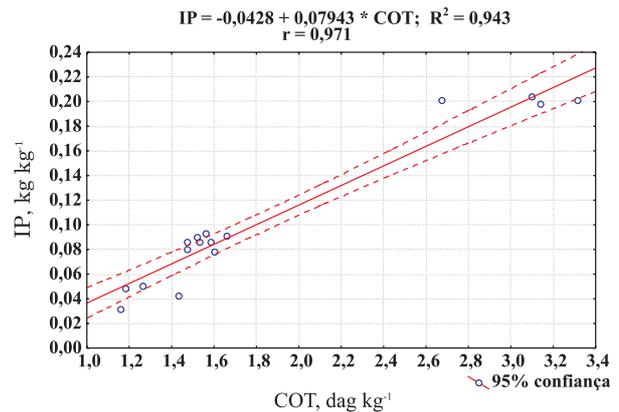


Figura 3. Relação entre o índice de plasticidade (IP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0–0,20 m.

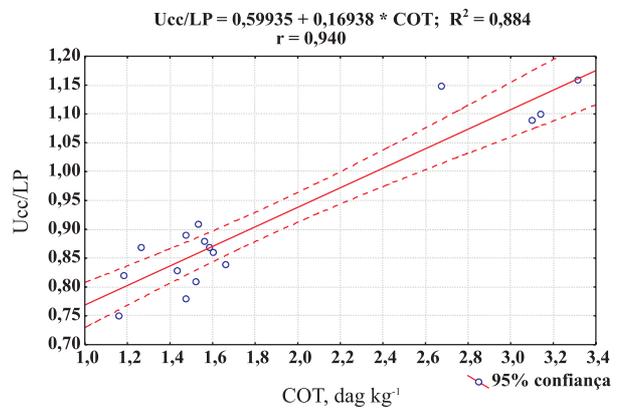


Figura 4. Relação entre a razão U_{cc}/LP e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0–0,20 m.

nejo e profundidades, mostraram diferença significativa entre as médias dos sistemas de manejo e profundidades sobre os cátions trocáveis (Quadro 5). Com exceção do Al^{3+} , o comportamento geral foi de redução nos teores dos cátions trocáveis com a profundidade. Na profundidade de 0–0,20 m, foram observados valores mais elevados para os teores de Ca^{2+} nos sistemas de manejo sob aplicação de vinhaça e de vinhaça + torta de filtro: respectivamente, 1,79 e 3,00 vezes maiores do que o teor de Ca^{2+} no sistema de manejo sob irrigação.

O Ca^{2+} , conforme relatam Meurer et al. (2000), promove a floculação das argilas, além de contribuir para o aumento da atividade biológica, o que favorece a agregação das partículas do solo. Para o Mg^{2+} , elemento químico que também contribui para a floculação das partículas do solo, foram encontrados teores mais elevados nos sistemas de manejo sob aplicação de vinhaça e de vinhaça+torta de filtro: respectivamente, 1,42 e 1,92 vezes maiores do que o teor de Mg^{2+} no sistema de manejo sob irrigação. Esses dois cátions promovem diminuição da espessura da

Quadro 5. Cátions trocáveis e saturação por sódio, em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados

Camada	Sistemas de manejo				
	MN	SMI	SMVT	SMV	Média
m			Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)		
0–0,20	0,33Da	1,27Ca	3,87Aa	2,27Ba	
0,20–0,40	0,20Ba	0,55Ab	0,90Ab	0,57Ab	
0,40–0,60	0,30Aa	0,67Ab	0,90Ab	0,47Ab	
			Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)		
0–0,20	0,33Da	0,60Ca	1,15Aa	0,85Ba	
0,20–0,40	0,20Ba	0,37Ab	0,53Ab	0,53Ab	
0,40–0,60	0,30Aa	0,37Ab	0,53Ab	0,47Ab	
			K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)		
0–0,20	0,11Ca	0,18Ca	1,15Aa	0,45Ba	
0,20–0,40	0,04Ba	0,03Bb	0,35Ab	0,38Aa	
0,40–0,60	0,03Ba	0,02Bb	0,31Ab	0,30Aa	
			Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)		
0–0,20	1,43Aa	0,23Bb	0,08Bbb	0,13Bb	
0,20–0,40	1,20Aab	0,55Bab	0,37Bab	0,50Bab	
0,40–0,60	0,87Abb	0,43Bab	0,40Ba	0,50Bab	
			Saturação por Na ⁺ (%)		
0–0,20	0,71 Aa	0,54Aa	0,59 Aa	0,91 Aa	0,69 a
0,20–0,40	0,65 Aa	0,55 Aa	0,61 Aa	0,58 Aa	0,60 ab
0,40–0,60	0,47 Aa	0,49 Aa	0,49 Aa	0,61 Aa	0,51 b
Média	0,61AB	0,53B	0,56B	0,70A	

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5 %). Média de quatro repetições. MN: mata nativa; SMI: área irrigada; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça.

dupla camada difusa na solução do solo, aumentando a atração entre as partículas, o que resulta em maior grau de floculação. Esse comportamento é reflexo do menor raio hidratado desses cátions.

O solo sob mata nativa, apesar dos baixos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, em comparação aos solos cultivados com cana-de-açúcar, apresenta elevado teor de Al³⁺, que possivelmente compensou os cátions bivalentes. O Al³⁺ tem grande importância na agregação do solo, pois realiza pontes entre a superfície da argila e os compostos orgânicos (Munner & Oades, 1989).

O íon K⁺ tem comportamento inverso, em comparação aos cátions bivalentes, no processo de floculação do solo. Embora os teores de K⁺ tenham sido maiores nas áreas cultivadas sob aplicação de vinhaça e de vinhaça + torta de filtro, pode-se inferir que eles não foram suficientes para inibir o efeito favorável dos cátions bivalentes e da matéria orgânica (Quadro 8).

Quanto aos valores de saturação por Na, obtidos para os diferentes sistemas de manejo, não houve participação relevante no processo de agregação ou dispersão do solo.

No que se refere às camadas subsuperficiais (0,20–0,40 e 0,40–0,60 m), o comportamento dos cátions trocáveis foi semelhante ao da camada superficial.

A capacidade de troca de cátions (CTC) do solo (Quadro 6), nos diferentes sistemas de manejo, apresentou variação de 4,44 a 10,35 cmol_c kg⁻¹. Os maiores valores de CTC foram obtidos para o solo sob mata nativa. No valor de 10,35 cmol_c kg⁻¹ para o solo sob mata nativa, na profundidade de 0–20 cm, a acidez extraível (H + Al) teve na CTC um peso de 92 % (Quadro 6).

Os diferentes sistemas de manejo, nas profundidades amostradas, apresentaram baixos valores para saturação por bases (V) – característica edáfica desse solo. Os valores de pH indicam que a reação do solo é moderadamente ácida na profundidade de 0–0,20 m. As áreas sob cultivo com cana-de-açúcar mostraram os maiores valores de pH, provavelmente como resultado dos efeitos residuais das calagens realizadas ao longo dos ciclos da lavoura da cana-de-açúcar.

Segundo Sparks (1995), o aumento do pH pode proporcionar incremento da dispersão de argila em solos de carga variável, fato esse creditado à geração de cargas negativas nas partículas do solo.

A argila dispersa em água apresentou variação de 39 a 171 g kg⁻¹ para os diferentes sistemas de manejo e profundidades investigados (Quadro 7).

O solo sob cultivo irrigado, nas três profundidades pesquisadas, apresentou os maiores valores para a argila dispersa em água. Esse comportamento

Quadro 6. Capacidade de troca de cátions potencial (CTC potencial), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e pH em água do solo, em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados

Camada	Sistemas de manejo			
	MN	SMI	SMVT	SMV
m	CTC potencial (cmol _c kg ⁻¹)			
0–0,20	10,35Aab	5,96Bab	8,88Aab	7,11Bab
0,20–0,40	7,24Abb	5,01Bab	4,93Bbb	5,19Bbb
0,40–0,60	6,83Ab	4,44Bb	4,59Bb	4,88Bb
	SB (cmol _c kg ⁻¹)			
0–0,20	0,83Da	2,06Ca	6,23Aa	3,64Ba
0,20–0,40	0,49Ca	0,98BCb	1,81ABb	1,52ABCb
0,40–0,60	0,65BCa	1,09ABb	1,77ABb	1,28ABb
	V (%)			
0–0,20	8,25Da	35,25Cab	70,13Aa	51,74Ba
0,20–0,40	6,80Cab	19,11BCb	36,83ABbb	29,29ABCbb
0,40–0,60	9,65CBab	23,82BCab	38,45ACbb	26,23CBbb
	pH (H ₂ O)			
0–0,20	4,2Cab	5,00Bab	5,6Abab	5,4Abab
0,20–0,40	4,3 Ba	4,60ABb	4,7ABb	4,7ABb
0,40–0,60	4,4ABab	4,70ABab	4,7ABbb	4,6ABbb

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5%). Média de quatro repetições. MN: mata nativa; SMI: área irrigada; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça.

provavelmente está associado ao fato de o solo expressar baixos teores para os cátions bivalentes e matéria orgânica, principalmente na profundidade de 0–20 cm.

De maneira geral, os solos sob cultivo da cana-de-açúcar mostraram os maiores valores para argila dispersa; destes, as áreas sob aplicação de vinhaça e de vinhaça+ torta de filtro ficaram em posição intermediária entre a área irrigada e a mata nativa. Camargo et al. (1988) relatam diminuição nos teores de argila dispersa em solos que receberam vinhaça, atribuindo a esse comportamento o aumento da concentração salina no solo, promovido pela vinhaça, que reduz a dupla camada difusa.

A relação entre a argila naturalmente dispersa e a argila total indica a proporção da fração argila que se encontra floculada. Esse índice permite inferir o grau de estabilidade dos agregados.

Constatou-se diferença significativa na interação entre sistemas de manejo e profundidades sobre a variável grau de floculação do solo (Quadro 7). Na camada de 0–0,20 m, o solo sob mata nativa apresentou o maior valor de grau de floculação (85 %), e o solo sob irrigação, o menor valor (63 %), ficando em posição intermediária os outros dois sistemas de manejo. Para as profundidades de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, o comportamento dos sistemas de manejo foi semelhante ao supracitado.

A concentração de argila no efluente, obtida no ensaio de condutividade hidráulica saturada, foi maior na área sob irrigação nas três profundidades (Quadro 7), em relação aos demais sistemas de manejo, evidenciando maior migração de argila neste sistema

Quadro 7. Argila dispersa em água, grau de floculação, argila total e argila no efluente, em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados

Camada	Sistemas de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
m	Argila dispersa (g kg ⁻¹)			
0–0,20	92Ac	39Db	69Bc	64Cc
0,20–0,40	111Ab	57Ca	94Bb	110Ab
0,40–0,60	171Aa	57Da	111Ca	132Ba
	Grau de floculação (%)			
0–0,20	63Ca	85Aab	75Bab	80Aab
0,20–0,40	67Ca	81Ab	75Bab	69Bb
0,40–0,60	48Cb	87Aab	75Ba	71Bbb
	Argila total (g kg ⁻¹)			
0–0,20	250Bb	255Bc	275Bc	322Ac
0,20–0,40	340Aa	307Bb	370Ab	360Ab
0,40–0,60	330Ba	343Ba	443Aa	455Aa
	Argila no efluente (mg L ⁻¹)			
0–0,20	642,5Ab	357,5Cb	450,0Bb	525,0Bb
0,20–0,40	696,3Bb	475,0Ca	575,0Ba	650,0Ba
0,40–0,60	1187,5Aa	487,5Ca	600,0Ba	670,0Ba

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5 %). Média de quatro repetições. MN: mata nativa; SMI: área irrigada; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça.

de manejo. Silva (2003) também observou maior concentração de argila no efluente em Argissolo Amarelo distrocoeso sob sistema de manejo irrigado. Esses resultados são coerentes com o comportamento

observado para argila dispersa em água, cuja concentração foi maior no solo irrigado, nas três profundidades.

Verificou-se diferença significativa para a interação sistemas de manejo x profundidades para os teores de C orgânico total e matéria orgânica (Quadro 8). O carbono orgânico total (COT) diminuiu com a profundidade em todos os sistemas de manejo, sendo os maiores valores encontrados para o solo sob mata nativa. Na profundidade de 0–0,20 m, o COT sofreu redução de 47,87, 50,49 e 58,69 % nos sistemas de manejo sob aplicação de vinhaça + torta (SMVT), de vinhaça (SMV) e sob irrigação (SMI), respectivamente, em comparação ao solo em condições naturais (mata nativa). Quanto às demais profundidades, as médias de COT nos sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar foram estatisticamente iguais. O efeito dos sistemas de manejo sobre o teor de C orgânico total foi mais evidente na camada superficial.

Mello et al. (1983) esclarecem que valores de carbono orgânico, expressos em dag kg^{-1} , inferiores a 0,60, de 0,60 a 1,20 e maiores que 1,20 são interpretados como baixos, médios e altos, respectivamente. A redução do teor de C orgânico total do solo, provocada pelo cultivo intensivo com cana-de-açúcar, também foi observada por outros autores (Silva, 2003; Oliveira, 2008).

Em regiões tropicais, alguns obstáculos contribuem para que se mantenham elevados os teores de carbono orgânico nos solos cultivados, entre os quais as temperaturas elevadas, a umidade e as práticas de revolvimento do solo, que propiciam a rápida decomposição da matéria orgânica, por meio da ação microbiana. Na cultura da cana-de-açúcar, a prática da queima da cana antes da colheita constitui um dos maiores, se não o maior, fator de degradação da matéria orgânica.

Quadro 8. Carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO) do solo, em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados

Camada	Sistemas de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
m	Carbono orgânico total (%)			
0–0,20	1,26Ca	3,05Aa	1,59Ba	1,51Ba
0,20–0,40	0,87Bb	1,85Ab	0,85Bb	0,68Bb
0,40–0,60	0,80Bb	1,23Ac	0,69Bb	0,60Bb
	Matéria orgânica (%)			
0–0,20	2,17Ca	5,26Aa	2,74Ba	2,60Ba
0,20–0,40	1,50Bb	3,19Ab	1,47Bb	1,17Bb
0,40–0,60	1,38Bb	2,12Ac	1,19Bb	1,03Bb

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5 %). Média de quatro repetições. MN: mata nativa; SMI: área irrigada; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça.

CONCLUSÕES

1. As medidas de consistência do solo apresentaram tendência de aumento em seus valores de umidade com o incremento do carbono orgânico total (COT) do solo, devido à adição de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar.

2. Os sistemas de manejo das áreas cultivadas que receberam resíduos orgânicos da cana-de-açúcar na forma da aplicação de vinhaça e de vinhaça adicionada de torta de filtro apresentaram menor degradação dos atributos físicos e químicos do solo.

3. O aumento do teor de matéria orgânica pela adição de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar provocou uma tendência de elevação dos limites de consistência do solo, reduzindo o risco de deformações plásticas.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.
- BALESDENT, J.; CHENU, C. & BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protein and tillage. *Soil Till. Res.*, 53:215-230, 2000.
- BAVER, L.D. *Soil physics*. 3.ed. New York, John Wiley, 1966. 489p.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JÚNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:155-163, 2004.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. 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.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; BERTON, R.S. & TEÓFILO SOBRINHO, J. Características físicas de solo que recebeu vinhaça. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1988. (Boletim Científico,14)
- CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos*. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2000. v.1. 234p.
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:99-105, 1990.

- 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, Série Pédol.*, 26:37-50, 1991.
- CORRÊA, J.C. Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola. *Pesq. Agropec. Bras.*, 17:917-921, 1982.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- 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.
- FORSYTHE, W.M. Manual de laboratório de física de solos. San José, IICA, 1985. 216p.
- GOMES, A.S.; PATELLA, J.F. & PAULETTO, E.A. Efeito de sistemas e tempo de cultivo sobre a estrutura de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:17-21, 1978.
- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório. Reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife, Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35).
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia: Relações solo planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.
- LEVI-MINZI, R.; RIFFALDI, R. & SAVIOZZI, A. Carbon mineralization in soil amended with different organic materials. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 31:325-335, 1990.
- MELLO, F.A.F.; SOBRINHO, M.O.C.B.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; NETTO, A.C. & MEURER, E.J.; RHENHEIMER, D. & BISSANI, C.A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. Porto Alegre, Gênese, 2000.174p.
- MUNNER, M. & OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. *Austr. J. Soil Res.*, 29:411-423, 1989.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76:319-337, 1984.
- OLIVEIRA, M.; CURI, N. & FREIRE, J.C. Influência do cultivo na agregação de um Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa (MG). *R. Bras. Ci. Solo*, 7:317-322, 1983.
- OLIVEIRA, V.S. Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008. 81p. (Tese de Doutorado)
- ÖREN, A.H. & KAYA, A. Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals. *Environ. Monitoring Assessment*, 84:85-98, 2003.
- SAEG. Sistema para análises estatísticas. Versão 9.0. Viçosa, MG, Fundação Arthur Bernardes, 2005.
- 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)
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. & CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:579-585, 2006.
- SPARKS, D.L. *Environmental soil chemistry*. New York, Academic Press, 1995. 267p.
- STATSOFT STATISTICA: Data analysis software system. Version 6. 2001.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 188p. (Boletim Técnico de Solos, 5)