

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM LATOSSOLO AMARELO
DISTROCOESO NÃO SATURADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE
MANEJO CULTURAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR**

ROMERO FALCÃO BEZERRA DE VASCONCELOS

Engenheiro Agrônomo (UFRPE)

Mestre em Engenharia Agrícola - Mecanização Agrícola (UFV)

Tese apresentada como um dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor
em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

FEVEREIRO - 2009

Ficha catalográfica

Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central - UFRPE

V331c Vasconcelos, Romero Falcão Bezerra de
Comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo Distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo culturais da cana-de-açúcar/ Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos. - 2009.

138 f. : il.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice

Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia.

Inclui bibliografia

CDD 631.51

1. Manejo do solo
 2. Agregados
 3. Compactação do solo
 4. Compressibilidade
 5. Aproveitamento de resíduos
- I. Cantalice, José Ramon Barros
 - II. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de Doutorado

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM LATOSSOLO AMARELO
DISTROCOESO NÃO SATURADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE
MANEJO CULTURAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR

Elaborada por

ROMERO FALCÃO BEZERRA DE VASCONCELOS

Como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice
(Orientador / Presidente)

Prof. Dr. Apolino José Nogueira da Silva

Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá da Costa

Dr. Ademar Barros da Silva

Dr. Antônio Raimundo de Souza

DEDICO,

Ao meu pai Antônio Bezerra de Vasconcelos Filho “in memorian”, que apesar de curta convivência física, deixou um exemplo de trabalho e honestidade a ser seguido.

A minha mãe Miriam Falcão Bezerra de Vasconcelos, mulher forte e determinada, exemplo de dedicação aos filhos, ofereço o meu carinho e eterna gratidão.

A minha esposa Ana Maria de Oliveira Vasconcelos, pelos quase 25 anos de dedicação a família e sua participação efetiva na concretização dos nossos objetivos, ofereço o meu carinho.

Aos meus filhos Antônio Neto e Rafaela, motivação maior na minha vida pessoal e profissional, ofereço o meu carinho. Beijos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador da terra

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade da realização de mais uma etapa na minha formação acadêmica.

Ao Departamento de Tecnologia Rural, pela concessão do meu afastamento para realizar o Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por ter me recebido como aluno.

Em nome dos professores Clístenes Williams Araújo do Nascimento e Maria de Fátima Cavalcanti Barros, agradeço a todos os professores que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Ao professor José Ramon Barros Cantalice, pela orientação, dedicação e amizade. O meu muito obrigado.

Aos professores co-orientadores Yuri Daniel Jatobá da Costa e Apolino José Nogueira da Silva, pela amizade e co-orientação.

Aos meus irmãos Agnaldo, Marcílio (in memoriam) e Roberta, pelo carinho e convivência familiar.

Ao professor Veronildo Souza de Oliveira, pelo companheirismo e colaboração nos trabalhos.

Aos professores João Audifax, Fernando Cartaxo, Geber Moura e Paulo Santiago pelo companheirismo e colaboração nos trabalhos.

A Usina Santa Clotilde, pela disponibilidade de suas áreas cultivadas com cana-de-açúcar e pelo apoio operacional nos trabalhos de campo, em especial

ao Engenheiro Agrônomo Moacir Cavalcanti de Oliveira, em nome do qual agradeço aos proprietários dessa conceituada empresa sucroalcooleira de Alagoas.

Ao Engenheiro Agrônomo José Fernando Vanderley Fernandes Lima pela amizade e apoio nos trabalhos de campo e ao laboratorista Anacleto, pela colaboração nos trabalhos de laboratório.

À Professora Maria Cristina Malta de Almeida Costa, pelo trabalho de correção gramatical desta tese.

Ao Professor Clarivaldo Germano da Costa, pelo incentivo e amizade.

À Sra. Maria do Socorro, secretária da Pós-Graduação em Ciência do solo, pela presteza e dedicação aos alunos.

“Concedei-nos, Senhor, a serenidade necessária para aceitar, como são, as coisas que não podemos modificar, coragem para modificar as que podemos e a sabedoria necessária para distinguirmos uma das outras”.

Abraham Lincoln.

SUMÁRIO

Introdução geral	1
Objetivo Geral	2
Hipóteses	2
1. CAPÍTULO I. Aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar, propriedades físicas e químicas e estado de agregação de um Latossolo Amarelo Distrocoeso de tabuleiro costeiro.	
1.1 Resumo.....	4
1.2 Abstract.....	5
1.3 Introdução.....	6
1.4 Material e métodos.....	12
1.5 Resultados e discussões.....	17
1.6 Conclusões.....	41
1.7 Literatura Citada.....	42
2. CAPÍTULO II. Comportamento da compactibilidade de um Latossolo Amarelo Distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo.	
2.1 Resumo.....	49
2.2 Abstract.....	51
2.3 Introdução.....	52
2.4 Material e métodos.....	59
2.5 Resultados e discussões.....	64
2.6 Conclusões.....	81
2.7 Literatura Citada.....	82
3. CAPÍTULO III. Comportamento da compressibilidade de um Latossolo Amarelo Distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar.	
3.1 Resumo.....	91
3.2 Abstract.....	92
3.3 Introdução.....	93
3.4 Material e métodos.....	101
3.5 Resultados e discussões.....	107
3.6 Conclusões.....	125
3.7 Literatura Citada.....	126

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é cultivada em diversas regiões fisiográficas do Brasil, dentre elas os tabuleiros costeiros nordestinos, revestidos por uma cobertura sedimentar formada no terciário e de ocorrência comum ao longo do litoral brasileiro. Alguns solos destes tabuleiros costeiros apresentam um caráter coeso, associado às condições climáticas, ao relevo e ao material de origem, constituído por sedimentos detríticos do grupo Barreiras, que favorecem o aparecimento dos horizontes coesos.

Os solos que apresentam o caráter coeso exibem uma consistência dura a muito dura, quando secos, e friável, quando úmidos. O comportamento físico desse solo dificulta o manejo da cultura da cana-de-açúcar no período seco do ano.

Atualmente, no Brasil, como no mundo, há uma grande preocupação com o aumento das terras agrícolas que apresentam sintomas de compactação. Provavelmente, o aumento de terras agrícolas compactadas tem como um dos principais motivos o tráfego intenso de máquinas pesadas e a realização das operações agrícolas com a umidade do solo inadequada.

O comportamento compressivo diferenciado dos solos, quando submetidos à carga externa que resulta em compactação, pode ser explicado por possuírem características diferenciadas, destacando-se a granulometria e o teor de matéria orgânica. As deformações provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas constituem um fator determinante de alterações físicas do solo. De maneira geral, o solo apresenta redução da densidade e do grau de compactação quando o teor de matéria orgânica é aumentado.

O preparo periódico do solo talvez seja a atividade que mais influencia no comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. O aumento do teor de matéria orgânica do solo com a adição de resíduos da cana-de-açúcar pode modificar a curva de compactação e, como consequência, diminuir a densidade máxima e aumentar a umidade crítica de compactação, reduzindo dessa forma o risco de degradação do solo.

A capacidade de suporte de carga do solo agrícola não depende apenas de suas características físicas e do teor de umidade, mas também do seu histórico

de tensões que pode ser avaliado através da sua tensão de precompactação. A determinação da capacidade de suporte de carga do solo é complexa e tem por objetivo definir o quanto de carga o solo suporta sem que sua estrutura sofra compactação adicional, de forma não recuperável.

A matéria orgânica tem forte influência na formação e manutenção da estabilidade dos agregados do solo e pode dissipar parte da energia de compactação resultante do tráfego de máquinas.

O conhecimento do comportamento compressivo dos solos coesos e suas inter-relações com a energia de compactação, a umidade do solo e os sistemas de manejo culturais da cana-de-açúcar pode contribuir para o planejamento de uma mecanização agrícola de baixo risco de degradação física do solo.

Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo investigar e conhecer o comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros sob aplicação de resíduos de cana-de-açúcar.

Hipóteses

As hipóteses que nortearam o trabalho foram as seguintes:

- A adoção de sistemas de manejo com aplicação de resíduos da cana-de-açúcar proporciona um comportamento mecânico do solo mais resistente às cargas externas.
- A aplicação de resíduos da cana-de-açúcar que promovam o aumento da matéria orgânica do solo resultará na dissipação de parte da energia de compactação das cargas externas.
- Sistemas de manejo culturais que promovam aporte de matéria orgânica resultam no aumento de macroagregados vinculados a uma maior resistência ao processo compressivo provocado por cargas externas.

CAPÍTULO I

**APLICAÇÃO DE DIFERENTES RESÍDUOS DA CANA DE AÇÚCAR,
PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS E ESTADO DE AGREGAÇÃO DE UM
LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO DE TABULEIRO COSTEIRO**

RESUMO

Os solos dos tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar, durante longo período de tempo, sob diferentes sistemas de manejo, podem apresentar alterações nas propriedades físicas e químicas e no estado de agregação. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo com 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, a saber: 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 uma mata nativa (MN). Para avaliar as propriedades físicas e químicas e o estado de agregação do solo, 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 metros, sendo retiradas num ponto situado nas entrelinhas da cana-de-açúcar. Os resultados obtidos foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância. 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 e no estado de agregação do solo. Os parâmetros de consistência do solo apresentaram tendência de aumento em seus valores de umidade com o incremento do carbono orgânico total (COT) do solo, promovido pela adição de resíduos da cana-de-açúcar. Os estudos de correlações simples entre o carbono orgânico total (COT) e os índices de estabilidade de agregados investigados apresentaram correlações significativas ($p < 0,01$) e positivas. Os sistemas de manejo que receberam adição de resíduos da cana-de-açúcar denotaram menor degradação nas propriedades físicas e químicas do solo, em relação ao solo sob mata nativa (MN).

Palavras-chave: consistência do solo, estabilidade de agregados, manejo da cana-de-açúcar, solos coesos.

ABSTRACT

The soils of the Coastal Plains cultivated with sugarcane for a long period of time under different management systems may make changes in physical and chemical properties and the state of soil aggregation. Considering the above, the objective of this study was to evaluate the effects of different management systems with sugarcane on the chemical and physical properties of a dystrophic cohesive Yellow Latosol of coastal tablelands of Alagoas. Plots were selected in areas of production in the growing of sugarcane, and the object of experimental research three areas, representative of three management systems adopted by sugarcane production unit, namely: a cultivated area under irrigation management system (SMI), an area under the management system of fertirrigation with vinasse (SMV) and area under a management system with application of vinasse + filter tart (SMVT). These management systems were compared and on the witness pattern represented by native forest (NF). To assess the physical and chemical properties and aggregation state of the soil, the soil samples were collected at random in the areas subject to different management systems, in the depths of 0-0,20; 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m, being withdrawn at a point between the lines of sugarcane. The results were submitted to analysis of variance and the averages compared by Tukey test to 5% significance. Study of simple correlations were performed between some variables measures. The results showed that the different management systems promoted investigated changes in physical and chemical properties and the state of soil aggregation. The parameters of consistency of the soil tended to increase the humidity in their values with the increase of total organic carbon (TOC) of soil, promoted by the addition of waste from sugar cane. The studies of simple correlations between the total organic carbon (TOC) and the rates of stability of aggregate investigated, showed significant ($p < 0,01$) correlation and positive. The management systems that received the addition of waste from sugarcane showed less deterioration in physical and chemical properties of soil in the soil under native forest (NF).

Key words: consistency of the soil, aggregate stability, management of sugar cane, cohesive soils.

INTRODUÇÃO

Chinn & Pillai (2008) e Richard et al. (2001) comentam que a compactação do solo, dependente do conteúdo de água, pode causar mudanças significantes na estrutura do solo em termos de redução da porosidade total e da continuidade de poros, distribuição do diâmetro de poros e a estabilidade de poros. Essas alterações estruturais, por sua vez, levam a mudanças em três indicadores comuns de estrutura de solo: porosidade preenchida pelo ar, densidade do solo e resistência as tensões aplicadas (McNabb et al., 2001).

Por isso, as estratégias de manejo de solo para melhorar ou recuperar a estrutura, como o cultivo do solo com rotação de culturas e incorporação de matéria orgânica (Milne & Haynes, 2004), objetivam aumentar a porosidade do solo ao mesmo tempo em que reduzem a densidade do solo e dissipam energia de cargas aplicadas.

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

A consistência do solo é conseqüência das manifestações de forças físicas de adesão e coesão que atuam de acordo com a variação da umidade. Segundo Forsythe (1985), estas forças são expressas através 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. Tais solos apresentam baixos valores para o índice 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. Nestas condições, caso venha ser mobilizado mecanicamente, haverá a formação de blocos grandes, deixando o solo numa condição desfavorável para o preparo periódico secundário e provavelmente exigindo um maior número de operações de gradagens. No caso do 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, sendo que 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 cm e 0,20-0,40 m, em relação ao solo sob mata nativa. Os autores também observaram que o cultivo com cana-de-açúcar reduziu a estabilidade dos agregados em água e o diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via úmida em relação ao solo de mata nativa.

A agregação do solo pode ser definida como a união de partículas (argila - íon - matéria orgânica, areia e silte) em unidades secundárias, sendo a estabilidade dos agregados caracterizada como a resistência a uma ação degradante, particularmente da água (Chaves & Calegari, 2001). Para os autores, a agregação do solo controla os movimentos internos de água, ar e calor e o crescimento de raízes.

A adição dos resíduos das culturas e o revolvimento mínimo do solo podem produzir processos físicos, químicos e biológicos, fortemente inter-relacionados, que levam ao aumento da estabilidade dos agregados e dos estoques de matéria orgânica do solo. O teor de matéria orgânica no solo é muito sensível em relação às práticas de manejo. Existe uma relação causa-efeito entre a agregação e a matéria orgânica (Six et al., 1999), na qual o aumento da estabilidade de agregados do solo é, ao mesmo tempo, uma causa e uma consequência dos maiores estoques de matéria orgânica do solo.

As frações lábeis da matéria orgânica, geralmente, têm influência maior sobre os macroagregados do solo, pois se trata de uma fonte mais facilmente assimilável de carbono e de energia pelos microrganismos heterotróficos (Chan, 1997), cujos compostos do metabolismo microbiano atuam na estabilização de macroagregados de solo.

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 movimentação mecânica do solo provoca aumento da oxidação de compostos orgânicos e perdas por lixiviação e erosão. Segundo Silva et al. (2006), o cultivo com cana-de-açúcar em comparação com a mata nativa reduziu a estabilidade dos agregados em água e o diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via úmida. As raízes e os micélios de fungos criam uma rede que favorece a estabilidade dos agregados, os quais aumentam em número na presença de gramíneas e quando o solo não é perturbado.

A estabilidade dos agregados tem sido associada à habilidade do solo de resistir às forças externas que promovem a compactação (Soane, 1990). Entretanto, 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 cálcio no complexo de troca, além de proporcionar a flocculação adequada das argilas, contribui no aumento da atividade biológica que favorece a formação de agregados. Enquanto, a predominância de sódio ou potássio no complexo de troca favorece a dispersão dos colóides e, conseqüentemente, redução da estabilidade dos agregados (Meurer, 2000).

Silva et al. (2006), avaliando os efeitos dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar na agregação do solo, verificaram correlação positiva e significativa entre o diâmetro médio ponderado dos agregados (via úmida) e os teores de carbono orgânico total, demonstrando a importância dos compostos orgânicos na estabilização dos agregados do solo. A contribuição da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico, sendo recomendável o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura necessária ao desenvolvimento das plantas.

A agregação do solo pode sofrer alterações permanentes ou temporárias, evidenciando variação cíclica provocada por práticas de manejo de solo e de culturas (Campos et al., 1999). 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 cultivo intensivo, somado à alta taxa de mobilização mecânica do solo, é responsável pela redução do teor de matéria orgânica do solo, a qual é um dos principais agentes de formação e estabilização dos agregados (Tisdall & Oades, 1982; Castro Filho et al., 1998). O tipo de planta cultivada interfere na estruturação dos solos, ou seja, as gramíneas são mais eficientes em aumentar e manter a estabilidade de agregados do que as leguminosas (Carpenedo & Mielniczuk, 1990), por apresentarem um sistema radicular extenso e renovado constantemente (Harris et al., 1966).

A camada superficial do solo recebe mais fortemente a ação dos ciclos de umedecimento e secagem, esses podem contribuir no aumento da estabilidade de agregados. Horn (1990) relata que os ciclos de umedecimento e secagem provocam a desidratação de ligantes orgânicos e inorgânicos do solo, que proporcionam a formação de agregados de maior tamanho. Oliveira et al. (1996), estudando a ação dos ciclos de umedecimento e secagem em Latossolos brasileiros, concluíram que seu efeito sobre os agregados maiores se manifesta mais na superfície do solo.

Wendling et al. (2005), pesquisando a influência de diferentes manejos no carbono orgânico e na estabilidade de agregados em Latossolo, concluíram que o plantio direto aumenta os índices de agregação em relação ao preparo convencional, mas diminui em relação à mata nativa; tendo também encontrado boa correlação do carbono orgânico com os índices de estabilidade de agregados.

A agregação é um dos parâmetros que podem ser utilizados para avaliar a qualidade do solo, uma vez que a manutenção de sua estrutura facilita a aeração e a infiltração de água e reduz a erodibilidade (Neves et al., 2006). Os mesmos pesquisadores verificaram que a estabilidade de agregados foi reduzida quando o solo passou da vegetação de floresta para culturas. Esta redução foi mais acentuada para o solo com culturas anuais e com pomar capinado e menor para o solo sob pomar com cobertura vegetal de gramíneas ou leguminosas.

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). O comportamento do solo em relação à porosidade é resultado de diversos fatores inter-relacionados, como, por exemplo, a mobilização mecânica dos implementos agrícolas de preparo periódico, que exercem pressão sobre o solo, provocando alterações nas suas propriedades físicas, como a redução da porosidade total (Wu et al., 1995).

Diversas pesquisas abordando diferentes sistemas de manejo de solo têm confirmado a importância do fornecimento de matéria orgânica objetivando 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.

A mobilização mecânica do solo para o plantio e cultivo da cana-de-açúcar tem maiores efeitos na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica em relação à matéria orgânica e ao tempo de cultivo no Latossolo Vermelho distroférico (Góes et al., 2005).

Com a remoção da vegetação natural e subseqüentes anos de cultivo, ocorre uma redução gradativa da aptidão cultural do solo, pela alteração de suas propriedades físicas. Para Wohlenberg et al. (2004), a maior estabilidade estrutural em solo arenoso ocorreu sob campo natural e a maior desagregação sob solo descoberto, devido ao intensivo preparo do solo que reduziu o teor de matéria orgânica e aumentou a quantidade de agregados de menor diâmetro. Os mesmos autores também verificaram uma ação direta das culturas na formação e estabilização dos agregados, tendo ocorrido estabilidade maior em sistemas de cultivo que aportou material orgânico e cobriram o solo durante o ano todo.

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; esta variável influencia o diâmetro médio ponderado dos agregados.

Diante do exposto, este trabalho objetiva avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda Pau Amarelo, de propriedade da Usina Santa Clotilde S/A, localizada na latitude 9°27'8" Sul e longitude 35°51'12" Oeste, no município de Rio Largo, litoral do Estado de Alagoas. O clima do local onde foi conduzida a pesquisa é tropical chuvoso com verão seco, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual situa-se próximo a 1.752 mm e a temperatura média anual em torno de 29° C.

As áreas escolhidas como experimentais, são cultivadas com a cana-de-açúcar há mais de 20 anos, em relevo variando de plano a suave ondulado característico dos solos dos Tabuleiros Costeiros. O solo estudado foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso (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).

Para caracterização física e química do solo, amostras de solo foram coletadas ao acaso, nas áreas submetidas aos diferentes sistemas de manejo, nas profundidades de 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, sendo retiradas num ponto situado nas entrelinhas da lavoura da cana-de-açúcar. A coleta do solo foi realizada no mês de fevereiro de 2007. As análises físicas e químicas do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo e no Laboratório de Solo/EECAC (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 minutos, sendo usado também dispersante químico (EMBRAPA, 1997). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo obtida através de 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 sódio e o potássio por fotometria de chama, o cálcio e o magnésio por espectrofotometria de absorção atômica e o alumínio por volumetria.

Na determinação da argila dispersa em água utilizou-se o mesmo procedimento da argila total, no entanto 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 através da razão entre a argila naturalmente dispersa e a argila total (EMBRAPA, 1997).

A tabela 1 apresenta as características granulométricas, densidades do solo e de partícula e carbono orgânico total do Latossolo Amarelo Distrocoeso estudado.

Tabela 1. Caracterização do Latossolo Amarelo Distrocoeso, sob diferentes sistemas de manejo e profundidades estudadas.

Prof (m)	Granulometria			Densidade		*COT (%)
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	Solo (Mg.m ⁻³)	Partícula	
MATA (MN)						
0 - 0,20	655	90	255	1,05	2,62	3,05
0,20 - 0,40	553	140	307	1,21	2,64	1,85
0,40 - 0,60	547	110	343	1,27	2,68	1,23
IRRIGADO (SMI)						
0 - 0,20	680	70	250	1,65	2,67	1,26
0,20 - 0,40	580	80	340	1,72	2,63	0,87
0,40 - 0,60	572	98	330	1,63	2,66	0,80
VINHAÇA+TORTA (SMVT)						
0 - 0,20	625	100	275	1,49	2,61	1,59
0,20 - 0,40	520	110	360	1,56	2,68	0,85
0,40 - 0,60	437	120	443	1,58	2,67	0,69
VINHAÇA (SMV)						
0 - 0,20	588	90	322	1,56	2,64	1,51
0,20 - 0,40	550	90	360	1,63	2,62	0,68
0,40 - 0,60	435	110	455	1,62	2,64	0,60

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

*COT - carbono orgânico total.

Foram selecionadas áreas em talhões de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa três áreas representativas de três sistemas de

manejo adotados pela unidade sucroalcooleira. Dessa forma, os tratamentos avaliados foram uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha padrão, reproduzida por solo em condições naturais (floresta nativa).

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 são descritos a seguir e foi o mesmo nas três áreas estudadas. O preparo periódico do solo constituiu-se 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. Finalmente, foram abertos sulcos de aproximadamente 0,25 m 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 três áreas cultivadas, a lavoura da cana-de-açúcar foi queimada antes da operação de colheita.

Na área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI) foi aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cana-de-açúcar, cuja composição química média encontra-se na tabela 2. A adubação química da cana-planta foi realizada de acordo com 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.

Tabela 2. Composição química média da água de irrigação nas áreas cultivadas.

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

CE = Condutividade elétrica

Na área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) são 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 na tabela 3. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha^{-1} de N e na cana-soca 80 kg ha^{-1} de N.

Tabela 3. Composição química média da vinhaça diluída aplicada

CE	pH	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
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

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 composição química média do produto aplicado encontra-se na tabela 4. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha^{-1} de N e na cana-soca 80 kg ha^{-1} de N.

Tabela 4. Composição química média da torta de filtro aplicada

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

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, 1984 a).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade do solo na fronteira entre os estados plástico e semi-sólido, foi determinado conforme a ABNT (1984 b). O índice de liquidez (IP) foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, constituindo uma indicação da plasticidade do solo.

A estabilidade dos agregados foi obtida por via seca e úmida, sendo as amostras coletadas ao acaso, com o auxílio de enxadão e pá de corte. Na separação de agregados por via úmida, adotou-se o procedimento descrito por Kemper & Rosenau (1986), através de peneiramento em água no aparelho de Yoder, após pré-umedecimento lento dos agregados por capilaridade, mas com uma modificação, a

adição da peneira de 3,35 mm para avaliação dos macroagregados. Os agregados assim preparados foram transferidos para dois conjuntos de cinco peneiras de 3,35; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm de diâmetro de malha, sendo submetidos a agitação vertical (42 ciclos por minuto) durante quinze minutos, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio, para secagem em estufa a 105° C, durante 24 horas. Em seguida, pesou-se e calculou-se a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados. Na separação por via seca, utilizou-se o mesmo conjunto de peneiras superpostas, as quais foram agitadas (90 rpm), durante 15 minutos. O solo retido em cada peneira foi seco em estufa a 105° C, durante 24 horas, sendo então realizados os mesmos cálculos supracitados. Os valores de diâmetro médio ponderado - DMP foram obtidos de acordo com a expressão de (Kemper & Rosenau, 1986) abaixo:

$$DMP = \sum_{i=1}^n u_i \cdot W_i \quad (1)$$

em que, DMP = diâmetro médio ponderado (mm);

u_i = diâmetro médio entre classes (mm);

W_i = fração em peso da classe em relação ao peso da amostra total.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) e o AGRI (Wendling et al., 2005) foram calculados segundo as equações a seguir:

$$IEA = (DMP_u / DMP_s) \cdot 100 \quad (2)$$

$$AGRI = (W_u > 2) \cdot 100 \quad (3)$$

em que, DMP_u = diâmetro médio ponderado via úmida (mm);

DMP_s = diâmetro médio ponderado via seca (mm);

W_u = representa a proporção de agregados > 2mm estáveis em água.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas, químicas e limites de consistência

Os resultados obtidos para os cátions trocáveis e saturação por sódio, em função dos sistemas de manejo e profundidades, são apresentados na tabela 5.

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

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

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições. MN =

mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Houve diferença significativa entre as médias dos sistemas de manejo e profundidades sobre os cátions trocáveis (Tabela 5). Com exceção do alumínio (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 cálcio (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 cálcio (Ca^{2+}) no sistema de manejo sob irrigação. Esse elemento químico, conforme relata Meurer (2000), promove a floculação das argilas, além de contribuir para o aumento da atividade biológica, que favorece a agregação das partículas do solo. Para o cátion magnésio (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 uma diminuição da espessura da dupla camada difusa na solução do solo, aumentando a atração entre as partículas, 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 cálcio e magnésio, em comparação aos solos cultivados com cana-de-açúcar, apresenta elevado teor de alumínio, que possivelmente compensou os cátions bivalentes. O alumínio tem grande importância na agregação do solo realizando pontes entre a superfície da argila e os compostos orgânicos (Munner & Oades, 1989).

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

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

Para as camadas subsuperficiais (0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) o comportamento para os cátions trocáveis foi semelhante ao da camada superficial.

A capacidade de troca catiônica (CTC) expressa a quantidade total de cátions retidos na superfície dos colóides (minerais de argilas e humus) em estado permutável (Kiehl, 1979). A CTC do solo (Tabela 6), nos diferentes sistemas de manejo apresentou variação de 4,44 a 10,35 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$. Os maiores valores de CTC foram obtidos para o solo sob mata nativa. Ainda se observa, na tabela 6, que no valor de 10,35 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ para o solo sob mata nativa, na profundidade de 0-20 cm, a acidez extraível ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) teve um peso de 92%.

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 apresentaram os maiores valores de pH, provavelmente resultado dos efeitos residuais das calagens realizadas ao longo dos ciclos da lavoura da cana-de-açúcar.

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

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

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

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

Como pode ser verificado na tabela 7, a argila dispersa em água apresentou variação de 39 a 171 g. kg⁻¹ para os diferentes sistemas de manejo e profundidades investigadas.

Tabela 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	85ABab	75Bab	80ABab
0,20 - 0,40	67CBa	81Ab	75BCab	69BCb
0,40 - 0,60	48CCb	87ABab	75Ba	71BCbb
	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	450,0BCb	525,0BCb
0,20 - 0,40	696,3Bb	475,0CCa	575,0BCa	650,0BCa
0,40 - 0,60	1187,5Aa	487,5CCa	600,0BCa	670,0BCa

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

O solo sob cultivo irrigado, nas três profundidades pesquisadas, apresenta os maiores valores para a argila dispersa em água. Esse comportamento provavelmente está associado ao fato deste solo expressar baixos teores para os cátions bivalentes e matéria orgânica, principalmente na profundidade de 0–0,20 m.

De maneira geral, os solos sob cultivo da cana-de-açúcar apresentaram os maiores valores para argila dispersa, sendo que, 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, promovida 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 parâmetro permite inferir sobre o grau de estabilidade dos agregados.

Na tabela 7 constata-se diferença significativa na interação entre sistemas de manejo e profundidades sobre a variável grau de floculação do solo. Na camada de 0-0,20 m, o solo sob mata nativa apresenta 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 manejos foi semelhante ao supracitado.

Ainda se observa, na tabela 7, que a concentração de argila no efluente, obtida no ensaio de condutividade hidráulica saturada, foi maior na área sob irrigação, nas três profundidades, em relação aos demais sistemas de manejo, evidenciando maior migração de argila neste sistema de manejo. Silva (2003) também observou maior concentração de argila no efluente em Argissolo Amarelo Distrocoeso sob sistema de manejo irrigado. Esses resultados estão coerentes com o comportamento observado para argila dispersa em água, que foram maiores no solo irrigado, nas três profundidades.

Na tabela 8 pode-se verificar diferença significativa para a interação sistemas de manejo e profundidades sobre as variáveis: carbono orgânico total e matéria orgânica. O carbono orgânico total (COT) diminui com a profundidade, em todos os sistemas de manejo, sendo os maiores valores encontrados para o solo sobre 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), sob aplicação de vinhaça (SMV) e sob aplicação de irrigação (SMI), respectivamente, em comparação ao solo em condições naturais (mata nativa). Para as demais profundidades, as médias de COT nos sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar estatisticamente foram iguais. O efeito dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total foi mais evidente na camada superficial.

Mello et al.(1983) esclarecem que valores de carbono orgânico, expressos em porcentagens 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 carbono orgânico total do solo, provocada pelo cultivo intensivo com cana-de-açúcar, também foi observada por outros autores (Silva, 2003; Oliveira, 2008).

Tabela 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 Tukey (5%). Média de quatro repetições. MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Em regiões tropicais, alguns obstáculos contribuem para que se mantenham elevados os teores de carbono orgânico nos solos cultivados, dentre os quais as temperaturas elevadas, a umidade e as práticas de revolvimento do solo, que propiciam a rápida decomposição da matéria orgânica, através 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.

Na avaliação da consistência do solo, alguns parâmetros foram mensurados para os diferentes sistemas de manejo investigados (Tabela 9).

Tabela 9. 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			
	SMI	MN	SMVT	SMV
m	LP (kg kg ⁻¹)			
0 - 0,20	0,178Cc	0,215Ab	0,189BCc	0,187BCc
0,20 - 0,40	0,188Cb	0,233Aa	0,205BCb	0,226Ab
0,40 - 0,60	0,201Ca	0,242ACa	0,217BCa	0,241ACa
	LL (kg kg ⁻¹)			
0 - 0,20	0,221Ca	0,416Aa	0,275Bc	0,273Bc
0,20 - 0,40	0,271Cb	0,417Aa	0,312Bb	0,318Bb
0,40 - 0,60	0,301Ca	0,405Ab	0,335Ba	0,341Ba
	IP (kg kg ⁻¹)			
0 - 0,20	0,043Cc	0,201Aa	0,086Bc	0,086Bb
0,20 - 0,40	0,083Cb	0,184Ab	0,107Bb	0,092Cab
0,40 - 0,60	0,100Ca	0,163Ac	0,119Ba	0,100Cab
	Ucc/LP			
0 - 0,20	0,82Bb	1,13Aab	0,85Ba	0,87Bab
0,20 - 0,40	0,91Ba	1,07Aab	0,91Bab	0,83Cab
0,40 - 0,60	0,78Cb	1,03Ab	0,88Bab	0,79Cbb

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Houve diferença significativa para a interação sistemas de manejo e profundidades sobre os parâmetros relacionados com a consistência do solo. Na profundidade de 0-0,20 m o solo sob mata nativa apresentou o maior valor (0,215 kg.kg⁻¹) de limite de plasticidade (LP), enquanto nos solos sob cultivo da cana-de-açúcar as médias para LP estatisticamente foram iguais. Para as camadas sub-superficiais o solo sob mata nativa mantém os maiores valores de LP. Esse

comportamento confirma a importância da matéria orgânica na definição dos valores para os limites de consistência (Braida et al., 2006; Silva et al., 2006).

A matéria orgânica apresenta uma área superficial específica (ASE) variando de 8×10^5 a $9 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Meurer et al., 2000), proporcionando uma grande capacidade de retenção de água, aumentando a necessidade de quantidades maiores para a formação de filmes de água ao redor das partículas minerais, resultando em aumento dos limites de consistência. Hillel (1980) aponta para uma tendência em se elevar o limite de plasticidade com o aumento da matéria orgânica, que sofreu redução nas camadas subsuperficiais (Tabela 8). De maneira geral, constata-se uma tendência de aumento dos limites de plasticidade e de liquidez e índice de plasticidade com a profundidade, provavelmente, em função do aumento do teor de argila no solo (Tabela 1), compensando, de certo modo, a redução da matéria orgânica com o aumento da profundidade (Tabela 8). Comportamento semelhante para os limites de consistência foi observado por Braida et al. (2006) e Silva et al. (2006).

A tendência dos resultados foi semelhante à observada por Baver (1966), ao verificar que, de um modo geral, aumentos no teor de matéria orgânica tendem a elevar o limite de plasticidade, enquanto, no teor de argila, elevam os limites de liquidez e o índice de plasticidade. Para Caputo (2000), uma pequena porcentagem de matéria orgânica eleva o limite de plasticidade, sem que o mesmo ocorra, simultaneamente, no limite de liquidez.

O solo sob mata nativa (Tabela 9) apresentou um valor médio, representativo das três profundidades, de 1,08 para a razão Ucc/LP, 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 um baixo risco de compactação, reforçando assim a recomendação de elevar e manter adequados os valores para a matéria orgânica do solo.

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

O efeito do carbono orgânico total sobre os parâmetros de consistência do solo decresceu na seguinte ordem: $Ucc/LP > LL > IP > LP$, como demonstram os valores

dos coeficientes angulares das equações que descrevem as relações Ucc/LP vs. COT; LL vs. COT; IP vs. COT e LP vs. COT, respectivamente, iguais a 0,16938; 0,09784; 0,07943 e 0,01841 (Figuras 1 a 4).

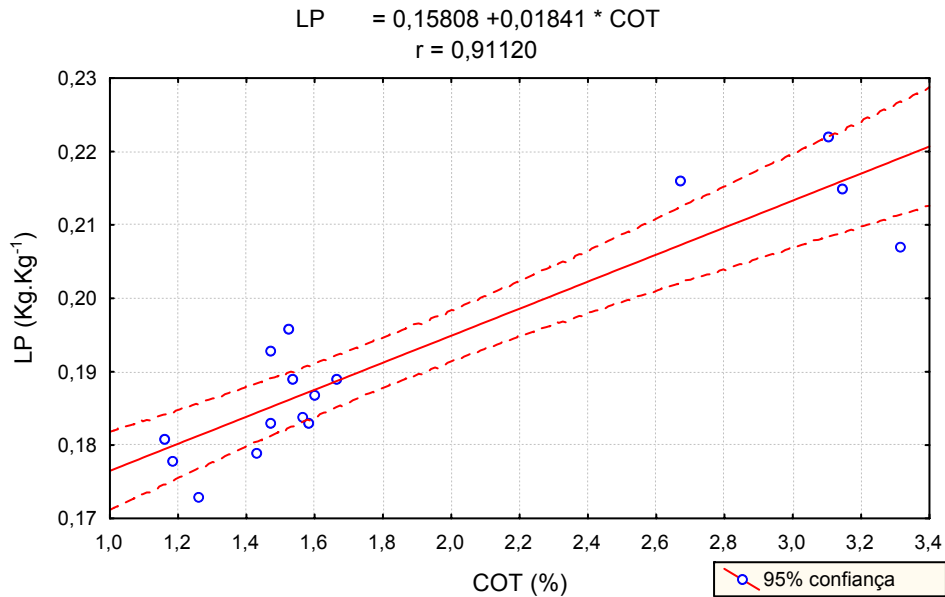


Figura 1. Relação entre o limite de plasticidade (LP) e carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0 - 0,20 m.

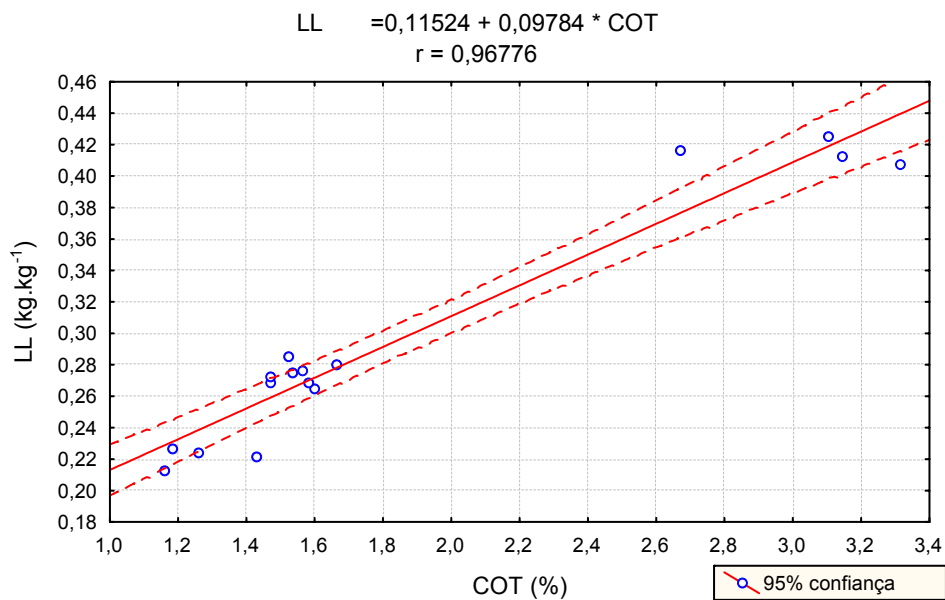


Figura 2. Relação entre o limite de liquidez (LL) e carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0 - 0,20 m.

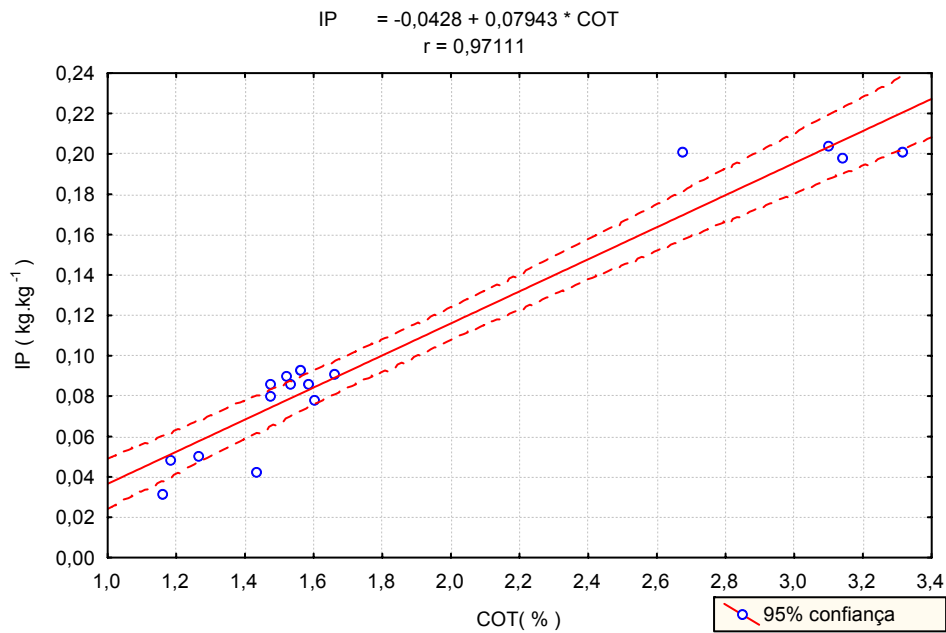


Figura 3. Relação entre o índice de plasticidade (IP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0 - 0,20 m.

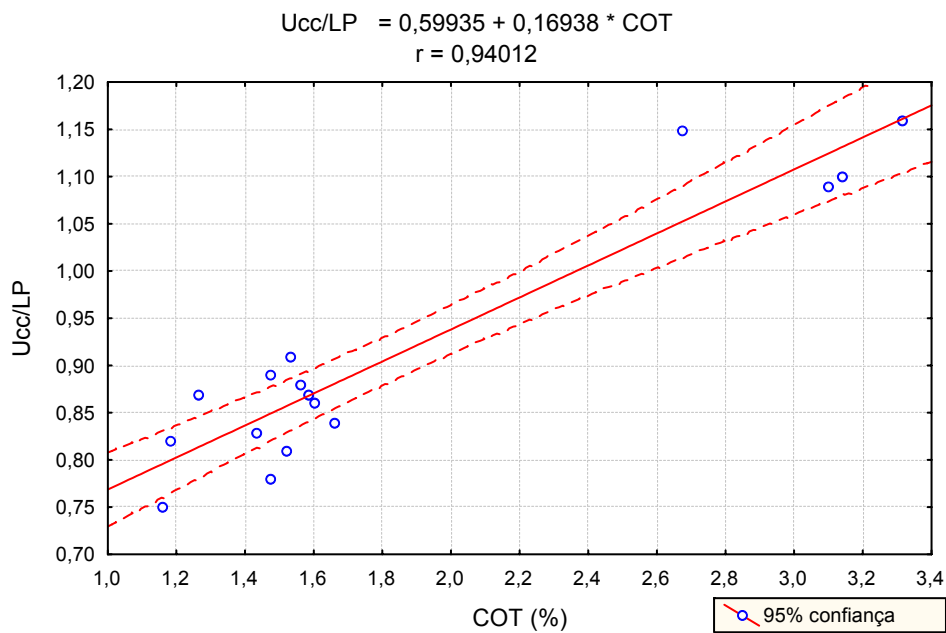


Figura 4. Relação entre a razão Ucc/LP e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0 - 0,20 m.

As figuras de 5 a 8 apresentam as correlações entre os limites de consistência do solo e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

Todas as correlações foram positivas, apresentando valores de r elevados, com exceção de LP vs. COT. O efeito do carbono orgânico total sobre os parâmetros de consistência do solo decresceu na seguinte ordem: Ucc/LP > LL > IP > LP, como demonstram os valores dos coeficientes angulares das equações que descrevem as relações Ucc/LP vs. COT; LL vs. COT; IP vs. COT e LP vs. COT, respectivamente, iguais a 0,17588; 0,09936; 0,08058 e 0,01879 (Figuras 5 a 8). Ainda se observa, que o efeito da acumulação de matéria orgânica proporcionada pelos sistemas de manejo no Latossolo Amarelo Distrocoeso foi mais forte sobre a relação Ucc/LP e o limite de liquidez, inclusive apresentando a mesma ordem decrescente da profundidade de 0 -0,20 m.

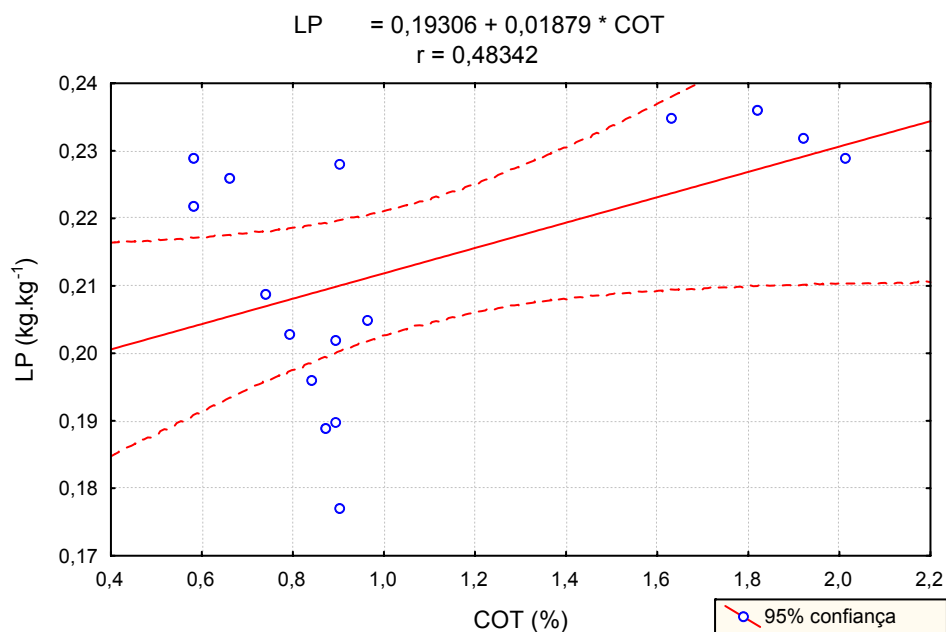


Figura 5. Relação entre o limite de plasticidade (LP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

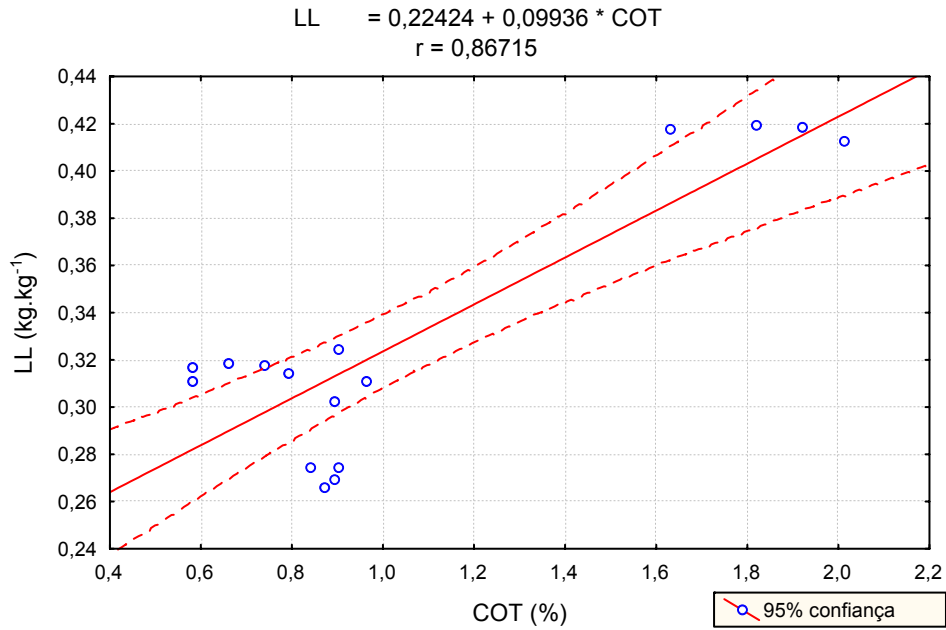


Figura 6. Relação entre o limite de liquidez (LL) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

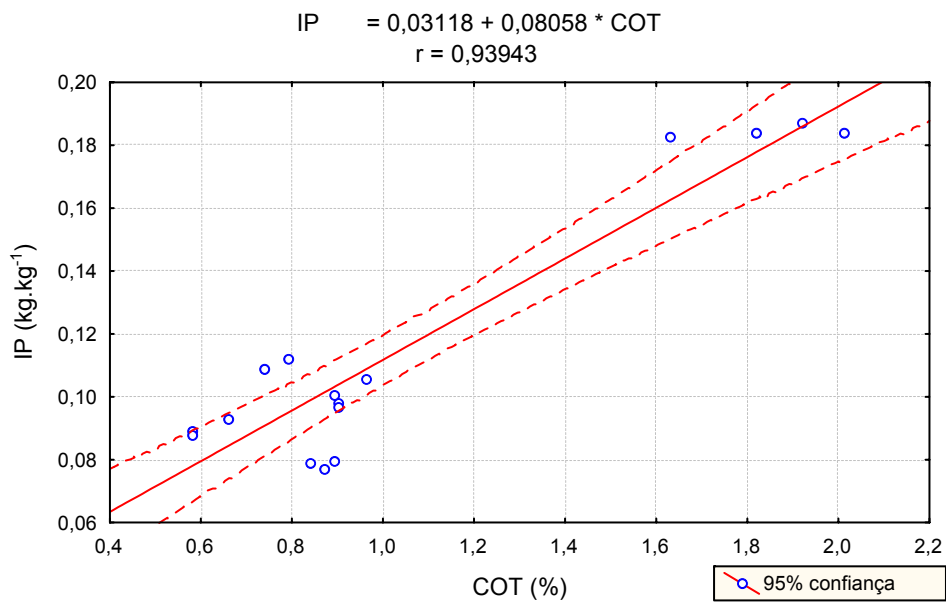


Figura 7. Relação entre o índice de plasticidade (IP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

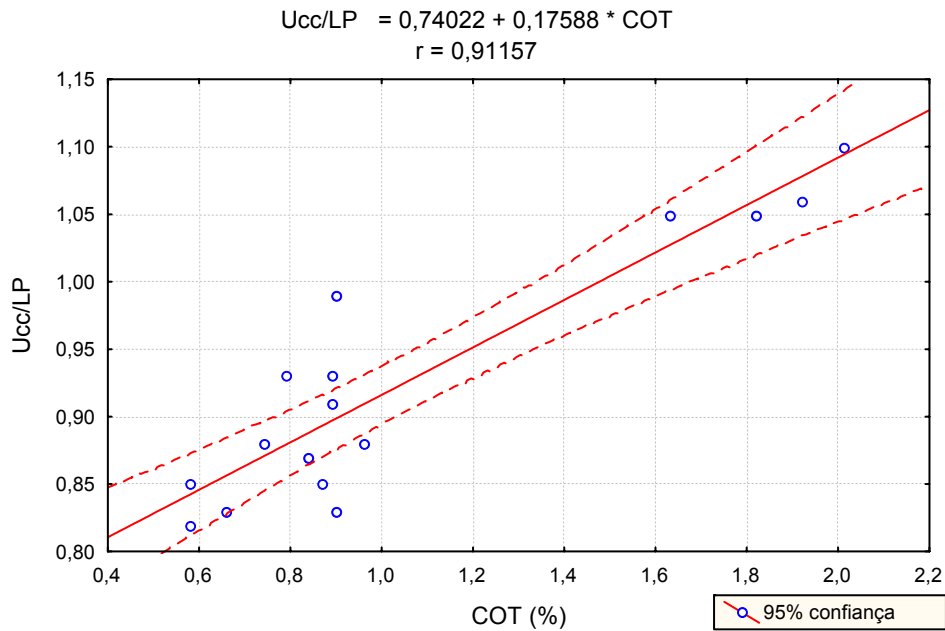


Figura 8. Relação entre a razão U_{cc}/LP e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

As figuras de 9 a 12 apresentam as correlações entre os limites de consistência do solo e o carbono orgânico total (COT), na profundidade de 0,40 - 0,60 m. Todas as correlações foram positivas, apresentando valores elevados de r , com exceção de LP vs. COT. O efeito do carbono orgânico total sobre os parâmetros 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 vs. COT; LL vs. COT; IP vs. COT e LP vs. COT, respectivamente, iguais a 0,31900; 0,10621; 0,08310 e 0,02311 (Figuras 9 a 12). Ainda se constata, que a seqüência decrescente do efeito do COT sobre os parâmetros de consistência do solo foi a mesma das duas profundidades anteriores.

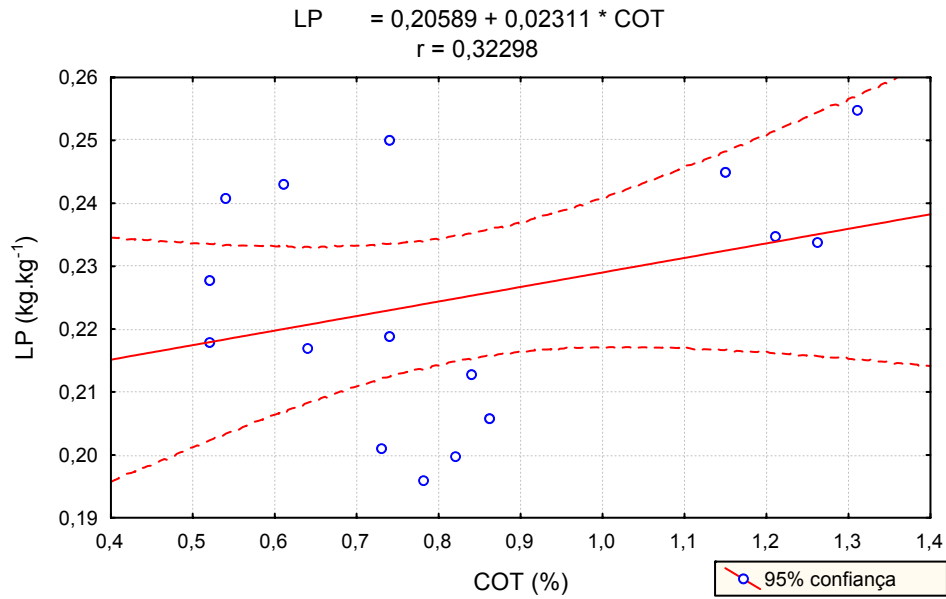


Figura 9. Relação entre o limite de plasticidade (LP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,40 - 0,60 m.

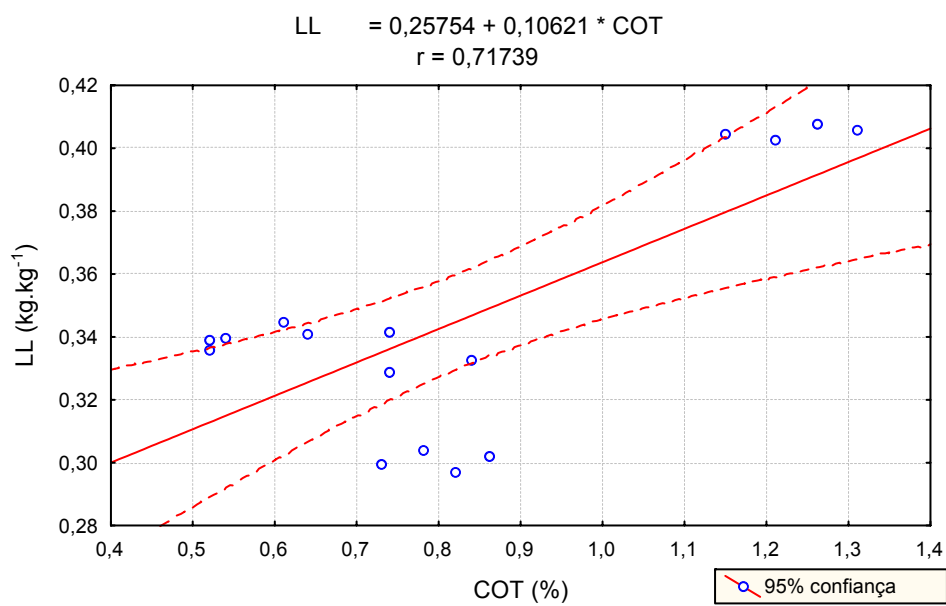


Figura 10. Relação entre o limite de liquidez (LL) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,40 - 0,60 m.

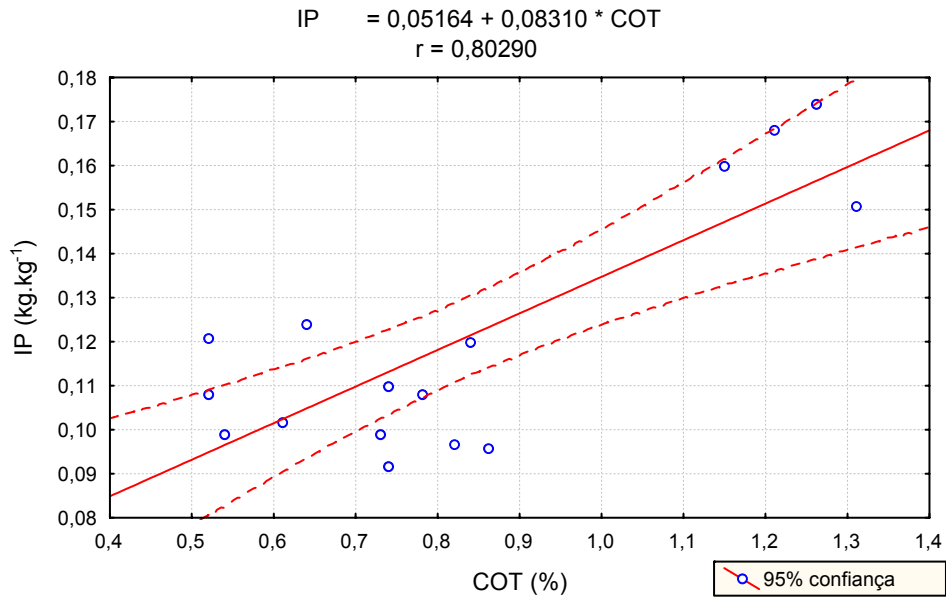


Figura 11. Relação entre o índice de plasticidade (IP) e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,40 - 0,60 m.

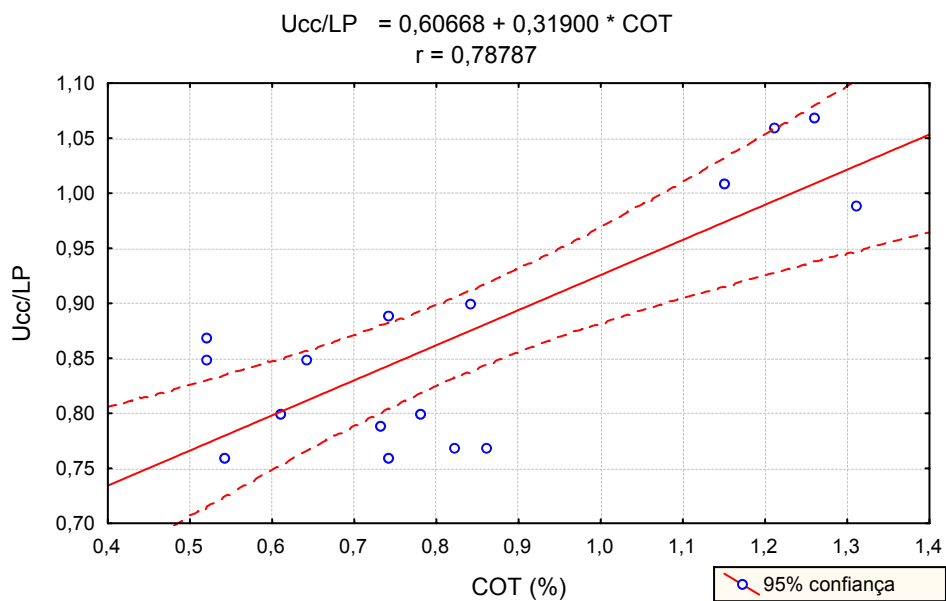


Figura 12. Relação entre a razão Ucc/LP e o carbono orgânico total (COT) do solo, na profundidade de 0,40 - 0,60 m.

Distribuição de agregados e índices de agregação

As porcentagens de agregados, obtidas por peneiramento por via seca, considerando desde os superiores a 3,35 mm até os inferiores a 0,25 mm estão expressas na figura 13.

A distribuição de tamanho de agregados pelo método de peneiramento por via seca revela que os diferentes sistemas de manejo exerceram pequena influência na separação de agregados, dentro de cada classe. Verifica-se, portanto, que a soma das porcentagens das duas maiores classes de diâmetros representa mais de 80% dos agregados, indistintamente, dos sistemas de manejo e de profundidade.

Kemper & Chepil (1965) demonstraram que a estabilidade mecânica dos agregados secos é um bom índice da habilidade dos solos de resistirem à erosão eólica. A erosão provocada pelo vento ocorre quando o solo está seco; assim, para simular o fenômeno de campo os estudos de laboratório são feitos com solo seco.

As porcentagens de agregados obtidas por peneiramento por via úmida estão explicitadas na figura 14. O tipo mais comum de desintegração de agregados em solos cultivados ocorre durante o primeiro umedecimento, após o cultivo (Kemper & Chepil, 1965). Quando o ar é preso dentro do agregado, durante o umedecimento, ocorre a compressão do mesmo à medida que a água entra no agregado, por capilaridade. No momento em que a estrutura se torna suficientemente fraca pelo umedecimento ocorre a expansão aparentemente explosiva do ar, provocando a desagregação.

Verifica-se, na figura 14, que a maior distribuição de agregados maiores do que 3,35 mm ocorreu na profundidade de 0-0,20 m, na qual a distribuição dos agregados decresceu na seguinte ordem: MN > SMVT > SMV > SMI, apresentando os valores de 47,0; 37,0; 30,8 e 25,8%, respectivamente.

A performance dos sistemas de manejo SMVT e SMV foi creditada aos efeitos da vinhaça sobre o tamanho dos agregados. A vinhaça proporciona um efeito benéfico na agregação do solo, devido à produção de mucilagens, como resultado de maior atividade microbiana em solos que receberam este resíduo (Camargo et al., 1988).

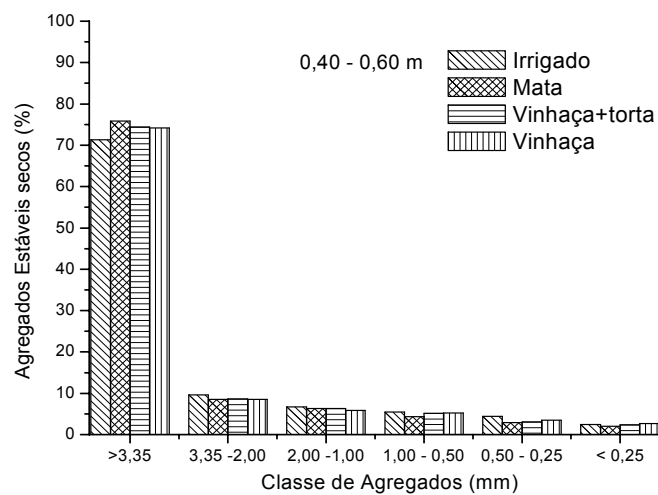
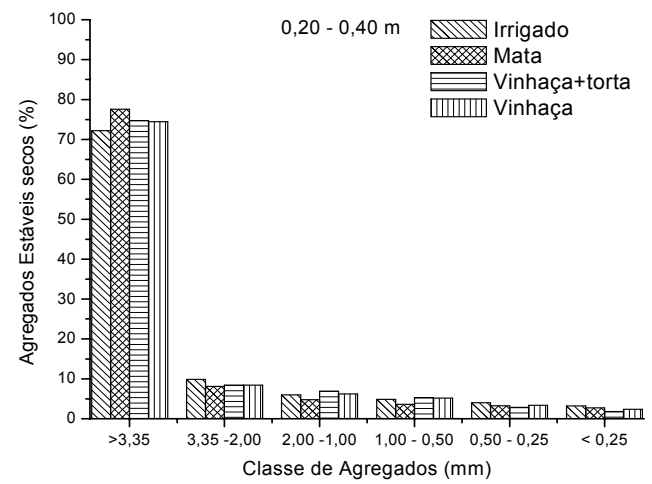
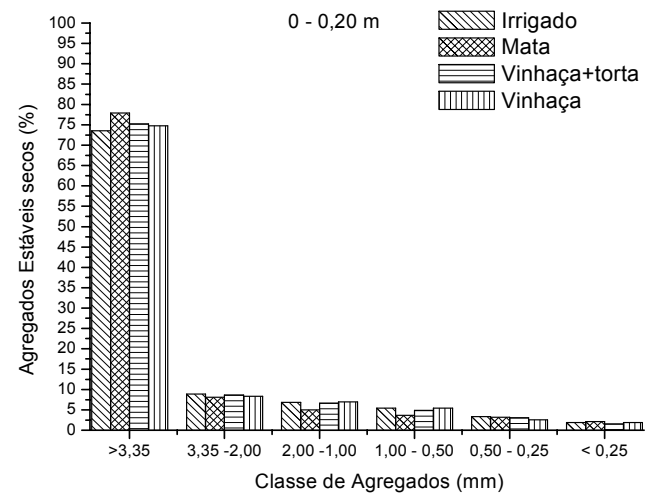


Figura 13. Distribuição dos agregados por peneiração via seca, nos sistemas de manejo e profundidades estudadas.

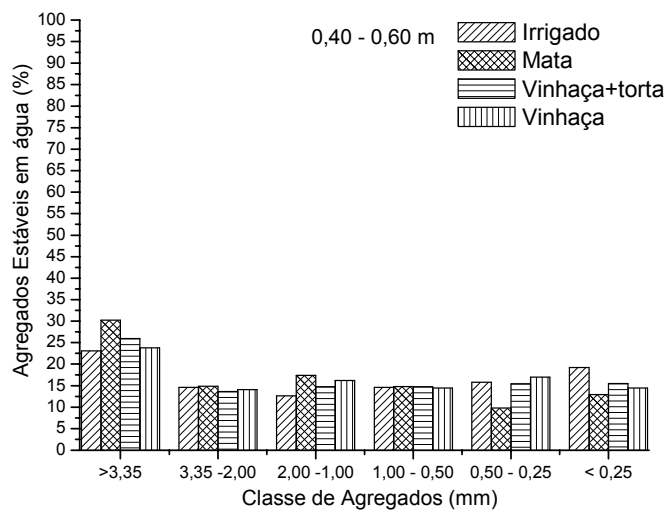
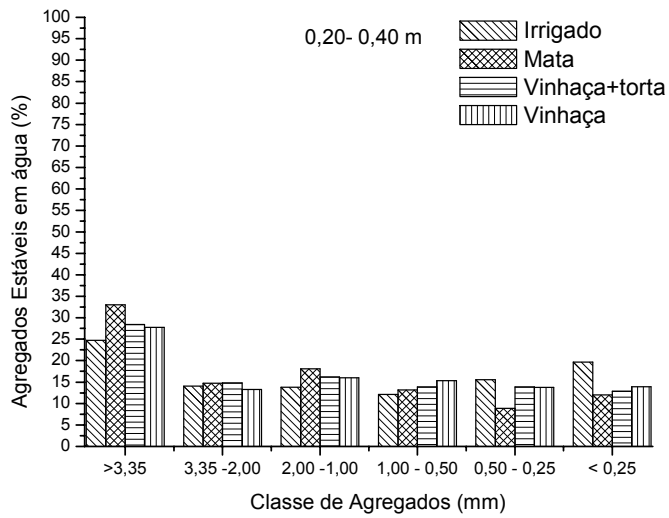
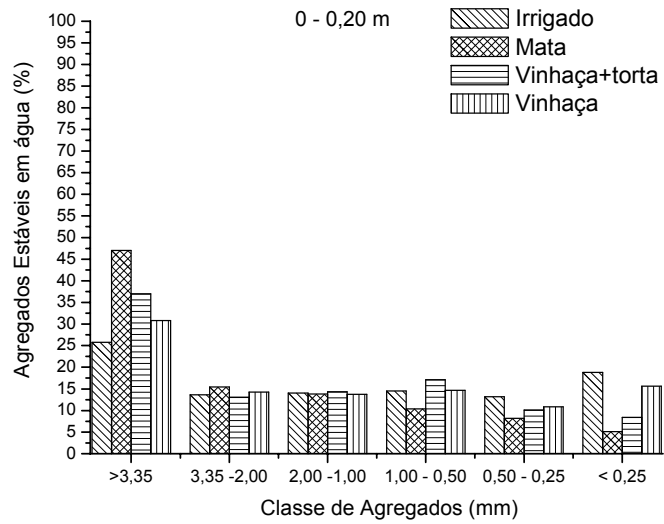


Figura 14. Distribuição dos agregados por peneiração via úmida, nos sistemas de manejo e profundidades estudadas.

Para as camadas subsuperficiais (0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m), o comportamento da distribuição de agregados foi semelhante ao da camada superficial. Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar, de forma geral, apresentaram menor estabilidade de agregados em água. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por diversos autores (Roth et al., 1991; Silva, 2003; Oliveira, 2008). A tabela 10 apresenta o diâmetro médio ponderado obtido por peneiração via seca (DMPs) e úmida (DMPu), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados > 2,0 mm estáveis em água (AGRI).

Tabela 10. Diâmetro médio ponderado obtido por peneiração via úmida (DMPu) , via seca (DMPs), índice de estabilidade de agregados (IEA), AGRI em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

Camada	Sistemas de manejo				
	SMI	MN	SMVT	SMV	Média
m	DMP seco (mm)				
0 - 0,20	2,85	2,95	2,90	2,88	2,89a
0,20 - 0,40	2,82	2,93	2,88	2,86	2,87ab
0,40 - 0,60	2,81	2,91	2,87	2,84	2,86b
Média	2,83C	2,93A	2,88B	2,86B	
	DMP úmido (mm)				
0 - 0,20	1,62Da	2,31Aa	1,98Ba	1,79Ca	
0,20 - 0,40	1,59Ca	1,91Ab	1,75Bb	1,61Ba	
0,40 - 0,60	1,54Ba	1,83Ab	1,64Bc	1,61Bb	
	Índice de Estabilidade de Agregados (%)				
0 - 0,20	56,8Da	78,3Aa	68,3Ba	62,1Cab	
0,20 - 0,40	56,4Ca	65,2Ab	60,8Cb	59,8BCab	
0,40 - 0,60	54,8BCa	62,9Ab	57,1Bb	56,7BCb	
	AGRI (%)				
0 - 0,20	39,4Da	62,5Aa	50,0BA	45,1Ca	
0,20 - 0,40	38,8Ca	47,8Ab	43,2BCb	41,0BCb	
0,40 - 0,60	37,7BCa	45,1Ac	39,6Bc	37,9BCc	

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

Não houve diferença significativa entre a interação sistemas de manejo e profundidades sobre o diâmetro médio ponderado via seco (DMPs). O DMPs nos diferentes sistemas de manejo apresentou variação de 2,81 a 2,95 mm, demonstrando que esse parâmetro não é adequado para avaliar a estabilidade de agregados.

Todavia, o diâmetro médio ponderado via úmida (DMPu) mostrou-se um bom parâmetro e houve diferenças significativas na comparação das médias para a interação sistemas de manejo e profundidades. De maneira geral, o DMPu decresceu na seguinte ordem: MN > SMVT > SMV > SMI, com a maior estabilidade de agregados na profundidade de 0 - 0,20 m. A estabilidade da estrutura do solo varia com as características intrínsecas do solo, com o cultivo intensivo e sistemas de manejo. O DMPu é um índice que poderá avaliar a estabilidade da estrutura do solo em relação à ação desagregadora da água, indicando o grau de susceptibilidade do solo à erosão hídrica.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) e a porcentagem de agregados maiores do que 2,0 mm estáveis em água (AGRI) também se mostraram bons parâmetros de avaliação da estabilidade de agregados. O comportamento geral desses dois índices foi bastante semelhante ao do DMPu.

Todos os índices utilizados na avaliação da agregação do solo tiveram melhor desempenho na profundidade de 0 - 0,20 m, demonstrando uma forte ação dos diferentes sistemas de manejo sobre a camada superficial.

As figuras de 15 a 18 apresentam as correlações entre os índices que indicam a estabilidade da estrutura do solo e o COT. Todas as correlações foram significativas ($p < 0,01$) e positivas, apresentando valores de r de 0,8862; 0,6304; 0,8682 e 0,9168, respectivamente, referentes às equações que descrevem as relações entre DMPu vs. COT; DMPs vs. COT; IEA vs. COT e AGRI vs. COT.

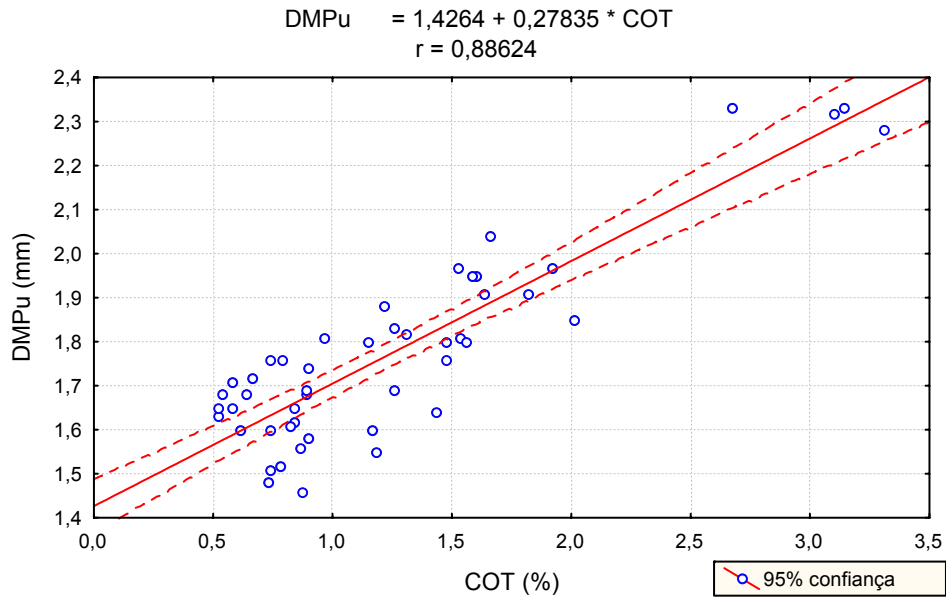


Figura 15. Relação entre o diâmetro médio ponderado de agregados via úmida (DMPu) e o carbono orgânico total do solo (COT).

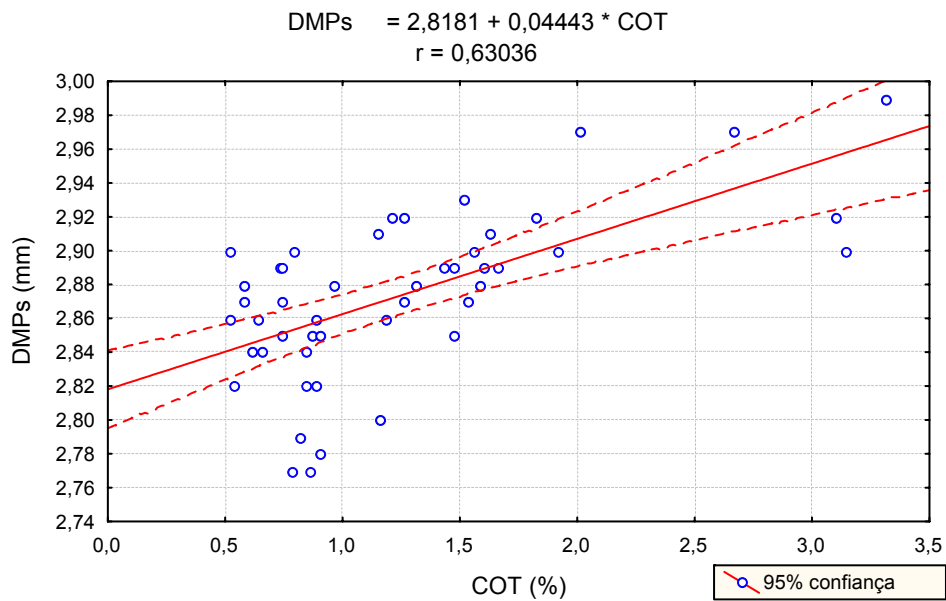


Figura 16. Relação entre o diâmetro médio ponderado de agregados via seca (DMPs) e o carbono orgânico total do solo (COT).

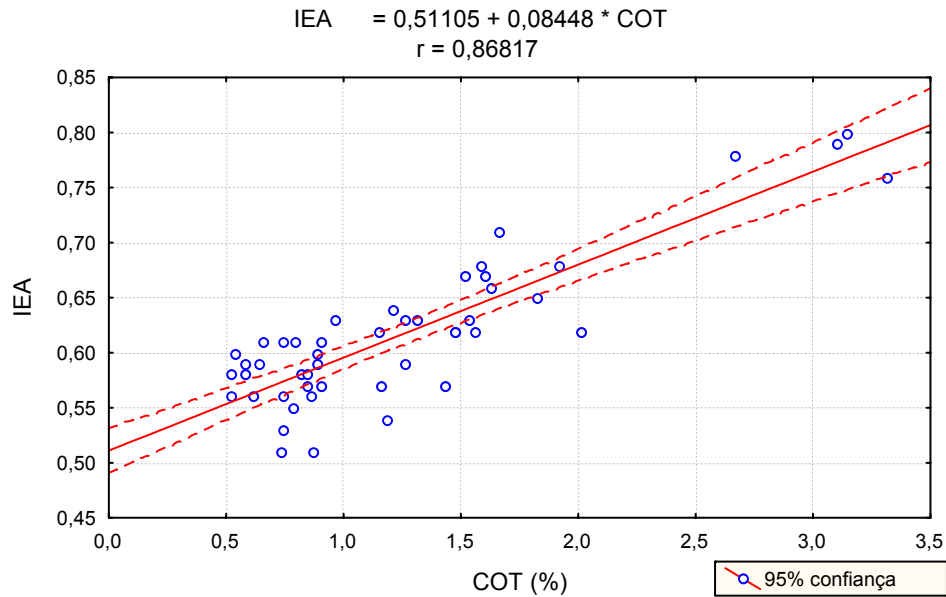


Figura 17. Relação entre o índice de estabilidade de agregados (IEA) e o carbono orgânico total do solo (COT).

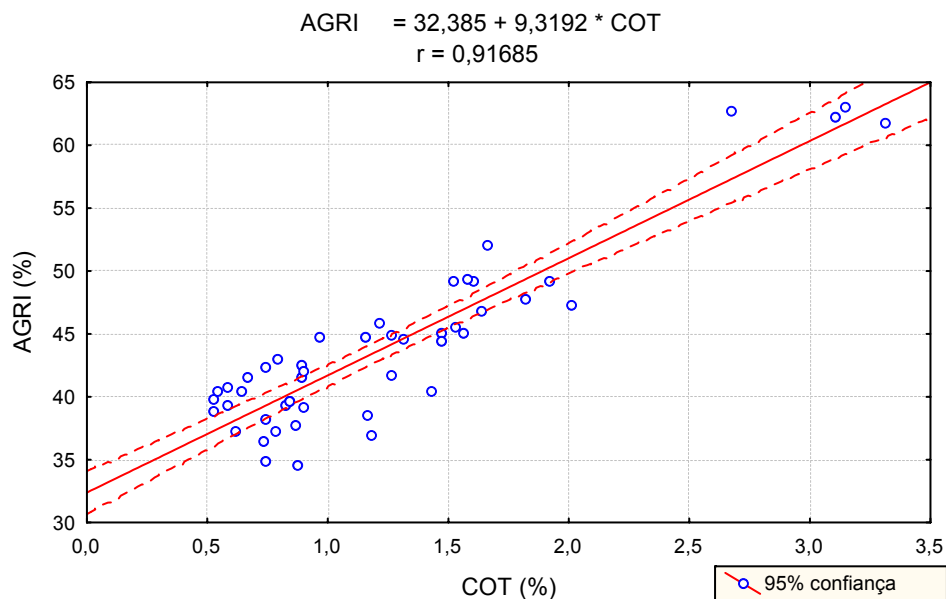


Figura 18. Relação entre a porcentagem de agregados maiores do que 2,0 mm estáveis em água (AGRI) e o carbono orgânico total do solo (COT).

Os resultados evidenciam que o mecanismo do processo de estabilização dos agregados desse solo está associado com o teor de matéria orgânica. Na camada superficial, principalmente, à medida que a matéria orgânica diminui, pelo revolvimento excessivo do solo ou pelo baixo aporte de material orgânico

proporcionado pelos sistemas de manejo, decresce a estabilidade dos agregados desse solo.

Acredita-se, todavia, que ao efeito da matéria orgânica soma-se a ação dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem. A camada superficial do solo apresenta ciclos de umedecimento e secagem mais intensos do que as camadas subsuperficiais. Esses ciclos provocam a desintegração dos ligantes orgânicos e inorgânicos do solo, que resultam na formação de agregados maiores (Horn & Dexter, 1988; Horn, 1990). Oliveira et al. (1996), investigando a ação dos ciclos de umedecimento e secagem em latossolos brasileiros, concluíram que seus efeitos sobre a formação e estabilidade de agregados maiores ocorrem nas camadas superficiais. Segundo Hermawan & Bonke (1997), a variação na estabilidade de agregados e diferentes sistemas de manejo pode ser atribuída a diferenças no teor de carbono orgânico do solo. Diversos autores encontraram correlações significativas e positivas entre o teor de carbono orgânico e os índices de estabilidade de agregados (Roth et al, 1991; Silva et al, 2006; Oliveira, 2008).

CONCLUSÕES

Os sistemas de manejo das áreas cultivadas que receberam resíduos da cana-de-açúcar (SMVT e SMV) apresentaram menor degradação dos atributos físicos e químicos do solo.

Os parâmetros 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 da cana-de-açúcar, reduzindo o risco de deformações plásticas.

A adição de resíduos da cana-de-açúcar exerce uma ação no aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), no solo investigado.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) e a porcentagem de agregados maiores do que 2,0 mm estáveis em água (AGRI) demonstraram ser bons parâmetros de avaliação da estabilidade de agregados e apresentaram boas correlações com o carbono orgânico total (COT) do solo.

A estabilização dos agregados na profundidade de 0-0,20 m foi dependente do teor de matéria orgânica do solo.

LITERATURA CITADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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 Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

CAMARGO, O. A., et al. Características físicas de solo que recebeu vinhaça. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo**, Campinas, v. 14, 1988.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 386-391, 1999.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. rev. e ampl. 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n. 14, p. 99-105, 1990.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 527-538, 1998.

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 Pédologie, Bondy, v. 26, p. 37-50, 1991.

CHAN, K.Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1376-1382, 1997.

CHAVES, J.C.D.; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 212, p. 53-60, set./out. 2001.

CHINN, C.; PILLAI, U.P.P. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland, Australia. **Geoderma**, 144: 491-504, 2008.

CORRÊA, J.C. Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 6, p. 917-921, 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA . Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 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 Suelos**. San José:lica, 1985. 216p.

GÓES, G.B.; GREGGIO, T.C.; CENTURION, J.F.; AMAURI, N.B.; ANDRIOLI, I. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, v. 10, n. 2, p. 116-122, 2005.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 17-21, 1978.

HARRIS, R.F.; CHESTERS, G.; ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, v. 18, p. 107-169, 1966.

HERMAWAN, B. & BONKE, A. A. Effect of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.44, p. 109-120, 1997.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press, 1980. 413p.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 17, p. 265-289, 1990.

HORN, R.; DEXTER, R. A. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.13, p. 253-266, 1988.

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).

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part 1, p. 499-510.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1, p. 425-442 (Agronomy, 9).

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.**, v. 31, p. 325-335, 1990.

McNABB, D.H.; STARTSEV, A.D.; NGUYEN, H. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:1238 -1247, 2001.

MELLO, F. A. F., et al. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1983.400p.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre : Gênese, 2000. 174 p.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre : Gênese, 2000.174 p.

MILNE, R.M.; HAYNES, R.J. Comparative effects of annual and permanent dairy pastures on soil physical properties in the Tsitsikamma region of South Africa. **Soil Use Manage**, 20: 81 - 88, 2004.

MUNNER, M.; OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, n. 2, p. 411-423, 1989.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica em água quente na estabilidade de agregados de um Latossolo argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 5, p. 1410-1415, 2006.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, Netherlands, v. 76, p. 319-337, 1984.

OLIVEIRA, M.; CURI, N.; FREIRE, J.C. Influência do cultivo na agregação de um Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 317-322, 1983.

OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M.; REGAZZI, A.J.; FIGUEIREDO, M.S. Efeito de ciclos de umedecimento e secagem sobre a estabilidade de agregados em água de quatro latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 509-515, 1996.

OLIVEIRA, V. S. **Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas**. 2008. 81 f. Tese (Doutorado). UFRPE, Recife, 2008.

ÖREN, A.H.; KAYA, A. Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals. **Environmental Monitoring and Assessment**, 84: 85-98, 2003.

RICHARD,G.; COUSIN,I.; SILLON,J.F.; BRUAND,A.; GUÉRIF,J. Effect of compaction on the porosity of a silty loam: influence on unsaturated hydraulic properties. **Eur. J. Soil Sci.**, 52 :49 -58, 2001.

ROTH, C. H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G. B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com agregados de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, p. 241-248,1991.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Versão 9.0. Viçosa: 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**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado). UFRGS, Porto Alegre, 2003.

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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 1350-1358, 1999.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 179-201, 1990

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. New York: Academic Press, 1995. 267p.

TEDESCO, M. J. ; GIANELO, C. ; BISSANI, C. A. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 188 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

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

WU, L.; SWAN, J.B.; ALLMARAS, R.R.; LOGSDON, S.D. Tillage and traffic influence on water and solute transport in corn-soybean systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 185-191, 1995.

CAPÍTULO II

COMPORTAMENTO DA COMPACTIBILIDADE DE UM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO NÃO SATURADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

RESUMO

A compactação do solo agrícola é um fenômeno de grande interesse para a Ciência do Solo e o estudo investigativo de diferentes sistemas de manejo no sentido de encontrar um sistema que degrade menos o solo é o objetivo maior da pesquisa sobre o comportamento mecânico do solo. De maneira geral, para um mesmo nível de energia de compactação, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor será a densidade máxima e maior a umidade crítica de compactação e, conseqüentemente, o risco de degradação física do solo fica reduzido. Dessa forma, o objetivo deste trabalho experimental foi o estudo do comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar. Foram selecionadas áreas em talhões de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa três áreas, representativas de três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira, denominada Usina Santa Clotilde, localizada no Estado de Alagoas. Dessa forma, os tratamentos avaliados corresponderam a uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área 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 uma mata nativa (MN). Os atributos físicos, a densidade seca máxima e a umidade crítica de compactação foram avaliados nas profundidades de 0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 metros. Para avaliar a capacidade dos resíduos da cana-de-açúcar em dissipar parte da energia compactante, foram realizados ensaios de Proctor, utilizando quatro níveis de energia de compactação. A avaliação da energia dissipada pelos resíduos foi realizada em amostras deformadas apenas da profundidade de 0-0,20 metros. Os sistemas de manejo cultivados com cana-de-açúcar que receberam adição de resíduos da cana apresentaram atributos físicos e comportamento mecânico mais favoráveis ao bom desenvolvimento desta cultura. Dentre os diferentes sistemas de manejo cultivados com cana-de-açúcar, o mais eficiente na dissipação da energia compactante foi a área sob SMVT, seguido da área sob SMV, respectivamente com os valores de 54 e 41% de dissipação para o nível mais alto de energia de compactação. Verificou-se, também, que a dissipação da energia de compactação foi maior para os níveis de energia mais altos.

Palavras-chave: compactação do solo, matéria orgânica, dissipação de energia de compactação, ensaio de Proctor, resíduos da cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The agricultural soil compaction is a phenomenon of great interest to the Soil Science and investigative study of different management systems to find a management system that degrades the soil is less the goal of more research on the mechanical behavior of soil. In general, for the same level of energy of compression, the greater the organic matter content, the lower the maximum density and the higher the humidity critical compaction, and consequently the risk of physical degradation of soil is reduced. Thus, the aim of this experimental work was the study of the mechanical behavior of a dystrophic cohesive Yellow Latosol of coastal tablelands cultivated with sugarcane. Plots were selected in areas of production in the growing of sugar cane and is subject to search three areas, representative of three management systems adopted by sugarcane production unit, called Santa Clotilde mill, located in the State of Alagoas. Thus, the treatments were a cultivated area under irrigation management system (SMI), an area under the management system of fertigation with vinasse (SMV) and area under a management system with application of vinasse + filter tart (SMVT). These management systems were compared and for a witness default, played by a native forest (NF). The physical attributes, the maximum density and moisture critical compaction were evaluated in the depths of 0-0,20; 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m. To assess the capacity of waste from sugar cane to dissipate the energy of compactification, tests were performed Proctor, using four levels of energy energy of compactification. For the evaluation of the energy dissipated by residue, deformed samples were used only the depth of 0-0,20 m. The management systems cultivated with sugarcane that received the addition of sugar cane waste, had mechanical behavior and physical attributes more favorable to the smooth development of the cultivation of sugarcane. For the different management systems cultivated with sugar cane, the best efficacy in the dissipation of energy of compactification was in the area under SMVT, followed by the area under SMV, respectively with the values of 54 and 41% of dissipation to the highest level energy compaction. There is, also, that the dissipation of energy of compression is greater for higher levels of energy.

Key words: soil compaction, organic matter, dissipation of energy of compression, Proctor test, residue from sugarcane.

INTRODUÇÃO

O potencial produtivo da cana-de-açúcar decorre de fatores relacionados ao clima, ao solo e à variedade cultivada. O solo pode apresentar limitações ao crescimento da cana-de-açúcar pela capacidade de fornecer nutrientes, água e oxigênio. Todavia, atributos físicos do solo favoráveis ao crescimento do sistema radicular são necessários para alcançar e manter altas produtividades. Os solos agrícolas devem ter espaço poroso adequado para o movimento de água e gases e resistência favorável à penetração das raízes (Imhoff et al., 2000).

O solo agrícola é um material poroso formado pelas partes sólida, líquida e gasosa, cada uma delas tem importância no comportamento mecânico do solo. Quando o solo saturado começa a ser drenado, esses espaços passam a ser preenchidos pelo ar e o solo torna-se não saturado; nesse caso, o espaço poroso é parcialmente cheio com água e ar, apresentando interfaces ar-água. De acordo com Libardi (1984), a formação dessas interfaces, depois da drenagem, é de fundamental importância para a retenção de água pelo solo. Todavia, sabe-se que uma umidade excessiva do solo concorre para que ocorra o fenômeno de compactação.

A compactação do solo é caracterizada pela redução do volume do solo quando uma tensão externa lhe é aplicada. A compactação é tida como uma modificação no solo feita pelo homem, causada principalmente pelo manejo inadequado ou intensivo de meios mecânicos, como pressão de pneus e implementos agrícolas ou pisoteio intensivo por animais (Horn & Lebert, 1994; Hakansson & Voorhees, 1998).

Quando um solo não saturado é submetido à determinada tensão, provocando redução do volume de ar com conseqüente aumento de densidade; não havendo mudança significativa no volume de água do solo, ocorre o processo de compactação (Craig, 2007). O arranjo estrutural do solo, a consistência, a porosidade total, o número e tamanho dos poros, a difusão de gases e a taxa de infiltração de água são afetados pela compactação. Esses fatores limitam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Taylor & Brar, 1991). A redução da infiltração de água no solo causa um escoamento superficial maior, diminui a quantidade de água armazenada e pode resultar em erosão do solo (Soane & Ouwerkerk, 1994).

A compactação do solo reduz a quantidade de macroporos, espaço poroso responsável pela aeração, e aumenta a proporção de microporos. Como

conseqüência, ocorre um decréscimo na taxa de difusão de oxigênio através do solo e aumenta a força com que a umidade do solo é retida (Donnelly & Shane, 1986; Reisinger et al., 1988; Muroski & Hassan, 1991). Vomocil & Flocker (1961) concluíram que um valor mínimo crítico para macroporos é de 10%.

A compactação do solo provoca redução de seu índice de vazios, que pode ser definido como a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (Seixas, 2000). Os espaços porosos perdidos com o efeito da compactação constituem, na maioria, macroporos, fundamentais na movimentação de água e ar no interior do solo.

Barzegar et al. (2000) reportam que numerosos estudos indicaram que resíduos culturais como palha de milho, palha de aveia, outros resíduos tenros e muito úmidos reduzem a compactabilidade do solo. No entanto, a influência da adição de matéria orgânica sobre a compactação do solo não é bem documentada, particularmente no que se refere a conteúdo de matéria orgânica, a conteúdo de água do solo no momento da compactação e energia de compressão das máquinas agrícolas.

Ainda, Barzegar et al. (2000) observaram que a incorporação de resíduos culturais ao solo podem reduzir sua susceptibilidade à deformação por compactação. Assim, a compactabilidade de três diferentes solos os quais continham diferentes quantidades de resíduos culturais da cana-de-açúcar foi investigada a distintos conteúdos de água e cargas de compactação. As cargas de deformação por compactação foram escolhidas para simular as energias aplicadas pelas colheitadeiras, caminhões “trucks” e transportadores através do teste de Proctor Normal. Aos 3 solos, sendo um de textura franco arenosa, outro de textura argilosa e, o terceiro siltoso argiloso, foram adicionados e misturados resíduos de cana de açúcar nas doses de 0, 6, 9 e 15,3 g kg⁻¹ de solo, correspondentes a 0, 27 e 60 Mg ha⁻¹. A mistura de solo e resíduos de cana de açúcar foi compactada de acordo com o procedimento padrão do teste de Proctor normal e, a densidade do solo foi avaliada. A compactação foi avaliada a diferentes níveis de umidade e relacionada aos limites de consistência do solo. Nessas condições, o resíduo da cana de açúcar foi efetivo na redução da densidade do solo com as diferentes cargas aplicadas para os vários níveis de umidade. Os resultados sugerem que a compactabilidade provocada pelas máquinas pesadas no cultivo da cana-de-açúcar

no conteúdo de água mais baixo que o limite de plasticidade, pode ser reduzida pela incorporação de 60 Mg ha^{-1} do resíduo.

O solo poderá está compactado quando a proporção do volume total de poros em relação ao volume total do solo é inadequada para o máximo desenvolvimento da planta. A compactação provoca o aumento da densidade do solo e o decréscimo do volume de poros de maior diâmetro (Dexter, 2004). Para Geist et al. (1989), o nível de compactação considerado prejudicial corresponde a um acréscimo entre 15 a 20% no valor inicial da densidade média do solo.

Segundo Silva et al. (2006b), os solos cauliniticos são mais sensíveis à compactação do que os oxídico-gibbsíticos. Os mesmos autores concluíram que o incremento da microporosidade com a compactação aumentou a retenção de água no solo. Entretanto, este aumento não se expressou em termos de conteúdo de água disponível no solo.

Streck et al. (2004), investigando o efeito de níveis de tráfego de máquinas agrícolas nas alterações das propriedades físicas de um solo franco-arenoso, concluíram que o tráfego de máquinas sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração, reduziu a porosidade total e a macroporosidade e não afetou a microporosidade. A resistência à penetração foi a propriedade física que melhor evidenciou o efeito do número de tráfego do rodado da máquina sobre o solo. A estrutura do solo é alterada em função da compactação, uma vez que os macroagregados são destruídos e a estrutura se degrada, resultando em baixo desenvolvimento do sistema radicular (Tavares Filho et al., 1999).

De acordo com Barzegar et al. (2000), o incremento da carga de compactação aumentou a susceptibilidade dos solos a compactação. Os autores, também, concluíram que o resíduo da cana-de-açúcar foi efetivo na redução da compactação de solos coesos em conteúdos de água mais baixo do que 0,80 PL (PL= limite de plasticidade) no ensaio Proctor normal.

Estudos sobre comportamento mecânico de solos agrícolas comprovaram que a compactação do solo é fortemente influenciada pela carga por eixo e número de passagens da máquina. Outros fatores tais como dimensões do pneu, conteúdo de umidade e pressão dos pneus, também tiveram efeito significativo na compactação do solo. A compactação do solo foi definida nas três primeiras passagens do trator. O aumento do número de passagens do trator demonstrou que não existe efeito significativo na compactação. Os modelos de predição da compactação do solo são

animadores, pois tem proporcionado boas estimativas da compactação do solo, como confirmados pelas relações entre os valores estimados e observados (Canillas & Salokhe, 2001).

A principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo periódico, plantio, tratos culturais e colheita (Flowers & Lal, 1998). Horn et al. (1995) complementam, afirmando que não somente a pressão estática causa compactação, mas também as forças dinâmicas resultantes da vibração do trator tracionando implementos e pelo patinamento.

Segundo Camargo & Alleoni (1997), o uso intensivo de máquinas, associado ao aumento do peso dos tratores agrícolas, vem tornando comuns os problemas de compactação em solos agrícolas. A avaliação da degradação do solo pelo fenômeno da compactação tem sido feita, investigando-se alguns parâmetros físicos, dentre os quais: densidade, porosidade, condutividade hidráulica (Ishag et al., 2001; Mcqueen & Shepherd, 2002), agregados estáveis em água (Silva et al., 2000; Beutler et al., 2001). De acordo com Batey & McKenzie (2006), existe uma variedade de critérios diagnósticos disponível para detectar a compactação no campo. Uma aproximação cuidadosa e metodológica é recomendada para examinar a face do solo exposta em uma trincheira e quando possível comparação entre o solo compactado e o solo não compactado equivalente deve ser feito. A avaliação de mudanças das propriedades físicas do solo causadas pela compressão inclui a tensão do solo, a resistência à penetração, o grau de agregação, a porosidade inter-agregados e a densidade relativa. Métodos indiretos, baseados em mudanças secundárias causadas pela compactação, incluem distribuição de raízes, percolação de água e umidade relativa.

Fenner (1999), estudando as relações entre solo e tráfego de máquinas, concluiu que o teor de água no solo durante o tráfego tem efeito significativo sobre as deformações físicas do solo e que a primeira passagem da máquina causou a maior parte da deformação da superfície.

Os sistemas de manejo do solo podem provocar forte influência nos parâmetros de compactação e compressibilidade do solo. Figueiredo et al. (2000), comparando diversos sistemas de manejo em Latossolo Roxo (LR), verificaram que a densidade do solo máxima e a umidade crítica de compactação não foram significativamente afetadas. Todavia, os autores encontraram coerência entre os valores da umidade crítica de compactação, obtidos pelo ensaio de Proctor normal e os obtidos usando os critérios relativos a 90% do limite de plasticidade. As curvas de compactação do

solo assemelham-se quanto à forma, independentemente da classe de solo (Caputo, 2000). A curva de compactação depende de vários fatores, tais como: energia de compactação, textura e matéria orgânica do solo (Silva et al., 1986; Ohu et al., 1986; Ekwue & Stone, 1997).

A influência da matéria orgânica no fenômeno de compactação é significativa, devido ao seu alto poder de absorção de água, dificultando a compactação (Silva et al., 1986; Dias Júnior, 2000), por proporcionar melhorias na estrutura do solo (Stone & Ekwue, 1993) e apresentar menor densidade que a do solo (Ekwue & Stone, 1995). Gupta et al. (1989) concluíram que os sistemas de manejo podem proporcionar um arranjo mais compacto das partículas primárias e agregados decorrentes da compactação, o que pode resultar em alterações na sua capacidade de suporte de carga.

Braída et al. (2006), avaliando o efeito da matéria orgânica sobre o comportamento mecânico de duas classes de solo, verificaram que o acúmulo de matéria orgânica proporcionado por diferentes sistemas de manejo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo, significando que ele se tornou mais difícil de ser compactado. Os mesmos autores também observaram que a presença de palha picada sobre o solo, durante a realização do ensaio Proctor, resultou em dissipação de parte da energia de compactação.

Proctor (1933) contribuiu significativamente para o estudo da compactação de solos, observando a relação existente entre o peso específico do solo, sua umidade e a energia de compactação. A curva de compactação é fundamental na avaliação da compactabilidade do solo, sendo construída plotando-se os valores de umidade versus densidade do solo. O ensaio de Proctor é realizado com o solo desestruturado, o que teoricamente torna o solo mais susceptível à compactação (Braída et al., 2006). Para Figueiredo et al. (2000), o ensaio de Proctor tem demonstrado ser um método adequado para determinação da umidade crítica de compactação dos solos agrícolas.

O grau de compactação ou compactação relativa é a razão entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo obtida no ensaio Proctor. Esse parâmetro representa o grau de consolidação dos constituintes do solo (Craig, 2007) e tem sido utilizado como indicador de susceptibilidade à compactação do solo.

Linstrom & Voorhess (1994) consideram como elevados valores acima de 86% para grau de compactação. Valores superiores a esse limite crítico podem afetar negativamente a produtividade de certas culturas, devido à redução da capacidade de armazenamento de água, em razão da menor quantidade de macroporos no solo. Entretanto, o grau de compactação, isoladamente, não é suficiente para diagnosticar o efeito de atributos físicos do solo sobre as plantas, mas apenas um indicador de prováveis limitações ao desenvolvimento do sistema radicular.

Foloni et al. (2006), avaliando o crescimento aéreo e radicular da soja e de mais cinco leguminosas de verão, de acordo com a compactação do solo em sub-superfície, verificaram que o impedimento físico em sub-superfície não diminuiu a produção total das raízes da maioria das espécies estudadas, apesar de ter alterado a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo.

Beulter & Centurion (2004), investigando o efeito da compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja em Latossolo Vermelho de textura média, observaram que a partir do decréscimo de 18% da densidade radicular na profundidade entre 5 a 15 cm, para uma resistência à penetração de 0,85 MPa, ocorre redução na produtividade da soja.

O volume poroso do solo está relacionado com a forma de manejo, como: práticas de mecanização, tipo de cultura plantada, tipo de solo, biologia e macroestrutura do solo (Reynolds et al., 1994; Azooz & Arshad, 1996; Gimenez et al., 1997).

Pereira et al. (2005), estudando a contribuição dos sistemas de manejo no processo de agregação do solo, concluíram que o tamanho dos agregados tem efeito significativo e positivo no processo de sua compactação e a mudança da compactação do solo pode ser prevista em função do estado inicial do solo antes do umedecimento, da pressão aplicada e do teor de água.

Dexter (1991) comenta que raízes de plantas podem amenizar a impedância mecânica do solo. O sistema radicular provoca desarranjos no solo ao penetrar camadas com alta resistência mecânica e, ao sofrer decomposição, deixa canais (bioporos), que contribuem para a infiltração de água e difusão de gases, melhorando a qualidade do solo (Bennie, 1996). Camargo & Alleoni (1997) denominam plantas descompactadoras aquelas que apresentam raízes com capacidade elevada de penetração em camadas de solo com alta impedância mecânica.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi o estudo do comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar, tendo como objetivos específicos: verificar o efeito dos sistemas de manejo na cultura da cana-de-açúcar sobre os parâmetros de compactação e avaliar a capacidade da matéria orgânica em dissipar parte da energia de compactação produzida pelo tráfego de máquinas.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado na Fazenda Pau Amarelo, da Usina Santa Clotilde S/A, localizada no município de Rio Largo, litoral do Estado de Alagoas. O clima do local é tropical chuvoso com verão seco, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual gira em torno de 1.752 mm e a temperatura média anual em torno de 29° C.

O solo estudado foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso (EMBRAPA, 2006), relevo plano, textura média/argilosa. O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos areno-argilosos, com a fração areia constituída basicamente de quartzo e a fração argila constituída de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (Jacomine et al., 1975).

Foram selecionadas áreas em talhões de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa três áreas, representativas de três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira. Dessa forma, os tratamentos avaliados foram uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). As três áreas cultivadas são exploradas com cana-de-açúcar há mais de 20 anos, sendo o relevo plano a suave ondulado, que é característico dos solos dos Tabuleiros Costeiros. Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha padrão, reproduzida por solo em condições naturais (floresta nativa).

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 são descritos a seguir e foi o mesmo nas três áreas estudadas. O preparo periódico do solo constituiu-se 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, usou-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. Finalmente, foram abertos sulcos de aproximadamente 0,25 m 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 três áreas

cultivadas, a lavoura da cana-de-açúcar foi queimada antes da operação de colheita. Na colheita, a cana é cortada manualmente e transportada para o caminhão por meio de carregadoras convencionais.

Na área cultivada sob sistema de irrigação é aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cultura. A adubação química da cana-planta foi realizada de acordo com 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 de fertirrigação com vinhaça são aplicados, por ciclo de cultura, 300 m³.ha⁻¹ de vinhaça diluída, sendo a aplicação realizada por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de N e na cana-soca 80 kg ha⁻¹ de N.

Na área cultivada com aplicação de vinhaça + torta de filtro são aplicados 30 Mg.ha⁻¹ de torta de filtro associada com vinhaça, sendo a aplicação da mistura vinhaça + torta realizada por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de N e na cana-soca 80 kg ha⁻¹ de N.

As amostras foram coletadas ao acaso, nas áreas com os 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 nas entrelinhas de plantio da cana-de-açúcar. A coleta do solo foi realizada no mês de fevereiro de 2007.

Na análise granulométrica empregou-se o método do densímetro de Boyoucos, e na dispersão física do solo utilizou-se um agitador mecânico, durante 15 minutos, e um dispersante químico (EMBRAPA, 1997). A densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo obtida com anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A porosidade total do solo foi calculada para cada amostra, baseando-se na densidade do solo (D_s) e das partículas (D_p), pela expressão seguinte:

$$P_t = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (1)$$

Onde P_t = porosidade total (m³.m⁻³); D_s = densidade seca do solo (Mg.m⁻³)
e D_p = densidade de partículas (Mg.m⁻³).

O índice de vazios (e) foi calculado baseando-se na densidade das partículas (D_p) e do solo (D_s), por meio da expressão (McBride e Joosse, 1996) a seguir :

$$e = \left(\frac{D_p}{D_s} - 1 \right) \quad (2)$$

Para avaliar o teor de matéria orgânica do solo determinou-se o teor de carbono orgânico, em cada uma das amostras, seguindo-se o método descrito pela Embrapa (1997).

A condutividade hidráulica saturada foi determinada a partir de amostras indeformadas, em que tubos de PVC foram adaptados como parâmetros de carga constante, sendo a condutividade hidráulica obtida pela aplicação da equação de Darcy, após os valores de fluxo alcançarem a estabilidade (EMBRAPA, 1997).

A estabilidade dos agregados foi determinada por via úmida, sendo as amostras coletadas ao acaso, com auxílio de enxadão e pá de corte. Na separação de agregados por via úmida, adotou-se o procedimento descrito por Kemper e Rosenau (1986), através de peneiramento em água, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Os agregados assim preparados foram transferidos para dois conjuntos de cinco peneiras de 3,35; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm de diâmetro de malha, sendo submetidos a agitação vertical (42 ciclos por minuto), durante quinze minutos, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio para secagem em estufa a 105° C, durante 24 horas. Em seguida, pesou-se e calculou-se a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados.

O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade no qual o solo começa a fissurar, quando rolado, para formar pequenos cilindros de dimensões padronizadas, sendo determinado segundo a ABNT (1984 b).

O limite de liquidez (LL) é o teor de umidade no qual o solo apresenta resistência ao cisalhamento tão pequena que flui quando vibrado sob condições padronizadas, fechando uma ranhura também padrão, sendo o ensaio realizado em conformidade com a ABNT (1984a). A quantidade de água necessária, a ser adicionada ao solo, para levar o seu limite de plasticidade para o de liquidez é uma indicação da sua plasticidade, sendo denominada de índice de plasticidade(IP).

O ensaio Proctor Normal, descrito por Proctor (1933), foi realizado com o emprego de um equipamento denominado cilindro de Proctor, marca Contenco, em conformidade com a metodologia descrita pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Todas as amostras deformadas dos solos dos sistemas de manejo foram coletadas nas três profundidades estudadas. A amostra de solo é compactada em um anel metálico de aproximadamente 1.000 cm^3 , em três camadas de solo, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm, correspondendo a uma energia de $60,2 \text{ kJ.m}^{-3}$.

Para a construção da curva de compactação, o solo foi compactado em cinco teores de umidade, com intervalos de cerca de $0,02 \text{ kg.kg}^{-1}$ de umidade, de modo que o terceiro ponto da curva de compactação ficasse próximo da umidade crítica de compactação (U_{cc}). Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo de prova (topo e fundo), para determinação do teor de água do solo. Plotando-se os valores de umidade **versus** densidade do solo, constrói-se a curva de compactação.

Com o objetivo de mensurar a capacidade dos sistemas de manejo em absorver parte da energia de compactação, realizou-se o ensaio de Proctor, usando-se níveis de energia de 24,1; 36,1; 60,2 e 84,3 kJ.m^{-3} , que correspondem, respectivamente, a 10, 15, 25 e 35 golpes (Braida et al., 2006).

Nesta investigação, utilizaram-se amostras deformadas apenas da profundidade de 0-0,20 m e o sistema de manejo da área cultivada sob irrigação foi considerado testemunha, pois o mesmo não recebeu resíduos da cana-de-açúcar. Com base nos resultados obtidos para o sistema de manejo irrigado, ajustou-se a seguinte equação:

$$D_{S_{\max}} = a + b (E_c) + c (E_c)^2 \quad (3)$$

Em que: $D_{S_{\max}}$ = densidade do solo (Mg.m^{-3}); E_c = energia de compactação (kJ.m^{-3}); a, b e c = coeficientes de ajuste.

Com base na equação 3, que descreve a relação entre densidade do solo e energia de compactação, estimou-se a energia de compactação correspondente, a partir dos dados de densidades dos sistemas de manejo supra-descritos.

Desta maneira, com base na energia de compactação empregada nos diferentes sistemas de manejo e na energia equivalente correspondente, foi possível prever a energia dissipada pelos sistemas de manejo.

O grau de compactação do solo foi determinado de acordo com Caputo (2000), através da razão entre a densidade do solo e a densidade máxima de compactação.

A caracterização física do solo dos diferentes sistemas de manejo foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, cujas características granulométricas, densidades do solo e da partícula e carbono orgânico total estão explicitadas na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do Latossolo Amarelo Distrocoeso, nos diferentes sistemas de manejo e profundidades

Profund. (m)	Granulometria			Densidade		*COT (%)
	Areia	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila	Solo (Mg.m ⁻³)	Partícula	
MATA (MN)						
0 - 0,20	655	90	255	1,05	2,62	3,05
0,20 - 0, 40	553	140	307	1,21	2,64	1,85
0,40 - 0,60	547	110	343	1,27	2,68	1,23
IRRIGADO (SMI)						
0 - 0,20	680	70	250	1,65	2,67	1,26
0,20 - 0, 40	580	80	340	1,72	2,63	0,87
0,40 - 0,60	572	98	330	1,63	2,66	0,80
VINHAÇA+TORTA (SMVT)						
0 - 0,20	625	100	275	1,49	2,61	1,59
0,20 - 0, 40	520	110	360	1,56	2,68	0,85
0,40 - 0,60	437	120	443	1,58	2,67	0,69
VINHAÇA (SMV)						
0 - 0,20	588	90	322	1,56	2,64	1,51
0,20 - 0, 40	550	90	360	1,63	2,62	0,68
0,40 - 0,60	435	110	455	1,62	2,64	0,60

* Carbono orgânico total.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação de parâmetros físicos do solo

Existe uma forte relação entre as condições físicas do solo e um bom desenvolvimento das plantas, sendo a densidade do solo uma característica indicativa de mudanças nas propriedades físicas que regulam o crescimento radicular dos vegetais e ao mesmo tempo serve para avaliar o impacto do tráfego de máquinas na degradação do solo.

Os resultados obtidos para a densidade seca do solo (D_s) são apresentados na tabela 2. Verificam-se aumentos significativos nos valores de densidade do solo nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar, em comparação ao solo sob mata nativa.

Tabela 2. Densidade seca do solo (D_s) e teor de carbono orgânico total (COT) em função dos sistemas de manejo e profundidades

Camadas	Sistemas de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
m	D_s ($Mg.m^{-3}$)			
0 - 0,20	1,65ABa	1,05Cb	1,49 Ba	1,56 ABa
0,20 - 0,40	1,72 ABa	1,21CBa	1,56 Ba	1,63 ABa
0,40 - 0,60	1,63 ABa	1,27Ba	1,58 ABa	1,62 ABa
	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

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

Na profundidade de 0-0,20 m, que apresenta média de densidade do solo de $1,44 Mg.m^{-3}$, o solo sob sistema de manejo irrigado apresentou maior incremento (57%),

em resposta às pressões externas de compactação provocadas pelo tráfego de máquinas.

O menor aumento (42%) na densidade do solo verifica-se na área cultivada sob o sistema de manejo com aplicação de vinhaça+torta de filtro. De maneira geral, o comportamento mecânico do solo em resposta às cargas externas é mais favorável para os sistemas de manejo que proporcionaram aporte no teor de matéria orgânica do solo. O processo de compactação pelas máquinas (Tabela 2), observado nos sistemas de manejo das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, diminui o volume de poros do mesmo e, conseqüentemente, o peso por unidade de volume aumenta. Acredita-se que pode ser um indicativo de compactação do solo quando a relação entre volume total de poros e o volume total do solo é inadequada para o máximo desenvolvimento do vegetal.

Nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, a tendência observada para os valores de densidade do solo foi semelhante ao comportamento já descrito. Todavia, o efeito dos sistemas de manejo no fenômeno de densificação do solo foi mais evidente na camada superficial. Para as camadas subsuperficiais, à ação de cargas externas de compressão soma-se o caráter coeso, característica edáfica deste solo. O caráter coeso está relacionado às condições climáticas, ao relevo e ao material de origem, constituído de sedimentos terciários do grupo Barreiras (Jacomine et al., 1975). Comportamento semelhante para densidade do solo em sistemas de manejo com cana-de-açúcar foi observado por diversos pesquisadores (Silva, 2003; Oliveira, 2008). O cultivo intensivo do solo tende a aumentar a densidade das camadas superficiais.

Constatou-se, também, que a densidade seca do solo (D_s) apresentou correlação significativa ($p < 0,05$) e negativa ($r = -0,8161$) com o diâmetro médio ponderado úmido (DMPu). A figura 1 evidencia uma forte relação funcional entre D_s e DMPu, comprovando que agregados maiores resultam em menores valores para densidade do solo, demonstrando que a adoção de sistemas de manejo com adição de resíduos orgânicos é uma prática benéfica para o solo.

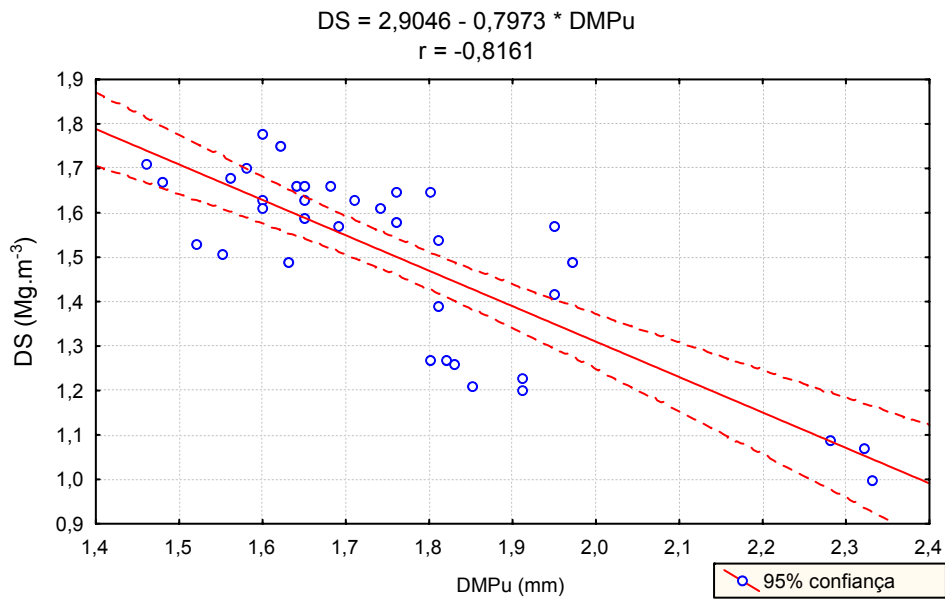


Figura 1. Relação entre a densidade seca do solo (Ds) e o diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu).

Os macroagregados formados e estabilizados por forças mecânicas estão sempre associados à fração lábil da matéria orgânica do solo, que responde rapidamente às mudanças dos sistemas de manejo (Mielniczuk, 1999).

A porosidade total (Pt) do solo (Tabela 3), nos diferentes sistemas de manejo, apresentou variação de 0,38 a 0,60 m³ m⁻³. Houve efeitos significativos para sistemas de manejo e profundidades sobre a porosidade total do solo. O sistema de manejo sob solo irrigado, na profundidade de 0-0,20 m, apresentou a maior redução (37%), enquanto na área sob aplicação de vinhaça+torta de filtro contata-se a menor redução (28%). As comparações foram feitas em relação ao solo sob mata nativa. Para as demais profundidades, o comportamento foi semelhante ao da camada superficial.

Em relação ao índice de vazios (e), a tendência dos resultados foi semelhante à observada para a porosidade total, ou seja, a densificação do solo proporcionou alterações no sistema poroso, provavelmente transformando ambientes de macroporos em microporos.

Tabela 3. Porosidade total e índice de vazios em função dos sistemas de manejo e profundidades

Camadas	Sistemas de manejo				
	SMI	MN	SMVT	SMV	Média
m	Porosidade total (m ³ m ⁻³)				
0 - 0,20	0,38	0,60	0,43	0,41	0,45a
0,20 - 0,40	0,35	0,54	0,42	0,38	0,42b
0,40 - 0,60	0,39	0,53	0,41	0,39	0,43b
Média	0,37C	0,56A	0,42B	0,39C	
	Índice de vazios (e)				
0 - 0,20	0,63Ba	1,49Aa	0,76Ba	0,70Ba	
0,20 - 0,40	0,53Ba	1,17Ab	0,72Ba	0,60BCa	
0,40 - 0,60	0,65BCa	1,12Ab	0,69Ba	0,63BCa	

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Na figura 2, a condutividade hidráulica saturada do solo para os sistemas de manejo está representada por barras verticais. Os valores de condutividade hidráulica sofreram redução nos solos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, em comparação ao solo sob mata nativa, nas três profundidades estudadas. Na profundidade de 0-0,20 m, a maior redução (57%) foi constatada na área sob irrigação. A condutividade hidráulica saturada sofreu redução, em resposta à compactação do solo, provocada pelo cultivo intensivo. Esse comportamento pode estar relacionado à reorganização do sistema poroso, ou seja, da distribuição do diâmetro dos poros, não continuidade vertical dos poros (Marsili et al., 1998).

A redução da condutividade hidráulica saturada é imputada, também, ao decréscimo da macroporosidade com o aumento da densidade do solo, uma vez que o movimento de água no solo está diretamente associado à porosidade de drenagem (Silva, 2003). Segundo Cerdà (1996), solos com baixa condutividade hidráulica são mais susceptíveis à erosão, devido à maior quantidade de água que permanece na superfície, resultando em maior escoamento superficial e conseqüentemente maiores perdas de solo e água. Portanto, os solos das áreas

cultivadas com cana-de-açúcar apresentam maior risco de degradação e, destes, o solo sob sistema de irrigação encontra-se em posição mais desfavorável.

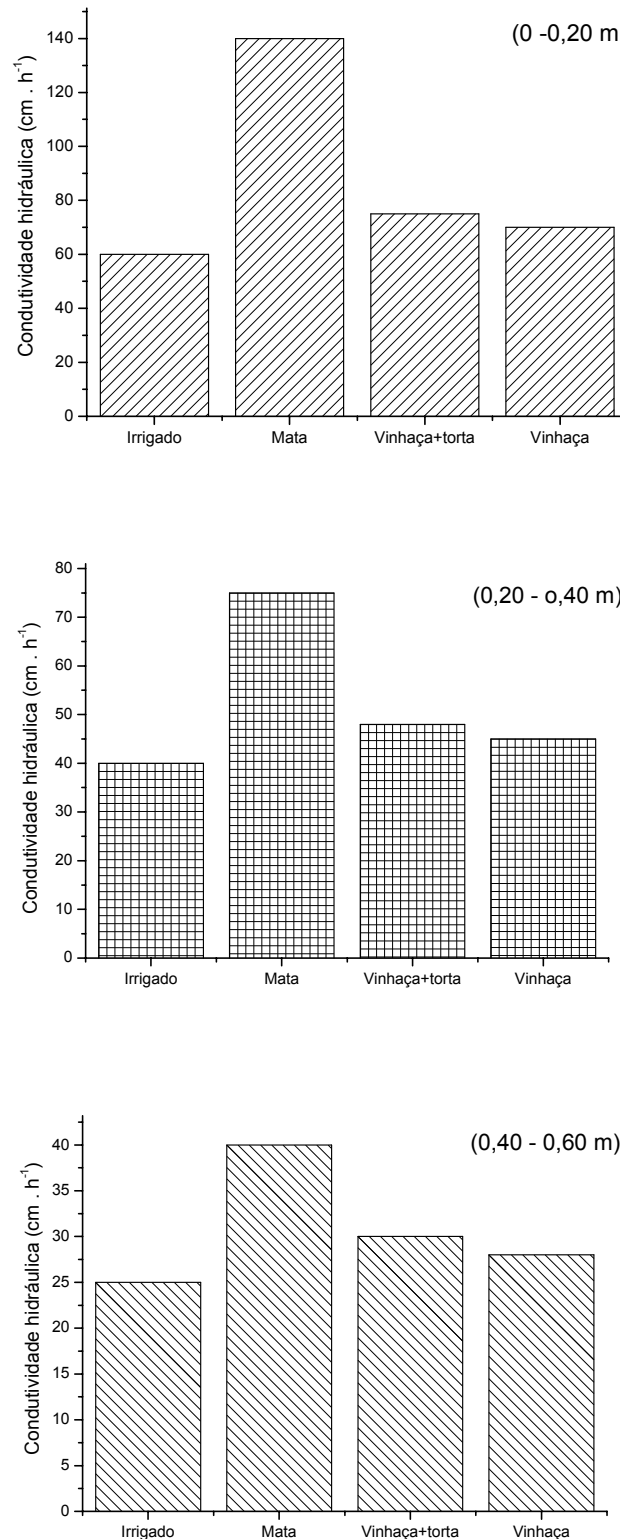


Figura 2. Condutividade hidráulica saturada em função dos sistemas de manejo: mata nativa, área irrigada, área de vinhaça + torta de filtro e área de vinhaça, nas profundidades estudadas.

A tabela 4 evidencia um aumento do grau de compactação dos solos sob os sistemas de manejo com cana-de-açúcar, em comparação ao solo sob mata nativa. Constata-se, também, um aumento nos valores do grau de compactação com as profundidades amostradas. Conforme afirma Carter (1990), quando o grau de compactação (GC) supera 0,86 a 0,90, ocorre uma grande redução nos macroporos, afetando os movimentos dos fluidos, e estes estariam relacionados com um menor desenvolvimento das plantas. Linstrom & Voorhess (1994) consideram como limite crítico para o grau de compactação valores acima de 0,86.

Tabela 4. Grau de compactação do solo (GC) e teor de carbono orgânico total (COT) em função dos sistemas de manejo e profundidades.

Camada	Sistemas de manejo				
	SMI	MN	SMVT	SMV	Média
m	GC				
0 - 0,20	0,91	0,74	0,88	0,90	0,86b
0,20 - 0,40	0,99	0,82	0,94	0,98	0,93a
0,40 - 0,60	0,94	0,86	0,94	0,96	0,93a
Média	0,95A	0,81B	0,92A	0,95A	
	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	

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Ainda se observa, na tabela 4, na profundidade de 0-0,20 m, que apenas os solos sob mata nativa (GC=0,74) e vinhaça+torta de filtro (GC=0,88) ficaram abaixo do limite crítico para o grau de compactação. O grau de compactação não é suficiente para caracterizar o processo de compactação do solo, sendo considerado apenas um indicador de prováveis limitações ao desenvolvimento das plantas (Assis, 2002). O resultado do grau de compactação para as áreas sob cultivo com cana-de-açúcar denota que o aporte de matéria orgânica proporcionado pelos sistemas de manejo não foram ainda suficientes para provocar as alterações esperadas. Melhores

resultados não foram ainda alcançados, possivelmente, em função da queima da cana-de-açúcar antes da colheita. Essa prática cultural contribui para a perda do carbono orgânico do solo. Conforme afirmam Mendonza et al. (2000), a mobilização mecânica do solo e a queima da cana-de-açúcar resultam em degradação nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Na figura 3 constata-se que o grau de compactação apresentou correlação significativa ($p < 0,01$) e negativa ($r = -0,7797$) com o diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), evidenciando uma boa relação funcional entre as duas variáveis para o solo estudado. A relação funcional demonstra que o aumento do diâmetro médio ponderado úmido reduz o grau de compactação, ratificando a manutenção de sistemas de manejo que forneçam matéria orgânica ao solo e adotar novas práticas culturais na lavoura da cana-de-açúcar que não destruam a matéria orgânica. O resultado do grau de compactação pode explicar a tendência no comportamento do índice de vazios (e), onde se verifica que os valores médios dessa variável estatisticamente foram iguais para os sistemas de manejo sob cultivo com cana-de-açúcar.

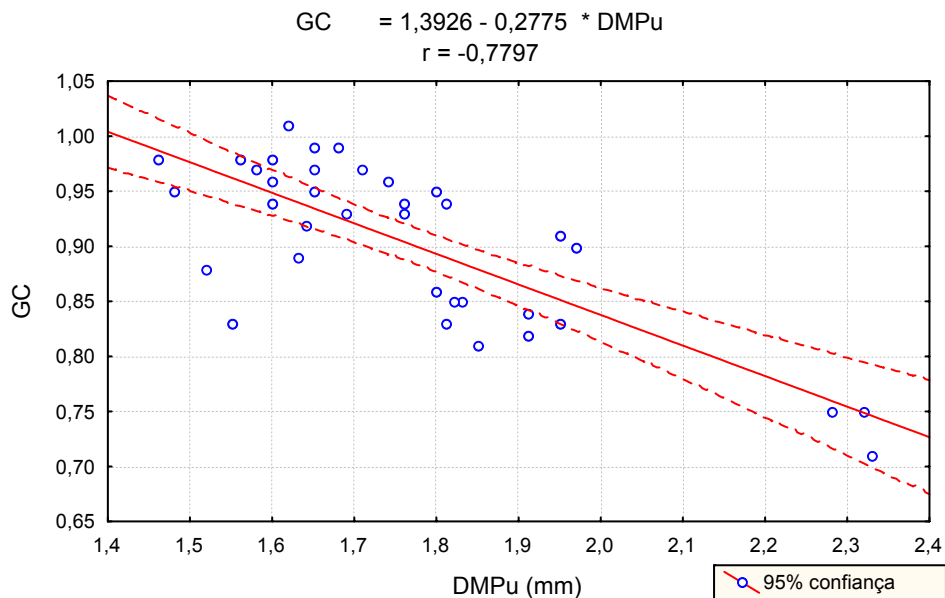


Figura 3. Relação entre o grau de compactação (GC) e o diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu).

Avaliação de parâmetros da curva de compactação e dissipação de energia

As curvas de compactação, obtidas através do ensaio de Proctor normal para os sistemas de manejo, nas três profundidades investigadas, são apresentadas na figura 4. O comportamento geral das curvas de compactação para os sistemas de manejo com cana-de-açúcar, em comparação ao solo de mata nativa, apresentou deslocamento à esquerda e para cima, nas três profundidades, resultando em maiores valores de densidade máxima de compactação e menores valores de umidade crítica de compactação.

Analisando-se, separadamente, os sistemas de manejo com cana-de-açúcar, verifica-se, na tabela 5, que o solo da área sob irrigação com $D_{max}=1,808 \text{ Mg.m}^{-3}$ e $U_{cc}=0,145 \text{ kg.kg}^{-1}$ apresentou o pior desempenho nos parâmetros de compactabilidade do solo. Esse comportamento está associado à redução significativa da matéria orgânica neste solo, em comparação àquele sob mata nativa. As áreas sob cultivo com cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça + torta de filtro e de vinhaça apresentaram um comportamento mais próximo das condições do solo sob mata nativa. Alterações nos parâmetros de compactabilidade do solo, devido às reduções nos teores de matéria orgânica, foram observadas por diversos pesquisadores (Barzegar et al., 2000; Braida et al., 2006; Silva et al., 2006a). Geralmente, para um mesmo nível de energia de compactação, associa-se maior teor de matéria orgânica do solo com menor valor de densidade máxima de compactação e maior valor de umidade crítica.

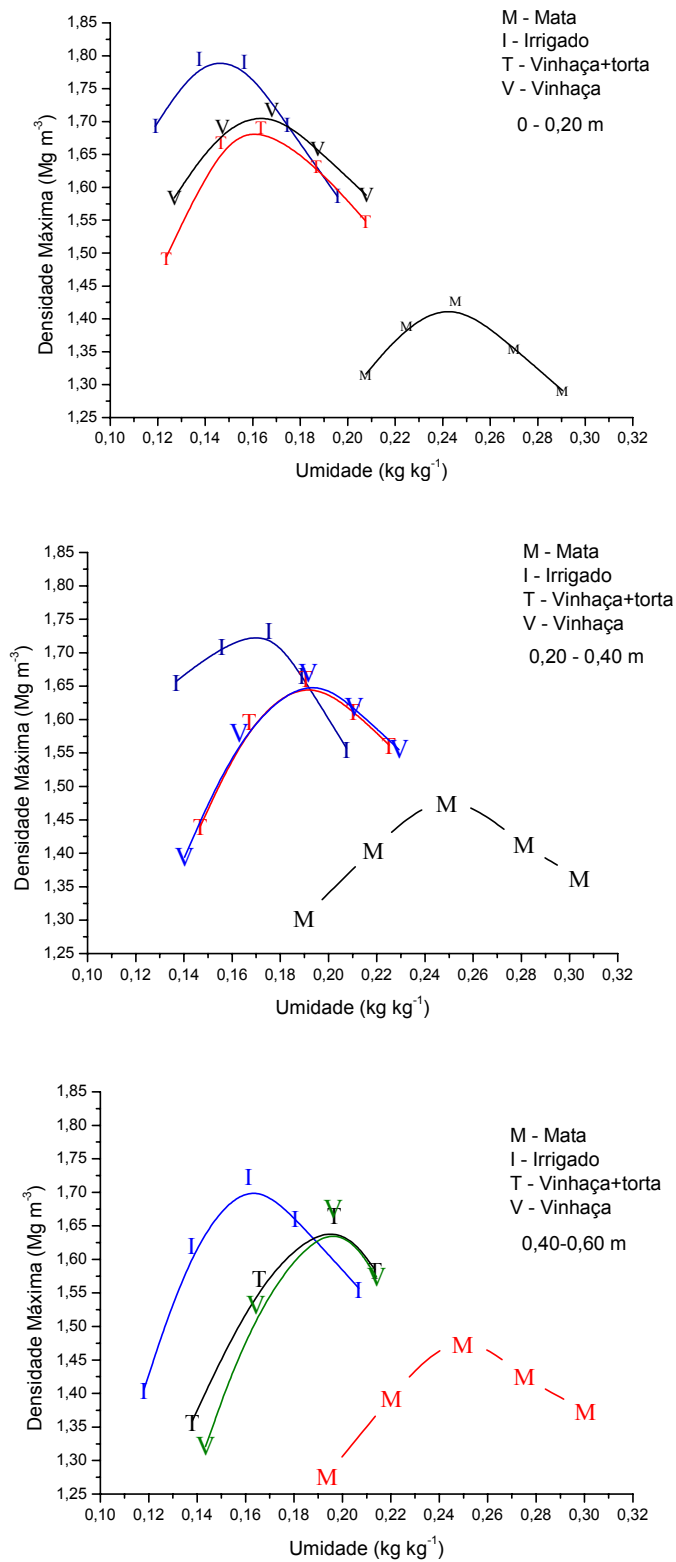


Figura 4. Curvas de compactação do solo dos quatro sistemas de manejo nas três profundidades estudadas.

Tabela 5. Umidade crítica de compactação (Ucc) e densidade seca máxima de compactação (Dmáx) obtidas pelo ensaio Proctor Normal e teor de carbono orgânico total (COT), para os diferentes sistemas de manejo e profundidades

Camada m	Sistemas de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
	Ucc (kg. kg ⁻¹)			
0 - 0,20	0,145Cc	0,242Aa	0,160Bb	0,162Bb
0,20 - 0,40	0,170Ca	0,249Aa	0,185Ba	0,189Ba
0,40 - 0,60	0,157Cb	0,250Aa	0,191Ba	0,191Ba
	Dmáx (Mg.m ⁻³)			
0 - 0,20	1,808Aa	1,430Ca	1,695Ba	1,729Bab
0,20 - 0,40	1,742Ab	1,478Ca	1,670Ba	1,672Bb
0,40 - 0,60	1,734Ab	1,475Ba	1,681Aa	1,687Aab
	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

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

A tabela 6 apresenta as relações entre o limite de plasticidade e a umidade crítica de compactação. A análise evidencia o efeito da adição de resíduos pelos manejos culturais da cana-de-açúcar sobre o comportamento mecânico do solo, com destaque para aquele sob mata nativa, em que a umidade crítica de compactação (0,24 kg.kg⁻¹) supera o limite de plasticidade (0,22 kg.kg⁻¹), na profundidade de 0-0,20 m; para as camadas subsuperficiais (0,20-0,40; 0,40-0,60 m) o comportamento foi semelhante. Para os sistemas de manejo sob cultivo com cana-de-açúcar, verifica-se que a umidade crítica de compactação situa-se um pouco abaixo do limite de plasticidade nas três profundidades. O solo nas condições da mata nativa apresenta baixo risco de compactação. A tendência da relação Ucc/LP para o solo estudado foi semelhante à observada por Ojeniyi & Dexter (1979), que preconizam

uma razão entre U_{cc}/LP em torno de 0,90, sugerindo que a umidade crítica de compactação (U_{cc}) seja estimada próxima de 90 % do limite de plasticidade (LP).

Segundo Camargo & Alleoni (1997), a grande capacidade de retenção de água da matéria orgânica reduz a quantidade de água entre as partículas minerais do solo, sendo necessário uma maior quantidade de água para que a densidade máxima do solo seja alcançada.

Tabela 6. Limite de plasticidade (LP), umidade correspondente a 90% do limite de plasticidade e umidade crítica de compactação (U_{cc}), considerando os sistemas de manejo e profundidades

Profundidade m	Limites	Sistemas de manejo			
		Irrigado	Mata	Vinhaça+torta	Vinhaça
		kg. kg ⁻¹			
0 - 0,20	LP	0,18	0,22	0,19	0,19
	90 % LP	0,16	0,20	0,17	0,17
	U_{cc}	0,15	0,24	0,16	0,16
0,20 - 0,40	LP	0,19	0,23	0,21	0,23
	90 % LP	0,17	0,21	0,19	0,21
	U_{cc}	0,17	0,25	0,19	0,19
0,40 - 0,60	LP	0,20	0,24	0,22	0,24
	90 % LP	0,18	0,22	0,20	0,22
	U_{cc}	0,16	0,25	0,19	0,19

O melhor momento para realizar o preparo periódico do solo é aquele em que a umidade do solo estiver abaixo do limite de plasticidade, pois nesta condição a massa de solo encontra-se friável. A zona de consistência friável constitui a faixa ótima de umidade para mobilização mecânica do solo, pela facilidade de esboroamento quando o solo é submetido às pressões provocadas pelas ferramentas ativas dos implementos agrícolas.

Na figura 5 observa-se que a densidade máxima de compactação apresentou correlação significativa e negativa ($r = - 0,7429$) com o diâmetro médio ponderado úmido (DMPu), comprovando uma forte relação funcional entre essas duas variáveis para o solo pesquisado. Esse fato reforça a importância da adoção de sistemas de

manejo que promovam o aumento no teor de matéria orgânica do solo. A densidade seca máxima do solo foi influenciada pelo diâmetro médio ponderado dos agregados, tornando-se menor à medida que o diâmetro dos agregados aumentou.

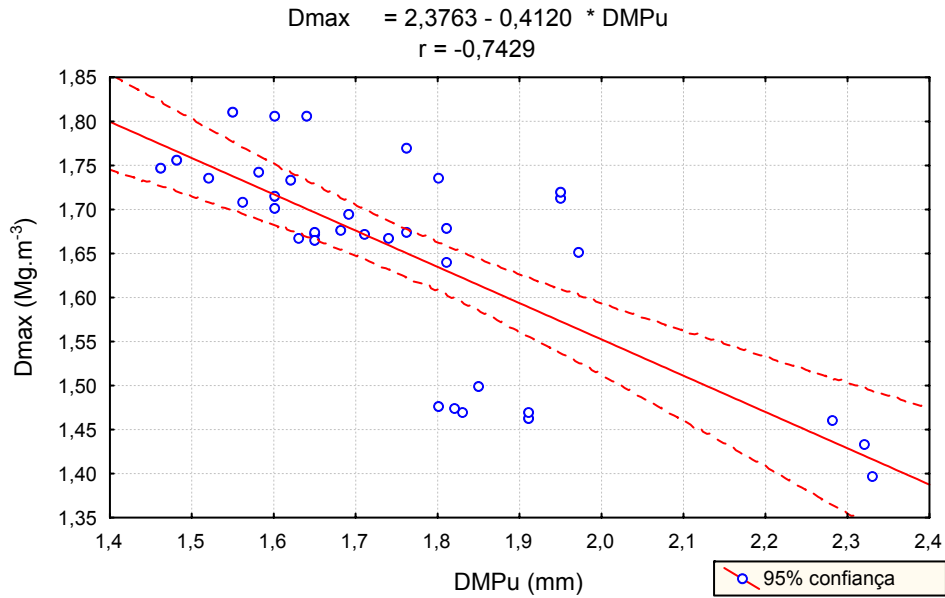


Figura 5. Relação entre a densidade seca máxima do solo (D_{max}) e o diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu).

Na figura 6 pode-se verificar que a densidade seca máxima de compactação (D_{max}) apresentou, também, correlação significativa ($p < 0,01$) e positiva ($r = 0,9074$) com a densidade seca do solo (D_s), evidenciando uma forte relação funcional entre as duas variáveis para o solo investigado.

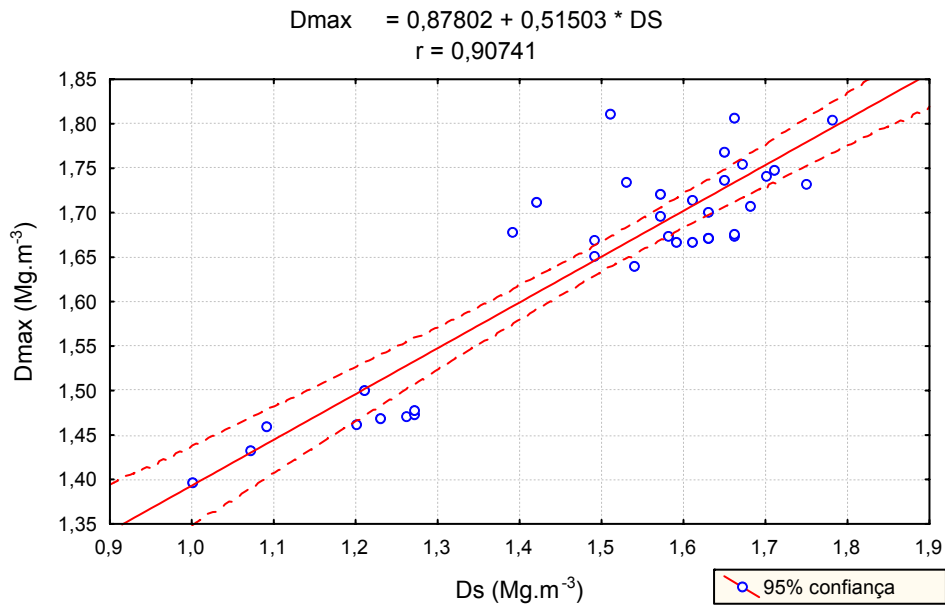


Figura 6. Relação entre a densidade seca máxima do solo (D_{max}) e a densidade seca do solo (D_s).

A figura 7 expressa o resultado da análise de regressão múltipla linear da densidade seca máxima de compactação (D_{max}), em função da densidade seca do solo (D_s) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMP_u). A estimativa de D_{max} baseou-se no cálculo, através de modelo linear ajustado, com intervalo de confiança ao nível de 95% para o valor estimado, o que significa uma probabilidade de erro da ordem de 5%. Neste modelo de predição para a densidade máxima de compactação, obtém-se $R^2=0,8234$, que corresponde a um coeficiente de correlação da ordem de $r=0,9074$ entre os valores observados e estimados. Além disso, é alcançado elevado nível de significância estatística, pois a probabilidade p de erro (do tipo I) é $p<0,00001$. Pode ainda ser constatado, na figura 7, que um $R^2=0,8234$ significa que as covariáveis explicam 82% do fenômeno.

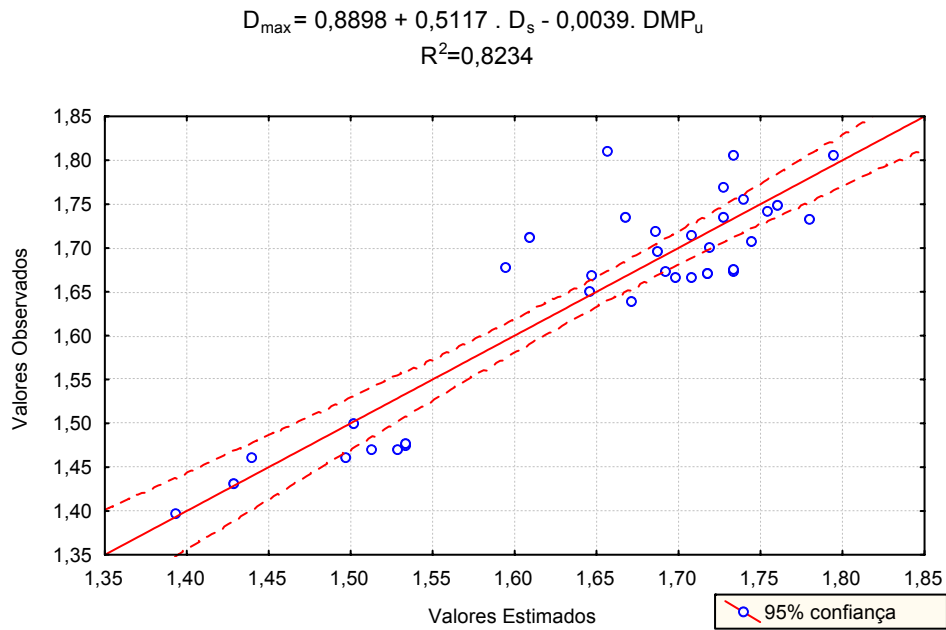


Figura 7. Modelo de densidade seca máxima do solo (D_{\max}), valores estimados contra valores observados.

A densidade máxima de compactação cresceu com o aumento da energia de compactação, enquanto a umidade crítica de compactação (U_{cc}) apresentou comportamento inverso (tabela 7). A área sob irrigação apresentou maior incremento (25%) no valor da densidade máxima e maior redução (38%) da umidade crítica, na média, em comparação com o solo sob mata nativa. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de ser o sistema de manejo que proporcionou menor aporte de matéria orgânica. Enquanto, as áreas de vinhaça + torta de filtro e de vinhaça, apresentaram aumentos da ordem de 18 e 20 % e reduções de 30 e 32%, respectivamente, nos valores médios para a variável densidade máxima do solo e umidade crítica de compactação, também, em comparação com o solo sob mata nativa. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Braida et al. (2006), levando os autores a concluir que o acúmulo de matéria orgânica, devido a diferentes sistemas de manejo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para a compactação do solo, significando que este se tornou mais difícil de compactação. Acharya & Sharna (1994) e Dao (1996), investigando o efeito da matéria orgânica sobre a densidade do solo, concluíram que ela foi menor quando sobre o mesmo havia resíduos vegetais. Essas conclusões ratificam os resultados aqui apresentados

Tabela 7. Umidade crítica de compactação (U_{cc}) e densidade seca máxima de compactação ($D_{máx}$) obtidos pelo ensaio de Proctor para os diferentes sistemas de manejo e níveis de energia, na profundidade de 0 a 0,20 m

Níveis de energia	Sistemas de manejo				
	SMI	MN	SMVT	SMV	Média
kJ.m^{-3}	$U_{cc} \text{ (kg kg}^{-1}\text{)}$				
24,1	0,180Ca	0,278Aa	0,205Ba	0,186Ca	
36,1	0,151Cb	0,260Ab	0,176Bb	0,173Bb	
60,2	0,145Cb	0,242Ac	0,160Bc	0,162Bb	
84,3	0,132Cc	0,207Ad	0,152Bc	0,145Bc	
	$D_{max} \text{ (Mg m}^{-3}\text{)}$				
24,1	1,680	1,360	1,620	1,640	1,575a
36,1	1,735	1,376	1,634	1,664	1,602b
60,2	1,808	1,430	1,695	1,729	1,665c
84,3	1,861	1,512	1,743	1,786	1,725d
Média	1,771A	1,419B	1,673C	1,705D	

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Na figura 8 pode-se visualizar que a densidade seca máxima do solo cresceu com o aumento da energia de compactação para o sistema de manejo sob irrigação, com desenho de função quadrática ($R^2=0,9862$). O sistema de manejo irrigado foi utilizado como padrão na construção da curva de densidade seca máxima do solo em função dos níveis de energia de compactação, pelo fato do mesmo não ter recebido resíduos da cana-de-açúcar.

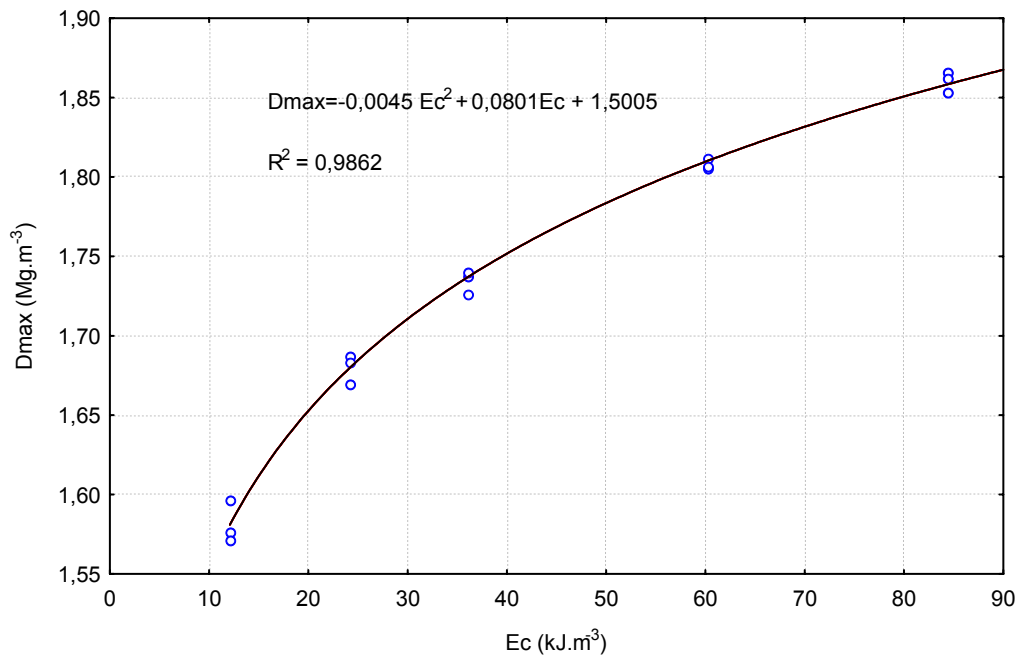


Figura 8. Densidade seca máxima do solo (área irrigada) em função de diferentes níveis de energia de compactação adotados no ensaio Proctor, na profundidade de 0-0,20 m.

Com base nos valores de densidade seca máxima (D_{max}) obtidos nos demais sistemas de manejo em função de diferentes níveis de energia de compactação e empregando-se a equação que descreve a relação D_{max} vs. E_c (Figura 8), estimou-se a energia de compactação equivalente. Posteriormente, também foi estimada a porcentagem de energia dissipada pelos sistemas de manejo (Tabela 8).

Observando os resultados (Tabela 8), verifica-se que, dentre os sistemas de manejo cultivados com cana-de-açúcar, o mais eficiente na dissipação de energia de compactação foi a área cultivada sob aplicação de vinhaça+torta de filtro, seguido da área sob aplicação de vinhaça. Apesar da prática cultural da queima da cana-de-açúcar antes da colheita, se confirma que o acúmulo de matéria orgânica proporcionado pelos dois sistemas de manejo supra-citados foi responsável pela dissipação de parte da energia de compactação, significando que o solo se tornou mais difícil de ser compactado. Constata-se, também, que a dissipação da energia de compactação é maior para os níveis de energia de compactação mais altos.

Tabela 8. Densidade seca do solo (D_s), energia equivalente (E_e) e energia dissipada (E_d) em função da energia de compactação (E_c) e dos sistemas de manejo no ensaio Proctor (médias de três repetições) na camada de 0 a 0,20 m

E_c kJ.m^{-3}	Manejos	$D_{\text{máx}}$ Mg m^{-3}	E_e		E_d %
			kJ.m^{-3}	%	
84,3	SMI	1,861	84,3	100,0	0,00
	MN	1,512	-----	-----	-----
	SMVT	1,743	38,7	45,9	54,10
	SMV	1,786	49,3	58,5	41,50
60,2	SMI	1,808	60,2	100,0	0,00
	MN	1,430	-----	-----	-----
	SMVT	1,695	29,0	48,2	51,80
	SMV	1,729	35,7	59,3	40,70
36,1	SMI	1,735	36,1	100,0	0,00
	MN	1,376	-----	-----	-----
	SMVT	1,634	18,6	51,5	48,50
	SMV	1,664	23,5	65,1	34,90
24,1	SMI	1,680	24,1	100,0	0,00
	MN	1,360	-----	-----	-----
	SMVT	1,620	16,4	68,1	31,90
	SMV	1,640	19,6	81,3	18,70
12,1	SMI	1,582	12,1	100,0	0,00

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

CONCLUSÕES

Os sistemas de manejo do solo cultivado com cana-de-açúcar provocaram alterações nos atributos físicos do solo, aumentando a densidade e reduzindo a porosidade total, o índice de vazios e a condutividade hidráulica saturada em relação ao solo sob mata nativa.

A densidade máxima de compactação do solo sofreu o efeito dos diferentes sistemas de manejo, decrescendo na seguinte ordem: SMI > SMV > SMVT > MN; a umidade crítica de compactação seguiu a mesma ordem, porém de forma crescente.

A densidade máxima de compactação é inversamente proporcional ao diâmetro médio ponderado úmido (DMPu), isto é, tornou-se menor à medida que o DMPu dos agregados do solo aumentou.

A densidade máxima de compactação do solo investigado é diretamente proporcional à densidade do solo, ou seja, tornou-se maior à medida que a densidade do solo (D_s) aumentou.

Dentre os sistemas de manejo do solo cultivado com cana-de-açúcar, o mais eficiente na dissipação de energia compactante foi a área sob SMVT, seguida da área sob SMV, respectivamente com os valores de 54 e 41% de dissipação para o nível mais alto de energia de compactação. Verifica-se, também, que a dissipação da energia de compactação é maior para os níveis de energia mais altos.

LITERATURA CITADA

ACHARYA, C. L.; SHARMA, P. D. Tillage and mulch effects on soil physical environment root growth nutriente uptake and yield of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.32, p.291-302,1994.

ASSIS, R. L. **Avaliação dos atributos físicos e da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa**. 2002. 141 f. Tese (Doutorado). Unesp, Botucatu, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Can. J. Soil Sci.**, v. 76, p. 143-152, 1996.

BARZEGAR, A. R.; ASOODAR, M. A.; ANSARI, M. Effectiveness of sugar-cane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.57, n.1, p.167-172,2000.

BATEY,T.; McKENZIE,D.C. Soil compaction: identification directly in the field. **British Society of Science**, Soil Use and Management, v.22, p.123-131, 2006.

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Eds.). **Plant roots**. 2. ed., New York: M. Dekker, 1996. p. 453-470.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; PEREIRA FILHO, I.A.; CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 129-136, 2001.

BEULTER, A.N.;CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

CAMARGO, O.A. de; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, 1997. 132p.

CANILLAS,E.C.; SALOKHE,V.M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 61, p. 167-178, 2001.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6ª ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. v.1, 234p.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine loamy sands. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.

CERDÀ, A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, Amsterdam, v.69, n.2, p.217-232,1996.

CRAIG, R.F. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007. 365p.

DAO, T. H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agron. J.**, v.88, p.141-148,1996.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 87-100, 1991.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Part 1. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n.2, p. 337-346, 2000.

DONNELLY, J.R.; SHANE, J.B. Forest ecosystem responses to artificially induced soil compaction. 1. Soil physical properties and tree diameter growth. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, p. 750-754, 1986.

EKWUE, E.J.; STONE, R.J. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 38, p. 357-365, 1995.

EKWUE, E.J.; STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 40, p. 317-323, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ªed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FENNER, P.T. **Relações entre tráfego e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 f. Tese (Livre Docência). Unesp, Botucatu, 1999.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 487-493, 2000.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 21-35, 1998.

FOLONI, S.J.S.; LIMA, S.L.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 49-57, 2006.

GEIST, J.M.; HAZARD, J.W.; SEIDEL, K.W. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 53, p. 946-950, 1989.

GIMENEZ, D.; ALLMARAS, R.R.; HUGGINS, D.R.; NATER, E.A. Prediction of the saturated hydraulic conductivity-porosity dependence using factals. **Soil Sci. Soc. Am.J.**, v. 61, p. 1285-1292, 1997.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Adv. Agron.**, v. 42, p. 311-338, 1989.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (Eds.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC, 1998. p. 167-179.

HODER, R.J.; LOVELL, C.E. A new look at compaction process in fills. **Bull. Assoc. Eng. Geol.**, v. 16, p. 487-99, 1979.

HORN, R., et al. Compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van (Eds.). **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994, p. 45-69 (Developments in Agricultural Engineering, 11).

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

ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 153-161, 2001.

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, Sudene-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35).

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1, p. 425-442 (Agronomy, 9).

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera**. Piracicaba: Cena/USP, 1984. 232p.

LINSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994, p. 265-286 (Developments in Agricultural Engineering, 2).

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 Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 185-199, 1998.

MCBRIDE, R. A.; JOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soil : pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , 60 : 373 - 380, 1996.

MCQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endo-aquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 63, n. 1, p. 93-107, 2002.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solos de tabuleiros cultivados com cana-de-açúcar com e sem queima da palha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.201-207, 2000.

MIELNICZUK, J. **Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas**. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecosistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gênese, 1999. p. 1-8.

MUROSKEY, D.L.; HASSAN, A.E. Impact of tracked and rubber-tired skidders traffic on a wetland site in Mississippi. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng**, v. 34, n. 1, p. 322-327, 1991.

OHU, J.O.; RAGHAVAN, G.S.V.; MCHYES, E.; MEHUYS, G. Shear strength prediction of compacted soils with varying organic matter contents. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 29, p. 351-355, 1986.

OJENIYI, S.O.; DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostrutured produced by tillage. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 22, p. 339-343, 1979.

OLIVEIRA, V. S. **Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas**. 2008. 81 f. Tese (Doutorado). UFRPE, Recife, 2008.

PEREIRA, J.O.; BENEZ, S.H.; SILVA, S.L.; TABILE, R.A.; TOLEDO, A. Comportamento compressivo de um nitossolo: efeito do tamanho de agregados, do teor de água e da pressão aplicada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 749-757, set./dez. 2005.

PROCTOR, R.R. **Fundamental principles of soil compaction**. Engineering News Record, 1933.

REISINGER, T.W.; SIMMONS, G.L.; POPE, P.E. The impact of timber harvesting on soil properties and seedling growth in the South. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 12, n. 1, p. 58-67, 1988.

REYNOLDS, W.D.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Characterization of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 33, p. 117-131, 1994.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Versão 9.0. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, 2005.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75 f. Tese (Livre Docência). USP, Piracicaba, 2000.

SILVA, A. J. N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado). UFRGS, Porto Alegre, 2003.

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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.579-585, 2006a.

SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 842-847, 2006b.

SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.

STONE, R.J.; EKWUE, E.J. Maximum bulk density achieved during soil compaction as effected by the incorporation of three organic materials. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 36, p. 1713-1719, 1993.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p.755-760, 2004.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 393-399, 1999.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

VOMOGIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1961.

CAPÍTULO III
COMPORTAMENTO DA COMPRESSIBILIDADE DE UM
LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO NÃO SATURADO SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO DA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

Os sistemas de manejo que promovem adição de resíduos de cana-de-açúcar ao solo podem provocar alterações nos parâmetros de compressibilidade do solo. O objetivo do trabalho foi investigar o comportamento da compressibilidade de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas, em função da adição de resíduos orgânicos nos diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar investigados. A pesquisa experimental foi realizada na Usina Santa Clotilde, localizada no Estado de Alagoas. Foram escolhidas áreas em talhões com cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira, a saber: 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 uma mata nativa (MN). Para o ensaio de compressão uniaxial foram coletadas amostras indeformadas, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, com a intervenção de um amostrador metálico. As amostras preparadas foram ensaiadas por compressão uniaxial, nas seguintes umidades gravimétricas: 0,10; 0,14; 0,18 e 0,22 kg.kg^{-1} . No ensaio de compressão foram aplicados carregamentos verticais correspondentes a tensões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa e realizadas leituras aos trinta segundos. Após o ensaio, as amostras foram levadas à estufa, para determinação da umidade gravimétrica. Os resultados foram submetidos a análise de variância e análise de regressão múltipla da tensão de precompactação e do índice de compressão, considerando as seguintes variáveis independentes: densidade seca do solo (D_s), umidade gravimétrica (U_g), diâmetro médio ponderado de agregados via úmida (DMPu) e energia dissipada (E_d). O teor de água do solo e os diferentes sistemas de manejo investigados promoveram alterações nos parâmetros de compressibilidade do solo estudado. Os resultados permitem concluir que houve relação significativa e linear entre a tensão de precompactação observada e a estimada. O mesmo comportamento foi verificado para o índice de compressão observado e o estimado.

Palavras-chave: tensão de precompactação, índice de compressão, resíduos orgânicos, tabuleiros costeiros.

ABSTRACT

The management systems that promote additions of waste from sugarcane to the ground may cause changes in the parameters of the compressibility of the soil. The objective was to investigate the behavior of the compressibility of a dystrophic cohesive Yellow Latosol of coastal tablelands of Alagoas, according to the addition of organic waste provided by the different management systems investigated. The experimental research was conducted at Santa Clotilde mill, located in the State of Alagoas. Plots were chosen in areas with sugarcane, and the search was focused on three management systems adopted by sugarcane production unit, namely: a cultivated area under irrigation management system (SMI), an area under the management system of fertigation with vinasse (SMV) and area under a management system with application of vinasse + filter tart (SMVT). These management systems were compared and for a witness standard, represented by a native forest (NF). For the uniaxial compression test were collected undisturbed samples, in the depths of 0-0,20 m and 0,20-0,40 m, with the assistance of a metal sampler. The prepared samples were tested by uniaxial compression, the following gravimetric moisture: 0,10, 0,14, 0,18 and 0,22 kg.kg⁻¹. In the test of compression loads were applied to corresponding vertical stress of 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 and 1600 kPa and readings taken at thirty seconds. After the test samples were taken to the oven for gravimetric determination of moisture. The results were submitted to analysis of variance and multiple regression analysis of the tension of pre-consolidation and the index of compression, according to the following independent variables: bulk density (Ds), gravimetric moisture (Ug), weighted average diameter of aggregates wet (DMPu) and dissipated energy (Ed). The water content of the soil and the various management systems investigated promoted changes in the parameters of the compressibility of the soil studied. The results showed that there were significant and linear relationship between the stress of pre-consolidation observed and estimated. The same trend was observed for the index of compression observed and estimated.

Key words: pre-consolidation of tension, compression index, organic residue, coastal tablelands

INTRODUÇÃO

Compressibilidade é a capacidade que o solo não saturado tem em sofrer redução de volume, quando submetido a carga (Gupta & Allmaras, 1987). De acordo com Holtz & Kovacs (1981), a deformação do solo ($\frac{dh}{H}$) é definida como a diferença entre a altura inicial da amostra e a altura final após a aplicação de cada tensão, dividida pela altura inicial da amostra. O comportamento compressivo diferenciado dos solos, quando submetidos à carga externa que lhes causa deformação, pode ser influenciado pelas características físicas e químicas como a granulometria e o teor de matéria orgânica. Segundo Mantovani (1987), os solos constituídos por partículas de mesmo tamanho são menos susceptíveis a deformações, quando comparados àqueles em que existe uma maior mistura de areia, silte e argila. A explicação reside no fato de as partículas de tamanhos diferentes se arranjam e preencherem os poros do solo mais facilmente, quando submetido à carga externa.

Considerando uma massa de solo, não saturada, sendo submetida a carga externa, no seu interior se desenvolverão pressões nas fases sólida, líquida e gasosa. A distribuição das tensões encontra-se esquematicamente representada na figura 1.

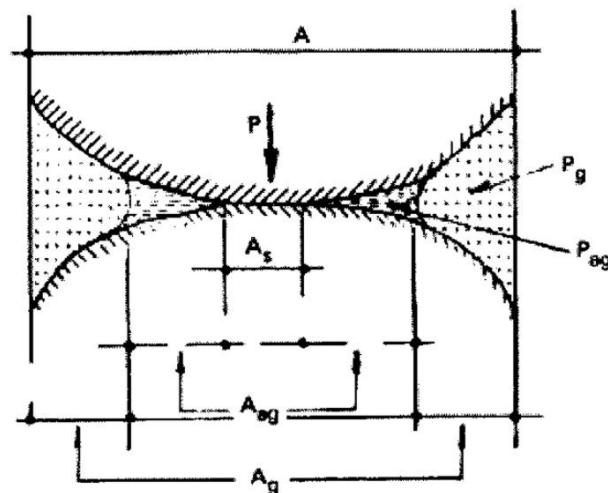


Figura 1. Distribuição das tensões nas fases sólida, líquida e gasosa em solo não saturado quando submetido a carga normal. Fonte: Caputo (2000).

Considerando duas partículas sólidas em contato sobre uma superfície de área A_s e P a força (carga) total normal ao plano de contato, na condição de equilíbrio, têm-se:

$$P = P_s + P_{ag} + P_g \quad (1)$$

Ou:

$$P = p_s \cdot A_s + p_{ag} \cdot A_{ag} + p_g \cdot A_g \quad (2)$$

Assim:

$$P/A = p_s \cdot A_s/A + p_{ag} \cdot A_{ag}/A + p_g \cdot A_g/A \quad (3)$$

em que: P = força total normal no ponto de contato; P_s = força atuante sobre a fase sólida ; A_s = área da fase sólida; P_{ag} = força atuante sobre a fase líquida; A_{ag} = área da fase líquida; P_g = força atuante sobre a fase gasosa; A_g = área da fase gasosa, e A = área total.

Sendo $P/A = \sigma$, $A_s/A = a$ e $A_{ag}/A = \chi$, reescrevendo os termos, tem-se:

$$\sigma = a \cdot p_s + (1-a)p_g + \chi(p_g - p_{ag}) \quad (4)$$

Como "a" é muito pequeno ($1-a$), tende a 1, enquanto p_s é muito alto. Assim, fazendo $a \cdot p_s = \sigma'$ (pressão efetiva), podemos reescrever:

$$\sigma' = \sigma - p_g + \chi \cdot (p_g - p_{ag}) \quad (5)$$

em que σ' = pressão efetiva no ponto de contato; σ = pressão normal no plano de contato; p_g = pressão atuante sobre o ar e χ = coeficiente de resistência proporcional ao grau de saturação do solo, sendo igual a um para o solo saturado e igual a zero para o solo seco, e p_{ag} = pressão atuante no menisco de água.

A equação (5) representa o princípio das pressões efetivas, proposto por Terzaghi e generalizado para os solos não saturados por Bishop (1959). Para solos não saturados, Tower & Childs (1972) e Tower (1983) demonstraram que a tensão ou pressão efetiva (σ') pode ser determinada pela expressão:

$$\sigma' = -\chi(\Psi_m) \quad (6)$$

em que: Ψ_m é a sucção matricial do solo, e χ o parâmetro de resistência definido acima. Mosaddeghi et al. (2003), utilizando a equação (6), concluíram que o aumento da resistência do solo, definida pela tensão de pré-compactação, devido à sucção matricial do solo, pode ser explicada em termos de tensão efetiva (σ').

As deformações físicas do solo devem-se a uma complexa interação de fatores internos e externos do solo (Semmel & Horn, 1995). Os fatores internos são: histórico de tensões, umidade do solo, textura do solo, estrutura do solo, densidade inicial do solo e matéria orgânica. Os fatores externos estão relacionados com o tipo, intensidade e frequência da carga aplicada (Horn, 1988).

A compressão dos solos agrícolas, decorrente das operações agrícolas mecanizadas, pode alterar a distribuição e o tamanho dos poros e, como consequência, a pressão com que a água é retida (Larson & Gupta, 1980). Horn & Lebert (1994) afirmam que a variação da pressão da água no solo altera o seu comportamento compressivo. Carpenedo (1994), estudando o comportamento mecânico de Latossolos, também, investigou e constatou a existência de uma relação entre a pressão de sucção matricial e a compressibilidade solo.

O caráter coeso é uma característica pedogenética de solos dos tabuleiros costeiros, típica de horizontes subsuperficiais de textura média, argilosa ou muito argilosa, encontrados normalmente entre 30 e 70 cm de profundidade; quando secos, são muito duros ou extremamente duros, tornando-se friáveis ou firmes quando úmidos, não apresentando a quebradicidade dos fragipãs, mas, sim, uma lenta deformação, quando examinados neste estado de umidade (Ribeiro, 2001). O caráter coeso em solos do Brasil (EMBRAPA, 1999) é observado na faixa dos tabuleiros costeiros e abrange, aproximadamente, dez milhões de hectares, apenas no Nordeste brasileiro (Jacomine, 1996; Rezende, 2000).

O preparo do solo talvez seja a atividade que mais influencia no comportamento físico, pois atua diretamente na sua estrutura. Além das modificações na porosidade e na densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica (Silva et al., 1994).

De acordo com Canarache et al. (2000), a subsolagem profunda diminui significativamente a tensão de precompactação e corrobora para o aumento do índice de compressão. Entretanto, esses dois parâmetros do comportamento mecânico do solo não diferiram consistentemente com a frequência das operações de subsolagem ou com o tempo decorrido desde a última subsolagem. Os autores, também, confirmaram a existência de correlação significativa entre diversas propriedades físicas do solo (densidade, estrutura, resistência à penetração) e a tensão de precompactação, o mesmo comportamento não foi verificado para o índice de compressão. A densidade e o tamanho dos agregados do solo foram significativamente correlacionados com a produção das culturas.

Segundo Veiga et al. (2007), o sistema de plantio direto expressou alta resistência do solo a deformações, quando determinou-se as deformações pelos parâmetros de compressibilidade nas profundidades de 5 e 15 cm. A tensão de precompactação, o índice de compressão e a resistência à penetração foram correlacionados com a densidade e a porosidade do solo. As variações na pressão da água nos poros durante os testes de tensão - deformação do solo foram intimamente associadas as variações na porosidade total e a duração da aplicação da carga. A aplicação de matéria orgânica na forma de cama de frango resultou em valores de tensão de precompactação reduzida e índice de compressão mais elevado.

A tensão de pré-compactação determinada pelo método de Casagrande foi mais alto para as camadas subsuperficiais do que para as camadas superficiais do solo, e mais altas para maiores tensões de água no solo. Entretanto, foi difícil relacionar os valores obtidos com propriedades físicas do solo, tais como: distribuição de tamanho de agregados, porosidade e retenção de água no solo. Os valores de tensão de precompactação situaram-se entre 100 - 200 kPa, indicando um baixo risco de compactação da camada subsuperficial para solos da Suécia (Arvidsson & Keller, 2004).

Atualmente, no Brasil, como no mundo, existe uma grande preocupação com o aumento das terras agrícolas com problemas de compactação. Esse aumento tem como um dos principais motivos as operações agrícolas mecanizadas, principalmente quando realizadas com a umidade do solo inadequada (Silva et al., 2000).

Solos com maiores teores de argila e de matéria orgânica sofrem redução na amplitude das curvas de compactação e, como consequência, diminuição da densidade máxima do solo e aumento da umidade ótima ou crítica de compactação. Tal comportamento é explicado pelo fato da argila e da matéria orgânica influírem no poder de absorção de água no solo (Stone & Ekwue, 1995).

Soane (1990) observou que o maior poder de absorção de água pela matéria orgânica reduz a quantidade de água nas partículas minerais do solo, sendo requerida uma maior quantidade de água para as partículas se deslocarem e o solo atingir a sua densidade máxima, resultando num maior valor para a umidade ótima para compactação. A manutenção da estabilidade dos agregados tem grande influência na resistência do solo às pressões externas. Todo material orgânico apresenta uma elasticidade muito maior do que as partículas minerais do solo. Vários pesquisadores, entre eles Tisdall & Oades (1982), afirmam que a matéria

orgânica tem um papel importante na formação e estabilização dos agregados do solo.

Segundo Shang & Tiessen (1998), a estabilidade dos microagregados está associada à matéria orgânica ligada aos minerais, que constituem a fração mais estável da matéria orgânica do solo, sendo formados pela fração que está complexada às partículas de silte e argila, formando complexos organominerais primários. A união dos microagregados, entre 20 e 250 μm , forma os macroagregados (Golchin et al., 1997). Os macroagregados ($> 3000 \mu\text{m}$), formados e estabilizados por forças mecânicas e pela produção de mucilagens, durante o crescimento de raízes (Golchin et al., 1997), estão sempre associados à fração lábil da matéria orgânica do solo, que responde rapidamente às alterações de manejo (Mielniczuk, 1999).

A matéria orgânica tem uma grande importância no comportamento físico do solo, principalmente quando ele é submetido a carga externa. O solo apresenta redução da densidade e do grau de compactação quando o teor de matéria orgânica é aumentado. Mosaddeghi et al. (2000), estudando a adição de esterco ao solo observaram uma redução no efeito do tráfego e da umidade sobre a densidade e o índice de cone, aumentando o intervalo de umidade que o solo pode suportar com a aplicação de carga externa e, dessa forma, reduzindo o risco de compactação irreversível. A deformação rápida dos resíduos incorporados ao solo durante a aplicação de carga externa poderá aumentar a área de contato carga/solo, resultando possivelmente em diminuição da pressão sobre o solo.

A deformação do solo decorrente das operações agrícolas, comumente chamada de compactação, é caracterizada pela redução de seu volume quando uma pressão externa lhe é aplicada (Horn & Lebert, 1994; Hakansson & Voorhees, 1998) e depende, dentre outros fatores, do conteúdo de água, da tensão aplicada e do tipo de manejo do solo (Holtz & Kovacs, 1981).

Os sistemas de manejo podem exercer forte influência nos parâmetros de compactação e compressibilidade do solo. Silva & Cabeda (2006), estudando diversos sistemas de manejo com cana-de-açúcar em Argissolo Amarelo Coeso latossólico, textura média/argilosa, verificaram que, nos sistemas sequeiro e irrigado, a tensão de precompactação aumentou e diminuiu o índice de compressão em relação ao solo de mata, refletindo o maior grau de compactação do solo e a maior resistência dos agregados à ruptura nesses sistemas de manejo. Os mesmos autores também observaram que os parâmetros de compressibilidade foram

influenciados pelo conteúdo de água do solo, verificando que o aumento da umidade do solo resultava em menores valores de tensão de precompactação e aumentava o índice de compressão, daí inferindo haver menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo.

Apesar das propriedades mecânicas permitirem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos, ainda são poucos os trabalhos que quantificam os níveis de pressão que podem ser aplicados para evitar a compactação dos solos (Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva et al., 2001a).

A compactação influi nas propriedades e nas funções físicas, químicas e biológicas do solo, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo (Hakansson & Voorhees, 1988). O ambiente físico ao redor das raízes é caracterizado pela aeração, temperatura, umidade e resistência mecânica, sendo todas essas propriedades físicas do solo modificadas, em grau variável, pela compactação (Boone & Veen, 1994).

Em solos compactos ocorre alteração da estrutura, da densidade, da porosidade total, do tamanho e continuidade dos poros (Dexter, 1988; Horn & Lebert, 1994). Em decorrência disso, o movimento e o armazenamento da água, ar e calor também podem ser alterados, tendo sido verificados aumentos nas perdas de nutrientes por volatilização e lixiviação (Hakansson & Voorhees, 1998).

As pressões médias geralmente aplicadas sobre o solo pelos pneus de tratores e colhedoras estão entre 100 e 200 kPa, enquanto as carretas agrícolas exercem pressões que, dependendo da carga, podem alcançar valores próximos de 600 kPa (Carpenedo, 1994).

A tensão de precompactação (σ_p) tem sido utilizada como indicador da capacidade de carga dos solos não saturados, uma vez que a aplicação de cargas maiores que esse valor leva a uma compactação adicional do solo, resultando em degradação irreversível da sua estrutura (Lebert & Horn, 1991; Dawidowski et al., 2001).

A tensão de precompactação vem sendo usada para estimar a capacidade de suporte de carga do solo (Larson & Gupta, 1980; Kondo & Dias Júnior, 1999b; Dawidowski et al., 2001). Esse parâmetro quantifica a maior pressão que o solo já sofreu no passado e representa o limite máximo de carga suportado antes que a compactação adicional ocorra (Dias Júnior & Pierce, 1996). A tensão de precompactação pode ser determinada através da curva de compressão do solo, obtida do ensaio de compressão uniaxial (Horn & Lebert, 1994; Dias Júnior, 1994).

Segundo Holtz & Kovacs (1981), o estudo da tensão efetiva foi proposto por Terzaghi, em 1920, demonstrando que a resposta de um volume de solo a mudanças quando da aplicação de cargas, depende exclusivamente da tensão efetiva aplicada ao mesmo.

Salire et al. (1994), estudando o comportamento compressivo de cinco tipos de solos, observaram que o índice de compressão (C_c) aumentou com o incremento da umidade gravimétrica do solo de 0,05 até 0,20 kg.kg^{-1} , tendo o índice de compressão atingido o valor médio máximo de 0,71 para uma umidade gravimétrica de 0,20 kg.kg^{-1} . Entretanto, quando a umidade alcançou 0,25 kg.kg^{-1} o valor do índice de compressão foi reduzido para 0,56. Dias Junior (1994) observou comportamento semelhante entre a umidade gravimétrica e o índice de compressão.

A tensão de precompactação (σ_p) e o índice de compressão (C_c) podem ser preditos a partir de propriedades físicas de fácil mensuração, como a densidade do solo, umidade gravimétrica, resistência do solo à penetração. A predição desses parâmetros possibilita avaliar o estado mecânico do solo visando o seu uso, manejo e planejamento sustentável da mecanização agrícola (Silva et al., 2000; Imhoff et al., 2004; Lima et al., 2006a).

Silva et al. (2000), utilizando modelos de predição da tensão de precompactação e do índice de compressão para duas classes de solos e diferentes manejos, concluíram que existe relação da densidade inicial e dos graus de saturação de água na compressibilidade dessas duas classes de solos.

Imhoff et al. (2004), investigando amostras de Latossolos, com variação de textura em uma toposeqüência sob cultivo com cana-de-açúcar, utilizaram um modelo de predição da tensão de precompactação que incorpora o efeito do teor de água, argila e densidade do solo.

Lima et al. (2006b) avaliaram o efeito da intensidade do tráfego de máquinas agrícolas e diferentes sistemas de manejo na compressibilidade de um Argissolo Vermelho distrófico arênico, e concluíram que no plantio direto sob compactação adicional foram obtidos os maiores e os menores valores, respectivamente, de densidade e índice de compressão do solo. Os autores, também, afirmaram que a densidade e o índice de compressão do solo são parâmetros adequados e sensíveis para detectar alterações na estrutura do solo.

Há estimativas de que as pressões médias aplicadas pelas máquinas agrícolas situam-se entre 50 e 300 kPa (Lebert & Horn, 1991; Carpenedo, 1994; Silva et al.,

2000), enquanto os reboques e caminhões podem exercer pressões entre 300 e 600 kPa (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000).

A tensão de precompactação (σ_p) pode ser obtida através da curva de compressão do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo. Essa curva pode ser obtida usando-se o método gráfico de Casagrande (1936), o de Pacheco Silva e o proposto por Dias Junior & Pierce (1995).

A curva de compressão secundária representa as pressões sofridas pelo solo no passado e se caracteriza por deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, enquanto a curva de compressão virgem apresenta deformações plásticas e não recuperáveis (Chancellor, 1997; Holtz & Kovacs, 1981; Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva et al., 2001b).

O solo agrícola deve ser preparado ou trafegado na região da curva de compressão secundária, para que não ocorra compactação adicional irreversível (Dias Júnior & Pierce 1996). Segundo Lebert & Horn (1991), os valores obtidos para tensão de precompactação utilizando-se o método desenvolvido por Casagrande (1936) satisfazem as duas condições de umidade do solo, ou seja, de solo saturado e não saturado.

A tensão de precompactação (σ_p) é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (Dias Júnior & Pierce, 1996) e o índice de compressão (I_c) é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1980 e Holtz & Kovacs, 1981). O índice de compressão indica a variação do índice de vazios ou da porosidade do solo por unidade de tensão aplicada, sendo determinado pela inclinação da reta de compressão virgem do solo. Conforme Lambe & Whitman (1979), o índice de compressão (C_c) é determinado pela expressão:

$$c_c = \frac{-\Delta_c}{\Delta \log P} \quad (7)$$

sendo C_c = índice de compressão; Δ_c = Variação do índice de vazios da reta virgem; $\Delta \log P$ = Variação do logaritmo da pressão aplicada no intervalo correspondente.

Diante do contexto levantado, o objetivo geral desta pesquisa foi investigar o comportamento da compressibilidade de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas, em função da adição de resíduos orgânicos proporcionados pelos diferentes sistemas de manejo estudados.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado na Fazenda Pau Amarelo da Usina Santa Clotilde S/A, localizada no município de Rio Largo, litoral do Estado de Alagoas. O clima do local 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.

O solo estudado foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso (EMBRAPA, 2006), relevo plano, textura média/argilosa. O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos areno-argilosos, com fração areia constituída basicamente de quartzo e com a fração argila constituída de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (Jacomine et al., 1975). Foram escolhidos solos em áreas de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de estudo três áreas, representativas dos três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira.

As três áreas cultivadas escolhidas como experimentais são exploradas com cana-de-açúcar há mais de 20 anos, sendo o relevo plano a suave ondulado, que é característico dos solos dos Tabuleiros Costeiros. Durante o período da pesquisa experimental foi executado um rígido controle de tráfego de máquinas nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Foram selecionadas áreas em talhões de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de pesquisa três áreas, representativas de três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira. Dessa forma, os tratamentos avaliados foram uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha padrão, reproduzida por solo em condições naturais (floresta nativa).

Na área cultivada sob sistema de irrigação é aplicada uma lâmina de 120 mm de água, por ciclo da cultura. A adubação química da cana-planta foi realizada de acordo com 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 de fertirrigação com vinhaça são aplicados, por ciclo da cultura, $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de vinhaça diluída, por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha^{-1} de N e na cana-soca 80 kg ha^{-1} de N.

Na área cultivada com vinhaça + torta de filtro são aplicados $30 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de torta de filtro associada com vinhaça, por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha^{-1} de N e na cana-soca 80 kg ha^{-1} de N.

No plantio e na renovação do canavial, o preparo periódico do solo é o mesmo nas três áreas. Constando do uso de subsoladores de três hastes parabólicas, cujo modo de ação é expresso por cortes verticais e uma intensa vibração no interior do solo. Em seguida, são utilizadas grades de discos de trinta polegadas de diâmetro na destruição da socaria e ao mesmo tempo ocorrem deslocamentos horizontais do solo, ficando o mesmo preparado para a operação de plantio. Finalmente, são abertos sulcos de aproximadamente 0,25 m de profundidade, utilizando sulcadores de três linhas. O plantio é manual, sendo as canas sementes jogadas nos sulcos, que posteriormente são cobertos mecanicamente com solo. Em todas as áreas cultivadas, a cana-de-açúcar é queimada, antes da colheita. Na colheita, a cana é cortada manualmente e carregada em caminhão, utilizando carregadoras convencionais.

As amostras foram coletadas ao acaso, nas áreas com os 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 nas entrelinhas de plantio da cana-de-açúcar. A coleta de amostras do solo foi realizada no mês de fevereiro de 2007.

Na análise granulométrica empregou-se o método do densímetro de Boyoucos, e na dispersão física do solo utilizou-se um agitador mecânico, durante 15 minutos, e um dispersante químico (EMBRAPA, 1997). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo obtida com anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A estabilidade dos agregados foi determinada por via úmida, sendo as amostras coletadas ao acaso, com auxílio de enxadão e pá de corte. Na separação de agregados por via úmida, adotou-se o procedimento descrito por Kemper & Rosenau (1986), através de peneiramento em água, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Os agregados assim preparados foram transferidos para dois conjuntos de cinco peneiras de 3,35; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm de diâmetro de malha, sendo submetidos a agitação vertical (42 ciclos por minuto),

durante quinze minutos, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio para secagem em estufa a 105° C, durante 24 horas. Em seguida, pesou-se e calculou-se a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados.

A curva característica contribui para o entendimento dos solos não saturados frente à variação de umidade, sendo definida como a relação entre o teor de água e a correspondente sucção matricial. O método utilizado para a obtenção da curva característica do solo pesquisado foi por dessorção (secamento). Foram coletadas amostras indeformadas de solo através de anéis metálicos, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. A amostra de solo indeformada foi previamente saturada e, em seguida, o solo úmido foi equilibrado a uma sucessão de potenciais matriciais ou sucções conhecidas, e se determinou, a cada vez, a quantidade de água retida. Para as tensões de 0,1 a 10 kPa utilizou-se aparelho de placas porosas (Funil de Haynes) e nas tensões de 50, 500 e 1.500 kPa o aparelho de Richards. Posteriormente, plotando-se os valores de umidade volumétrica **versus** sucção matricial ($U_a - U_w$), elaborou-se a curva de retenção de água do solo. A figura 2 apresenta as curvas características típicas de três solos distintos.

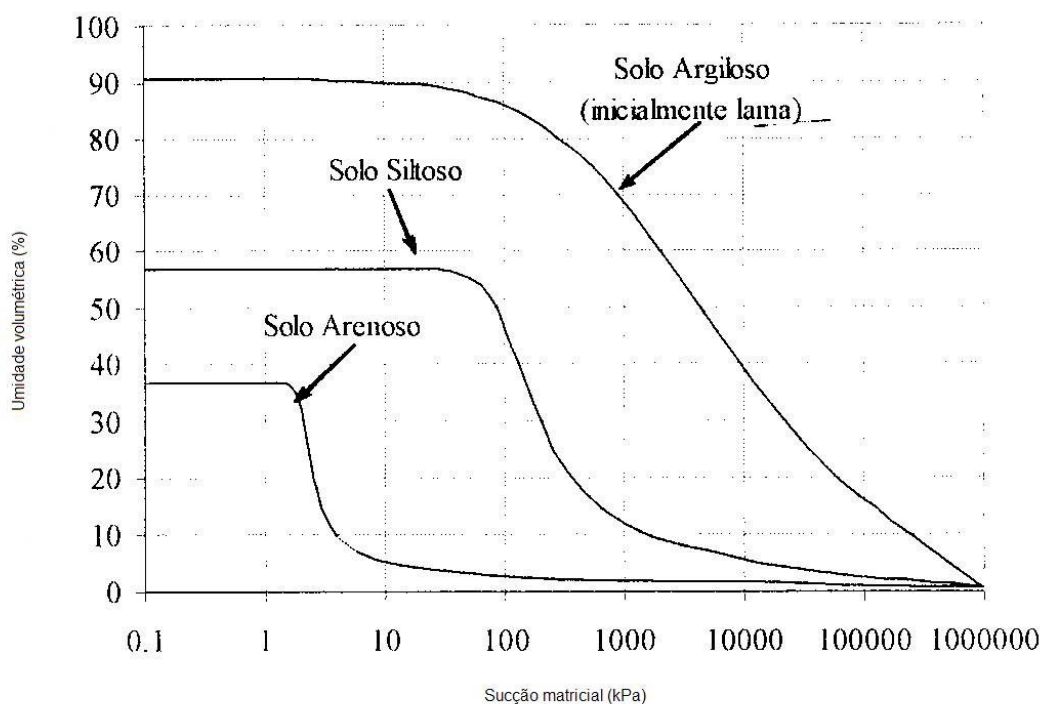


Figura 2. Curvas características típicas de três solos distintos (Fredlund & Xing, 1994).

Para avaliar o teor de matéria orgânica do solo determinou-se o teor de carbono orgânico, em cada uma das amostras empregadas, seguindo-se a aplicação do método descrito pela Embrapa (1997).

A porosidade total (P_t) foi calculada para cada amostra baseando-se na densidade do solo (D_s) e na densidade de partículas (D_p), pela expressão:

$$P_t = (1 - D_s/D_p) \quad (8)$$

A microporosidade do solo foi determinada aplicando-se sucção de 0,6 kPa e a macroporosidade através da diferença entre porosidade total e microporosidade.

Para o ensaio de compressão uniaxial, foram coletadas 128 amostras de solo indeformadas, nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, com a intervenção de amostrador metálico contendo, em seu interior, dois anéis metálicos de parede fina, com 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura.

Após a extração do amostrador da superfície do solo, os anéis coletores de amostra indeformada de solo foram separados e envolvidos com filme plástico, e posteriormente acondicionados em sacos plásticos sobre papel, para serem transportados com segurança até o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco. No laboratório, foi retirado o excesso de solo do anel, para determinação da umidade inicial e preparação da amostra para o ensaio.

A amostra de solo indeformada devidamente preparada foi saturada por capilaridade e as umidades gravimétricas equilibradas à temperatura ambiente. As amostras preparadas foram ensaiadas por compressão uniaxial, nas seguintes umidades gravimétricas médias: 0,10; 0,14; 0,18 e 0,22 kg.kg^{-1} . No ensaio de compressão uniaxial foi utilizada uma prensa mecânica, marca Solotest, sendo o ensaio desenvolvido em conformidade com a norma NBR-12007 da ABNT (1990). O ensaio consistiu de carregamentos verticais correspondentes a tensões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa e leituras realizadas aos trinta segundos. A razão de carga aplicada foi igual a 2 e os estágios de carregamentos foram trocados aos 30 segundos. No final do ensaio, as amostras foram levadas a estufa a 105° C, por 24 h, para determinação da umidade gravimétrica final.

Os dados obtidos da deformação vertical, medida no relógio microcomparador após a aplicação de cada uma das cargas verticais, alimentaram o programa computacional "Compress" (Reinert et al., 2003), que calculou e forneceu o índice de

vazios a partir do deslocamento registrado, a curva de compressão, a tensão de precompactação (σ_p') e o índice de compressão (C_c). Na determinação da tensão de precompactação (σ_p') utilizou-se o método gráfico de Pacheco Silva. A figura 3 apresenta a curva de compressão e o processo gráfico para determinação da tensão de precompactação.

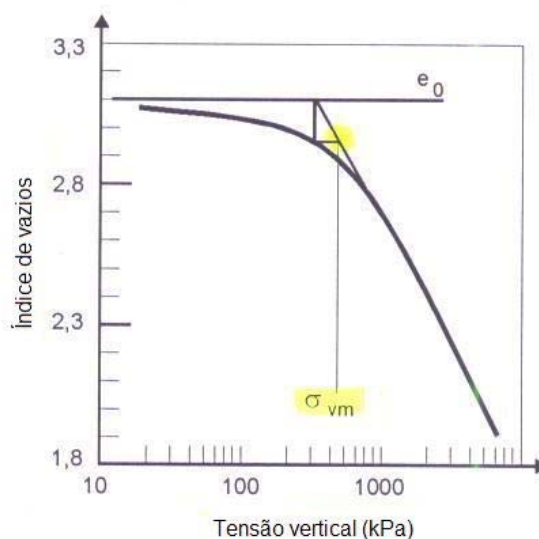


Figura 3. Determinação da tensão de precompactação pelo método de Pacheco Silva.

No método do engenheiro Pacheco Silva, ilustrado na figura 3, prolonga-se a reta virgem até a horizontal correspondente ao índice de vazios inicial (e_0) da amostra. Do ponto de interseção, baixa-se uma vertical até a curva de compressão e, deste ponto, traça-se uma horizontal. A interseção desta horizontal com o prolongamento da reta virgem é considerada a tensão de precompactação.

A caracterização física do solo dos diferentes sistemas de manejo foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco. As características granulométricas, densidades do solo e da partícula, carbono orgânico total e porosidade do solo pesquisado encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física do Latossolo Amarelo Distrocoeso, sob diferentes sistemas de manejo e profundidades

Prof (m)	Granulometria			Densidade		*COT	Porosidade	
	Areia	Silte	Argila	Solo	Partícula		Micro	Macro
	(g.kg ⁻¹)			(Mg.m ⁻³)			(%)	
MATA								
0 - 0,20	655	90	255	1,05	2,62	3,05	35,61	21,22
0,20 - 0,40	553	140	307	1,21	2,64	1,85	31,17	19,37
IRRIGADO								
0 - 0,20	680	70	250	1,65	2,67	1,26	30,98	8,91
0,20 - 0,40	580	80	340	1,72	2,63	0,87	29,70	7,81
VINHAÇA + TORTA								
0 - 0,20	625	100	275	1,49	2,61	1,59	33,05	14,76
0,20 - 0,40	520	110	360	1,56	2,68	0,85	30,91	13,65
VINHAÇA								
0 - 0,20	588	90	322	1,56	2,64	1,51	33,49	11,58
0,20 - 0,40	550	90	360	1,63	2,62	0,68	32,72	10,29

* Carbono orgânico total.

Os resultados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo Teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando o programa SAEG (2005). As análises de correlação e de regressão foram desenvolvidas para algumas variáveis. Para a escolha dos modelos de regressão, os coeficientes foram testados pelo Teste F, com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tensões de precompactação (σ'_p) e relações de predição

Os resultados obtidos para tensão de precompactação (σ'_p) em função dos sistemas de manejo culturais da cana-de-açúcar e dos teores de água, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, estão apresentados na tabela 2. Houve diferença significativa nas comparações entre médias da interação sistemas de manejo dos resíduos culturais da cana-de-açúcar e umidade do solo sobre a tensão de precompactação do solo, nas duas profundidades investigadas.

Tabela 2. Valores médios das tensões de precompactação (σ'_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas

Teor de água (kg.kg ⁻¹)	Sistema de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
Camada de 0 - 0,20 m				
0,10	162,1Aa	112,1Ca	126,1Ba	130,3Ba
0,14	131,0Ab	86,4Cb	101,2Bb	105,5Bb
0,18	95,1Ac	77,8Cc	82,9BCc	86,7BCc
0,22	76,4ABd	67,1BCd	71,6ABd	74,6ABd
Camada de 0,20 -0,40 m				
0,10	200,9Aa	131,8Ca	148,0Ba	156,9Ba
0,14	156,5Ab	116,6Cb	124,3BCb	131,5BCb
0,18	124,9Ac	96,2Cc	105,1BCc	114,3BCc
0,22	76,7Ad	70,5ACd	74,3ACd	75,3ACd

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

Na profundidade de 0-0,20 m, a tensão de precompactação do solo apresentou variação de 67,1 a 162,1 kPa para os diferentes sistemas de manejo e umidade. Os

solos sob cultivo da cana-de-açúcar apresentaram os maiores valores de tensão de precompactação, independentemente da umidade do solo. Para o teor de água mais baixo ($0,10 \text{ kg kg}^{-1}$) observa-se maior tensão de precompactação, que resulta em maior capacidade de suporte de carga. Quanto menor o teor de água no solo, mais resistente a matriz do solo, proporcionando-lhe maior resistência às deformações causadas por forças externas a ele aplicadas. A amplitude de variação da tensão de precompactação está associada ao teor de água no solo. A diminuição da tensão de precompactação com o aumento da umidade do solo tem sido relatada por diversos pesquisadores (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999b; Silva & Cabeda, 2006; Oliveira, 2008).

Nas condições deste estudo, os solos sob cultivo com cana-de-açúcar foram submetidos ao mesmo tipo de preparo periódico, bem como ao tráfego de máquinas nas demais operações. Todavia, observa-se, na tabela 2, que nas umidades de $0,10$; $0,14$ e $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$, os valores médios de tensão de precompactação dos sistemas de manejo sob aplicação de vinhaça e de vinhaça+torta de filtro foram estatisticamente diferentes e inferiores aos do sistema de manejo sob solo irrigado. Esse fato demonstra a importância da adoção de sistemas de manejo que proporcione aumento dos teores de matéria orgânica nos solos, que venham a originar uma maior dissipação de energia de compactação e, evitando assim, que essa energia chegue a deformar o solo.

Para a camada subsuperficial ($0,20$ - $0,40 \text{ m}$), a tensão de precompactação apresentou uma variação maior ($70,5$ a $200,9 \text{ kPa}$) do que a observada na camada superficial ($67,1$ a $162,1 \text{ kPa}$), creditando-se esse comportamento mecânico ao maior grau de compactação nessa profundidade. Salire et al. (1994) e Silva (2003) encontraram uma relação linear e positiva entre a tensão de precompactação e a densidade do solo, ou seja, maiores valores de densidade estiveram associados à história de tensões suportadas pelo solo. O mesmo foi corroborado por Silva et al. (2002), ao constatarem um aumento significativo da tensão de precompactação, de 68 para 164 kPa , quando o solo apresentava densidades de $1,3$ e $1,6 \text{ Mg . m}^{-3}$, respectivamente, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

Ainda se pode observar, na tabela 2, para a condição de umidade do solo de $0,22 \text{ kg kg}^{-1}$, que as médias de tensão de precompactação dos diferentes sistemas de manejo foram estatisticamente iguais. Esse comportamento provavelmente resultou do teor de umidade, próximo ou acima dos limites de plasticidade dos solos sob os sistemas de manejo estudados.

O solo sob mata nativa apresentou os menores valores de tensões de precompactação, pelo fato de não ter sofrido as cargas de um solo cultivado, mas só as tensões naturais de um solo exposto ao ambiente, que são as tensões matriciais que originam as tensões efetivas desenvolvidas durante os ciclos de umedecimento e secagem. Diante deste raciocínio, pode-se inferir que a capacidade de suporte de carga do solo com mata nativa está associada à estabilidade da estrutura do solo.

Já os solos sob os sistemas de manejo com aplicação de vinhaça e de vinhaça+torta de filtro estão em posição intermediária e o solo irrigado tem a sua capacidade de suporte de carga associada ao maior grau de compactação. Para Kanali et al. (1997) a compactação do solo torna-se crítica ao desenvolvimento de plantas quando a tensão de precompactação assume valores superiores a 122 kPa em solos francos arenosos, com umidade e densidade média, respectivamente de $0,23 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ e $1,40 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Diante destes referenciais este Latossolo Amarelo Distrocoeso, apresenta boas condições físicas de enraizamento da cana-de-açúcar. Já Soane et al. (1981) indicaram tensões inferiores a 200 kPa para um controle efetivo e redução da compactação do solo, e dessa forma, só a área sob irrigação estaria sob risco de restrição ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

A curva característica do solo pode contribuir para a compreensão do comportamento dos solos não saturados frente à variação de umidade (Rahardjo & Leong, 1997). A curva característica do solo é definida como a relação entre o teor de umidade e a correspondente sucção matricial, sendo uma representação da capacidade do solo em armazenar água.

A umidade é uma variável determinante no processo de compressão do solo e da magnitude de sua deformação. Diversas pesquisas constatam que a capacidade de suporte de carga relaciona-se negativamente com a umidade do solo (Horn, 1988; Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva & Cabeda, 2006; Lima et al, 2006a).

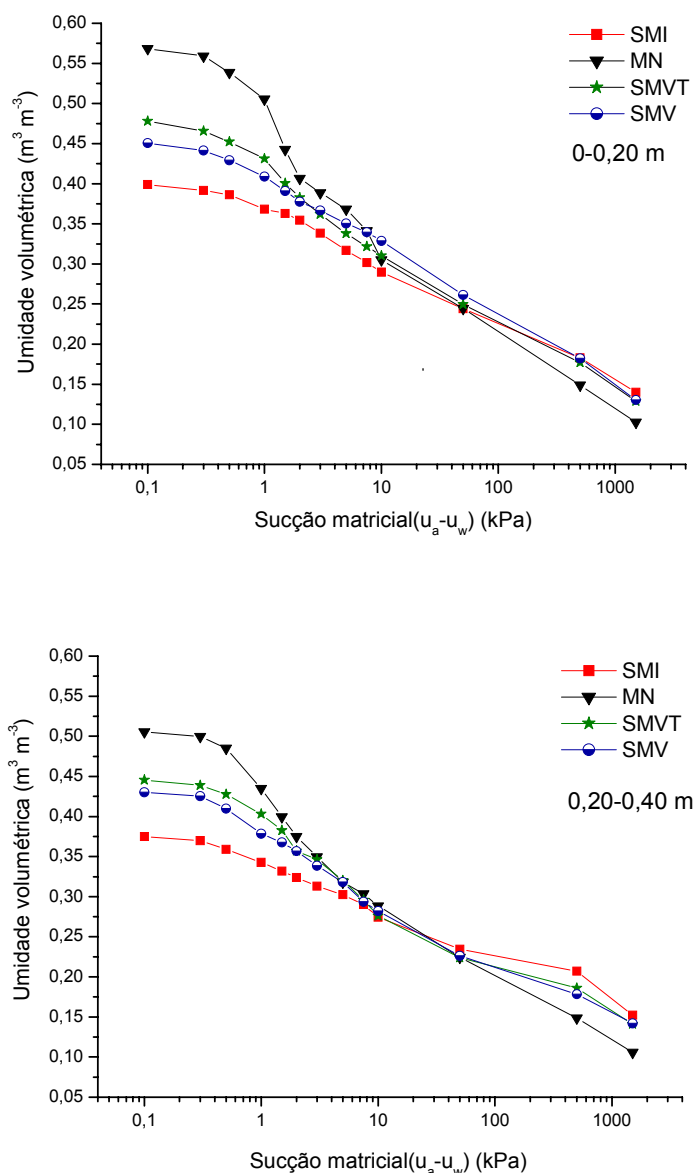


Figura 4. Curvas características do solo sob os sistemas de manejo: área irrigada (SMI), mata nativa (MN), área de vinhaça+torta (SMVT) e área de vinhaça (SMV), nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m.

Observa-se, na figura 4, que a entrada de ar ou sucção matricial crítica verifica-se a partir de 0,3 kPa de sucção matricial para os diferentes sistemas de manejo nas duas profundidades. Todavia, a entrada de ar ocorreu em umidades volumétricas diferenciadas, obedecendo a seguinte ordem decrescente: $MN > SMVT > SMV > SMI$. Esse comportamento, provavelmente, encontra-se associado à distribuição de tamanho dos poros. O efeito da sucção produz, no solo, uma ação intergranular, que tende a manter mais fortemente unidas as partículas, resultando em aumento de sua rigidez e, conseqüentemente, de sua resistência ao cisalhamento.

O comportamento mecânico do solo não saturado pode ser representado pelas curvas limites SI (suction increase) e LC (loading collapse), conforme as figuras 5 e 6 (Alonso et al., 1987). Plotando-se os valores de umidades volumétricas utilizados no ensaio de compressão uniaxial nas curvas características dos solos dos diferentes sistemas de manejo pode-se encontrar as respectivas sucções matriciais. Em seguida, com os valores de sucção matricial e as respectivas tensões de precompactação, foram construídas as curvas limites (Figuras 5 e 6). Estas curvas limites (SI e LC) definem a região de comportamento elástico do solo. Caso estes limites sejam ultrapassados, o solo poderá acumular deformações irreversíveis.

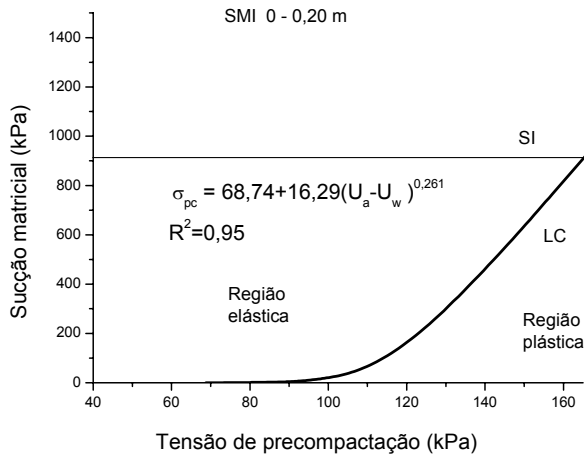
. Segundo Alonso et al. (1987), estas curvas limites representam situações de carregamento e de sucção matricial já experimentadas pelo solo. Os autores concluíram que os limites definidos pelas curvas SI e LC são acoplados, ou seja, uma variação de carregamento externo ou de sucção matricial provocará o deslocamento dos dois limites. De maneira geral, a rigidez dos solos não saturados aumenta com a sucção matricial. Todavia, localmente existem poucos dados experimentais para se estabelecer uma relação precisa.

Em pesquisa experimental, Costa et al. (2003) utilizaram as curvas limites representadas por função exponencial, conforme segue:

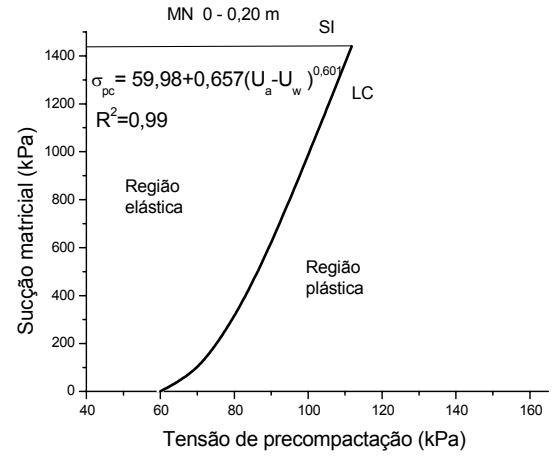
$$\sigma_{pc} = a + b (u_a - u_w)^c, \quad (9)$$

em que: σ_{pc} = Tensão de precompactação; a, b e c = parâmetros de ajuste; u_a = pressão do ar; u_w = pressão da água, e $(u_a - u_w)$ = sucção matricial. Estes autores definiram a curva SI considerando que a sucção matricial do solo, na profundidade investigada, não excedeu 50 kPa.

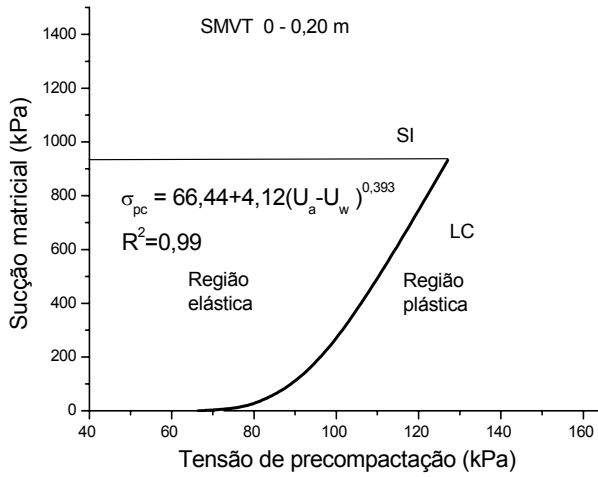
Observa-se, nas figuras 6 e 7, que em todos os diferentes sistemas de manejo a capacidade de suporte de carga aumentou de forma exponencial com o aumento da sucção matricial.



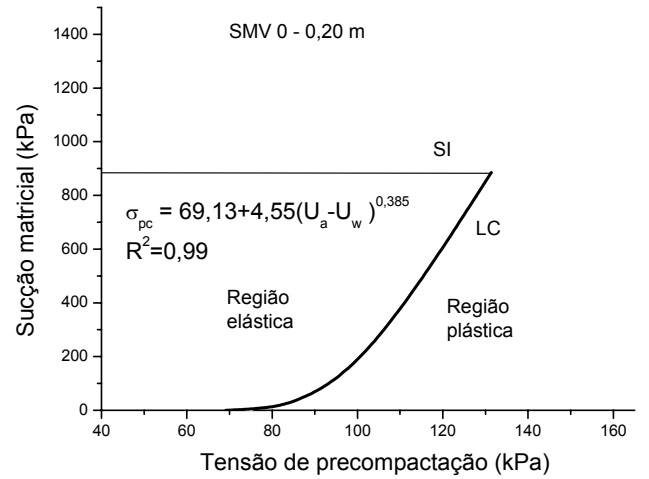
(A)



(B)



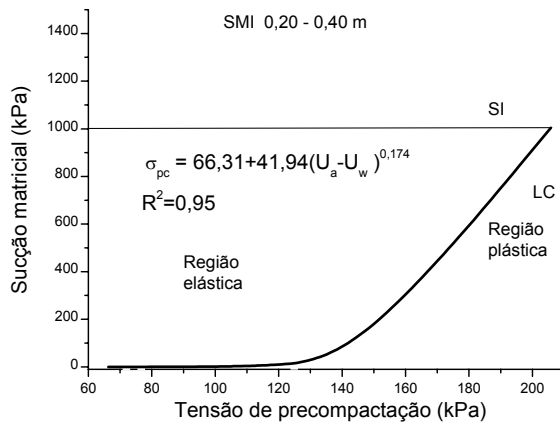
(C)



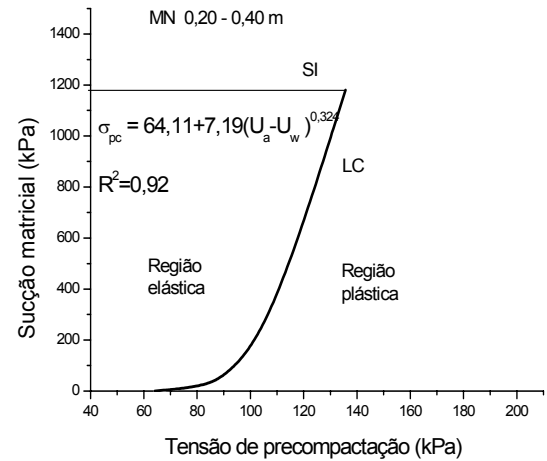
(D)

Figura 5. Sucção matricial em função da tensão de precompactação, para as quatro condições de sistemas de manejo, na profundidade de 0 - 0,20 m.

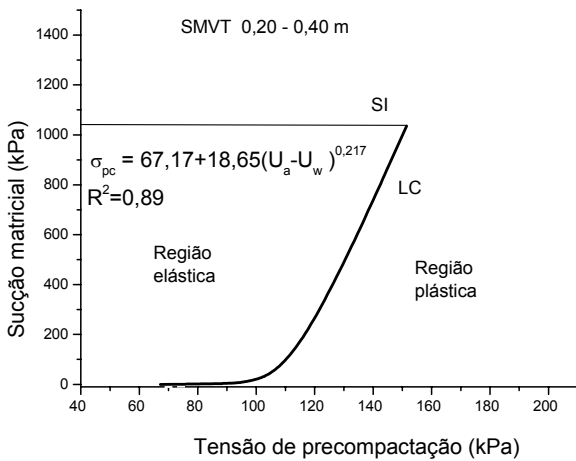
SI



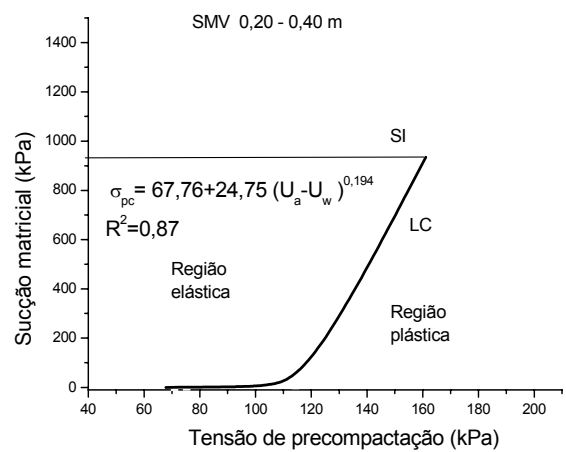
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 6. Sucção matricial em função da tensão de precompactação, para as quatro condições de sistemas de manejo, na profundidade de 0,20-0,40 m.

Todas as equações de regressão apresentaram elevado poder explicativo, ou seja, R^2 acima de 85%. O solo sob mata nativa apresenta a área contida pelas curvas SI e LC menor do que as áreas sob cultivo com cana-de-açúcar. Pode-se inferir, que o solo sob mata nativa possui uma menor região de comportamento elástico e, no caso de exceder-se esses limites, significa acumulação de deformações irreversíveis pelo solo com mata nativa, no entanto, nessa condição de uso de solo, isso nunca acontecerá.

As figuras 7 a 10 apresentam relações de predição da capacidade de suporte de carga do solo investigado. As relações foram obtidos a partir dos resultados de equações de regressão múltiplas lineares da tensão de precompactação, em função de variáveis independentes previamente escolhidas, pelas suas vinculações com o fenômeno investigado. As variáveis independentes escolhidas foram: densidade seca do solo (D_s), diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), umidade gravimétrica (U_g) e energia dissipada (E_d).

A figura 7 apresenta um modelo para predição da tensão de precompactação (σ_p), em função de duas variáveis independentes, umidade gravimétrica (U_g) e diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), na profundidade de 0-0,20 m, para as condições em que este Latossolo foi estudado. A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta. Neste modelo de predição obtém-se $R^2 = 0,8870$, que corresponde a um coeficiente de correlação da ordem de $r = 0,9418$ entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis explicam 88,70% do fenômeno. Além disso, é atingido elevado nível de significância estatística, pois a probabilidade p de erro (do tipo 1) é $p > 0,0001$. Essa estimativa baseou-se no cálculo através de modelo linear ajustado, com intervalo de confiança ao nível de 95% para o valor estimado, o que significa uma probabilidade de erro da ordem de 5%.

Em termos físicos, a figura 7 apresenta as tensões de precompactação obtidas com todas as adições de resíduos da cana-de-açúcar através dos diferentes tratamentos na camada superficial de 0 a 0,20 m, em função das variáveis umidade gravimétrica (U_g) e diâmetro médio ponderado (DMPu) dos agregados do solo.

A variável independente umidade gravimétrica (U_g) exerce um papel decisivo no valor da tensão de precompactação do solo. De maneira geral, quando os demais fatores mantêm-se constantes, a umidade do solo é quem governa a quantidade de deformação do solo. Assim, a capacidade de suporte de carga do solo cresce com a secagem do mesmo e menor será a probabilidade de compactação. De acordo com Hillel (1980), quando o solo encontra-se com baixo teor de água apresenta-se mais resistente em função da rigidez de sua matriz, que exibe alta resistência friccional às cargas externas. Entretanto, quando o teor de água do solo aumenta, forma-se um filme de água que enfraquecem as ligações interpartículas, como também reduzem a fricção entre elas, produzindo efeito lubrificante e favorecendo o rearranjo.

A relação linear e positiva da figura 7, também se deu em função do incremento do diâmetro dos agregados do solo pela incorporação de matéria orgânica na razão

da elevação de incorporação de resíduos ao solo pelos tratamentos. Dessa forma, o solo absorveu maior quantidade de água e apresentou resistência à compressão associada à estabilidade estrutural possibilitada pelo incremento de diâmetro dos agregados. Dessa forma, o efeito interativo descrito acima, resultou em diminuição das tensões de precompactação.

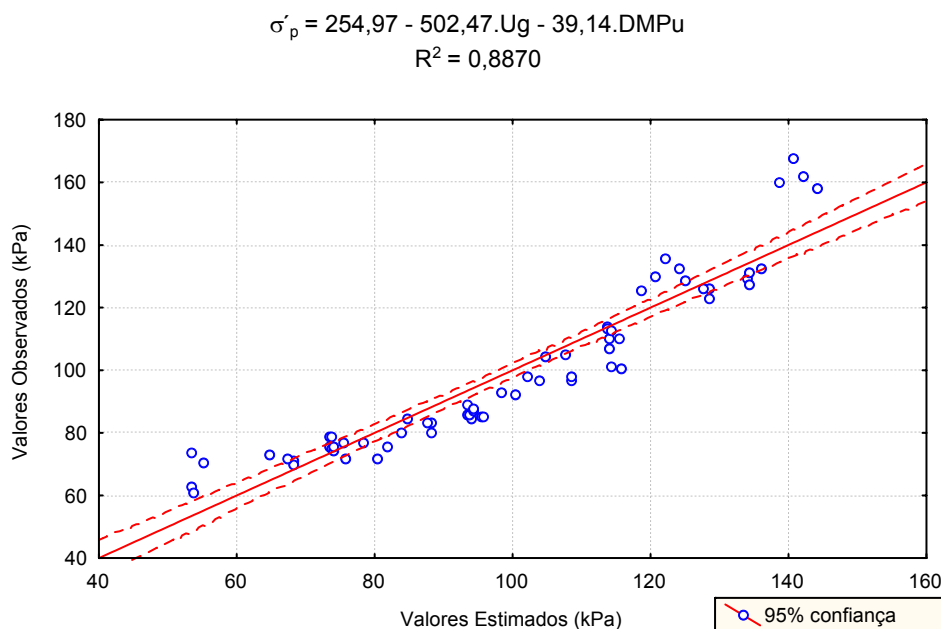


Figura 7. Modelo de tensão de precompactação (σ'_p) em função da umidade gravimétrica (Ug) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0-0,20 m.

A figura 8 apresenta um modelo para predição da tensão de precompactação (σ'_p), em função de três variáveis independentes (Ug, DMPu e Ed), na profundidade de 0–0,20 m, para as condições em que este Latossolo foi estudado. A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta e a equação que descreve a relação entre valores estimados **vs.** valores observados apresenta $R^2 = 0,8918$, que corresponde a um coeficiente de correlação da ordem de $r = 0,9443$ entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo explica 89,18% das variações na variável dependente.

Esta figura acrescentou a relação da figura 7, um pequeno incremento nos coeficientes de correlação e de determinação, pela inclusão da variável da quantidade de energia dissipada (Ed). O efeito dessa variável representa o efeito da quantidade de energia dissipada pelos resíduos adicionados na forma de vinhaça e

torta de filtro. Essa quantidade de energia não se tornou energia de deformação ou de compactação do solo, pela ação positiva da matéria orgânica. De maneira geral, solos com altos teores de matéria orgânica apresentam históricos de menores valores de tensão de precompactação. Assim, ficou demonstrada a afirmação de Lebert & Horn (1991), de que as tensões de precompactação têm forte vinculação não somente a atributos como densidade e umidade do solo, mas também a fatores relacionados com sua estrutura e agregação.

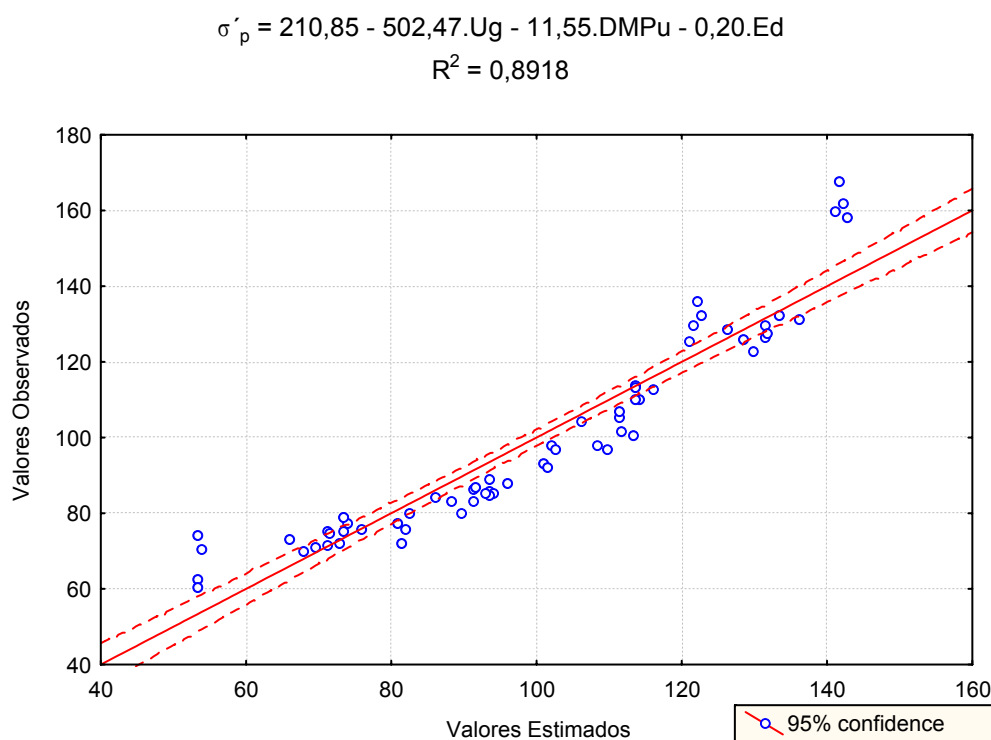


Figura 8. Modelo de tensão de precompactação (σ'_p) em função da umidade gravimétrica (Ug), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu) e da quantidade de energia dissipada (Ed). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0 - 0,20 m.

A figura 9 apresenta um modelo para predição da tensão de precompactação (σ'_p), em função de quatro variáveis independentes (Ds, Ug, DMPu e Ed), na profundidade de 0-0,20 m e nas condições em que este Latossolo foi estudado.

A influência da densidade seca do solo sobre sua capacidade de suporte de carga está associada a um maior número de pontos de contato entre as partículas, e conseqüentemente, maior resistência friccional.

A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta e a equação que descreve a relação entre valores estimados **vs.** valores

observados apresenta $R^2 = 0,8947$, que corresponde a um coeficiente de correlação da ordem de $r = 0,9459$ entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo explica 89,47% das variações na variável dependente.

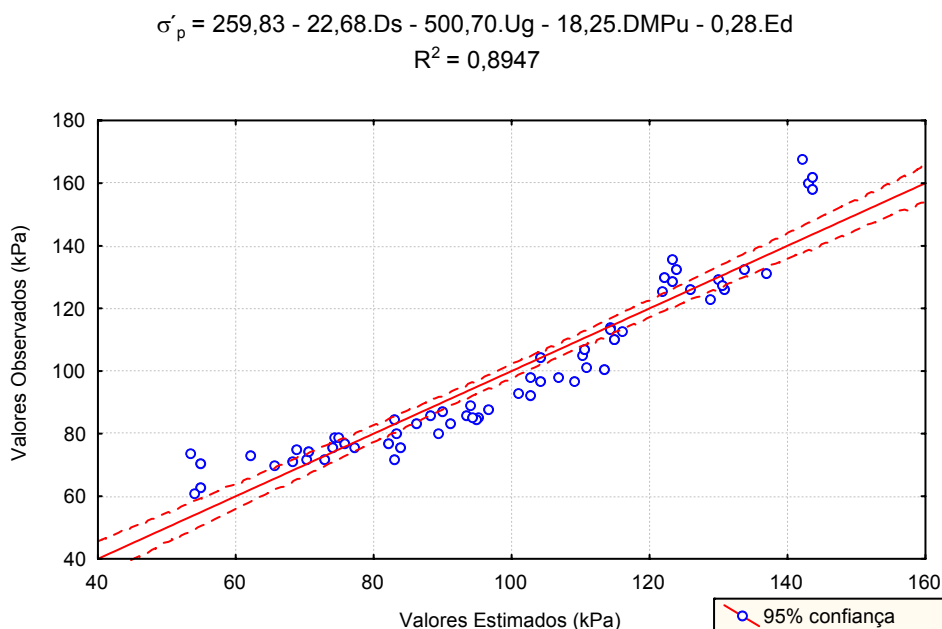


Figura 9. Modelo de tensão de precompactação (σ'_p) em função da umidade gravimétrica (Ug), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida ($DMPu$), da quantidade de energia dissipada (Ed) e da densidade seca do solo (Ds). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0 - 0,20 cm.

A figura 10 apresenta uma relação para predição da tensão de precompactação (σ'_p), em função de duas variáveis independentes (Ug e $DMPu$), na profundidade de 0,20-0,40 m, o valor $R^2 = 0,8755$, e $r = 0,9357$, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 12,45% das variações na variável dependente.

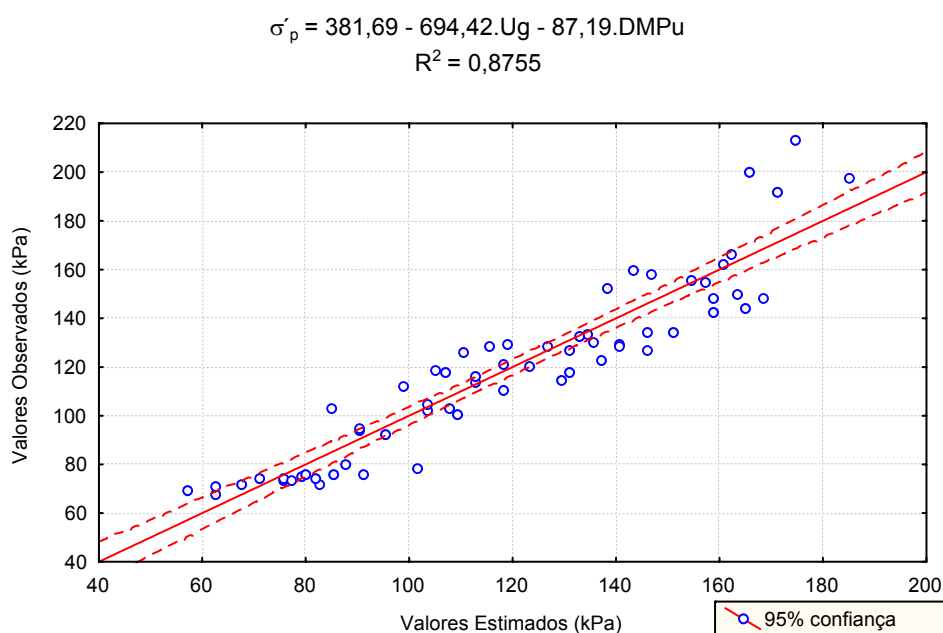


Figura 10. Modelo de tensão de precompactação (σ'_p) em função da umidade gravimétrica (Ug) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida ($DMPu$). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0,20 -0, 40 m.

Então, para a profundidade de 0,20 a 0,40 m, foi também observada a interação positiva e linear entre as variáveis da umidade gravimétrica (Ug) do solo e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida ($DMPu$) do solo na explicação das tensões de precompactação desenvolvidas.

Índice de compressão e relações de predição

O índice de compressão (Cc) é um indicativo da susceptibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1980 e Holtz & Kovacs, 1981). Observa-se, na tabela 3, que os maiores valores do índice de compressão ocorreram na umidade mais elevada, em todos os sistemas de manejo, nas duas profundidades investigadas, demonstrando que a resistência do solo à compressão decresce à medida que aumenta seu teor de água. A água diminui o atrito entre as partículas do solo, favorecendo seu deslocamento e rearranjo. Silva & Cabeda(2006) constataram comportamento semelhante para o índice de compressão, em função da umidade do solo. Houve efeito significativo dos sistemas de manejo e umidades sobre o índice de compressão nas duas profundidades

Tabela 3. Valores médios do índice de compressão em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas

Teor de água (kg.kg ⁻¹)	Sistema de manejo				Média
	SMI	MN	SMVT	SMV	
Camada de 0 -0,20 m					
0,10	0,15	0,46	0,24	0,23	0,27a
0,14	0,17	0,49	0,29	0,27	0,31b
0,18	0,19	0,50	0,31	0,31	0,33c
0,22	0,20	0,51	0,33	0,33	0,34d
Média	0,18C	0,49A	0,29B	0,29B	
Camada de 0,20 - 0,40 m					
0,10	0,13	0,32	0,24	0,22	0,23a
0,14	0,17	0,38	0,26	0,23	0,26b
0,18	0,18	0,40	0,29	0,27	0,29c
0,22	0,22	0,42	0,33	0,32	0,32d
Média	0,17A	0,38B	0,28C	0,26D	

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

MN = mata nativa; SMI = área irrigada; SMVT = área de vinhaça + torta; SMV = área de vinhaça.

Nas duas profundidades estudadas, o índice de compressão decresceu na seguinte ordem: MN > SMVT > SMV > SMI. O solo sob o sistema de manejo irrigado (SMI) apresentou os menores valores do índice de compressão, ou seja, menos compressibilidade, provavelmente resultado do maior número de contato entre partículas, conseqüência do maior grau de compactação do solo.

Através do conhecimento do índice de compressão, é factível prever mudanças na relação ar-água-matriz do solo, quando determinada tensão externa é aplicada ao solo (Gupta & Allmaras, 1987). De maneira geral, o solo do sistema de manejo

que recebeu compactação adicional apresentou a menor susceptibilidade à compactação, em comparação aos demais sistemas de manejo.

As figuras 11 a 14 apresentam modelos de predição da susceptibilidade do solo à compactação. As variáveis independentes escolhidas foram: densidade seca do solo (D_s), diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), umidade gravimétrica (U_g) e energia dissipada (E_d).

A figura 11 apresenta um modelo para predição do índice de compressão, em função de duas variáveis independentes (U_g e DMPu), na profundidade de 0–0,20 m, e nas condições em que este Latossolo foi estudado. A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta e a equação que descreve a relação entre valores estimados **vs.** valores observados apresenta $R^2 = 0,9110$, que corresponde a um coeficiente de correlação da ordem de $r = 0,9545$ entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 4,45% das variações na variável dependente.

Em termos físicos, a figura 11 apresenta os índices de compressão obtidos com todas as adições de resíduos da cana-de-açúcar através dos diferentes tratamentos na camada superficial de 0 a 0,20 m, em função das variáveis umidade gravimétrica (U_g) e diâmetro médio ponderado via úmida (DMPu) dos agregados do solo.

A variável independente umidade gravimétrica (U_g) tem forte influência no valor do índice de compressão (C_c) do solo. De maneira geral, quando os demais fatores mantêm-se constantes, a umidade do solo é quem governa a quantidade de deformação do solo. Assim, o índice de compressão (C_c) do solo decresce com a secagem do mesmo e menor será o risco de compactação. Todavia, quando o teor de água do solo aumenta, forma-se um filme de água que enfraquece as ligações interpartículas, como também reduz a tensão de cisalhamento do solo, resultando em aumento do índice de compressão (C_c).

A relação linear e positiva da figura 11, também se deu em função do incremento do diâmetro dos agregados do solo pela incorporação de matéria orgânica na razão da elevação de incorporação de resíduos da cana-de-açúcar ao solo pelos tratamentos. Dessa forma, o solo absorveu maior quantidade de água e apresentou resistência à compressão associada à estabilidade estrutural possibilitada pelo incremento de diâmetro dos agregados. Dessa forma, o efeito interativo descrito acima, pode resultar em aumento do índice de compressão.

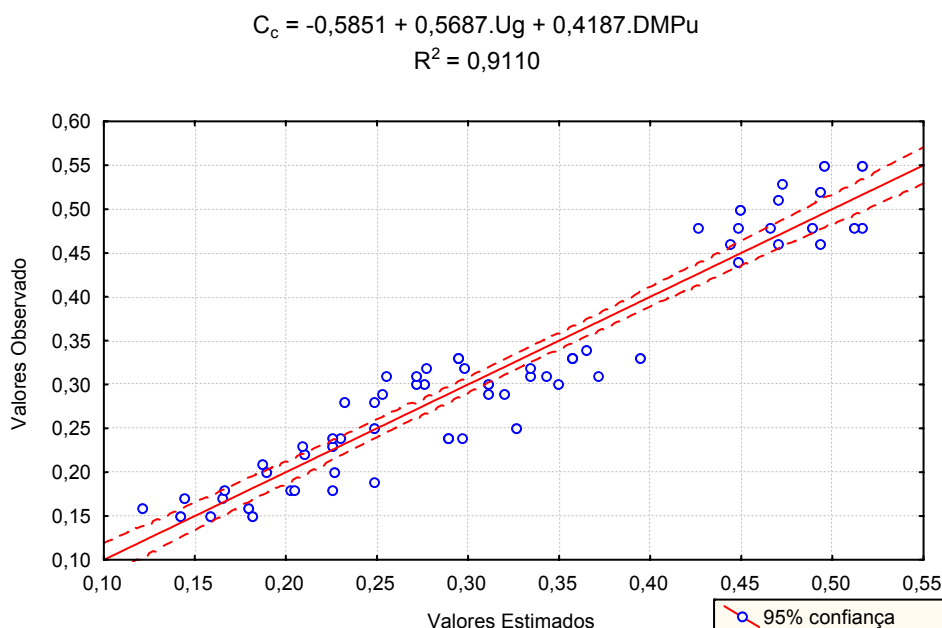


Figura 11. Modelo de índice de compressão (C_c) em função da umidade gravimétrica (U_g) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0 - 0,20 m.

A figura 12 mostra um modelo de predição do índice de compressão, em função de três variáveis independentes (U_g , DMPu e E_d), na profundidade de 0 - 0,20 m, para as condições em que este Latossolo foi estudado. A dispersão dos pontos experimentais sugere modelo linear e a equação que descreve a relação entre valores estimados **vs.** valores observados apresenta $R^2 = 0,9457$ e $r = 0,9726$, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 5,41% das variações na variável dependente.

Essa figura acrescentou a relação da figura 11, um pequeno incremento nos coeficientes de correlação e de determinação, pela inclusão da variável da quantidade de energia dissipada (E_d). O efeito dessa variável representa o efeito da quantidade de energia dissipada pelos resíduos adicionados na forma de vinhaça e torta de filtro. Essa quantidade de energia não se tornou energia de deformação ou de compactação do solo, pela ação positiva da matéria orgânica. De maneira geral, solos com altos teores de matéria orgânica apresentam históricos de maiores valores de índice de compressão.

$$C_c = -0,0577 + 0,5687.U_g + 0,0890.DMPu + 0,0024.Ed$$

$$R^2 = 0,9457$$

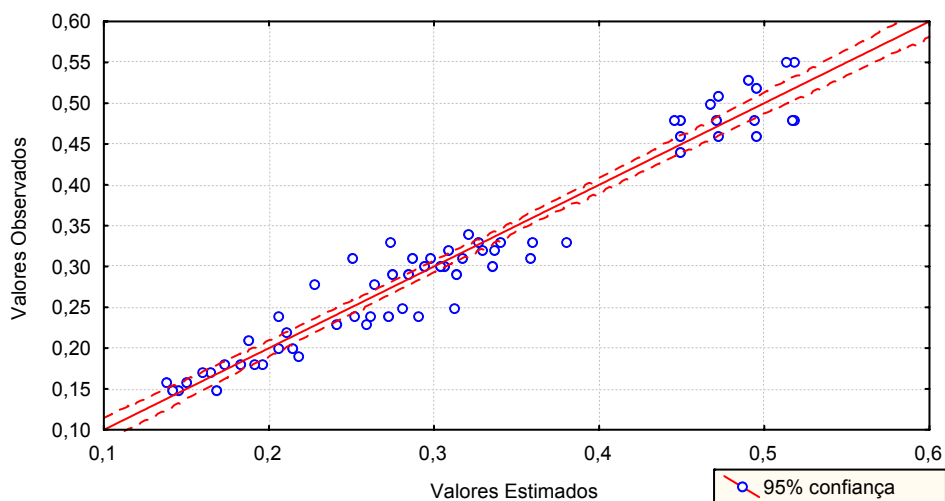


Figura 12. Modelo de índice de compressão (C_c) em função da umidade gravimétrica (U_g), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu) e da quantidade de energia dissipada (E_d). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0 - 0,20 m.

A figura 13 apresenta um modelo de predição do índice de compressão, em função de quatro variáveis independentes (D_s , U_g , DMPu e E_d), na profundidade de 0 - 0,20 m e nas condições em que este Latossolo foi estudado. A dispersão dos pontos experimentais sugere modelo linear e a equação que descreve a relação entre valores estimados *vs.* valores observados apresenta $R^2 = 0,9614$ e $r = 0,9805$, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 3,86% das variações na variável dependente. A influência da densidade seca do solo sobre seu índice de compressão (C_c) está associada ao grau de compactação do solo, demonstrando que maior estado de compactação e arranjo mais compacto das partículas, torna o solo menos susceptível à deformação.

$$C_c = 0,4539 - 0,2369.D_s + 0,5873.U_g + 0,0191.DMP_u + 0,0016.E_d$$

$$R^2 = 0,9614$$

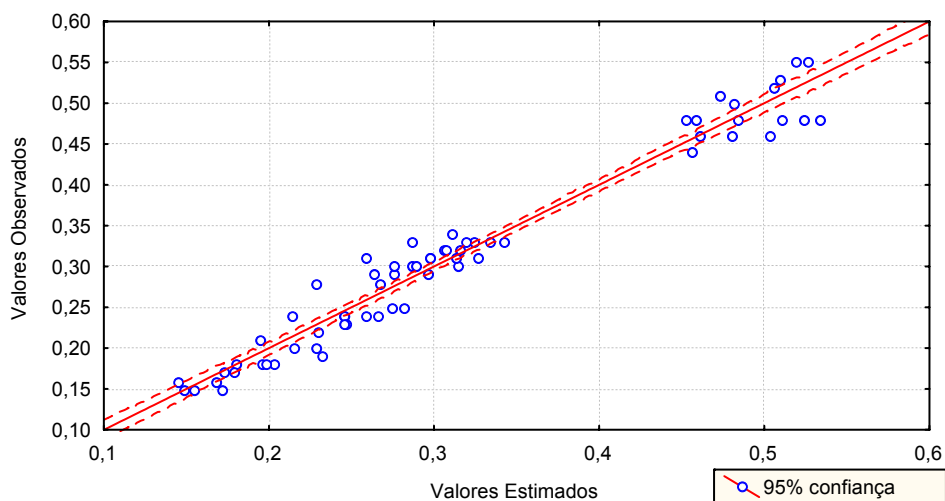


Figura 13. Modelo de índice de compressão (C_c) em função da umidade gravimétrica (U_g), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), da quantidade de energia dissipada (E_d) e da densidade seca do solo (D_s). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0 - 0,20 m.

A figura 14 apresenta modelo de predição do índice de compressão, em função de duas variáveis independentes (U_g e DMPu), na profundidade de 0,20 - 0,40 m. A equação que descreve a relação entre valores estimados **vs.** valores observados apresenta $R^2 = 0,8674$, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 13,26% das variações na variável dependente. Então, para a profundidade de 0,20 a 0,40 m, foi também observada a interação positiva e linear entre as variáveis da umidade gravimétrica (U_g) do solo e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu) do solo na explicação dos índices de compressão desenvolvidos.

$$C_c = -0,7768 + 0,7813.U_g + 0,5327.DMPu$$

$$R^2 = 0,8674$$

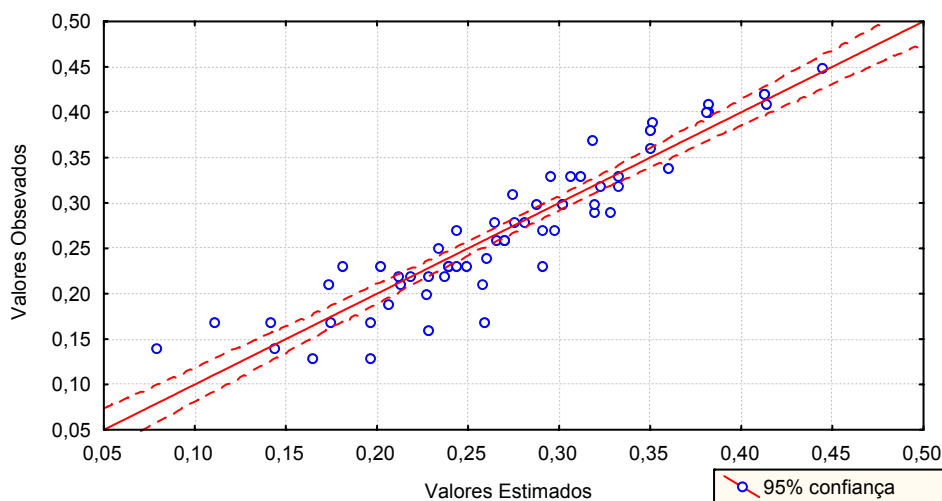


Figura 14. Modelo de índice de compressão (C_c) em função da umidade gravimétrica (U_g) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0,20 - 0,40 m.

Procura-se um modelo que apresenta a menor soma dos quadrados dos resíduos, ou seja, que deixe a menor quantidade possível da variável dependente sem explicação. Com base nos modelos já discutidos, verifica-se que os de predição da tensão de precompactação e do índice de compressão com duas, três e quatro variáveis independentes apresentam coeficientes de determinação (R^2), também chamado de poder explicativo da regressão, semelhantes, inclusive quando se acrescenta mais uma variável independente; o poder explicativo adicional foi pouco significativo. Portanto, deve-se adotar o modelo com o menor número de variáveis independentes, pela sua simplicidade em explicar os fenômenos.

CONCLUSÕES

- A capacidade de suporte de carga do solo sofreu efeito dos diferentes sistemas de manejo, decrescendo na seguinte ordem: SMI>SMV>SMVT>MN.
- Os sistemas de manejo aos quais foram adicionados resíduos orgânicos apresentaram melhor comportamento mecânico em relação à aplicação de cargas externas.
- Houve relação significativa e linear entre a tensão de precompactação observada e a estimada, em todos os modelos investigados.
- A susceptibilidade do solo à compactação sofreu efeito dos diferentes sistemas de manejo, decrescendo na seguinte ordem: MN >SMVT>SMV> SMI.
- Houve relação significativa e linear entre o índice de compressão observado e estimado, em todos os modelos investigados.

LITERATURA CITADA

ALONSO, E.E.; GENS, A.; HIGHT, D.W. General Report - Special Problem Soils. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9º, 1987, Dublin. **Proceedings...** Dublin; 1987. v.3, p.1087–1146.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress. I. An survey of Swedish arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.77, p.85-95, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12007: **Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 106, n. 39, p. 859 -863, 1959.

BOONE, F.R. ; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D. ;van OUWERKERK, C., (Eds). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.56, p.185-196, 2000.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. v.1, 234p.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University, 1936. p.60-64, v.34.

CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil agricultural equipment. **B. Division Agric. Sci**, Davis, 1881:53, 1997.

COSTA, Y.D.; CINTRA, J.C.; ZORNBERG, J.G. Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a Lateritic soil deposit. **Geotechnical Testing Journal**, v.26, n. 262, p.1-9, 2003.

DAWIDOWSKI, J.B.; MORRISON, J.E. & SNIEG, M. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, 4:1059-1064, 2001.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988..

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114f. Tese (Doutorado). Michigan State University, East Lansing 1994.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, p.139-151, 1995.

DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.175-182, 1996.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 412 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de Solos**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil- water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, p. 521 - 532, 1994.

GOLCHIN, A. ; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In : LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GUPTA, S.C. ; ALLMARAS, R.R. Models to the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p. 5 -10, 1987.

HAKANSSON, I. ; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C. ; STEWARD, B.A.(Eds.). Methods for assessment of soil degradation. **Advances in Soil Science**. Boca Raton: CRS Press, 1998.p.167-179.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. ;RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in diferent traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York : Academic Press, 1980. 413p

HOLTZ. R.D. ; KOVACS. W.D. **An introduction to geotechnical engineering**, New Jersey; Prentice-Hall, 1981. 773p.

HORN, R. Compressibility of arable lands. In: DRESCHER, J.; HORN, R.; DE BOODT, M. (Eds.). **Impact of water and external forces on soil structure**. Catena: Cremligen-Destedt, 1988. p. 53–71 (Suplemento, 11).

HORN, R.; LEBERT,M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE,B.D. ; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.

IMHOFF,S; SILVA,A.P.; FALLOW,D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.17-24, 2004

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, SUDENE-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: NOGUEIRA L.R.Q. ; NOGUEIRA, L.C. (Eds.), 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Aracaju: Embrapa, 1996. p. 13-24.

KANALI, C.L. et al. The use of soil compaction levels in the selection of the fird-safe sugarcane transport vehicles. **Journal of Terramechanics**, v.34, p.127-140, 1997.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1, p. 425-442 (Agronomy, 9).

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR. M.S. Efeito do manejo da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.497-506, 1999a.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR. M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 211-218, 1999b.

LAMBE, T. L.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. Massachusetts Institute of Technology: John Wiley & Sons, 1979. 553 p.

LARSON,W.E.;GUPTA,S. C. Estimating critical stress unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n.6, p.1127-1132, 1980.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. ;USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.3, p.450-457, 1980.

LEBERT, M. ;HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.

LIMA,C.L.R.; SILVA,A.P.; IMHOFF,S.; LEÃO,T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.217-223, 2006a.

LIMA,C.L.R.; REINERT,D.J.; REICHERT,J.M.; SUZUKI,L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36 n.6, p.1765-1772, 2006b.

MANTOVANI,E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, v.13,n.147, p.52-55,1987.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. ; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre:Gênesis, 1999. p. 1-8.

MOSADDEGHI, M.R. ; HAJABBASI, M.A. ; HEMMAY, A. ; AFYUNI,M. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.55, p.87-97, 2000.

MOSADDEGHI, M.R., HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; ALEXANDROU, A. Pré-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil & Tillage Research**, v. 70, p. 53-64, 2003.

OLIVEIRA, V. S. **Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas**. 2008. 81f. Tese (Doutorado). UFRPE: Recife, 2008.

RAHARDJO,H.; LEONG,E.C. Soil water characteristic curves and flex boundary problems. New York: Asce, 1997. p.88-112 (Geotechnical Special Publication, n.68).

REINERT, D. J. et al. Compress - software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade de solos e seus parâmetros. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto : SBCS, 2003. CD - ROOM.

REZENDE, J. de O. Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo. Salvador: **Seagri-SPA**, 2000. 117p. (Série Estudos Agrícolas, 1).

RIBEIRO, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos de tabuleiros costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa, 2001. p.161-190.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**, versão 9.0,Viçosa, Fundação Arthur Bernardes, 2005.

SALIRE, E.V.; HAMMEL, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsolis under short - duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.31, p.235-248, 1994.

SEMMELE, H. ; HORN, R. Mögchkeit zur bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckverformung im Boden Hinblick auf die Ableitung von Bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwert. In: **Bodenverdichtung. KTBL**, Darmstadt, 1995. p. 61-92.

SHANG,C.; TIESSEN,H. Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils : size, density and magnetic separations. **Soil Science Society America Journal**, Madison,v.62,p.1247-1257,1998.

SILVA, R.B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142 f. Tese(Doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SILVA, A. J. N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. 2003. 120 f. Tese(Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SILVA, A. J. N. ; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.921-930, 2006.

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

SILVA, R.B.; LIMA, J..M.: DIAS JUNIOR, M..S. & SILVA,F.A.M. Alterações de propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho Distrófico pela adsorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.791-798, 2001a.

SILVA, R.B.; LIMA, J..M., DIAS JUNIOR, M..S. & SILVA,F.A.M. Influência da adição de fósforo no índice de compressão e propriedades de consistência de um Latossolo Vermelho Escuro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.261-268. 2001b.

SILVA, V.R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Prodzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.1-8, 2002.

SOANE, B. D. The role organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.6, p. 179-201, 1990.

SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W. ;PAINER, D. J. Compaction by agricultural vehicles: a review II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.1, p.373-400, 1981.

STONE, R.J. ; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.60, p.15-24, 1995.

TISDALL, J. M. ; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, p.141 - 163, 1982.

TOWER, G. D. Effective stresses in unsaturated soil and their applicability in theory on critical state soil mechanics. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 34, p. 429 - 435, 1983.

TOWER, G. D. ; CHILDS, E. C. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 23, n.2, p. 481 - 498, 1972.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.92, n.1-2, p.104-113, 2007.