

VERONILDO SOUZA DE OLIVEIRA

**COMPACTAÇÃO EM SOLOS COESOS DOS
TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS**

RECIFE - 2008

VERONILDO SOUZA DE OLIVEIRA

**COMPACTAÇÃO EM SOLOS COESOS DOS
TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração em Física, Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE, PE), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

RECIFE – 2008

Ficha catalográfica
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

O48s Oliveira, Veronildo Souza de
Compactação em solos coesos dos
tabuleiros costeiros de Alagoas / Veronildo Souza de
Oliveira. – 2008.
76 f. : il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim
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. Rolim, Mário Monteiro
 - II. Título

**Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pós-Graduação
Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo**

**Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado**

**COMPACTAÇÃO EM SOLOS COESOS DOS TABULEIROS
COSTEIROS DE ALAGOAS**

elaborada por
Veronildo Souza de Oliveira

**como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em
Ciência do Solo**

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
(Orientador/Presidente)

Prof. Dr. Joaquim Odilon Pereira

Profa. Dr. Nelci Olszewski

Prof. Dr. Mateus Rosas Ribeiro

Prof. Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa

RECIFE, 11 de março de 2008

DEDICO,

Ao meu pai José Tavares de Oliveira “in memorian”, que sempre incentivou seus filhos aos estudos e deixou grandes lições de vida, mas que infelizmente não pôde presenciar o término dessa obra.

A minha mãe Eliza Souza de Oliveira, que com seus 85 anos de idade, a cada dia nos dá lições de vida, e nos acolhe com singeleza e muito amor, ofereço o meu carinho e eterna gratidão.

A minha querida e amada esposa Maria de Fátima, que durante nossos 23 anos de casados continua, com paciência e determinação; a ser a companheira e incentivadora em todos os momentos, um grande beijo com carinho todo especial.

E, por fim, aos meus amados filhos: Rafael e Fernanda, continuação da minha vida, a eles **OFEREÇO** esta obra. Espero que sirva de incentivo para seus projetos de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom precioso da vida, pela saúde de cada dia pela oportunidade de mais uma conquista, por ter me concedido todos esses momentos de alegria e felicidade.

Aos meus pais, por sua coragem, dedicação e ensinamentos. Os quais em suas vidas humildes nos deixaram como maior herança a educação e a honestidade.

Aos meus irmãos Veronice, Veronaldo, Veralúcia e Vanildo, que me proporcionaram os melhores momentos da minha vida em família, um forte abraço e o meu muito obrigado.

A Fátima Rafael e Fernanda, agradeço por me proporcionarem a continuação de viver em família, dedicando seu carinho, amor e paciência durante esses anos de convivência, sobretudo nestes últimos quatro anos.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, através do Professor Valmar Correa de Andrade, Magnífico Reitor, pela ajuda e por ter me dado à oportunidade da realização do meu Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo por ter me recebido como aluno, amigo e professor. O meu muito obrigado.

Ao professor Mário Monteiro Rolim, que além da tarefa de orientador, foi permanentemente incentivador em todos os momentos dessa jornada, no qual reconheço amizade e leal companheirismo. Meu muito obrigado!

Em nome dos professores Mateus Rosas Ribeiro, Clístenes Nascimento, Maria de Fátima, agradeço a todos que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, que muito contribuíram para formação e conclusão do referido curso.

Ao professor Romero Falcão, pelo companheirismo e otimismo demonstrado principalmente nos momentos mais árduos dessa jornada, meu eterno agradecimento.

Ao estudante de Engenharia Agrícola, Romário Amaral pela sua participação ativa e ajuda na realização da maioria das análises laboratoriais, sem as quais não teria conseguido concluir em tempo hábil.

A todos os colegas do Doutorado Felizarda, Thais, Djalma, Francisco, Paulo Cardoso, pela amizade e convivência.

Ao meu sobrinho Diego Coutinho, pelo apoio nos momentos que precisei nas traduções dos textos, o meu muito obrigado.

A Sra. Maria do Socorro pela presteza, amizade e dedicação, sempre preocupada em tentar solucionar nossos problemas na Pós-Graduação.

A Usina Triunfo Agroindustrial, pela disponibilidade de suas áreas de plantio e apoio logístico durante a coleta de campo, em especial ao Engenheiro Agrônomo Arnaldo Jugurta (Responsável pela Fertirrigação), em nome do qual agradeço a toda a diretoria dessa conceituada Empresa do setor sucroalcooleiro de Alagoas.

Ao Engenheiro Agrônomo José Fernando Vanderley Fernandes Lima (Zeca) pelo companheirismo e dedicação, sobretudo nos trabalhos de campo no período de coleta de dados na Usina. e ao laboratorista Anacleto pela disponibilidade e ajuda nas determinações da física do solo.

A todos familiares e amigos, que direta ou indiretamente, também contribuíram para a realização desse trabalho.

“Cada pessoa que passa em nossa vida, passa sozinha, porque cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra! Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha e não nos deixa só porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós. Essa é a mais bela responsabilidade da vida e a prova de que as pessoas não se encontram por acaso”.

Charles Chaplin

Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas

RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar requer um intensivo uso de máquinas agrícolas desde a realização do preparo do solo até as operações de colheita, no entanto, o efeito de compressão sofrida pelo solo durante a passagem do maquinário agrícola tem sido pouco pesquisado nos últimos anos. As deformações decorrentes do tráfego de máquinas e implementos agrícolas aliados a manejos inadequados vêm comprometendo a sustentabilidade dos solos agrícolas, principalmente pelas modificações de alguns atributos físicos que podem contribuir com a sua compactação. O objetivo deste trabalho foi estudar a susceptibilidade à compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso, submetido a três diferentes manejos, sob cultivo de cana-de-açúcar e mata nativa, através do estudo da estabilidade e distribuição dos agregados; da compactação; e do comportamento compressivo dos solos. Assim, foram avaliadas quatro áreas sendo: mata nativa (MA), manejo sem irrigação (MSI), manejo com irrigação (MCI), e manejo com fertirrigação de vinhaça (MCV). Para a realização dos ensaios foram coletadas amostras de solo nos locais sorteados, 50,00 x 50,00 m, nas quatro áreas nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. No estudo da estabilidade e distribuição dos agregados foi analisado o carbono orgânico total (COT) e determinando a estabilidade de agregados por via úmida, expressa por quatro índices: diâmetro médio ponderado (DMP), índice de estabilidade de agregados (IEA), módulo de finura (MF) e da porcentagem de agregados maiores que 2,0 mm estáveis em água (AGRI). Na determinação da densidade do solo, amostras indeformadas foram retiradas por meio de anel; e deformada na determinação da densidade máxima (D_{smax}) e da umidade crítica (U_c) de compactação, através do ensaio de Proctor normal; além da determinação do grau de compactação. No caso específico da compressibilidade, quatro trincheiras foram abertas nos locais sorteados das quatro áreas de estudo e retiradas amostras indeformadas com auxílio de anéis metálicos de 6,4 cm diâmetro e 2,5 cm de altura nas profundidades de 0-20, 20-40 cm, com quatro repetições. As amostras após coletadas foram saturadas e submetidas a sucções de 0,1 a 10 kPa e 50, 500 e 1500 kPa

levadas a prensa mecânica e realizado o ensaio de compressibilidade. Todos os dados foram submetidos à análise de variância e as diferenças entre médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Em todos os manejos, houve diminuição da estabilidade de agregados com o aumento da profundidade, para as classes superiores a 2,0 mm. Os tratamentos cultivados tiveram seus índices de agregação reduzidos em relação à mata nativa na seguinte seqüência: MA>MCV>MCI>MSI. O sistema MSI apresentou os menores índices de agregação e o MCV o mais próximo da condição de mata. Correlações significativas e positivas foram obtidas entre COT e os índices de estabilidade estudados. Os valores das densidades máximas de compactação do solo obedeceram a seguinte ordem crescente de susceptibilidade à compactação: MSI>MCI>MCV>MA, enquanto a umidade crítica o inverso. Análise de regressão para a variável tensão de pré-consolidação em função da umidade gravimétrica (Ug) além de correlações entre as diversas variáveis foram realizadas. A profundidade de 0-20 cm, em todos os casos, mostrou ser a mais susceptível à compactação em relação à profundidade de 20-40 cm; o manejo MCV alterou o comportamento compressivo do solo em ambas as profundidades (0-20 e 20-40 cm); e que a capacidade de suporte de carga do solo foi maior em todos os manejos nas camadas de 20-40 cm.

Palavras-chave: Manejo, agregados, compactação, compressibilidade, aproveitamento de resíduos.

Cohesive soil compaction in the coastal table of Alagoas

ABSTRACT

The sugarcane cultivation requires an intensive use of agricultural machinery for tillage and crop procedures; however, compression effect on soil caused by passage of agricultural machinery has been little studied in the last years. Deformations due to continuous traffic of agricultural machinery and implements in association with inadequate managements have been observed to decrease the sustainability of agricultural soils, mainly because of alterations of some soil physical attributes which can make the soil more susceptible to compaction. The objective of this work was to evaluate the susceptibility to compaction of a Yellow Argissol submitted to three distinct managements of sugarcane cultivation and native forest, through aggregate stability and distribution, compaction and compressibility characteristics of the soil. Four distinct areas were investigated: a native forest (NF), an area cultivated with sugarcane without irrigation (ANI), an irrigated area (AWI), and an area irrigated with vinasse (AIV). Soil samples were collected randomly, in 50.00×50.00m-area, at depths ranging from 0 to 20 cm, 20 to 40 cm, and 40 to 60 cm. For assessment of aggregate stability and distribution it was evaluated total organic carbon (TOC) content, wet aggregate stability, aggregate stability index (ASI), module of thinness (MT), and percentage of aggregates larger than 2.0 mm stable in water (AGRI). For compaction analyses, undeformed soil samples were collected with metallic rings and were used for the determination of soil density. Deformed samples were used for the determination of organic matter content and the performance of Standard Proctor tests. Regarding the compressibility analyses, a trench was dug in the four selected areas and four underformed samples were collected in each depth. The samples were collected using metallic rings with 6.4 cm in diameter and 2.5 cm in height, at 0-20, 20-40 cm, with four replicates. In laboratory, the samples were previously saturated and submitted to soil suction ranging from 0.1 to 1500. Confined compression tests were performed with the saturated samples. Data were submitted to variance analysis and the differences among means were compared using the Tukey test at 5% of probability. In all areas, the results pointed out decrease in aggregate stability as the soil depth increased for classes higher

than 2.0 mm. The aggregation indexes of the cultivated areas were comparatively smaller than that of the native forest following the sequence NF>AIV>AWI >AWI. The management AWI showed the smallest aggregation indexes and AIV was the most close to NF. Significant and positive correlations occurred between The management that more closely approached the native forest conditions was the vinasse management (MWV), which showed better aggregate stability under water. Significant and positive correlations were obtained between TOC and stability indexes studied. Data of maximum capacity of soil compaction followed the crescent order of compaction susceptibility ANI>AWI>AIV>NF, and the critical humidity the inverse order. A regression analysis for pre-consolidation stress in function of water content (Ug) and correlations among the several variables were carried out. In all investigated areas, the depth of 0 to 20 cm showed to be more susceptible to compaction than 20 to 40 cm; the AIV management modified the compressive behavior of the soil in both depth ranges (0-20 and 20-40 cm); and the load support capacity of the soil was larger in the depth of 20 to 40 cm.

Key-word: managements, compaction, compressibility, use of residues

SUMÁRIO

Introdução	1
Objetivos	2
Fundamentação teórica	3
Referências	18
1. CAPÍTULO I. Distribuição de agregados em um Argissolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes manejos	26
1.1 Resumo.....	27
1.2 Abstract.....	28
1.3 Introdução.....	28
1.4 Material e métodos.....	30
1.5 Resultados e discussões.....	33
1.6 Conclusões.....	40
1.7 Literatura Citada.....	40
2 CAPÍTULO II. Compactação de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos	44
2.1 Resumo.....	45
2.2 Abstract.....	45
2.3 Introdução.....	46
2.4 Material e métodos.....	48
2.5 Resultados e discussões.....	51
2.6 Conclusões.....	57
2.7 Literatura Citada.....	57
3 CAPÍTULO III. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos	61
3.1 Resumo.....	62
3.2 Abstract.....	62
3.3 Introdução.....	64
3.4 Material e métodos.....	66
3.5 Resultados e discussões.....	69
3.6 Conclusões.....	77
3.7 Literatura Citada.....	78
4. CONCLUSÕES GERAIS	80

INTRODUÇÃO

Os tabuleiros costeiros constituem uma cobertura sedimentar formada no terciário, de grande ocorrência ao longo do litoral brasileiro. A ocorrência de solo com horizonte coeso está relacionada às condições climáticas aliada ao relevo e material de origem, constituído por sedimentos detríticos do Grupo Barreiras, que favorecem a formação dos horizontes coesos. Esses horizontes apresentam consistência dura a muito dura, quando seco, e friável quando úmido, acarretando sérios problemas quanto ao seu manejo.

A cana-de-açúcar é a cultura de maior extensão econômica do Nordeste, destacando-se os Estados de Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte, como maiores Estados produtores. No Estado de Alagoas, a maioria das unidades produtoras de açúcar está localizada no litoral em solos que apresentam relevo leve a levemente ondulado, condições favoráveis à agricultura mecanizada. Algumas Usinas dessa região estão localizadas, especificamente, em áreas que apresentam horizontes coesos.

Aliado a essa condição, o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, tratamentos culturais e colheita vêm progressivamente causando problemas de compactação. Sendo o preparo do solo do tipo convencional, aumenta o risco de compactação subsuperficial, pela carga aplicada ao longo do tempo. Em consequência da compactação há aumento de massa por unidade de volume, acarretando maior densidade do solo e resistência do solo à penetração, com redução da porosidade total, da continuidade de poros, além da diminuição da permeabilidade e da disponibilidade de água e nutrientes no solo.

Os horizontes coesos são encontrados nos Latossolos e Argissolos, solos que se caracterizam por apresentarem baixa CTC, baixos teores de matéria orgânica e bastantes intemperizados. Uma alternativa utilizada para suprir os baixos teores da matéria orgânica desses solos é a utilização da vinhaça na fertirrigação, em virtude dos seus elevados níveis de matéria orgânica e nutrientes. A grande vantagem da utilização da vinhaça é que ela pode substituir em grande parte os nutrientes da adubação mineral, principalmente o potássio.

Os sistemas de manejos podem promover um rearranjo das partículas primárias e de agregados do solo devido a compactação, resultando em novos estados de resistência do solo a pressões externas. Aliados a condição dos horizontes coesos, que é uma característica pedogenética, a compactação do solo vem, ao longo dos anos, aumentando os problemas de degradação do solo de tabuleiros costeiros.

Assim, uma das formas de atenuar os efeitos do processo de compactação é a adição de matéria orgânica na forma de torta de filtro ou vinhaça, com a finalidade de dissipar parte da pressão exercida pelos rodados das máquinas e de aumentar, por sua elasticidade, a resistência à compactação.

OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade e distribuição de agregados, a compactação do solo, através da densidade ótima e umidade crítica pelo ensaio de Proctor normal, a compressibilidade e capacidade de suporte de carga de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes sistemas de manejo sob cultivo de cana-de-açúcar.

Para alcançar tais objetivos foram desenvolvidos três trabalhos que serão relatados neste trabalho através de Capítulos. O primeiro avaliou a estabilidade e distribuição de agregados por via úmida; o segundo a compactação nos manejos estudados, e o terceiro a compressibilidade e a capacidade de suporte dos diferentes manejos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A cultura da cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área plantada de 6,96 milhões de hectares e uma safra anual de cerca de 475,07 milhões de toneladas, das quais 47,0% (223,48 milhões de toneladas) são para a fabricação de açúcar e 53,0% (251,59 milhões de toneladas) são para a produção de álcool (MAPA/CONAB, 2007). O aumento da produção de açúcar e de álcool resulta, por outro lado, no aumento da produção de resíduos originados do processo de fabricação, como vinhaça, torta de filtro, água de lavagem, cinzas de caldeira, entre outros (FIRME, 2005).

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada no Centro-Sul, Norte e Nordeste, o que permite dois períodos de safra de abril a novembro e de setembro a abril. No Nordeste, Alagoas se destaca por ser o maior produtor da região, colhendo 29,255 milhões de toneladas (SINDAÇÚCAR-AL, 2008) com uma área de aproximadamente 28.000 km², que corresponde a 2.800.000 hectares. Considerando-se que aproximadamente 50% dessa área, ou seja, 1.400.000 hectares, são vocacionados para a cultura da cana-de-açúcar e a área cultivada de 450.000 hectares, a lavoura de cana está implantada em cerca de 16% da área total do Estado, sendo responsável por 80% do PIB agrícola. As 27 unidades agroindustriais estão localizadas em região de mata úmida, e a grande maioria em áreas dos tabuleiros costeiros.

Tabuleiros costeiros e os solos coesos

O termo Tabuleiro Costeiro é utilizado para designar uma forma de paisagem tabular dissecada por vales profundos e encostas com forte declividade. De uma forma geral, apresentam relevo plano a suavemente ondulado. (DEMATTE, 1996; JACOMINE, 2001; GIAROLA, 2002). Extensas áreas da formação barreiras cobrem grande parte dos Estados do Nordeste, particularmente Bahia, Alagoas e Rio Grande do Norte, onde o uso atual, na região mais úmida, é predominantemente ocupado pela cana-de-açúcar. Em termos de

granulometria o material da formação é bastante heterogêneo, sendo mais argiloso no Estado de Alagoas, e mais arenoso no Rio Grande do Norte. É um material sedimentar, bastante espesso e intemperizado (Jacomine et al., 1996).

Os solos originados deste sedimento são os mais diversos, mas predominantemente com perfis Latossólicos, de baixa saturação por bases, elevado teor de alumínio, podendo ter severas deficiências de micronutrientes, principalmente, cobre e zinco. O relevo em geral é plano a suave ondulado, uniforme de interflúvios longos, muito favoráveis à mecanização. Devido ao processo erosivo, vales profundos foram formados, podendo atingir material rochoso inclusive do pré-cambriano (DEMATTE, 1996).

Os primeiros estudos relacionados com o caráter coeso nos solos brasileiros foram realizados na década de 50, quando, em levantamento de solos do Estado do Rio de Janeiro, foram identificados horizontes com forte resistência à penetração do martelo pedológico (BARROS et al., 1958). Mas só na década de 70, o termo “coeso” foi aplicado para distinguir horizontes minerais subsuperficiais do solo, que apresentavam consistência dura a muito dura, quando secos, e friável a firme, quando úmido (EMBRAPA, 1978). A partir de 1980, intensificaram-se os estudos sobre solos coesos, nas áreas dos tabuleiros costeiros, principalmente pela sua importância econômica e localização regional (JACOMINE, 1996).

Segundo Acha Panoso (1976), a formação dos solos coesos está relacionada com o relevo e ao material de origem. A permanência da água da chuva por períodos prolongados, bem como a presença do lençol freático superficial, provoca uma lavagem mais completa, arrastando o ferro para maiores profundidades e dando lugar a solos de aspecto maciço, pouco poroso, coeso e de baixa fertilidade.

A ocorrência de solos com horizontes coesos está relacionada às condições climáticas aliada ao relevo e a material de origem constituído de sedimentos terciário do Grupo Barreiras. (JACOMINE, 2001; RIBEIRO, 2001).

Segundo Jacomine (1996) e Ribeiro (2001), no Nordeste os solos coesos se caracterizam por apresentarem horizontes formados por adensamento pedogenético da camada subsuperficial, podendo variar entre 0,3 e 0,7 m de profundidade. Nos solos com horizonte B textural (Argissolos) este adensamento atinge normalmente profundidades maiores, mas pode encontrar-se na superfície devido à erosão do horizonte superior, enquanto os fragipãs e duripãs geralmente são encontrados a profundidades maiores que 0,80 m, não sendo fator limitante para as culturas.

Atualmente, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA 2006) define o caráter coeso para distinguir solos com horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistente à penetração da faca ou martelo pedológico e que são muito duros a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Uma amostra úmida quando submetida a compressão, deforma-se lentamente, ao contrário do fragipã, que apresenta quebradicidade (desintegração em fragmentos menores). Esses horizontes são de textura média, argilosa ou muito argilosa e, em condições naturais, têm uma fraca organização estrutural, são geralmente maciços ou com tendência a formação de blocos. O caráter coeso é comumente observado nos horizontes transicionais AB e, ou, BA, entre 0,3 m a 0,7 m da superfície do solo, podendo prolongar-se até o Bw ou coincidir com o Bt, no todo ou em parte. “Uma amostra de horizonte com caráter coeso, quando seco, desmancha-se ao ser imersa em água” (EMBRAPA 2006).

O interesse pelo estudo da gênese dos solos com horizontes coesos dos tabuleiros tem crescido nos últimos anos. O reconhecimento de que há uma enorme complexidade na formação desse horizonte coeso tem levado a comunidade científica a desenvolver várias hipóteses, porém até agora não foram suficientes para esclarecer totalmente a origem do comportamento desses solos.

Por outro lado, Resende, (1982) destaca que as baixas quantidades de óxidos de ferro (goethita) e de alumínio (gibbsita) e a presença de ciclos de umedecimento e secagem, tanto nos Latossolos Amarelos como nos Podizólicos Amarelos, favoreciam os ajustes face a face da caulinita, camada de sílica (tetraédrica), alternada com uma camada de alumina (octaédrica) predominante na fração argila destes solos, responsável pelo endurecimento (coesão) do solo quando seco.

Ribeiro (1998) destaca que a matéria orgânica tem um papel muito importante no processo pedogenético desses solos. As substâncias leve ou pouco humificadas e os ácidos fúlvicos atacam quimicamente os argilominerais degradando a estabilidade estrutural e, por consequência, na desordem hídrica do solo. Isso conduzira a presença de lençol de água suspenso, dando condições para atuação de reações tipo ferrólise, que poderiam dar início a degradação do plasma argiloso, liberando alumínio, ferro e, principalmente, sílica amorfa, todos eles contribuindo de alguma forma na geração do horizonte coeso dos Latossolos Amarelos e Podizólicos Amarelos do Recôncavo Baiano.

Segundo Lima (2004) a gênese dos horizontes coesos ainda é bastante polêmica e pode estar associada a vários processos simultâneos. Agrupamento de partículas de argila face a face; perda do plasma argiloso da camada superficial para as subjacentes (argiluviação);

presença de compostos orgânicos pouco polimerizados; presença de sílica secundária, ferro e alumínio, dispersos nos microporos; adensamento resultante da alteração da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem; contribuição da areia fina, etc. (JACOMINE, 1996; ARAÚJO FILHO et al., 2001; RIBEIRO, 1998.).

Estabilidade de agregados do solo

A estabilidade de agregados é o resultado de uma complexa interação de processos físicos, químicos e biológicos no solo (TISDALL & OADES, 1982). Segundo Correa (2002) a manutenção de um bom estado de agregação e estabilidade e, conseqüentemente, de uma boa estrutura é condição primordial para garantir altas produtividades. A estrutura do solo é um dos atributos mais importantes, pois está relacionada com a disponibilidade de ar e água, e das raízes das plantas, com o suprimento de nutrientes, com a resistência mecânica do solo à penetração, e com o desenvolvimento do sistema radicular.

Carpenedo & Mielniczuc (1990), trabalhando com dois Latossolos (Latossolo Roxo distrófico e Latossolo Roxo álico) observaram que tanto a estabilidade como a qualidade dos agregados em água foram afetadas pelo sistema de manejo e que o solo submetido ao preparo convencional apresentou menor agregação do que o sob mata nativa.

O uso e o manejo conjugados ao tempo de utilização, tendem a provocar a perda da estrutura original do solo pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990), com conseqüente redução dos macroporos e aumento de microporos e densidade. Sistemas de manejo que adotam revolvimento em área total, são os que mais desagregam o solo, por afetarem o teor de matéria orgânica, principal agente de formação e estabilização dos agregados (SILVA & MIELNICZUK, 1997; ALBUQUERQUE et al., 2001).

Compactação do solo

Nas últimas décadas tem aumentado o uso do solo e, conseqüentemente, o número das operações com máquinas agrícolas, aumentando os efeitos solo-máquina. A literatura tem mostrado que grande parte da compactação nos solos agrícolas ocorre logo após as primeiras passadas das máquinas na área e que os tráfegos posteriores somente ocasionam compactação adicional, com o aumento de carga ou da umidade do solo.

A decisão de trafegar ou não em determinado talhão para efetuar determinada operação motomecanizada após ocorrência de chuva, ou mesmo após a irrigação, depende de fatores relacionados ao clima, à operação a ser realizada, ao peso das máquinas e dimensões do rodado e ao solo. Com base nas informações meteorológicas e na faixa de umidade em que se encontra o solo é que se deve possibilitar o tráfego de máquinas e implementos agrícolas (CASTRO NETO, 2001). No caso específico dos solos coesos dos tabuleiros costeiros, em períodos secos, quando da realização de operações agrícolas de manejo de solo, a única opção é a aplicação de uma lâmina de água, devido às condições de alta consistência em que se encontra o solo.

Dessa forma, Camargo & Alleoni (2006) enfatizam que o tráfego de máquinas e implementos, principalmente quando efetuado em determinadas condições de umidade, provocam alterações no arranjo das partículas do solo, diminuindo, geralmente, o volume ocupado por determinada massa de terra e o tamanho dos poros do solo que permitem livre circulação de ar e água, os chamados macroporos. Por conseguinte, outros atributos físicos do solo como aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração são modificadas, afetando também atributos químicos (disponibilidade dos nutrientes para as plantas), biológicos (condições do solo para desenvolvimento de microrganismos) e a região ocupada pelas raízes, a rizosfera. No final do processo, encontra-se a planta, que será, em suma, o retrato do sistema de manejo adotado.

Hakansson & Reeder (1994) mostraram que a produção de grãos diminuiu 14% no primeiro ano com o aumento do tráfego em solos agrícolas de sete diferentes países da Europa e América do Norte. O efeito do tráfego induz a compactação que reduz a permeabilidade do solo dificultando o crescimento das raízes. Situações de deficiências nutricionais, mudanças no volume de poros do solo pode reduzir o suprimento de nutrientes e água para as raízes.

Entende-se como preparo periódico, operações de movimentação do solo, com a finalidade de instalação periódica de culturas (BALASTREIRE, 1987). Neste tipo de preparo são utilizados implementos com discos, que cortam o solo em secções semicirculares. No caso da cana-de-açúcar, o preparo convencional consiste na passagem de uma grade pesada, com discos de 32", que faz o revolvimento vertical em área total. Na complementação dessa operação, utiliza-se grade leve, com discos de 22" que, segundo Balastreire (1987), tem a função de desagregar os torrões, nivelar a superfície do solo para facilitar o plantio, diminuir os vazios que resultam entre os torrões e destruir os sistemas de vasos capilares que se formam na camada superior do solo, a fim de evitar a evaporação de

água das camadas mais profundas. A operação seguinte consiste na passagem de sulcador de duas ou três linhas, que tem a função de abrir sulcos para o plantio da cana-de-açúcar.

A mobilização do solo é realizada principalmente para aumentar a aeração e a infiltração da água, incorporação de corretivos e controle de pragas, moléstias e plantas invasoras. A maioria dos solos brasileiros utilizados para culturas anuais é preparada mecanicamente, com o uso de arados e ou grades de discos, ferramentas de corte e revolvimento com elevadas pressões sobre o solo. O uso contínuo de equipamentos de preparo constituídos de discos favorece a ocorrência de erosão, agravada pela degradação física dos solos, com surgimento de crostas superficiais e compactação subsuperficial (MAIA, 1999).

No Brasil, o preparo convencional do solo vem sendo utilizado durante muitas décadas e ainda é praticado em muitas regiões, inclusive no Nordeste. Baseia-se em tecnologia adotada em climas temperados, não considerando as condições tropicais predominantes na região. Neste sistema, o revolvimento do solo é realizado através de aração e gradagens sucessivas, que promovem a inversão das camadas expondo-as ao calor e aos raios solares.

Segundo Hakansson et al. (1988), de maneira geral, o sistema de preparo convencional do solo tem ocasionado descompactação mecânica da camada mobilizada e, ao mesmo tempo em que a carga é aplicada, compactação subsuperficial com efeito acumulativo em subsuperfície ao longo dos anos.

Nas últimas três décadas houve um aumento da intensidade de uso do solo e da mecanização, principalmente com as operações agrícolas de aração e gradagem, com conseqüente degradação da estrutura do solo. A ação dos elementos ativos do equipamento de preparo do solo causa modificações, seja pulverizando os horizontes superficiais ou, promovendo a compactação mecânica dos horizontes subsuperficiais, comumente chamado pé de grade ou pé de arado (ASSIS, 2002).

As operações de preparo do solo modificam a estrutura do solo e distribuem substâncias orgânicas ricas em energia no solo, influenciando nas alterações de suas propriedades e processos físicos, químicos e biológicos. (CARTER, 2004).

Nos Estados de Pernambuco e Alagoas é comum o preparo do solo em condições desfavoráveis, ou seja, quando o solo ainda não atingiu a condição friável, utilizando-se grades pesadas principalmente com o solo seco.

Para Hillel (1980) as atividades agrícolas só devem ser realizadas quando o solo apresentar a condição friável, que corresponde à faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade.

A compactação do solo é um processo de densificação que leva ao aumento de sua resistência, redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água (SOANE & OUWERKERK, 1994). Por diminuir a macroporosidade, a água retida nos microporos permanece sob altas tensões, podendo estar indisponível para as plantas (KERTZMANN, 1996).

Quando um solo não saturado é submetido a determinada pressão, ocasionando redução de volume com conseqüente aumento de densidade, ocorre o processo de compactação do solo (GUPTA & ALLMARAS, 1987). O arranjo estrutural do solo, a consistência, a porosidade total, o número e tamanho dos poros e a difusão de gases são afetados pela compactação, que, por conseqüência, afeta o crescimento das raízes (TAYLOR & BRAR, 1991).

Em termos práticos, o uso intensivo de máquinas, segundo Camargo & Alleoni (1997), vem tornando comuns os problemas de compactação em solos agrícolas. Uma vez instalada, a compactação do solo determina, de certa maneira, as relações entre ar, água e temperatura, e estas influenciam a germinação, a brotação e a emergência das plantas, o crescimento radicular e, praticamente, todas as fases de seu desenvolvimento (CAMARGO & ALLEONI, 2006).

Os impactos causados pela compactação do solo tiveram início com a mecanização da agricultura, ainda na metade do século XIX, pelo tráfego de máquinas tratoras, inicialmente a vapor, na Europa e nos Estados Unidos (SOANE & OUWERKERK, 1994). Com o advento dos motores de combustão interna, ainda no início do século XX, foi possível a redução da relação peso/potência nos tratores e na metade do século a adoção dos motores diesel, possibilitou a utilização massificada desse insumo, aliada ao desenvolvimento de implementos acoplados ou de arrasto, que são utilizados para o preparo do solo que antecede o plantio da cana-de-açúcar.

Estudos sobre compactação de solos agrícolas tiveram início na década de 50, envolvendo os seguintes conhecimentos: distribuição de pressão no solo devido a carga por pneus, pressão de inflação e condição do solo; efeito da pressão de compressão na porosidade de diferentes tipos de solo e conteúdos de água; extensão da densificação e distribuição de pressão no solo abaixo dos pneus; e deformação causada pelo patinamento em relação à força transmitida aos rodados (OTHOME & TAN, 2001).

Quando um rodado se desloca sobre uma superfície, são geradas tensões perpendiculares e tangenciais a ele. Essas tensões, também denominadas tensões normal e

cisalhante, são transmitidas à massa de solo, a partir da área de contato rodado-solo (BARBOSA et al., 2004).

Para Etana et al. (1997), a compactação é uma das principais causas da degradação dos solos agrícolas. Seus efeitos atingem as propriedades e processos do solo algumas vezes de forma positiva, outras vezes de forma negativa. A susceptibilidade à compactação do solo depende primeiramente de suas propriedades físico-mecânicas, relacionadas com o conteúdo de água e o tipo de solo. O impacto das operações mecanizadas no solo depende principalmente dos rodados, da carga aplicada e do número de passadas do conjunto trator-implemento.

Considerando a gravidade dos problemas gerados pela compactação do solo, estudos de vários países desenvolvem alternativas de como prevenir a compactação, com base em estudos empíricos ou em modelos matemáticos probabilísticos. Danfors (1974) com base em estudo empírico, concluiu que a carga máxima admitida por eixo seria de 6 Mg para evitar a compactação das camadas subsuperficiais do solo. Para Van der Akker (1994) a susceptibilidade à compactação das camadas subsuperficiais do solo da Holanda pode ser classificada com base na tensão de pré-consolidação do solo. Arvidsson et al. (2001) calculou o risco de compactação pelo tráfego em diferentes períodos do ano, com base na tensão de pré-consolidação a diferentes teores de água no solo.

Ensaio de Proctor normal

Uma alternativa para avaliar a susceptibilidade à compactação de um solo é através da utilização de ensaio de Proctor normal, usado para determinar a densidade máxima para uma umidade ótima ou umidade crítica (VARGAS, 1977). O interesse da sua aplicação na Engenharia Agrícola tem sido recente (DIAS JÚNIOR & MIRANDA, 2000; BARZEGAR et al., 2000; ASSIS, 2002; WEIRICH NETO et al., 2002; SILVA, 2003; NHANTUMBO et al., 2003; BRAIDA et al., 2006; MENTGES et al., 2007).

O ensaio consiste em compactar uma amostra previamente preparada com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade crítica, dentro de um cilindro padrão (10 cm de diâmetro, 12,73 cm de altura, volume de 1000 cm³) através de 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 kg e caindo de 30 cm de altura. A energia de compactação utilizada no Proctor normal segundo Vargas (1977), equivale a passagem de cerca de 10 vezes um rolo pé-de-carneiro que pesa entre 5 a 7 toneladas, sobre uma camada de 30 cm de espessura.

Após cinco ensaios pode-se construir a curva de compactação (Figura 1) que relaciona a umidade gravimétrica em função da densidade do solo, obtendo-se assim a umidade ótima ou crítica de compactação e a densidade máxima do solo. Segundo Lambe (1979), as partículas do solo são consideradas como colóides, quando as forças elétricas, que atuam entre as mesmas, superam as forças de massa. Na Figura 1 a amostra compactada no ramo seco (ponto A) não ocorre a formação da dupla camada, devido à deficiência de água. Dessa forma se reduz a repulsão entre as partículas tendendo a formar uma estrutura floculada.

No entanto, com a aplicação da carga no ensaio de Proctor, ocorre a redução da concentração eletrolítica, no ponto B, diminuindo o grau de floculação, o que permite uma maior orientação das partículas. As partículas estando mais próximas produzem uma estrutura mais densa. A adição de água funciona como lubrificante fazendo com que as partículas deslizem entre si. Para umidades maiores que a umidade ótima ocorre uma maior expansão da dupla camada e as partículas dos colóides ficam alinhadas formando uma estrutura dispersa. O maior grau de alinhamento e o completo desenvolvimento da dupla camada fazem com que as forças de repulsão superem as forças atrativas reduzindo a densidade.

A curva de compactação do solo é afetada por vários fatores como energia de compactação, textura, umidade e matéria orgânica.

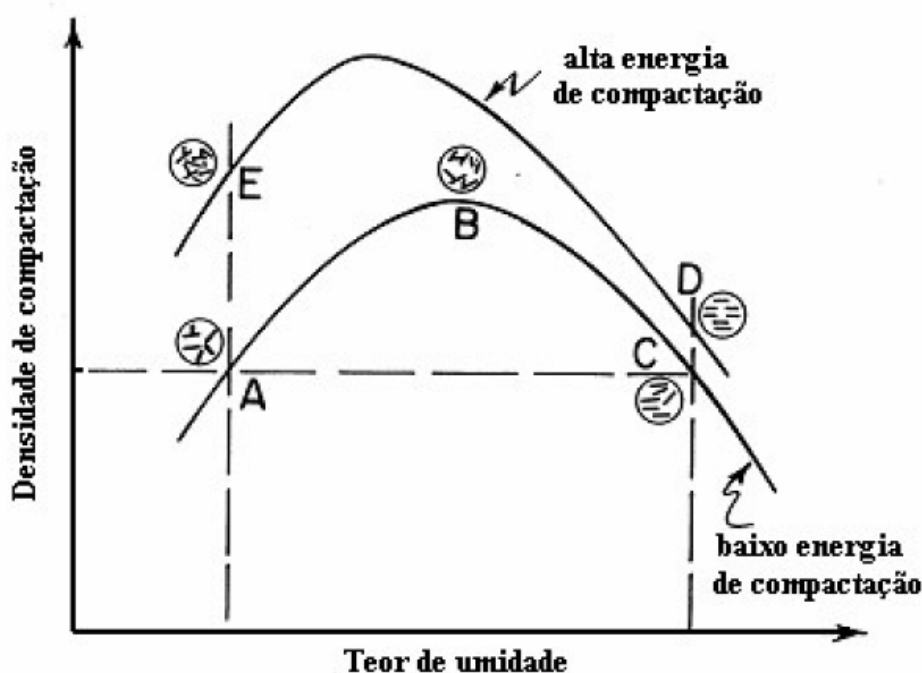


Figura 1. Curva de compactação do solo. (Lambe, 1979)

Por outro lado, a matéria orgânica exerce considerável influência sobre a curva de compactação do solo pelo seu alto poder de absorção de água, motivo pelo qual dificulta a compactação do solo. Assim, alguns autores verificaram correlação entre a umidade crítica e o teor de matéria orgânica (DIAS JÚNIOR, 2000; BERZEGAR et al. 2000; DIAZ-ZURITA & GROSSO, 2000; BRAIDA et al., 2006).

Compressibilidade do solo

O termo compressão se refere ao processo que descreve a diminuição de volume quando o solo é submetido a uma força externa exercida por uma carga aplicada. A compressão assume processos diferentes, dependendo da presença ou não da água. Assim, compactação é a redução de volume por expulsão de ar, feita muito rapidamente por equipamento mecânico, enquanto a consolidação é um processo pelo qual o solo sofre deformações devido a expulsão de água e ar dos vazios como resultados de aplicação de tensões em solos não saturados (HOLTZ & KOVACS, 1981).

A preocupação com os problemas de compactação do solo vem sendo estudada desde o século passado, quando se intensificou o uso do trator. Mas em 1920, Terzaghi desenvolvendo estudos experimentais onde foi verificado que o comportamento de solos saturados com relação à compressibilidade e à resistência ao cisalhamento está relacionado com a tensão média entre os grãos, a qual foi denominada pelo mesmo de tensão efetiva (MARSHALL & HOLMES, 1978; HILLEL, 1980; HOLTZ & KOVACS, 1981).

Nos solos saturados onde os vazios são preenchidos por água, a tensão atuante sobre o solo é dividida em duas parcelas: tensão efetiva, σ' , ou tensão intergranular, que atua nas partículas sólidas do solo e pressão neutra, u_w , que é transmitida à água contida nos vazios do solo (LAMBE & WHITMAN, 1979). A tensão total (σ) é transmitida via fase sólida e líquida, logo a tensão total é igual à soma das duas parcelas, ou seja:

Onde: $\sigma = \sigma' + u_w$ σ = tensão total aplicada

σ' = tensão efetiva

u_w = pressão neutra

Assim, a tensão efetiva é definida pela equação:

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

Para os solos não saturados os problemas são mais complexos uma vez que os poros do solo são preenchidos por dois fluidos, ar e água, que devido à tensão superficial entram em equilíbrio a pressões diferentes. Devido a este sistema trifásico (ar, água e solo) se torna difícil quantificar a parcela de tensão transmitida entre os grãos (tensão efetiva) ao se aplicar uma carga externa.

Nestas condições, a pressão exercida pelo ar deve ser considerada tendo em vista que a tensão efetiva é descrita em termos de tensão dos poros com ar $(\sigma - u_a)$, e a tensão dos poros com água $(\sigma - u_w)$ descrita por Bishop, em 1959 (HORN & LEBERT, 1994).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

Onde χ é um fator que depende do grau de saturação do solo (para solo completamente seco tem-se, $\chi = 0$, e quando completamente saturado $\chi = 1$);

$(\sigma - u_a)$ = variação da tensão normal

$(u_a - u_w)$ = variação da sucção matricial

Entretanto, pesquisas têm mostrado que essa expressão não reflete a relação correta entre variação de volume e tensão efetiva. O parâmetro χ é de difícil avaliação e apresenta valores diferentes quando determinados por força de cisalhamento e em termos de variação volumétrica. Fredlund & Rahardjo (1993) considerando o solo não saturado como um sistema de quatro fases, denominaram a quarta fase formada pela interface ar e água, como membrana contrátil. Com base na Mecânica do contínuo, mostraram que a tensão total (σ) , pressão poro-ar e pressão poro-água poderiam ser combinadas em duas variáveis de estado de tensão independentes $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$.

A tensão total em solo parcialmente saturado é transmitida via sólido, líquido e fase gasosa (KELLER, 2004).

Para solos não saturados a equação de tensão efetiva é modificada para levar em conta o fato de que a tensão de água de poro não está agindo nos poros de solo seco, assim, para superfícies sem carga temos (MOSADDEGHI, 2003).

$$\sigma' = -\chi(\Psi m)$$

Onde: Ψm é a sucção matricial do solo

Lebert & Horn (1991) observaram que os valores da tensão de pré-consolidação determinada de acordo com o método de Casagrande (1936), satisfazem tanto a condição de solo saturado, como para a condição de solo não saturado.

A redução do volume de vazios do solo devido a tensões exercidas sobre ele tem sido estudada em solos saturados, utilizando-se a curva de compressão. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da tensão vertical aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como índice de vazios, porosidade ou densidade do solo (LARSON et al., 1980).

A curva de compressão apresenta duas regiões distintas que podem ser observadas na Figura 2. A curva de compressão secundária que representa os níveis de pressões experimentadas pelo solo no passado. Esta parte da curva apresenta forma curvilínea, onde ocorrem pequenas deformações elásticas e reversíveis, sendo a região do solo onde ocorre o cultivo ou pode ser trafegada, sem que ocorra a compactação adicional. A parte linear corresponde à reta de compressão virgem, onde são evidenciadas as primeiras pressões exercidas ao solo, cuja aplicação de qualquer nível de pressão condicionará deformações plásticas irreversíveis (CASAGRANDE, 1936; DIAS JÚNIOR & PIERCE, 1996).

Segundo a teoria a consolidação considera a amostra saturada, confinada, camada de solo incompressível, de extensão infinita, espessura H e comprimento unitário, onde as deformações são verticais, a deformação ΔH é função da variação do seu índice de vazios (Adaptação de HOLTZ & KOVACS, 1981).

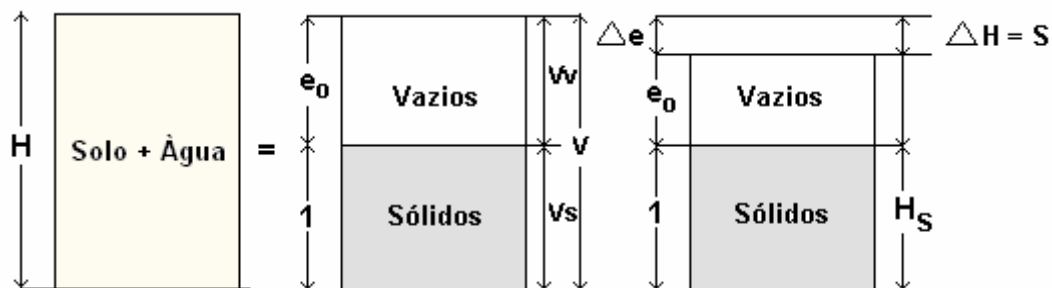


Figura 2. Variação da espessura da camada do solo. (Recalque)

$$\Delta H = \Delta e \times H_s \quad (1)$$

Onde: H e H_s são respectivamente, a altura da amostra e altura dos sólidos, e Δe é a variação de vazios.

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{H - H_s}{H_s}$$

Ou seja: $H_s = \frac{H}{1 + e_0}$

Substituindo em (1) temos: $\Delta H = \Delta e \frac{H}{1 + e_0}$

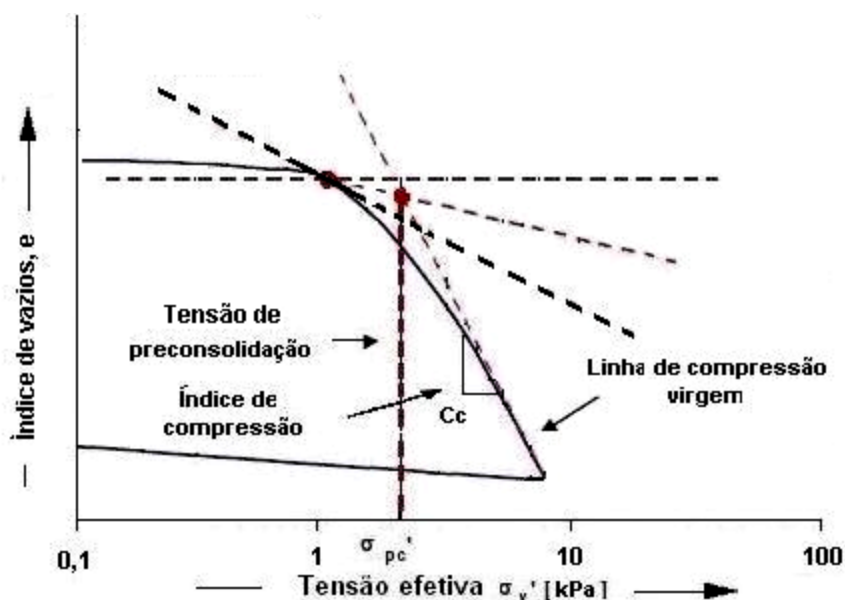


Figura 3. Curva de compressão do solo.

Que permite estimar o valor das deformações numa camada de solo sob um determinado carregamento.

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad (2)$$

O valor do índice de vazios é dado a cada instante por

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H}(1 + e_0)$$

Da curva de compressão do solo (e - $\log\sigma$), obtida no ensaio edométrico, estudam-se os parâmetros caracterizadores da compressibilidade do solo, levando-se em consideração a teoria de consolidação uniaxial que considera a amostra saturada, confinada, onde as deformações são verticais.

A relação entre a variação do índice de vazios ocorrido na camada de solo saturado, devido ao acréscimo de tensão efetiva aplicada é conhecida como índice de compressão, C_c , sendo o coeficiente angular da reta virgem (Figura 3).

$$\text{Assim, } C_c = \frac{\Delta e}{\sigma_e} = \frac{\Delta e}{\log \sigma_{ef} - \log \sigma_{ei}}$$

$$\text{Daí, } \Delta e = C_c \cdot \log \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_{ei}},$$

que substituindo em (2) resulta em: $\Delta H = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_1} \cdot \log \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_{ei}}$ ou

$$\Delta H = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_1} \cdot \log \frac{\sigma_{ef} - \Delta \sigma'}{\sigma_{ei}}$$

Onde:

ΔH = recalque da camada do solo;

H = espessura da camada do solo;

e_i = índice de vazios inicial;

σ_{ei}' = tensão vertical efetiva inicial;

$\Delta \sigma'$ = incremento de tensão efetiva, na qual produzirá a consolidação;

C = constante que para um solo normalmente consolidado se denomina C_c , índice de compressão, e para um solo pré-consolidado se denomina C_r , índice de re-compressão.

Ambos os coeficientes se obtém através de ensaio de consolidação.

A susceptibilidade a compactação depende de fatores externos e internos do solo. Os externos se relacionam com o tipo, intensidade, frequência e tempo de aplicação de uma carga. Os internos com a distribuição granulométrica, tipo de argila, conteúdo de matéria orgânica, densidade aparente, agregação, umidade e propriedades mecânicas (HORN, 1988).

Para avaliar a susceptibilidade do solo à compactação, várias relações envolvendo propriedades físicas e mecânicas do solo têm sido obtidas, usando amostras deformadas (LARSON et al., 1980) e indeformadas (LEBERT & HORN, 1991) e; utilizando ensaio de compressão uniaxial (LARSON et al., 1980; BRAIDA, et al, 2006).

Várias pesquisas foram realizadas sobre efeitos de tensões aplicadas ao solo, concluindo que as tensões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas se situam entre 50 e 300 kPa (LEBERT & HORN, 1991; SILVA et al., 2000).

Segundo Dias Júnior & Pierce (1996) os modelos matemáticos usados para avaliar a compactação do solo tem dado ênfase à reta de compressão virgem, a qual define deformações não recuperáveis, não levando em consideração a história da tensão do solo causada por diferentes tipos de manejo. Por outro lado, os modelos que se baseiam na pressão de pré-consolidação consideram a história da tensão em termos da pressão de pré-consolidação como uma função da umidade do solo. Neste modelo, a pressão de pré-consolidação representa o valor máximo da pressão que poderá ser aplicada ao solo para evitar a compactação adicional. Um dos enfoques dessa modelagem tem considerado a pressão de pré-consolidação do solo como sendo a propriedade que expressa a capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999).

REFERÊNCIAS

ACHÁ PANOSO, L. **Latossolo Vermelho-amarelo de tabuleiro do Espírito Santo: formação, características e classificação.** Recife, PE: UFRPE, 1976. 116f. (Tese de Livre Docência) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1976.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.717-723, 2001.

ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, J.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos dos tabuleiros do nordeste do Brasil. In: Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2001. **Anais....** Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001, p.123-142.

ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H. et al. Subsoil compaction caused by heave sugarbeet harvesters in southern Sweden: II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.60, n.1-2, p.67-78, 2001

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. 141f. Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP, SP, 2002.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas.** São Paulo, Ed.Manolo, 1987. 310 p.

BARBOSA, J.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; VIEIRA, L.B.; DIAS, G.P. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.8, p.321- 325, 2004.

BARROS, H. da C.; DRUMOND, J.L.; CAMARGO, M.N. et al. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro e Distrito Federal.** Rio de

Janeiro. Comissão de Solos do CNEPA-SNPA. Ministério da Agricultura, 1958. 350 p. (SNPA-Boletim Técnico 11).

BARZEGAR, A.R.; ASOODARB, M.A.; ANSARIA, M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.57, n.3, p.67-172, 2000.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA et al. 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.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132 p.

_____ **Conceitos Gerais de Compactação do solo**. 2006. Disponível em: <<http://www.infobios.com/Artigos/CompSolo/Comp1.Htm>>. Acesso em: 03 mar. 2007.

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**, Campinas, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CARTER, M.R. Researching structural complexity in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.1, p.1-6, 2004.

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

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalhados com máquinas agrícolas**. 2001. 155f. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n.2, p. 203-209, 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Cana-de-açúcar, safra 2007/2008**; terceiro levantamento novembro 2007. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 2 jan. 2008.

DANFORS, B. Changes in the subsoil porosity caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n.2-3, p.135-144. 1994

DEMATTE, J.L.I.; MAZZA, J.A.; DEMATTÊ, J.A.M. Caracterização e gênese de uma topossequência Latossolo Amarelo-Podzol originado de material da formação Barreiras, Estado de Alagoas. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, n.1, p.20-30, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p. 55-94.

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

DIAS JUNIOR, 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.

DIAZ-ZURITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, n. 1/2, p.121-126, 2000.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento exploratório** – reconhecimento de solos do Espírito Santo. Rio de Janeiro, 1978. 461p. (Boletim técnico, 45).

ETANA, A.; COMIA, R.A.; HIKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n.1, p. 13-21, 1997.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley, 1993. 517p.

FIRME, L.P. **Cinética de degradação de torta de filtro no solo na presença de cádmio e níquel**. 2005 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005

GIAROLA, N.F.B. **Similaridade entre solos coesos e Hardsetting: caracterização do comportamento físico**. 2002. 65f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.19, p.65-100, 1987.

HAKANSSON, I.; REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle-load extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n. 2/3, p.277-304, 1994.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n. ¾, p.239-282, 1988.

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

HOLTZ R. D.; KOVACS, W.D. **An introduction to Geotechnical Engineering**, New Jersey; Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable lands. In: DRESCHER, J., HORN, R., DE BOODT, M. (Ed.). **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., (ed.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

JACOMINE, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. p.19-46.

_____ Distribuição geográfica, características e classificação de solos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA OS TABULEIROS COSTEIROS, 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.13-24.

KELLER, T. **Soil compaction and soil tillage** – Studies in agricultural soil mechanics. 2004. 75 f. Tese (Doutorado em Ciência) Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2004.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Vermelho eutrófico provocados pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.497-506, 1999.

LAMBE, T.W. The Engineering Behavior of Compacted Clay. **Journal of the soil mechanics and foundations division** - American Society of Civil Engineers (ASCE), v.84, n.2, p. 1-35, 1958.

LARSON, W.E.; GRUPTA, 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, n. 2/3, p.275-286, 1991.

LIMA, H.V. **Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no Estado do Ceará**. 2004. 85 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

MAIA, J.C.S. **Determinação de esquema de amostragem para avaliação de propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de preparo**. 1999. 172 f. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

MARSHALL, T. J., HOLMES, J.W. **Soil physics**. London: Cambridge University Press, 1979. 345 p.

MENTGES, M.I.; FONTANELA, E.; REICHERT, J.M. et al. Densidade máxima pelo ensaio de Proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão axial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31, 2007. Gramado, 2007, **Resumos...** Gramado: SBCS, 2007. 1CD-ROM.

MOSADDEGHI, M.R., HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A. et al. Pré-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.70, n.1, p.53-64, 2003.

NHANTUMBO, A.B.J.C.; CAMBULE, A.H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam v.87, n. 2, p.231-239, 2006.

OTHOME, K.; ANDY TAN, C.C. Direct measurement of soil deformation using the bead-grig method. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.78, n.3, p.325-332, 2001.

- RESENDE, M. **Pedologia**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1982. 100 p.
- RIBEIRO, L.P. Os **Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano**: gênese, evolução e degradação. Salvador: SEPLANTEC-CADCT, 1998. 99 p.
- RIBEIRO, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.161-168.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS, **Boletim de safra 2007/2008**, Alagoas: Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas, 2008. Disponível em <<http://www.sindacucar-al.com.br>>. Acesso em: 3 jan.2008.
- SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Ed.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1-21.
- 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 em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho Escuro e de um Podzólico Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.24, n.2, p.239-349, 2000.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.1, p.113-117, 1997.
- TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.2/3, p.111-119, 1991

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARTS, W.B.M.; KOOLEN, A.J Comparison of stresses, compactions and increase of penetration resistances caused by a low ground pressure tyre and a normal tyre. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n. 2/3, p.125-134, 1994.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

WEIRICH NETO, P.H.W.; DA ROSA, A.L.T.; GOMES, J.A. Suscetibilidade de dois solos à compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.349-352, 2002.

CAPÍTULO I

Distribuição de agregados em um Argissolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes manejos

Distribuição de agregados em um Argissolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes manejos

Veronildo S. Oliveira², Mário M. Rolim², Romero F.B. Vasconcelos² & Elvira M.R. Pedrosa²

¹Parte da Tese de doutorado do primeiro autor, UFRPE

² UFRPE/DTR. Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE.
Fone: (81) 3320-6276. Email: verofat@dtr.ufrpe.br; rolim@dtr.ufrpe.br,
elvira.pedrosa@dtr.ufrpe.br

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade e distribuição de agregados de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes sistemas de manejos sob cultivo de cana-de-açúcar. Foram avaliadas quatro áreas sob diferentes manejos, incluindo mata nativa (MA), sem irrigação (MSI), com irrigação (MCI), e fertirrigação de vinhaça (MCV). Os manejos adotados nas áreas cultivadas tiveram o mesmo preparo convencional. Amostras indeformadas de solo foram coletadas nas entre linhas da cultura, para a determinação da estabilidade de agregados por via úmida, expressa pelo diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados, módulo de finura e a porcentagem de agregados estáveis em água maiores que 2,0 mm. O carbono orgânico total também foi determinado. Em todos os manejos, houve diminuição da estabilidade de agregados com o aumento da profundidade para as classes superiores a 2,0 mm. Os tratamentos cultivados tiveram os índices de agregação reduzidos em relação à mata nativa na seguinte seqüência: MA>MCV>MCI>MSI. O MSI apresentou os menores índices de agregação e o MCV foi que mais se aproximou da condição de mata, apresentando melhor estabilidade de agregados em água. Correlações significativas e positivas foram obtidas entre carbono orgânico total e os índices de estabilidade estudados.

Palavras-chave: solo, estabilidade de agregados, correlações, aproveitamento de resíduos

Aggregate distribution in a Yellow Argisol submitted to different managements

Abstract: The objective of this study was to evaluate the aggregate stability and distribution of a Yellow Argisol submitted to different management systems under sugarcane cultivation. Evaluated areas consisted in a native forest (NF) and managed areas with water irrigation (WI), vinasse irrigation (VI) and non irrigation (NI). Management of the areas followed the same conventional prepare. Undeformed soil samples were collected interlines of the crop to determine aggregate stability, through via wet, expressed as the average weight diameter, aggregate stability index, module of thinness and percentage of aggregates stable in water larger than 2.0 mm. Total organic carbon was also determined. In all managements there was decrease in aggregate stability as soil depth increased. Cultivated areas presented aggregation indexes smaller than that of the native forest, as following $NF > VI > WI > NI$. NI showed the smallest aggregation indexes and VI was the management that more closely approached NF, presenting better aggregate stability under water. Significant and positive correlations were obtained between total organic carbon and stability indexes studied.

Palavras-chave: soil, aggregate stability, correlations, residue use.

INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação com a degradação do solo e do meio-ambiente no mundo. A União Européia elegeu a compactação do solo como sendo uma das principais causas da degradação de solos (COM, 2002). Desse modo, é de fundamental importância para uma agricultura sustentável identificar os fatores que podem degradar o solo e inibir a sua conservação.

Assim, as forças externas que promovem a compactação do solo de uma forma direta comprometem a estabilidade dos agregados (Soane, 1990; Baumgarti & Horn, 1991). A formação e a estabilidade dos agregados resultam da interação complexa dos processos físicos, químicos e biológicos que acontecem no solo (Tisdall & Oades, 1982).

Mudanças na estrutura do solo causam alterações no arranjo das partículas e, conseqüentemente, mudança na distribuição de poros, comprometendo a disponibilidade de ar e água, bem como o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, além de

umentar a resistência mecânica do solo à penetração. Segundo Corrêa (2002), a manutenção de um bom estado de agregação e estabilidade e, conseqüentemente de uma boa estrutura, é condição primordial para garantir altas produtividades agrícolas.

A estrutura do solo está relacionada com a infiltração e retenção de água e difusão do ar, com a temperatura do solo e com o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Desse modo, quando a infiltração de água é menor, o solo se torna mais suscetível à erosão. Esse fenômeno é mais acentuado quando são utilizados sistemas de manejos que adotam revolvimento intensivo com taxas baixas de adição de resíduos orgânicos (restos de culturas, raízes, exsudações) afetando o teor de matéria orgânica do solo, um dos principais agentes de formação e estabilização dos agregados (Tisdall & Oades, 1982).

O uso intensivo do solo, aliado às condições inadequadas de manejo, concorre para a deterioração de suas propriedades físicas e isso se deve, principalmente, às modificações em sua estrutura (Olszewski, 2004). Do ponto de vista agrônômico, a estrutura do solo está relacionada com o arranjo das partículas, agregados e poros. Os agregados se formam devido à ação de substâncias que ligam as partículas umas nas outras, denominadas agentes cimentantes, que podem ser compostos por materiais orgânicos, óxidos de ferro e de alumínio, carbonatos ou principalmente sílica e argila. Esses agregados podem, por sua vez, se juntar novamente formando conjuntos maiores.

O uso e o manejo conjugados ao tempo de utilização, tendem ocasionar a perda da estrutura original do solo pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores (Carpenedo & Mielniczuk, 1990), com conseqüente redução dos macroporos e aumento de microporos e densidade. Sistemas de manejo que adotam revolvimento em área total, são os que mais desagregam o solo, por afetarem o teor de matéria orgânica, principal agente de formação e estabilização dos agregados (Silva & Mielniczuk, 1998; Albuquerque et al., 2001).

Os agregados podem ser classificados de acordo com o tamanho em macroagregados, quando superiores a 250 μm , e microagregados, aqueles inferiores a 250 μm (Tisdall & Oades, 1982). Os macroagregados são mais susceptíveis a danos mecânicos, por serem menos estáveis (Cambardella & Elliot, 1993) daí a preocupação em preservá-los.

Maia & Ribeiro (2004) observaram que em um Argissolo Amarelo distrocoeso abrupto fragipânico de Alagoas, com 30 anos de cultivo contínuo de cana-de-açúcar, apresentou valores de microporosidade e densidade do solo superiores aos de mata nativa, causando o desenvolvimento de compactação nos horizontes Ap e AB, correspondentes às camadas de 0 a 18 e de 18 a 34 cm. Verificaram também, que nas camadas inferiores a 35 cm, o maior

valor da densidade do solo foi no perfil da mata nativa, demonstrando que se trata de adensamento pedogenético, características dos Latossolos e Argissolos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. A densidade dos horizontes coesos varia na faixa de 1,5 a 1,8 kg m⁻³, enquanto nos horizontes superficiais está na faixa de 1,2 a 1,4 kg m⁻³, em condições sem cultivo (Araújo Filho et al., 2001).

Macedo (1987) analisando seis métodos de determinação de estabilidade de agregados para solos da zona da mata de Pernambuco concluiu que o método por peneiramento molhado mostrou maior capacidade de classificação dos solos quanto à estabilidade da macroestrutura, sendo, contudo, recomendadas adaptações para os solos da região.

Costa et al. (2004) observaram que o maior teor de matéria orgânica determina maior estabilidade de agregados e esta, por sua vez, mais proteção física a matéria orgânica. Segundo Six et al. (1999) existe uma relação causa-efeito entre os agregados e a matéria orgânica do solo. Por essa razão a quebra dos agregados pela ação mecânica das máquinas e implementos agrícolas expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, com a redução do seu conteúdo no solo (Costa et al., 2004).

Diversos trabalhos têm mostrado que o uso intensivo do solo agrícola vem promovendo diminuição na quantidade de agregados maiores que 2,0 mm. Márquez et al. (2004) postulam que a qualidade do solo pode ser avaliada por meio da quantificação de agregados estáveis.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade de agregados de um Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico em diferentes sistemas de manejo, sob cultivo de cana-de-açúcar e sob mata nativa.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em um Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico, textura média/argilosa fase floresta subperenifólia, relevo plano, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), em área da Usina Triunfo, localizada entre os paralelos 9°40'47" e 9°42'30" S e nos meridianos 36°08'12" e 36°05'03" W, no município da Boca da Mata, AL. O clima da área de estudo, segundo classificação de Köppen, é tropical chuvoso com verão seco. A precipitação média anual fica em torno de 1200 mm.

Foram escolhidas quatro situações distintas de uso e manejo do solo: uma coberta por vegetação nativa (floresta subperenifólia) MA = mata; e as outras três cultivadas

continuamente com cana-de-açúcar, MSI = manejo sem irrigação; MCI = manejo com irrigação; MCV = manejo com fertirrigação (Vinhaça). A área sob manejo sem irrigação (sequeiro) não recebeu nenhuma irrigação ou fertirrigação, há mais de 30 anos. Na área irrigada é aplicada uma lâmina de 120 mm de água durante o ciclo da cultura, através de aspersão por canhão, com vazão de $100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, há mais de 25 anos. Na área com fertirrigação são aplicados 500 m^3 de vinhaça diluída anualmente, através de aspersão com $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vazão, há mais de 25 anos.

O preparo do solo das áreas cultivadas foi sempre realizado por ocasião da renovação das áreas, utilizando-se implementos de preparo convencional: grade pesada, seguida de gradagem leve, precedida de subsolagem com implemento de hastes parabólicas, trabalhando a 40 cm de profundidade, a fim de quebrar a camada compactada que está sempre associada a influência do processo de gênese desse solo, com posterior sulcagem a 25 cm de profundidade, sendo a adubação e o plantio realizados manualmente. Algumas características do solo encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Análise granulométrica e pH do Argissolo Amarelo Distrocoeso, em diferentes sistemas de manejo e profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar

Prof (cm)	Granulometria			pH
	Areia	Silte g kg^{-1}	Argila	
Mata				
0-20	727,0	57,0	217,7	4,8
20-40	661,7	60,6	277,7	4,8
40-60	564,0	36,0	400,0	5,4
Manejo sem irrigação				
0-20	665,0	73,5	260,0	4,8
20-40	581,2	47,8	371,0	4,9
40-60	550,7	42,8	408,5	4,7
Manejo com irrigação				
0-20	701,4	53,9	244,7	4,9
20-40	668,6	67,2	264,2	4,6
40-60	606,2	40,3	353,5	4,4
Manejo com fertirrigação				
0-20	722,5	64,3	213,2	6,2
20-40	751,2	18,8	266,0	5,7
40-60	674,2	20,3	305,5	5,3

Em março de 2006 foram coletadas nos locais sorteados das quatro áreas de manejo em estudo, amostras indeformadas de solo, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, com três repetições. Em todas as áreas as amostras foram retiradas nas entre linhas da cultura da cana-de-açúcar, que se encontrava na quarta folha. No momento da amostragem, o solo se

encontrava em estação seca. Foram abertas três trincheiras por parcela em cada talhão, retirando-se uma amostra por profundidade de cada trincheira. No Laboratório, uma parcela das amostras foi utilizada para as análises de estabilidade de agregados, e outra colocada para secar ao ar por 72 horas, posteriormente, destorroada e passada na peneira de 2,00 mm para análise de carbono orgânico total (COT) e análise granulométrica.

Na caracterização do solo realizou-se a análise granulométrica através do método do densímetro de Boyoucos. Para a dispersão física utilizou-se um agitador mecânico durante 15 minutos e como dispersante químico, utilizou-se 25 mL de hexametáfosfato de sódio (Calgon), para determinação das frações areia e argila total, sendo o silte obtido por diferença, assim como a matéria orgânica das amostras de solo foram determinadas de acordo com Embrapa (1997).

A estabilidade de agregados foi determinada pelo método descrito por Kemper & Chepil (1965), através de peneiramento em água, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Para a determinação da agregação do solo, 100 g foram umedecidas e, posteriormente, colocadas em dois conjuntos de cinco peneiras com malhas de 3,35; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm. Em seguida, os conjuntos de peneiras foram submetidos a agitação vertical (42 ciclos por minutos) durante um período de 10 minutos, em recipiente com água. O material retido em cada peneira foi colocado em recipientes para secagem em estufa a 105 °C, durante 24 horas. Os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) (Kemper & Rosenau, 1986), índice de estabilidade de agregados (IEA) e o módulo de finura (Freire, 1979) e o AGRI (Wendling et al., 2005) foram determinados segundo fórmulas a seguir:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (\text{cp} \times p) \quad (1)$$

$$\text{IEA} = [(\text{MS} - \text{wp}_{0,25} - \text{areia}) / (\text{MS} - \text{areia})] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{MF} = \frac{\sum[(4,76-3,25)+(3,25-2,00)+(2,00-1,00)+(1,00-0,50)+(0,50-0,25)+(<0,25)]}{100} \quad (3)$$

$$\text{AGRI} = \sum_{w_i > 2} w_i \times 100 \quad (4)$$

Onde, cp é igual ao centro de cada classe de peneira e p, o peso seco da amostra, em porcentagem; Ms – massa seca da amostra, g e wp_{0,25} – massa dos agregados da classe

<0,25 mm, g; MF - módulo de finura dos agregados, e Σ - Somatório das porcentagem acumulada de agregados em cada classe e; $w_i > 2$ representa a proporção de agregados >2,00 mm

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, incluindo a profundidade como subfator. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as diferenças entre médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando o programa SAEG (2005). Para o estudo de correlações entre as diversas variáveis, efetuou-se o ajuste de equações, ao nível de 5% ou 1% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Tabela 2 que houve redução do carbono orgânico total nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, em todos os manejos dos solos cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo de mata. Na profundidade de 0-20 o COT decresceu 52,42 e 39,41% nos manejos MSI e MCI, respectivamente, em relação à condição do solo de MA. O manejo MCV foi o que menos decresceu 18,94%. A ação dos manejos vem diminuindo os teores de matéria orgânica do solo.

Tabela 2. Carbono orgânico total de um Argissolo Amarelo Distrocoeso, em diferentes sistemas de manejo e profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar

Prof. (cm)	COT (g kg ⁻¹)			
	MA	MSI	MCI	MCV
0 - 20	32,73Aa	15,57Ca	19,83Ca	26,53Ba
20 - 40	27,47Ab	10,87Cab	13,60BCb	16,77Bb
40 - 60	18,43Ac	0,8BCb	10,60 Bb	14,93Ab

Letras maiúsculas comparam diferenças entre os manejos e minúsculas entre profundidade do solo, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Média de três repetições.

O efeito do manejo do solo foi analisado quanto à estabilidade de agregados e expresso pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), pelo índice de estabilidade dos agregados (IEA), pelo módulo de finura dos agregados (MF), pela porcentagem de agregados >2,00 mm (AGRI) (Tabela 3) e pela distribuição dos agregados estáveis em água, em classes de diâmetro médio (Figura 1).

Os valores do DMP, obtidos por peneiramento por via úmida, do IEA, MF e AGRI apresentaram média geral de 1,44 mm, 72,65%, 2,31 e 29,55%, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados, módulo de finura e Agri determinados nos quatro sistemas de manejo, nas três profundidades estudadas.

Sistema de Manejo	Profundidade (em cm)			Média
	0-20	20-40	40-60	
Diâmetro Médio Ponderado (mm)				
MA	1,99	1,75	1,491	1,74A
MSI	1,29	1,28	1,17	1,25C
MCI	1,41	1,28	1,16	1,28C
MCV	1,58	1,50	1,416	1,49B
Média	1,56a	1,45ab	1,31b	1,44
Índice de Estabilidade de Agregados (%)				
MA	82,54	73,90	73,81	76,75A
MSI	74,32	76,47	76,27	75,69A
MCI	65,24	73,73	67,31	68,76A
MCV	62,56	73,95	71,76	69,42A
Média	71,16a	74,51a	72,29a	72,65
Módulo de Finura dos Agregados				
MA	2,98	2,67	2,40	2,68A
MSI	2,19	2,21	1,93	2,11B
MCI	2,27	2,02	1,84	2,05B
MCV	2,45	2,36	2,36	2,39AB
Média	3,07a	2,86ab	2,67b	2,31
AGRI (%)				
MA	46,75	42,26	33,03	40,68 A
MSI	23,33	20,35	20,38	21,35 C
MCI	27,83	26,15	21,03	25,00 C
MCV	32,64	33,09	27,81	31,18 B
Média	32,64a	30,46a	25,56b	29,55

Letras maiúsculas comparam diferenças entre os manejos e minúsculas entre profundidade do solo, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Média de três repetições.

Não houve interação significativa entre o DMP nos diversos manejos e nas profundidades estudadas. A comparação de médias entre os manejos mostrou diferença significativa para o DMP entre o MA e os tratamentos MSI, MCI e o MCV, havendo redução do tamanho dos agregados. Os resultados indicam que ao longo do tempo os manejos vêm contribuindo para a degradação dos solos. Os dados obtidos corroboram com Silva et al. (2003), que trabalharam em condições semelhantes observaram que tanto o manejo de sequeiro como irrigado mostraram-se mais susceptíveis a desagregação, apresentando valores de DMP menores que os agregados do solo de mata.

De maneira geral, o DMP decresceu na seguinte seqüência: MA maior que MCV, MCI, MSI, apresentando valores de 1,74; 1,49; 1,28; e 1,25 mm, respectivamente. A maior

estabilidade de agregados foi observada na profundidade de 0-20 cm. O teste de Tukey aplicado às médias do DMP nas três profundidades para os solos sob diferentes manejos apresentou significância estatística, quando comparado a primeira (0-20 cm) e a terceira (40-60 cm) profundidades. Assim, a estabilidade dos agregados decresceu à medida que aumentou a profundidade, devido ao caráter coeso, assim como houve um decréscimo do teor de matéria orgânica. Este fato indica que a matéria orgânica (Tabela 2) proporcionou maior estabilidade aos agregados, diferentemente do teor de argila que aumentou com a profundidade (Tabela 1).

Para o IEA (Tabela 3) a análise de variância não indicou nível de significância entre os sistemas de manejo bem como as profundidades e suas interações. Wendling et al. (2005) quando verificavam a influência do manejo na estabilidade de agregados em água, em um Latossolo Vermelho, também não observaram diferença significativa com relação ao IEA.

Com relação ao MF, mesmo não havendo diferença significativa entre as interações dos manejos com as profundidades, apresentou diferença em nível de 5% entre as médias para os tratamentos isolados. Todos os manejos estudados apresentaram médias menores do que a condição de MA, mesmo comportamento do DMP, sendo que os tratamentos MSI, MCI e MCV não apresentaram diferença entre si. Apenas os tratamentos MSI e MCI apresentaram diferença estatística em relação a MA. No entanto, não houve diferença estatística entre o manejo MCV e a condição de MA, que também apresentaram os maiores teores de matéria orgânica (Tabela 2). Rolim & Freire (1997), trabalhando com doses de vinhaça sobre a estabilidade estrutural dos agregados do solo, creditaram à fração orgânica da vinhaça o favorecimento da agregação do solo aos quais ela é incorporada, o que também foi evidenciado por Camargo et al. (1983).

O MF apresentou diferença significativa entre as médias nas profundidades de 0-20 e 40-60 cm, seguindo a mesma tendência do DMP, diminuindo com a profundidade, acompanhando a diminuição da matéria orgânica. A partir dos resultados obtidos pode-se inferir que os manejos vêm contribuindo para a degradação do solo ao longo do tempo, promovendo a diminuição da estabilidade dos agregados devido a mecanização agrícola. Lacerda et al. (2005), avaliando a estabilidade de agregados de um Nitossolo distroférico, observaram também que o manejo convencional utilizando grade aradora, apresentou valores menores para os parâmetros DMG e IEA, quando comparados com o solo de mata, corroborando os dados obtidos no presente trabalho.

As porcentagens da distribuição dos agregados estáveis em água, por classe de diâmetro, se encontram na Figura 1. Observando os valores de agregados maiores que 3,25

mm, na profundidade de 0-20 cm, a maior distribuição ocorreu nas condições de MA e MCV, com 27,9 e 19,69%, respectivamente, enquanto para MSI e MCI os valores foram 12,93 e 14,7%, respectivamente. Para os agregados de diâmetro entre 3,35 e 2 mm, os manejos apresentaram valores próximos aos encontrados na classe >3,25 mm. Considerando que as duas classes são maiores que 2,00 mm, os maiores percentuais recaem nos manejos MA e MCV. Este comportamento comprova que em todos os manejos houve redução do tamanho de agregados em relação à mata nativa. Entretanto, o manejo com vinhaça parece ter contribuído na maior manutenção do tamanho dos agregados. Estes resultados corroboram com os encontrados por Silva (2003), quando trabalhou com tratamentos semelhantes.

Comparando-se os agregados de diâmetro entre 2,0 e 1,0 mm, praticamente não houve variação com o manejo nesta profundidade. Observa-se que nas classes de 1,00 e 0,50 mm, e 0,50 e 0,25 começa uma inversão em relação aos agregados >2,00 mm. Ou seja, os manejos MSI e MCI apresentam valores maiores do que os da MA e MCV, evidenciando a ação dos implementos de preparo convencional. Os resultados obtidos confirmam, mais uma vez, a observação de Carpenedo & Mielniczuk (1990), que os agregados se desagregam formando subagregados de tamanho menores. Para os microagregados (<0,25 mm), todos os manejos cultivados apresentaram valores superiores aos encontrados na condição de MA.

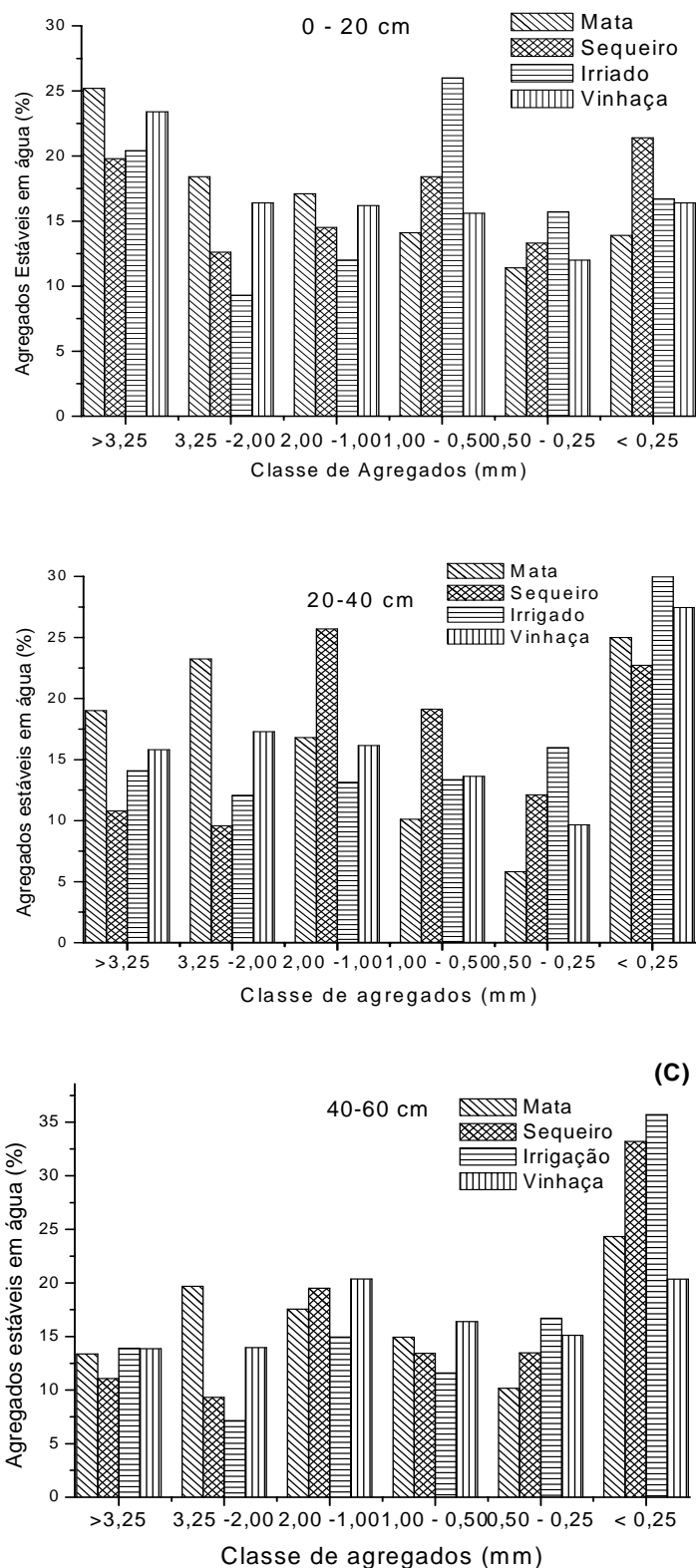


Figura 1. Distribuição dos agregados estáveis em água, nas profundidades de 0-20 (A); 20-40 (B) e de 40-60 cm (C), para os quatro sistemas de manejo de solo estudados.

Para a profundidade de 20-40 cm, quando somadas as classes maiores do que 2,0 mm, observa-se um comportamento similar aos encontrados na camada de 0-20 cm., Entretanto para as classes entre 2,0 e 0,25 mm o manejo MSI apresentou os maiores valores de agregados estáveis. Isto pode ser explicado pela condição de menor umidade, tendo em vista que neste manejo não é aplicado nenhum tipo de irrigação. Para os microagregados o comportamento da distribuição dos agregados dos manejos foi semelhante aos valores encontrados na profundidade de 0-20 cm.

Na profundidade de 40-60 cm para as classes entre >3,25 e 3,25-2,00 mm, os maiores valores foram obtidos nos manejos MA e MCV. Entre as classes de 2,00 a 0,25 mm as diferenças de percentuais foram próximas, enquanto que para os microagregados (<0,25 mm) os manejos MSI e MCI apresentaram os maiores percentuais em relação aos demais.

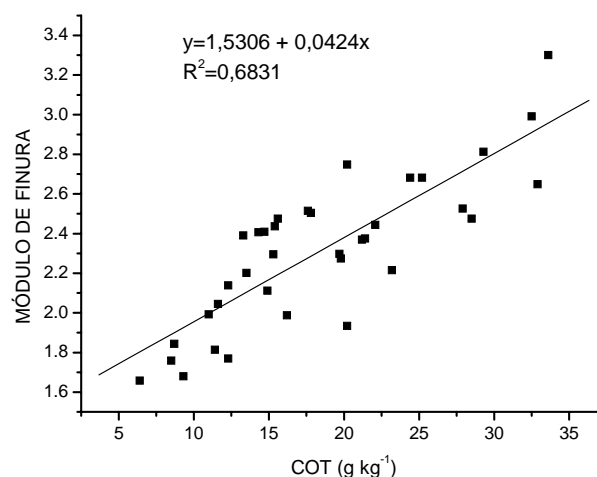
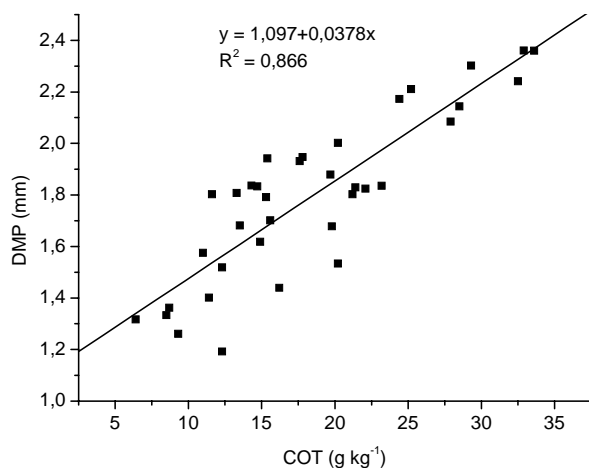
Da mesma forma, ficou evidenciado que nas condições estudadas o IEA não foi um bom indicador de estabilidade de agregados, pois não apresentou diferença estatística entre os manejos avaliados. Quanto ao MF que é mais utilizado para avaliar a estabilidade de agregados secos, também não se mostrou ser um bom indicador, tendo em vista que não evidenciou a diferença que existe entre os manejos MA e MCV encontrado pelos indicadores DMP e AGRI.

Ficou evidenciado, através da diferença estatística, que as médias dos indicadores DMP, MF e AGRI, que avaliaram os agregados estáveis na água nos manejos estudados, diminuem com a profundidade, devido a menor teor de matéria orgânica nos horizontes inferiores, fato comprovado pelas correlações positivas encontradas entre o COT e os indicadores (Tabela 4 e Figura 2).

Tabela 4. Equações das correlações entre carbono orgânico total (COT) e os índices de agregação: diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade se agregados (IEA), módulo de finura e porcentagem de agregados > 2,00 mm estáveis em água (AGRI)

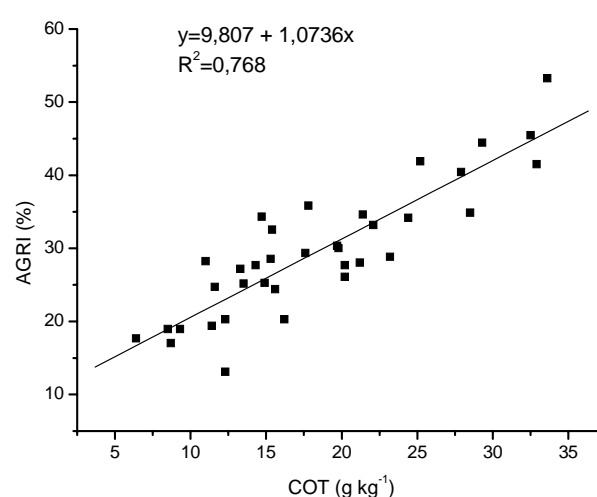
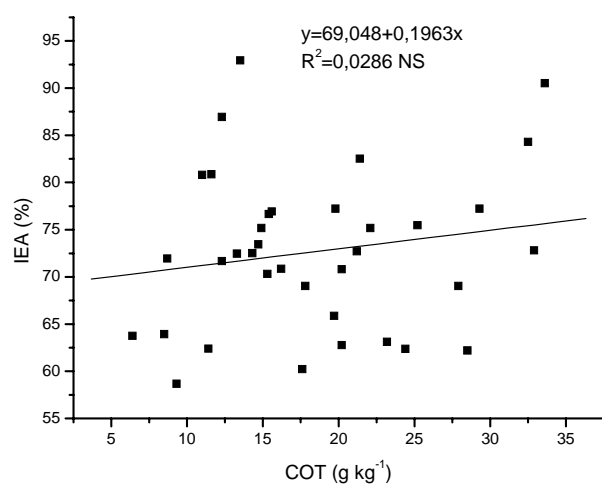
Variáveis	Equações de correlações	R ²
DMP	DMP=1,097+0,0378**COT	0,866
IEA	IEA=69,048+0,1963 ^{ns} COT	0,028
MF	MF=1,5306+0,0424**COT	0,683
AGRI	AGRI=9,807+1,0736**COT	0,768

* significativo a 5%, ** significativo 1% pelo teste t.



A.

B.



C.

D.

Figura 2. Relação entre o DMP, IEA, MF e AGRI e o COT de um Argissolo Distrocoeso submetido a diferentes manejos, nas três profundidades (0–60 cm)

Os coeficientes de correlação do COT com os valores dos índices de agregação (Tabela 4) foram positivos e significativos para DMP, MF E AGRI e não significativo para o IEA. Boas correlações também foram conseguidas por Paladini & Mielniczuk (1991) e Palmeira et al. (1999), para o DMP. Castro Filho et al. (1998) encontrou altas correlações entre os índices de agregação DMP ($r=0,746$), e IEA ($r=0,749$) enquanto Wendling et al. (2005) avaliando o carbono orgânico e estabilidade de um Latossolo vermelho sob diferentes manejos, encontraram correlações positivas e próximas as apresentada na Tabela 4. Os mesmos autores atribuem a menor correlação do IEA com a matéria orgânica ao fato de que o mesmo é calculado baseado apenas na menor classe de

agregados, que não é determinado por pesagem, mas por diferença. E ainda, que na menor classe não englobam apenas agregados ou areia, mas também argila dispersa que perpassa por todas as peneiras durante o processo de tamisamento, que não se caracteriza como agregados. Dessa forma concluíram que o IEA não é um parâmetro adequado para avaliar a estabilidade de agregados, pois é calculado com a proporção instável da amostra.

CONCLUSÕES

1. O cultivo de cana-de-açúcar vem, no decorrer dos anos, reduzindo a estabilidade dos agregados, tomando-se como parâmetro DMP das áreas cultivadas em relação ao solo de mata;
2. Os indicadores AGRI e MF mostraram que podem ser utilizados como índices de estabilidade de agregados;
3. O sistema MCV foi o que mais se aproximou da condição natural, devido ao aporte de matéria orgânica que disponibiliza ao solo interferindo na formação e estabilização dos agregados.
4. O carbono orgânico apresentou boas correlações com os indicadores DMP, MF e AGRI.

LITERATURA CITADA

- Araújo Filho, J.C.; Carvalho, J.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos dos tabuleiros do nordeste do Brasil. In: Workshop Coesão Em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001, p.123-142.
- Baumgart, T.H.; Horn, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.19, p.203-213, 1991.
- Albuquerque, J.A.; Sangoi, L.; Ender, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, p.717-723, 2001.
- 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.
- Cambardella, C.A.; Elliot, E.T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. Soil Science Society of America Journal, v.57, p.1071-1076, 1993.
- Camargo, O.A., Valadares, J.M.A.S., Gerardi, R.N. Características químicas e físicas de um solo que recebeu vinhaça por longo tempo. Campinas: IAC, 1983. 30p. (Boletim Técnico, 76).
- 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, Campinas, v.14, p.99-105, 1990.
- Corrêa, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho amarelo em Querência, MT. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.2, p.203-209, 2002.
- COM (Commission of the European Communities). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. Brussels, 35p. 2002.
- Costa, F. S.; Bayer, C.; Albuquerque, J.A.; Fontoura, S.M.V. Aumento da matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, 2004.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª. Ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- Freire, W.J.; Piedade Jr., C. O módulo de finura dos agregados do solo como índice de estabilidade estrutural. Engenharia Agrícola, Botucatu, v.3, n.2, p.29-36, 1979.
- 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. Part 1. American Society of Agronomy, Madison, 1965. p.499-510.

- Kemper, W.D.; Rosenau, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison, 1986. Part 1, p.425-442 (Agronomy, 9).
- Lacerda, N.B.; Zero, V.M.; Barilli, J.; Moraes M.H. Bicudo, S.J. Efeito de sistemas de manejo na estabilidade de agregados de um Nitossolo vermelho. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 686-695, 2005.
- Macedo, M.M.L. Estabilidade de agregados de solos da zona da mata de Pernambuco por diferentes métodos. 1987. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE.
- Maia, J.L.T.; Ribeiro, M.R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, p.79-87, 2004.
- Marquez, C.O.; Garcia, V.J.; Cambardella, C.A.; Schultz, R.C.; Isenhardt, T.M. Aggregate-size stability distribution and soil stability soil. *Soil Science America Journal*, Madison, v.68, p.725-735, 2004.
- Palmeira, P.R.T.; Pauletto, E.A.; Teixeira, C.F.A.; Gomes, A.S.; Silva, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, p.189-195, 1999.
- Paladini, F.C.S.; Mielniczuk, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.15, p.135-140, 1991.
- Olszewski, N.; Costa, L. M.; Fernandes Filho, E.I.; Ruiz, H.A.; Alvarenga, R.C.; Cruz, J.C. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.901-909, 2004.
- Rolim, M. M.; Freire, W.J. Efeito da vinhaça concentrada sobre a estabilidade estrutural dos agregados do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.16, n.3, p.69-76, 1997.
- 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. 120f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Silva, A.J.N.; Cabeda, M.S.V.; Carvalho, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistema de manejo com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.579-585, 2006.

- Silva, I.F.; Mielniczuk, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.20, p.113-117, 1997.
- Six, J.; Elliot, E.T.; Paustian, K. Aggregate and organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society America Journal*, 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, p.179-201, 1990.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *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, p.487-494, 2005.

CAPÍTULO II

COMPACTAÇÃO DE UM ARGISSOLO AMARELO DISTROCOESO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS

Compactação de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos¹

Veronildo S. Oliveira², Mário M. Rolim², Romero F.B. Vasconcelos², Yuri D.J. Costa² & Elvira M.R. Pedrosa²

¹Parte da Tese de doutorado do primeiro autor, UFRPE

² UFRPE/DTR. Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6276. Email: verofat@dtr.ufrpe.br, rolim@dtr.ufrpe.br, elvira.pedrosa@dtr.ufrpe.br

Resumo: Objetivou-se avaliar a susceptibilidade à compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, através da densidade máxima (D_{smax}) e umidade crítica (U_c) pelo ensaio de Proctor normal, e o grau de compactação em diferentes manejos e uso. O estudo foi realizado na Usina Triunfo Agro-Industrial, AL, em região composta de quatro subáreas sendo: Área de mata (MA), Área de sequeiro (MSI), Área irrigada (MCI) e Área com vinhaça (MCV). Para a realização dos ensaios foram coletadas amostras indeformadas para a densidade do solo e deformadas para matéria orgânica e ensaio de Proctor normal para obtenção da D_{smax} e U_c e determinação do grau de compactação (GC) nos locais sorteados, 50,00 × 50,00 m, nas quatro áreas de manejo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, com três repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Os valores das D_{smax} do solo obedeceram à seguinte ordem crescente: MSI > MCI > MCV > MA, enquanto a U_c acompanhou a mesma ordem, porém decrescente. Portanto, os manejos MSI e MCI podem provocar degradação do solo, mesmo a U_c mais baixas. Apenas o manejo MCI apresentou GC superior a 4,3%, valor crítico de referência, na profundidade de 0-20 cm.

Palavras-chave: grau de compactação, Proctor normal, aproveitamento de resíduos

Compaction of a dystrophic cohesive Argisol submitted to different managements

Abstract: The objective of this work was to evaluate the susceptibility to compaction of a dystrophic cohesive Yellow Argissoil cultivated with sugarcane. Evaluations consisted of maximum density (MD) and critical humidity (CH) through Standard Proctor compaction tests, and the degree of compaction in different soil managements and use. The study was carried out at Triunfo mill, at the State of Alagoas, Brazil. Testing area consisted in four

distinct sub-areas: a preserved forest (MA), an area without irrigation (MSI), an irrigated area (MCI), and an area with vinasse (MCV). Undeformed soil samples were collected for soil density and deformed ones for organic matter and Standard Proctor tests in order to obtain MD and CH and the compaction grade (CG). Plots, 50 × 50 m, were randomized within the four areas at depths of: 0-20, 20-40, and 40-60 cm, with three replicates. Three samples were collected at each depth. Data were submitted to the variance analyses, and means compared through Tukey test at 5% of probability. MD data followed the grade $MSI > MCI > MCV > MA$, in contrast to CH which presented inverse sequence. Therefore MSI and MCI can cause soil degradation, even at lower CH. Only MCI presented CG higher than 4.3%, the critical value reference, at 0-20 cm.

Key words: compaction degree, normal Proctor, residue use

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar ainda é a cultura de maior expressão econômica do Nordeste, sendo produzida em maior escala nos Estados de Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte. Atualmente, o Estado de Alagoas vem se destacando por ser o maior produtor da região, superando Pernambuco. Esse aumento da produção de cana-de-açúcar se deve, sobretudo, entre outros fatores, ao relevo que apresenta áreas planas denominadas de tabuleiros costeiros. O conhecimento do comportamento dos solos dos tabuleiros costeiros é muito importante para o Nordeste, pois apresentam grande potencialidade para o cultivo da cana-de-açúcar (Jacomine, 1996).

Segundo Jacomine (1996), em Alagoas, áreas de tabuleiros costeiros podem apresentar solos com horizontes subsuperficiais que apresentam consistência dura ou extremamente dura, quando secos, denominados solos coesos, que para Ribeiro (2001) se caracterizam por apresentarem horizontes formados por adensamento pedogenético da camada subsuperficial, podendo variar entre 0,3 e 0,7 m de profundidade.

Maia & Ribeiro (2004) encontraram valores de microporosidade e densidade do solo superior aos de mata nativa, causando o desenvolvimento de compactação nos horizontes Ap e AB, correspondentes às camadas de 0 a 18 e 18 a 34 cm, em um Argissolo Amarelo distrocoeso abrupto fragipânico em Alagoas, com 30 anos de cultivo contínuo de cana-de-açúcar. Verificaram também, que nas camadas inferiores a 35 cm, o maior valor da

densidade do solo foi no perfil mata nativa, demonstrando que se trata de adensamento pedogenético, características dos Latossolos e Argissolos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. A densidade dos horizontes coesos varia de 1,5 a 1,8 kg m⁻³, enquanto nos horizontes superficiais de 1,2 a 1,4 kg m⁻³, em condições sem cultivo (Araújo Filho et al., 2001).

A compactação do solo é um processo de densificação que leva ao aumento da resistência do solo à penetração, redução da porosidade, pela descontinuidade de poros, diminuição da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água. Esse processo afeta o crescimento e o desenvolvimento radicular, aumenta a densidade do solo, as perdas de nitrogênio por desnitrificação, o consumo de combustível das máquinas no preparo dos solos e aumenta a erosão do solo pela menor infiltração de água (Soane & Ouwerkerk, 1994).

Assim, um dos principais indicadores da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma pela união de agregados grandes por forças eletrostáticas, pela atividade microbiana e crescimento de raízes. A estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo que os macros agregados são destruídos e o solo apresenta uma estrutura maciça (Tavares Filho et al., 1999). Essa estrutura maciça pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Para Hillel (1980) as atividades agrícolas só devem ser realizadas quando o solo apresentar a condição friável, que corresponde à faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade. Quando diminui a umidade no solo, o efeito lubrificante da água entre as partículas do solo cessa e, com isso, aumenta a pressão a ser exercida para expansão radicular, até a ocorrência de situações considerada limitantes ao crescimento.

Para De Fosse et al. (2003) a intensidade da compactação do solo é controlada por fatores como: conteúdo de água no preparo do solo, características dos rodados e cargas por eixo, sendo que o teor de água do solo é a variável que controla o momento ideal de preparo.

Por outro lado, a susceptibilidade à compactação depende de fatores externos e internos do solo. Os externos se relacionam com o tipo, intensidade, frequência e tempo de aplicação de uma carga. Os internos, com a distribuição granulométrica, tipo de argila, conteúdo de matéria orgânica, densidade do solo, agregação, conteúdo de água no solo,

estabilidade estrutural e propriedades mecânicas (Soane et al., 1982; Horn, 1988; Dexter, 2004).

Diversos trabalhos têm mostrado que a umidade do solo é um dos fatores determinantes da susceptibilidade à compactação (Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2000) e que a adição de resíduos culturais pode diminuir a compactabilidade do solo (Grupta & Almaras, 1987; Zhang et al., 1997). Entretanto, poucas são as pesquisas utilizando resíduos líquidos como a vinhaça, como fonte de matéria orgânica para minimizar os efeitos da compactação (Silva, 2003).

Uma alternativa para avaliar a susceptibilidade à compactação de um solo é através da utilização de ensaio de Proctor normal, usado para determinar a densidade máxima para uma umidade ótima ou umidade crítica (Vargas, 1977). O interesse da sua aplicação na Engenharia Agrícola tem sido recente (Dias Júnior & Miranda, 2000; Barzegar et al., 2000; Weirich Neto et al., 2002; Silva, 2003; Nhantumbo et al., 2006; Mentges et al., 2007).

O grau de compactação ou compactação relativa é o resultado da razão entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo obtido após a compactação, que tem sido utilizado para representar o grau de consolidação dos constituintes do solo (Vargas, 1977). Esses parâmetros têm sido usados como indicadores de susceptibilidade à compactação do solo.

Objetivou-se, com o presente estudo, avaliar a susceptibilidade de um Argissolo distrocoeso à compactação, através da densidade máxima e umidade crítica pelo ensaio de Proctor normal, e o grau de compactação relativa em diferentes manejos e uso de um solo cultivado com cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo estudado foi classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico (EMBRAPA, 2006), textura média/argilosa, relevo plano, localizado nas áreas da Usina Triunfo Agro-Industrial, no município da Boca da Mata, AL, cuja caracterização encontra-se na Tabela 1. O material de origem é constituído por sedimentos detríticos do Grupo Barreiras, que favorece a formação dos horizontes coesos, fragipãs e duripãs (Jacomine, 1996). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica do Solo e Aproveitamento de Resíduos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

A área estudada é composta de quatro subáreas sendo a primeira – Área de mata (MA) - constituída de floresta subperenifólia, que engloba espécies vegetais de grande porte, com 20 a 30 metros de altura, com alta densidade vegetal. A segunda, manejada - Área de sequeiro, sem irrigação (MSI) - utilizada com cana-de-açúcar há mais de 30 anos. A terceira - Área irrigada (MCI) – sendo manejada há mais de 25 anos consecutivos com irrigação com aplicação de lâmina de 120 mm, em duas parcelas, durante o ciclo da cultura de cana-de-açúcar, além, da aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro por ocasião da renovação do canavial. A quarta manejada - Área de vinhaça (MCV) - sendo anualmente fertirrigada com 500 m³ha⁻¹ de vinhaça diluída por ciclo de cultura a mais de 25 anos consecutivos.

Tabela 1. Análise granulométrica do Argissolo Amarelo Distrocoeso, em diferentes sistemas de manejo e profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar

Profundidade (cm)	Granulometria		
	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila
	MA		
0 - 20	717,4	56,0	226,6
20 - 40	663,7	62,8	273,5
40 - 60	552,8	36,2	411,0
	MSI		
0 - 20	677,5	80,3	242,2
20 - 40	581,2	47,8	371,0
40 - 60	553,7	42,8	403,5
	MCI		
0 - 20	701,4	53,9	244,7
20 - 40	668,6	67,2	264,2
40 - 60	606,2	40,3	353,5
	MCV		
0 - 20	722,5	64,3	213,2
20 - 40	715,2	18,8	266,0
40 - 60	674,2	20,3	305,5

MA = Mata nativa, MSI = Manejo sem irrigação, MCI = Manejo com irrigação, MCV= Manejo com vinhaça

Todas as áreas manejadas, exceto a de mata, foram preparadas utilizando-se implementos de preparo convencional: grade pesada, seguida de grade leve, com posterior sulcagem a 25 cm de profundidade, sendo o plantio realizado manualmente. As áreas manejadas escolhidas são cultivadas com cana-de-açúcar. Cada parcela (50 × 50,00 m) correspondente a um tipo de manejo. Em cada área foram realizados sorteios inteiramente aleatórios dos pontos de amostragem, sempre nas entre linhas da cultura da cana-de-açúcar.

Para a realização dos ensaios foram coletadas amostras de solo nos locais sorteados nas quatro áreas de manejo em estudo, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, com três repetições. As amostras de solo deformadas pesaram entre 5 a 6 kg e foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 4,76 mm.

Realizou-se a análise granulométrica através do método do densímetro de Boyoucos, e na dispersão física, utilizou-se um agitador mecânico durante 15 minutos e como dispersante químico, 25 ml de hexametáfosfato de sódio (Calgon), para determinação das frações areia e argila total, sendo o silte obtido por diferença de acordo com EMBRAPA (1997).

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico utilizando-se álcool etílico absoluto como agente para a determinação do volume ocupado das partículas, expresso em Mg m^{-3} . Para a determinação da densidade do solo inicial (D_{si}) utilizaram-se amostras indeformadas, retiradas por meio de anel, que foram, posteriormente, secas em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a obtenção do peso seco, que dividido pelo volume do anel, determinou a densidade do solo. A matéria orgânica (MO) das amostras de solo foi determinada de acordo com EMBRAPA (1997).

O ensaio de Proctor normal consistiu em compactar uma amostra deformada previamente preparada, de acordo com metodologia preconizada pela norma NBR 7182 (1986). Através do ensaio determina-se a densidade máxima (D_{smax}) de compactação do solo, em função da umidade crítica (U_c), que segundo Mentges et al. (2007), é umidade que não se deve tráfegar com máquinas agrícolas. O grau de compactação do solo (GC) determinou-se através da relação entre a densidade do solo e a densidade máxima de compactação, obtida no ensaio de Proctor normal.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, incluindo a profundidade como subfator. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as diferenças entre médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando o programa SAEG (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se que o solo apresenta baixos teores de fração argila e elevados teores de fração areia (Tabela 1). Entretanto, os teores de argila tendem a aumentar com a profundidade e o inverso acontece com a areia. Este comportamento pode ser atribuído principalmente à translocação de argila do horizonte A e sua acumulação no horizonte B corroborando com Carvalho (1999). Com relação à variável matéria orgânica (Tabela 2), o tratamento mata (MA), apresentou os maiores teores em todas as profundidades estudadas, diferindo estatisticamente dos demais manejos. Enquanto o tratamento MCV foi o que mais se aproximou da condição de MA, mesmo sendo estatisticamente diferente, seguidos dos tratamentos MSI e MCI. O efeito da matéria orgânica contida na vinhaça e na torta de filtro aplicadas durante os 25 anos consecutivos, provavelmente contribuiu para a manutenção dos teores de matéria orgânica, principalmente nos primeiros 20 cm de profundidade do solo.

Silva et al. (2006) também encontraram resultados semelhantes quando estudaram os mesmos manejos nas profundidades de 0 a 80 cm, com decréscimo nos teores de carbono orgânico, principalmente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm em relação à mata nativa.

Tabela 2. Matéria orgânica de um Argissolo Amarelo distrocoeso, em diferentes sistemas de manejo e profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar

Profundidade (cm)	MO (%)			
	MA	MSI	MCI	MCV
0 - 20	3,3Aa	1,5Da	1,9Ca	2,6Ba
20 - 40	2,8Ab	1,0Cb	1,3BCb	1,7BCb
40 - 60	1,9Ac	0,8BCb	1,0BCb	1,5Ab

Letras maiúsculas comparam diferenças entre os manejos e minúsculas entre profundidade do solo, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Média de três repetições.

Manejos: MA = Mata nativa, MSI = Manejo sem irrigação, MCI = Manejo com irrigação, MCV = Manejo com vinhaça

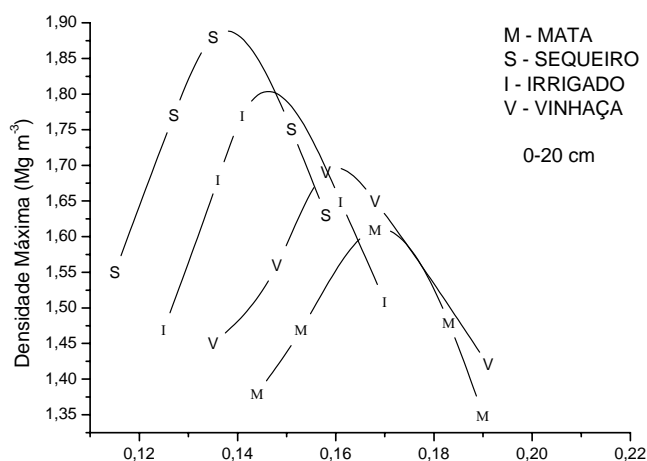
Perin et al. (2003), trabalhando com dois Latossolo Vermelhos distróficos de textura argilosa e um outro de textura média, constataram declínio no teor de matéria orgânica com o tempo de uso agrícola, principalmente no horizonte superficial. Originalmente, o solo apresentava 3,0 dag kg⁻¹ de MO no horizonte superficial, mas, nos perfis com mais de

33 anos de uso agrícola, o teor foi reduzido para 2,3 dag kg⁻¹. Carvalho et al. (1999), trabalhando em um Argissolo sob diferentes sistemas de manejo concluíram que o preparo do solo com grade pesada acarreta compactação superficial e redução dos teores de matéria orgânica na camada de 0-15 cm, dados estes que corroboram com o presente estudo.

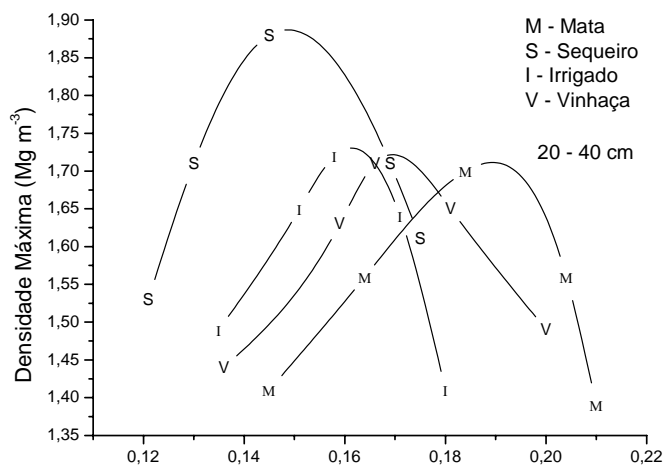
Na Figura 1 estão dispostas às curvas de compactação do Argissolo Amarelo distrocoeso para os diferentes manejos e profundidade. O tratamento MA apresentou menor valor para a densidade máxima de compactação (D_{smax}) e maior valor para a umidade crítica (U_c), quando comparado aos demais manejos. Esses dados corroboram com Dias Junior & Miranda (2000), Assis (2002), Silva (2003) e Braida et al. (2006), que observaram também redução da D_{smax} e aumento da U_c de compactação do solo, trabalhando com manejos.

O sistema de manejo sequeiro apresentou a maior D_{smax}, em relação à condição natural de mata. Houve um aumento na D_{smax} de 14,11% para o manejo com sequeiro e de 8,59% para o manejo com irrigação, na profundidade de 0-20 cm (Figura 1A). Entretanto, as áreas com mata e manejadas com vinhaça apresentaram menores valores de D_{smax} de compactação, provavelmente, devido a maior presença de matéria orgânica encontrada, principalmente na camada superficial entre 0-20 cm.

A.



B.



C.

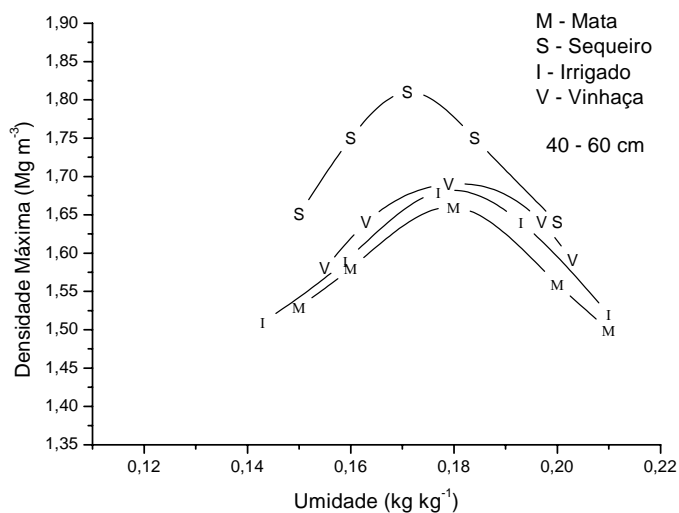


Figura 1. Curvas de compactação do solo ($D_{smax} \times U_c$) das diversas áreas manejadas nas profundidades de 0-20 (A); 20-40 (B) e 40-60 (C) cm.

Resultados similares foram obtidos por Silva et al. (2006), quando trabalharam com os manejos de mata, sequeiro, irrigado e vinhaça. Os autores atribuíram o menor porcentual de D_{smax} desses solos aos maiores teores de matéria orgânica encontrados nas superfícies dos mesmos. A influência da matéria orgânica na curva de compactação é muito importante, devido ao seu poder de absorção de água, o que dificulta a compactação do solo (Dias Júnior, 2000). Braida et al. (2006) utilizando ensaio de Proctor verificou ser menor a susceptibilidade à compactação de um solo, à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo. Em geral, observa-se que, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é o valor de densidade máxima de compactação obtida e maior é o teor de água necessário para atingi-lo.

Analisando os dados de umidade crítica entre os sistemas de manejo, observa-se o efeito da matéria orgânica no acréscimo de umidade, apenas no MCV, que apresentou valores próximos aos de MA, não diferindo estatisticamente. Entretanto, os MSI e MCI diferiram significativamente em relação aos manejos que apresentaram maiores teores de matéria orgânica. Para Camargo & Alleoni (1997) a grande capacidade de retenção de água da matéria orgânica reduz a quantidade de água retida pela matriz do solo, sendo necessário uma maior quantidade para que a densidade máxima de compactação seja atingida.

O comportamento quanto à susceptibilidade do solo nos manejos estudadas obedeceu a seguinte ordem: MSI (sequeiro) < MCI (irrigado) < MCV (vinhaça) < MA (mata), tendo em vista que a umidade crítica de compactação acompanhou a ordem decrescente MSI (sequeiro) < MCI (irrigado) < MCV (vinhaça) < MA (mata). Assim, com base nos resultados, pode-se esperar que o manejo na condição de MSI (sequeiro) apresente maior susceptibilidade à compactação a umidades mais baixas do que os demais manejos.

Houve efeitos significativos dos tratamentos sistemas de manejo: MA, MSI, MCI, MCV e profundidade sobre a densidade do solo e grau de compactação e da sua interação com a profundidade (Tabela 3).

Com relação ao manejo, houve um aumento significativo nos valores de densidade do solo nos três sistemas de manejos cultivados durante os 25 anos com cana-de-açúcar, na profundidade de 0-20 cm, em relação ao solo da mata nativa (Tabela 2 e Figura 2). Esse aumento está relacionado à aplicação intensiva de máquinas agrícolas nas operações de preparo, cultivo e colheita nas áreas cultivadas, muitas vezes realizadas em condições inadequadas de umidade. Trabalho realizado por Silva (2003) também evidenciou aumento de densidade do solo.

Tabela 3. Valores de densidade do solo inicial e o grau de compactação para os diferentes sistemas de manejos e profundidades.

Prof.	Sistema de manejo				Total
	MA	MSI	MCI	MCV	
Densidade do solo inicial (Mg m ⁻³)					
0 - 20	1,27Bb	1,61Aa	1,59Aa	1,42Ba	-
20 - 40	1,42Ba	1,62Aa	1,63Aa	1,54Aa	-
40 - 60	1,48Ba	1,49Ba	1,61Aa	1,50Ba	-
Grau de compactação (%)					
0 - 20	78,08	85,49	89,75	81,17	83,63b
20 - 40	83,94	85,53	95,76	89,24	88,62a
40 - 60	89,39	81,80	95,91	87,96	88,77a
Total	83,80B	84,27B	93,81A	86,90B	-

Letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna comparam diferenças entre os tratamentos para cada profundidade de manejo, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Média de quatro repetições. Manejos: MA = Mata nativa, MSI = Manejo sem irrigação, MCI = Manejo com irrigação, MCV= Manejo com vinhaça

Com relação à profundidade, os valores de densidade do solo inicial foram menores, com diferença estatisticamente significativa, na profundidade de 0-20 cm em relação a 20-40 cm para o tratamento MA, nos demais manejos não houve diferença estatística. Com exceção da mata, todos os manejos aumentaram a Dsi entre as profundidades de 20-40 e 40-60 cm. Este comportamento é devido a menor presença de matéria orgânica nessas profundidades, que favorece a diminuição da densidade do solo pela maior estruturação do solo.

Na profundidade de 20-40 cm, embora tenha havido aumento nos valores absolutos entre os sistemas de manejo, não apresentou diferença estatística. Este comportamento pode ser explicado por já existir nesta profundidade o caráter coeso, característica edáfica deste solo. Vale salientar que o aumento dos valores absolutos da densidade do solo em relação à condição natural se deve não somente ao caráter coeso, presente nesta profundidade, mas a compactação do solo devido tanto ao preparo do solo, como à colheita realizada, muitas vezes, em condições inadequadas de umidade do solo.

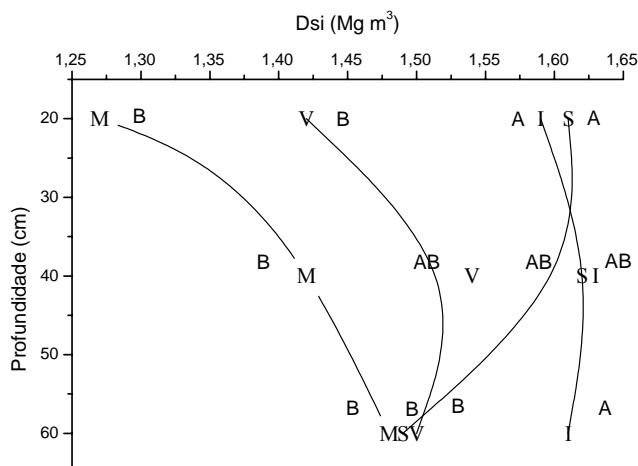


Figura 2. Efeitos dos sistemas de manejo de solos: MA = Mata nativa, MSI = Manejo sem irrigação, MCI = Manejo com irrigação, MCV= Manejo com vinhaça, sobre a densidade do solo (Dsi). Letras em cada profundidade indicam diferenças significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Para a profundidade de 40 a 60 cm o caráter coeso ficou evidenciado, principalmente para os manejos MA, MSI e MCV, que não apresentaram diferença significativa em si.

As áreas com os sistemas MSI e MCI foram as que apresentaram maiores valores de densidade do solo, com diferença estatisticamente significativa, na profundidade de 0-20 cm em relação a mata nativa, comprovando o efeito do tráfego de máquinas nas áreas cultivadas, por ocasião das operações de cultivo da cana-de-açúcar.

O grau de compactação do solo (GC) (Tabela 3), nos diferentes tratamentos variou de 78,08% a 95,91%. O sistema de manejo e o tráfego influenciaram decisivamente o comportamento das áreas em estudo. O manejo que apresentou a maior média foi o irrigado, variando na profundidade de 0–20 cm, 14,94% em relação à mata. Este fato pode ser explicado pela presença de maior teor de água devido à irrigação nos períodos das operações de cultivo, o que propiciou um maior incremento na densidade do solo, contribuindo assim para o aumento do grau de compactação do mesmo.

Os limites do grau de compactação foram estabelecidos por Linstrom & Voorhess (1994), que consideraram elevados valores acima de 86%, sendo prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento de culturas. Observa-se (Tabela 3) que apenas no manejo MCI - irrigado o valor foi superior em 4,3% do valor crítico de referência, na profundidade de 0-20 cm. Enquanto nos manejos de sequeiro, vinhaça e na condição de mata natural os

valores ficaram abaixo do limite considerado crítico. Segundo Linstrom & Voorhess (1994), valores superiores ao limite crítico, podem afetar negativamente a produtividade de certas culturas, devido à redução da capacidade de armazenamento de água, em razão da maior quantidade de macroporos no solo.

Entretanto, apenas a utilização do valor do grau de compactação não é suficiente para caracterizar a compactação do solo. Segundo Assis (2002) o grau de compactação não é suficiente para diagnosticar o efeito dos atributos físicos no solo sobre a planta, considerando apenas como um indicador de prováveis limitações ao desenvolvimento das culturas.

CONCLUSÕES

1. Os valores das densidades máximas do solo obedeceram a seguinte ordem crescente quanto à susceptibilidade dos manejos à compactação do solo: MSI>MCI>MCV>MA, enquanto a umidade crítica de compactação acompanhou a mesma ordem, porém decrescente.
2. Os solos onde se encontram as condições MSI e MCI podem sofrer degradação, através da compactação, mesmo a teores de umidade mais baixos, necessitando de maiores cuidados quanto ao preparo do solo e a colheita da cana-de-açúcar.
3. Apenas no manejo MCI o valor do grau de compactação foi superior em 4,3% o valor crítico de referência, na profundidade de 0-20 cm. Entretanto, apenas a utilização do valor do grau de compactação não é suficiente para caracterizar a compactação do solo.

LITERATURA CITADA

- Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação - ABNT. 1986. NBR 3. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- Araújo Filho, J.C.; Carvalho, J.; Silva, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos dos tabuleiros do nordeste do Brasil. In: Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001, p.123-142.

- 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. Botucatu: UNESP, 2002. 141p. Tese Doutorado.
- Barzegar, A.R.; Asoodarb, M.A.; Ansaria, M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.57, n.3, p.167-172, 2000.
- 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.; Alleoni, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Esalq, 132p. 1997.
- Carvalho, E.J.M.; Figueiredo, M.S.; Costa, L.M. Comportamento físico-hidro de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, p.257-65, 1999.
- De´Fossez, P.; Richard, G.; Boizard, H.; O’Sullivan, M.F. Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. *Geoderma*, Amsterdam, v.116, n.1-2, p.89-105, 2003.
- Dexter, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Amsterdam, v.120, n.3-4, p.201-214, 2004.
- Dias Júnior, M.S. Compactação do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V.V.H., Schaefer, C.E.G.R. *Trópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.
- Dias Junior, 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.
- Dias Junior, M.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.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª. Ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

- 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.
- Hillel, D. *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. 413p.
- 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, Suplemento 11. Catena, Cremligen-Destedt, p.53–71, 1988.
- Jacomine, P.K.T. Distribuição Geográfica, características e classificação de solos dos tabuleiros costeiros. In: *Reunião Técnica Sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros: “Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros”*, 1996, Cruz das Almas. Anais. Cruz das Almas: EMBRAPA/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.13-24.
- Linstron, M.J.; Voorhees, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. *Soil compaction in crop production*. London: Elsevier, 1994, p.265-86 (Developments in agricultural engineering 2).
- Maia, J.L.T.; Ribeiro, M.R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, p.79-87, 2004.
- Mentges, M.I.; Fontanela, E.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J. Suzuki, L.E.A.A.S.; Densidade máxima pelo ensaio de Proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão axial. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 31, Gramado, 2007, Resumos... Gramado: SBCS, 2007. (CD-ROM)
- Nhantumbo, A.B.J.C.; Cambule, A.H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.87, n.2, p.231-239, 2006.
- Perin, E.; Ceretta, C.A.; Klamt, E. Tempo de uso agrícola e propriedades químicas de dois Latossolos do planalto médio do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, p.665-674, 2003.
- Ribeiro, M.R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos de tabuleiros costeiros. In: *Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros*, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. p.161-190.
- SAEG - Sistema para análises estatísticas, versão 9,0. Viçosa-MG: Fundação Arthur Bernardes, 2005.
- Soane, B.D.; Dickson, J.W.; Campbell, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. III - Incidence and control of compaction in crop production. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.2, n.2, p.3-36, 1982.

- Soane, B.D.; van Ouwerkerk, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soil compaction in crop production. Amsterdam: (Ed.). Elsevier, 1994. p.1-21.
- Silva, A.J.N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 120p. Tese Doutorado.
- Silva, A.J.N.; Cabeda, M.S.V.; Carvalho, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistema de manejo com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.10, n.3, p.579-585, 2006.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho Escuro e de um Podzólico Vermelho Amarelo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.24, n.2, p.239-349, 2000.
- Tavares Filho, J.; Ralisch, R., Guimarães, M.F.; Medina, C.C.; Balbino, L.C.; Neves, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.23, n.2, p.393-399, 1999.
- Zhang, H.; Hartge, K.H.; Ringe, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. Soil Science Society America Journal, Madson, v.61, p.239-245, 1997.
- Vargas, M. 1977. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo. MCgraw-Hill do Brasil. 509p.
- Weirich Neto, P.H.W.; Da Rosa, A.L.T.; Gomes, J.A. Suscetibilidade de dois solos à compactação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.2, p.349-352, 2002.

CAPÍTULO III

COMPRESSIBILIDADE DE UM ARGISSOLO AMARELO DISTROCOESO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS

Compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos

Veronildo S. Oliveira, Mário M. Rolim,

¹Parte da Tese de doutorado do primeiro autor, UFRPE

² UFRPE/DTR. Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6276. Email: verofat@hotmail.com.br

³ UFRPE/DTR. Fone: (81) 3320-6276. Email: rolim@dtu.ufrpe.br,

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar a compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes sistemas de uso e manejo sob cultivo de cana-de-açúcar. Dessa forma em uma região foram avaliados os manejos: MA – mata nativa; MSI - manejo sem irrigação; MCI - manejo com irrigação; MCV - manejo com fertirrigação (Vinhaça). Em todos os sistemas de manejo, exceto MA, vem sendo utilizada o preparo convencional com uso de grades pesadas em área total. Quatro trincheiras foram abertas nos locais sorteados das quatro áreas de manejo em estudo e retiradas amostras de solo deformadas para caracterização e indeformadas com auxílio de anéis metálicos de 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura, nas profundidades de 0-20, 20-40 cm, com quatro repetições. As amostras após coletadas foram saturadas e submetidas a sucções de 0,1 a 10 kPa e 50, 500 e 1500 kPa, para construção da curva característica. Para o ensaio de precompactação, as amostras foram submetidas a quatro umidades: 0,08; 0,12; 0,15 e 0,19 kg kg⁻¹, determinadas ao ar livre. No ensaio foram aplicadas oito cargas, com razão de carga igual a 2, na seqüência de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800, 1600 kPa e duração da aplicação da carga de 30 segundos. Após o ensaio as amostras foram levadas à estufa para determinação da umidade gravimétrica. Os resultados foram submetidos à análise de regressão para a variável tensão de precompactação em função da umidade gravimétrica (Ug) além de correlações entre as diversas variáveis, fazendo-se o ajuste de equações a 5% de significância. A profundidade de 0-20 cm, em todos os manejos, mostrou ser a mais susceptível à compactação em relação à profundidade de 20-40 cm; o manejo MCV alterou o comportamento compressivo do solo em ambas as profundidades (0-20 e 20-40 cm); e que a capacidade de suporte do solo foi maior em todos os manejos nas camadas de 20-40 cm.

Palavras-chave: Grau de compactação, solo, tensão de precompactação.

Compressibility of a yellow Argisol submitted to different managements

Abstract: The objective of this paper is to evaluate the compressibility of a cohesive Yellow Argisol submitted to different managements of sugarcane cultivation. The investigation was carried out at Triunfo mill, at the State of Alagoas, Brazil. The testing area was composed by four distinct sub-areas: a native forest (NF), an area cultivated with sugarcane without irrigation (ANI), an irrigated area (AWI), and an area irrigated with vinasse (AIV). All investigated areas, except the forest, were prepared using conventional equipment for soil preparation. Soil samples were collected within depths ranging from 0 to 20 cm, 20 to 40 cm, and 40 to 60 cm. A trench was dug in the four selected areas and four underformed samples were collected in each depth mentioned above. The samples were collected with metallic rings with dimensions of 6.4 cm in diameter and 2.5 cm in height. In the laboratory, the samples were previously saturated and submitted to soil suctions ranging from 0.1 to 1500 kPa in order to build the soil-water characteristic curves. Confined compression tests were performed with saturated samples. The results obtained from the compression tests were used for the determination of the void ratio (e) and the pre-consolidation stress (σ'_p) of the tested samples. All data were submitted to regression analysis and the differences among the obtained averages were compared using the Tukey test to 5% of probability. A regression analysis for pre-consolidation stress in function of water content (U_g) and correlations among the several variables were carried out using a 5 % significance. Within all investigated areas, the depth range of 0 to 20 cm showed to be more susceptible to compaction in relation to the depth range of 20 to 40 cm. Management (AIV) was found to modify the compressive behavior of the soil in both depth ranges. In all investigated areas, the load support capacity was larger in the depth range of 20 to 40 cm.

Keywords: compaction degree, soil, pre-consolidation stress.

INTRODUÇÃO

O aumento da intensidade de uso da mecanização agrícola na cultura sucroalcooleira, principalmente com as operações de preparo convencional (aração e gradagem) vem causando modificações físico-mecânicas ao solo, com conseqüente degradação da estrutura, seja promovendo a pulverização dos horizontes superficiais ou a compactação dos horizontes subsuperficiais. Por outro lado, as operações de colheita onde a cada dia são usadas máquinas mais pesadas, conferindo ao solo tensões críticas que favorecem à compactação, principalmente se forem utilizadas em condições inadequadas de umidade, são preocupações cada vez maiores na agricultura moderna.

Estudos desenvolvidos por Kondo & Dias Junior (1999) tem sido de grande importância na possibilidade de avaliar conjuntamente a suscetibilidade do solo à compactação e o momento ideal para execução das operações agrícolas.

A susceptibilidade a compactação depende de fatores externos e internos do solo. Os externos se relacionam com o tipo, intensidade, frequência e tempo de aplicação de uma carga. Os internos como a distribuição granulométrica, tipo de argila, conteúdo de matéria orgânica, densidade aparente, agregação, umidade e propriedades mecânicas ([Horn, 1988](#)).

Alem da densidade, a umidade é um dos fatores que determinam a magnitude da deformação que pode ocorrer no solo, pois age como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas (Larson et al., 1980; Silva et al., 2000). Entretanto, a matéria orgânica pode interferir na resistência do solo à compactação através do aumento da força de ligação entre partículas minerais; bem como no aumento da fase elástica do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada é aliviada; diluição da densidade, já que a densidade dos materiais orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo; filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as juntas; algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; e finalmente, substâncias orgânicas, ao reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (Soane, 1990).

Contudo, são poucas as pesquisas no meio agrícola que relacione a compactação com índices da mecânica do solo. Alguns estudos sobre modelagem da compactação do solo vêm sendo desenvolvidos utilizando-se conhecimento geotécnico como no caso do ensaio de compressão uniaxial ou triaxial. Nesses ensaios são obtidas a tensão de precompactação,

o índice de compressão, o índice de re-compressão, coesão e ângulo de atrito interno do solo (Arvidsson & Keller, 2004). Poodt et al. (2000) identificaram a coesão e a tensão de precompactação como sendo os parâmetros mais importantes na previsão de risco à compactação subsuperficiais, e são parâmetros extensamente usados em modelos de compactação (Defossez & Richard, 2002; Pereira et al., 2006).

A tensão de precompactação é obtida a partir da curva de compressão, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da tensão efetiva aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como índice de vazios, porosidade ou densidade do solo, em ensaio de compressão uniaxial (Larson et al., 1980; Mosaddeghi et al., 2003). A curva de compressão apresenta três trechos distintos. Dois trechos curvilíneo, unidos por um trecho retilíneo. No primeiro ocorrem pequenas deformações elásticas e reversíveis, sendo a região do solo onde ocorre o cultivo ou pode ser trafegado, sem que ocorra a compactação adicional. O segundo trecho é aproximadamente linear e corresponde à reta de compressão virgem, a partir da qual as tensões aplicadas ao solo resultarão em deformações de maior magnitude. O terceiro trecho corresponde ao descarregamento. A tensão de precompactação delimita os dois primeiros trechos (Lembert & Horn, 1991; Dias Júnior & Pierce, 1996; Mosaddeghi, 2003). Métodos para calcular a tensão de precompactação mais utilizada foram desenvolvidos por Casagrande (1936) e Pacheco Silva (1970).

Enquanto a tensão de precompactação reflete as tensões a que o solo já foi submetido, o índice de compressão revela a suscetibilidade do solo à compactação (Silva, 2000). Quanto maior o seu valor, maior será a inclinação da reta de compressão virgem e mais suscetível o solo será à compactação, pois indica maiores deformações com a carga aplicada (Kondo & Dias Junior, 1999a).

Segundo Dias Júnior & Pierce (1996), os modelos matemáticos que se baseiam na tensão de precompactação consideram a história da tensão em termos da tensão de precompactação como uma função da umidade do solo. Neste modelo, a tensão de precompactação representa o valor máximo da tensão que poderá ser aplicada ao solo para evitar a compactação adicional. Desta forma, a tensão de precompactação do solo expressa, também, a capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados (Kondo & Dias Junior, 1999).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a suscetibilidade à compactação de um Argissolo Amarelo Distrocoeso em diferentes sistemas de uso e manejo sob cultivo de cana-de-açúcar, através do comportamento compressivo,

identificando sua capacidade de suporte em função do teor de umidade e da sucção matricial do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área da Usina Triunfo Agroindustrial, localizada entre os paralelos 9°40'47" e 9°42'30" S e nos meridianos 36°08'12" e 36°05'03" W, no município da Boca da Mata, AL. O clima da área de estudo, segundo classificação de Köppen, é tropical chuvoso com verão seco. A precipitação média anual fica em torno de 1200 mm. O solo utilizado foi classificado segundo EMBRAPA (2006), como Argissolo Amarelo Distrocoeso, textura média/argilosa fase floresta subperenifólia, relevo plano cujas características encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do Argissolo Amarelo Distrocoeso, em diferentes sistemas de manejo e profundidades sob cultivo de cana-de-açúcar.

Prof (cm)	Granulometria				Macro (%)	Micro (%)	M.O (%)
	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Dp Mg m ³			
MA							
0-20	717,4	56,6	226,0	1,30	30,57	20,88	3,3
20-40	663,7	62,8	243,5	1,40	27,85	17,47	2,8
MSI							
0-20	677,4	80,3	242,2	1,48	18,75	20,15	1,7
20-40	581,2	47,8	371,0	1,60	17,11	20,90	0,9
MCI							
0-20	707,4	57,8	234,7	1,63	20,12	19,48	1,9
20-40	648,7	44,05	307,2	1,52	20,57	19,45	1,2
MCV							
0-20	722,4	56,5	221,0	1,53	24,20	21,18	2,6
20-40	751,2	20,3	228,5	1,55	20,64	20,64	1,8

MA = mata nativa; MSI=manejo sem irrigação; MCI=manejo com irrigação; MCV=manejo com vinhaça

Foram escolhidas quatro situações distintas de uso e manejo do solo: uma coberta por vegetação nativa (floresta subperenifólia) MA - mata; e as outras três cultivadas continuamente com cana-de-açúcar, MSI - manejo sem irrigação; MCI - manejo com irrigação; MCV - manejo com fertirrigação (Vinhaça). A área sob manejo sem irrigação (sequeiro) não recebe nenhuma irrigação ou fertirrigação, há mais de 30 anos. Na área irrigada foi aplicada uma lâmina de 120 mm de água, em duas parcelas, durante o ciclo da cultura, através de aspersão por canhão, com vazão de 100 m³ h⁻¹, há mais de 25 anos. Na área com fertirrigação foram aplicados 500 m³ de vinhaça diluída anualmente, através de aspersão com 150 m³ h⁻¹ de vazão, há mais de 25 anos.

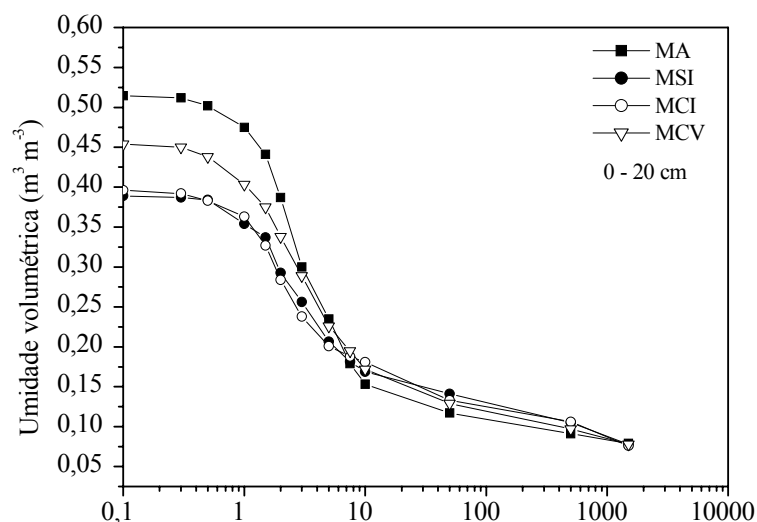
O preparo do solo das áreas cultivadas foi sempre realizado por ocasião da renovação das áreas, utilizando-se implementos de preparo convencional: grade pesada, seguida de gradagem leve, precedida de subsolagem com posterior sulcagem a 25 cm de profundidade, sendo a adubação e o plantio realizados manualmente.

As amostras de solo foram coletadas em março de 2006, nos locais sorteados das quatro áreas de manejo em estudo, nas profundidades de 0-20, 20-40 cm. Foram abertas quatro trincheiras por parcela (repetição) em cada talhão, retirando-se amostras indeformadas nas duas profundidades estudadas.

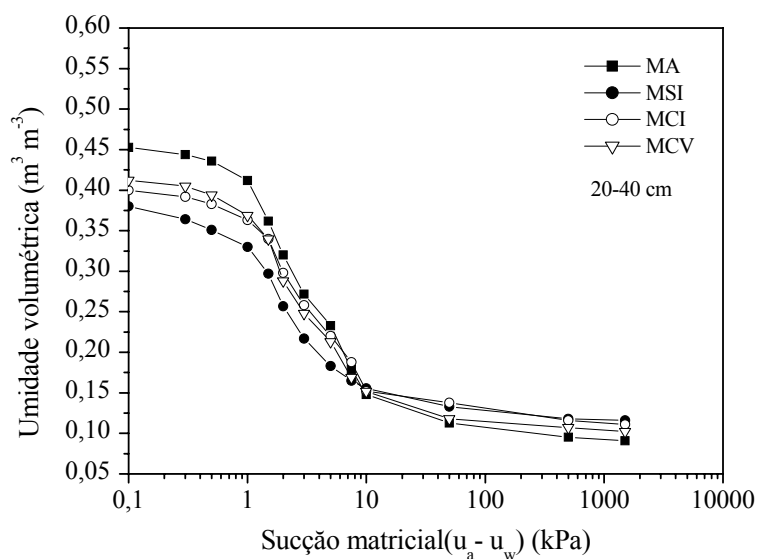
Para obtenção da curva de retenção de água do solo (Figura 1), utilizou-se aparelho de placas porosas (funil de Haynes) para os pontos de baixa pressão, associados aos dados dos pontos de maior pressão obtidos no aparelho de Richards.

As amostras foram saturadas e submetidas a sucções de 0,1 a 10 kPa e 50, 500 e 1500 kPa. Os dados de umidade gravimétrica foram multiplicados pela densidade do solo, calculada a partir das amostras com estrutura preservada, das respectivas camadas, para então obter a umidade volumétrica e , assim, reunir em uma mesma curva os pontos de umidade (θ) \times sucção ($u_a - u_w$), do funil de Haynes e do aparelho de Richards. A microporosidade foi determinada na sucção de 6,0 kPa.

Para o ensaio de precompactação, as amostras foram submetidas a quatro umidades: 0,08; 0,12; 0,15 e 0,19 kg kg^{-1} , determinadas ao ar livre. No ensaio foram aplicadas oito cargas, com razão de carga igual a 2, na seqüência de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800, 1600 kPa e duração da aplicação da carga de 30 segundos. Após o ensaio as amostras foram levadas à estufa para determinação da umidade gravimétrica.



A.



B.

Figura 1. Curvas características dos solos sob manejo de MA - mata; MSI - manejo sem irrigação; MCI - manejo com irrigação; MCV - manejo com fertirrigação (Vinhaça), ajustadas pela equação de van Genuchten, nas profundidades de 0-20 (A) e 20-40 cm (B).

Os resultados foram submetidos à análise de regressão para a variável tensão de precompactação em função da umidade gravimétrica (U_g). Empregou-se, ainda, o estudo de correlações entre as diversas variáveis, fazendo-se o ajuste de equações; para os ajustes das equações significativas, o coeficiente de determinação (R^2) das equações ajustadas é seguido de asteriscos, respectivamente para 1 e 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença significativa entre os manejos e as umidades sobre a tensão de precompactação do solo (Tabela 2). O fator umidade do solo foi significativo na avaliação da tensão de precompactação do solo nos quatro manejos e profundidades estudadas. A tensão de precompactação aumentou com a redução da umidade, nas duas profundidades estudadas.

Tabela 2. Valores médios da tensão de precompactação dos quatro manejos em função da umidade nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm em um Argissolo Amarelo distrocoeso.

Umidade m ³ m ⁻³	Tensão de precompactação (kPa)				
	MA	MSI	MCI	MCV	Total
Camada de 0 – 20 cm					
0,08	113,00	160,77	157,40	127,57	139,43A
0,12	83,27	112,15	112,72	88,97	99,28B
0,15	72,67	84,20	83,85	72,67	78,35C
0,19	42,67	66,85	65,27	53,37	57,04D
Total	77,90B	105,99A	104,56A	85,64B	
Camada de 20 – 40 cm					
0,08	112,65Ca	161,88Aa	157,10Aa	131,27Ba	
0,12	85,75Bb	126,19Ab	122,57Ab	102,35Bb	
0,15	75,18Bb	94,70Abc	94,08Abc	87,03Abb	
0,19	54,92Bc	78,80Ac	74,65Ac	77,80Ab	

Letras maiúsculas comparam diferenças entre os manejos e minúsculas entre profundidade do solo, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Média de quatro repetições. Manejos: MA – mata, MSI – manejo sem irrigação, MCI – manejo com irrigado, MCV – manejo com vinhaça.

Não houve interação entre manejo e umidade na profundidade de 0-20 cm. Entretanto, houve diferença significativa entre as médias dos manejos e das umidades. Os manejos MCI e MSI apresentaram os maiores valores de tensão de precompactação, estatisticamente iguais entre si. Os manejos MA e MCV apresentaram menores médias para a tensão de precompactação, estatisticamente iguais entre si.

Com relação à profundidade, verificou-se o movimento decrescente da tensão de precompactação com o acréscimo do teor de água nas amostras ensaiadas, apresentando diferenças significativas entre as quatro umidades. Para a camada de 20-40 cm, houve diferença significativa entre as médias para a interação manejo × umidade, com comportamento similar a camada de 0-20 cm. Especificamente, o manejo MA apresentou o menor valor de tensão de precompactação, diferindo estatisticamente do MSI.

O comportamento mecânico do solo em relação a tensão de precompactação também foi verificado por outros autores (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999; Silva, 2003; Braida et al., 2006). Apesar da ação antrópica sobre o MCV, o comportamento tensão-deformação foi semelhante ao do MA. Esse fato reforça a preocupação da adoção de manejos que proporcionem a manutenção e/ou aumento dos teores de matéria orgânica nos solos cultivados. Com a diminuição da umidade houve aumento da pressão de precompactação tornando o solo mais resistente às cargas externas, pelo aumento da sua capacidade de suporte. Segundo Hillel (1980) quanto mais baixo os teores de água, mais resistente fica a matriz do solo, conferindo ao mesmo, maior resistência às deformações provocadas por forças externas.

Os valores de tensão de precompactação para as quatro umidades estudadas foram estatisticamente diferentes, evidenciando a importância do controle do teor de água do solo, quando da utilização de máquinas e implementos agrícolas. Segundo Hillel (1980), a umidade ideal para a realização de operações agrícolas deve estar na condição friável, normalmente abaixo do limite de plasticidade do solo.

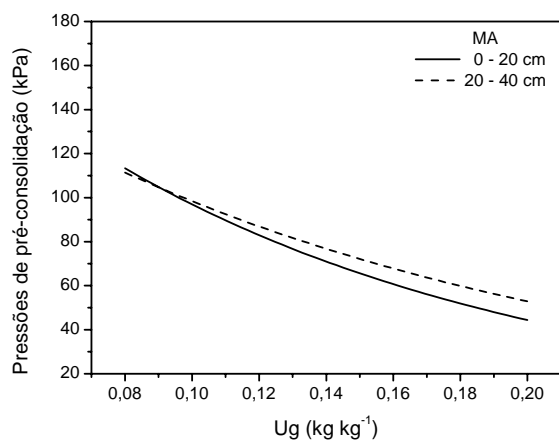
Observando-se a Figura 2, verifica-se que a tensão de precompactação variou significativamente com a variação do teor de água das amostras. De maneira geral, observa-se que a tensão de precompactação (σ_p) aumentou de forma exponencial à medida que o solo se tornou mais seco, segundo a seguinte equação de regressão:

$$\sigma_p = ae^{-bU_g} \quad (1)$$

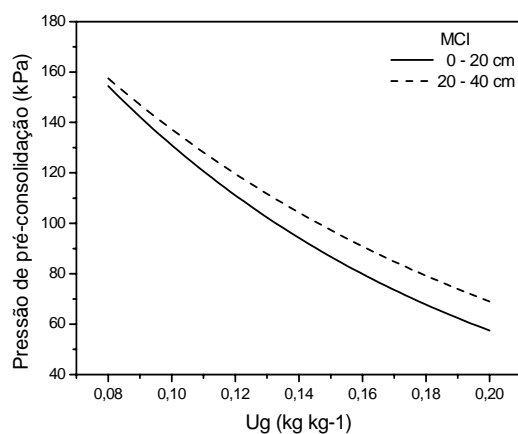
Onde σ_p = tensão de precompactação;

U_g = umidade gravimétrica e a e b = parâmetros de ajustes.

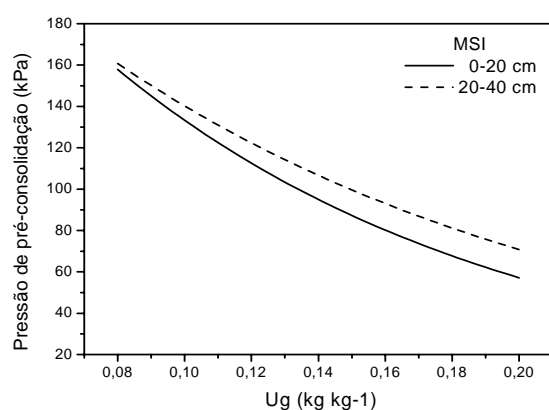
Esse comportamento também tem sido observado por vários autores como Kondo & Dias Junior (1999); Silva et al. (2002b); Miranda et al. (2003); Silva (2003); Mosaddeghi et al. (2003) e Braida (2006). Devido a atuação da água na parcela de coesão do solo que, segundo Hillel (1980), à medida que a umidade vai diminuindo, aumenta a resistência ao cisalhamento, tornando o solo mais resistente. Quando o teor de água aumenta, a sucção do solo diminui e a resistência também.



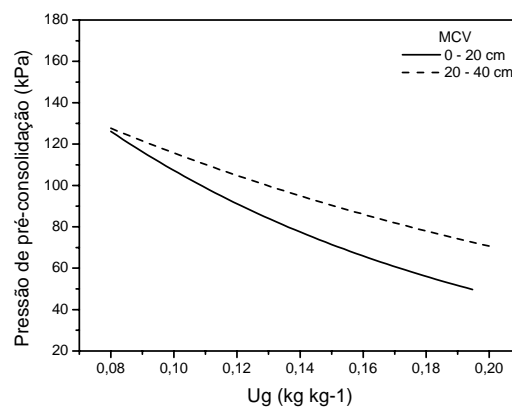
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 2. Curvas da pressão de precompactação em função das umidades de amostras indeformadas de um Argissolo Amarelo distrocoeso, coletadas na profundidade de 0-20 e 20-40 cm, nos diversos manejos MA (A), MCI (B), MSI (C) e MCV (D).

Para teores de água mais baixos, os valores de tensão de precompactação nos quatro manejos e nas duas profundidades estudadas ficaram muito próximos, não aparecendo o efeito da matéria orgânica absorvendo energia de compactação. Observa-se que a tensão de precompactação independentemente dos manejos estudados reduziu em toda faixa de umidade avaliada em função do acréscimo da umidade.

No tratamento de MA (Figura 2A e Tabela 2) praticamente não houve diferença entre as médias da tensão de precompactação nas duas profundidades estudadas. O manejo não recebeu nenhuma ação antrópica, atuando apenas os efeitos dos ciclos de secagem e

umedecimento e carga geostática. Apesar da atuação desses dois fatores, não foram observadas modificações nos atributos do solo que pudessem provocar alterações no comportamento mecânico do solo nas profundidades estudadas. Comportamento similar foi observado por Assis (2002) em estudo de manejo com diferentes sistemas de preparo do solo, comparados com a condição de mata nativa.

Para os tratamentos MSI e MCI observa-se que as equações de regressão $\sigma_p = f(u)$ foram diferentes nas profundidades estudadas. Verifica-se que os valores de σ_p na profundidade de 20-40 cm foram maiores do que os de 0-20 cm (Figura 2B e C), evidenciando uma maior capacidade de suporte, acentuando-se à medida que decresce o teor de água no solo. A maior capacidade de suporte nesta profundidade pode estar associada aos maiores valores da densidade do solo, pelo decréscimo da macroporosidade e pelo aparecimento do caráter coeso a partir desta profundidade.

No manejo MCV (Figura 2D) foi observado que o efeito da umidade na redução da tensão de precompactação foi mais evidente quando comparado com os outros manejos. Para toda faixa de umidade a tensão de precompactação foi maior na profundidade de 20-40 cm. A maior susceptibilidade da profundidade de 0-20 cm pode estar associada a menores valores de densidade do solo.

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos coeficientes “a” e “b” da equação exponencial $\sigma_p = a e^{-bu_g}$ e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para o Argissolo Amarelo distrocoeso nos diferentes manejos coletados nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Com os dados de sucção matricial obtidos na curva de retenção de água do solo de cada manejo e as respectivas tensões de precompactação, foram construídas curvas limites (Figura 3), que segundo Alonso et al. (1987) representam situações de carregamento e de sucção matricial já ocorrida pelo solo. Desse modo, as curvas SI (Suction increase) e LC (Loading Collapse) definem duas regiões: uma elástica e outra plástica. Os mesmos autores, concluíram que a área definida pelas curvas SI e LC são acopladas, ou seja, uma variação de carga externa ou da sucção matricial desloca os dois limites.

Em investigações de campo, Costa et al (2003) utilizam as curvas limites representadas por modelo exponencial da seguinte forma:

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

(2)

Onde: σ_{pc} = Tensão de precompactação; a, b e c = parâmetros de ajuste;

u_a = pressão do ar;

u_w = pressão da água;

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial.

Tabela 3. Coeficientes da equação de regressão, $\sigma p = ae^{-bu_g}$, para o Argissolo Amarelo distrocoeso nos diferentes sistemas de manejo, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Sistemas de Manejos	Coeficientes ($\sigma p = ae^{-bx}$)		
	a	b	R ²
Camada de 0 – 20 cm			
MA	211,63	7,80*	0,90
MSI	310,87	8,46*	0,85
MCI	298,57	8,24*	0,91
MCV	241,33	8,11*	0,92
Camada de 20 – 40 cm			
MA	183,62	6,20*	0,92
MSI	279,76	6,83*	0,88
MCI	272,93	6,87*	0,89
MCV	189,44	4,93*	0,88

* Nível de significância a 5% de probabilidade pelo teste t

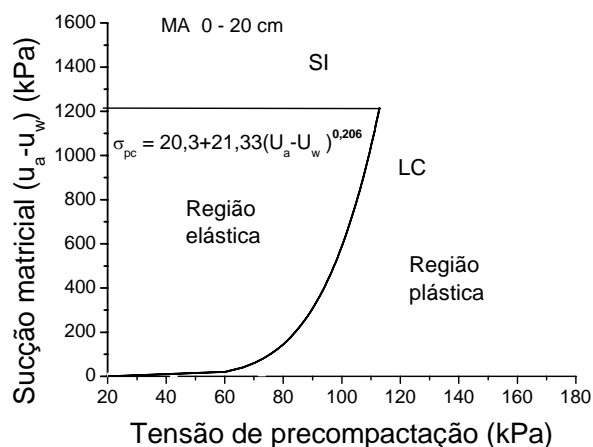
Os autores definiram a curva SI assumindo que a sucção matricial do solo na profundidade pesquisada não excedeu a 50 kPa em campo. As curvas LC e SI definem os limites que podem ser utilizados para estimar a capacidade de suporte de solos não-saturados.

Em todos os manejos a capacidade de suporte diminuiu de forma exponencial com o decréscimo da sucção matricial.

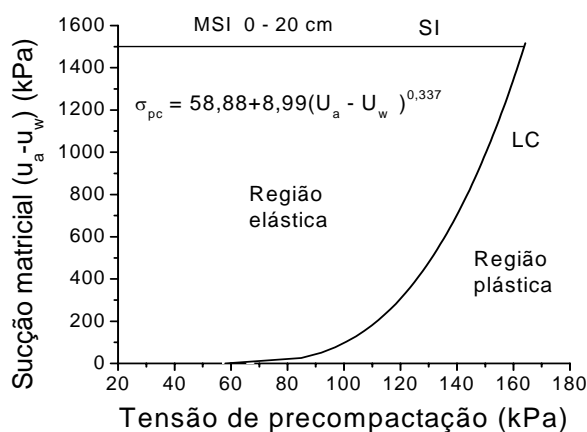
Utilizando-se a equação (2) para o cálculo da tensão de precompactação (curva LC) e assumindo a curva SI como a sucção que o solo atingiu na curva de retenção de água do solo. Analisando-se as áreas delimitadas pelas curvas SI e LC dos quatro manejos (Figura 3), a observa-se que o manejo MA (Figura 3A) foi o que apresentou menor área, enquanto nos demais, houve incremento da área delimitada pelas duas curvas, evidenciando que houve compactação nestas áreas.

Os três manejos cultivados foram submetidos a cargas externas semelhantes (operações agrícolas). Entretanto, o manejo MCV (Figura 3D) apresentou um histórico de tensão menor que os manejos MSI e MCI (Figura 3B e C), evidenciando que uma fração menor

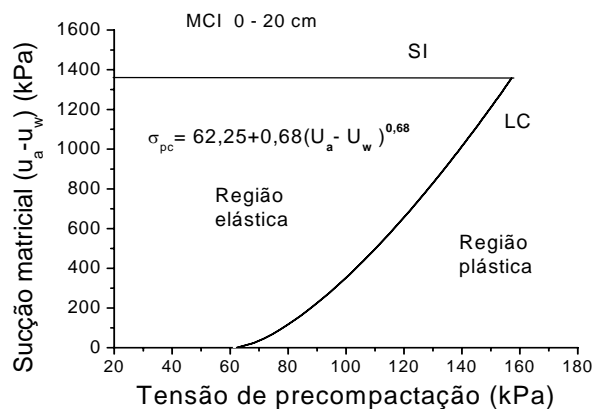
das cargas externas foi aplicada a matriz do solo, provavelmente devido à aplicação continuada de vinhaça durante mais de 25 anos. Embora mais susceptível à compactação, o manejo MCV apresentou menor degradação das propriedades físicas do solo, por apresentar menor tensão de precompactação para as umidades estudadas, menor variação da porosidade em relação a condição de MA e maior teor de matéria orgânica, corroborando com Silva & Cabeda (2006), que verificaram que a adição de matéria orgânica na forma de vinhaça contribuiu para os menores valores de tensão de precompactação em relação aos demais manejos cultivados.



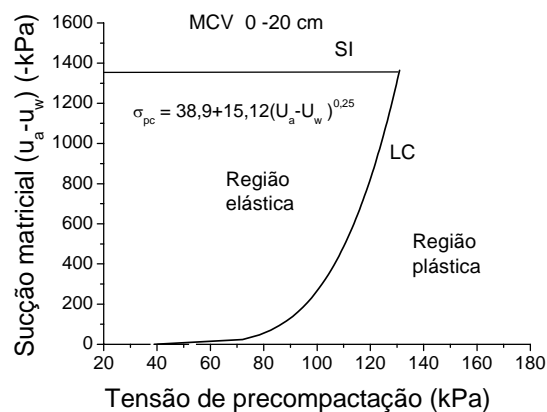
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 3. Sucção matricial em função da tensão de precompactação dos manejos estudados na profundidade de 0-20 cm.

Os manejos MSI e MCI apresentaram os maiores valores para a condição de sucção zero, ou seja, na condição saturada, 58,88 e 62,25 kPa, respectivamente, enquanto os manejos MA e MCV, os menores: 20,3 e 38,9 kPa, respectivamente.

Analisando-se a Figura 4, observa-se que para a profundidade de 20-40 cm o comportamento das curvas SI e LC apresentaram comportamento semelhante aos encontrados na profundidade de 0-20 cm. Os maiores valores na condição de sucção zero ocorreram nos manejos MCI e MSI, enquanto os menores ficaram com os manejos MA e MCV.

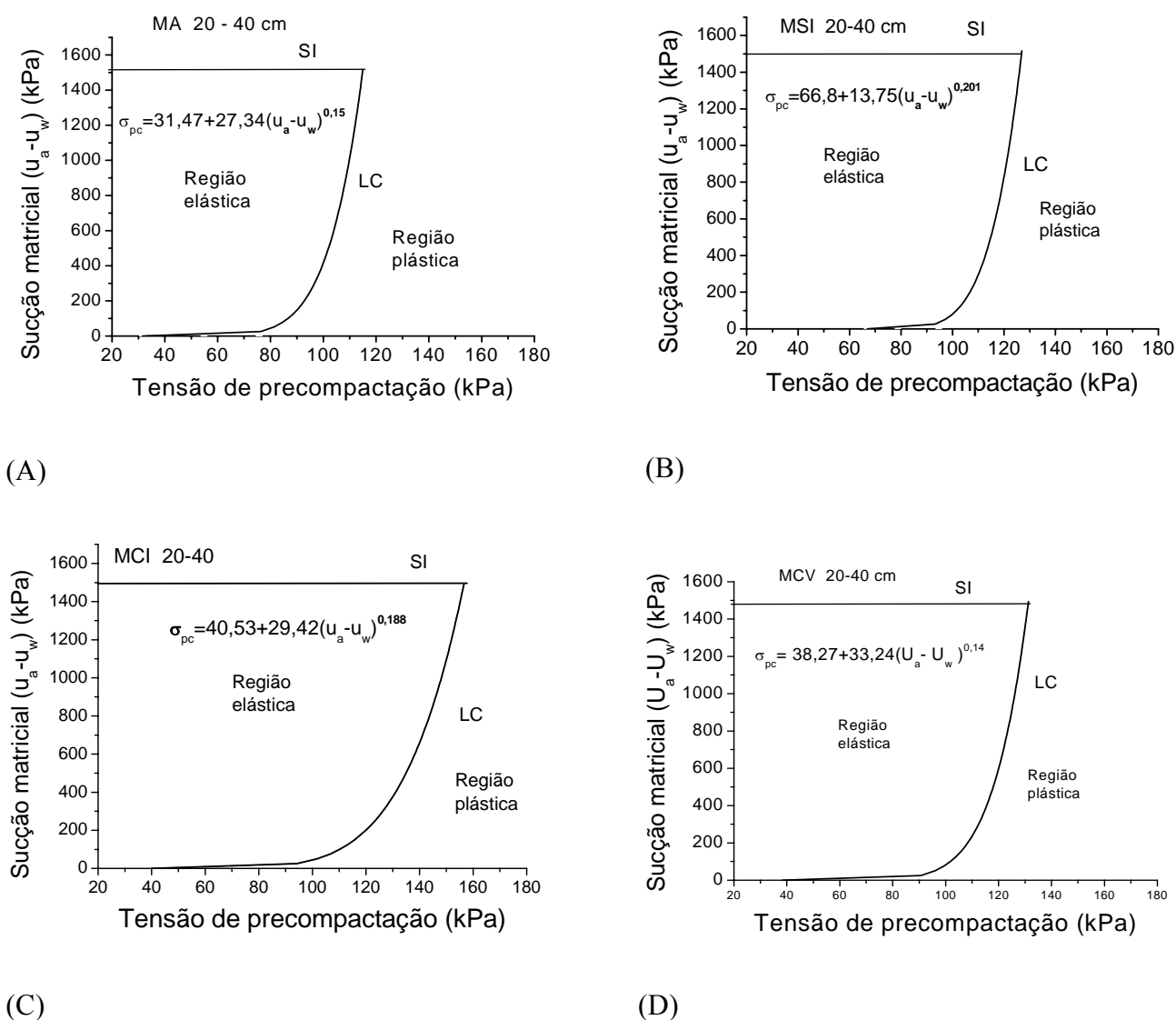


Figura 4. Sucção matricial em função da tensão de precompactação dos manejos estudados na profundidade de 20-40 cm.

Considerando-se que os equipamentos utilizados na colheita da cana-de-açúcar (caminhões e carretas) apresentam valores de peso por eixo da ordem de 60 kN e pressão

de insuflagem de pneus de 180 kPa (Kanali et al., 1997) é de se esperar que para as condições em que o solo foi ensaiado, essa operação provocaria compactação adicional ao solo, pois superaria a tensão de precompactação e entraria na região plástica sofrendo deformação irreversível, dependendo da sucção matricial encontrada no campo, no momento de entrada do maquinário no talhão.

CONCLUSÕES

a) A profundidade de 0-20 cm, em todos os tratamentos, mostrou ser a mais susceptível à compactação em relação à profundidade de 20-40 cm.

b) O manejo MCV alterou o comportamento compressivo do solo em ambas as profundidades (0-20 e 20-40 cm) por meio da mudança na pressão de precompactação, menor em relação aos demais manejos cultivados, devido à adoção da vinhaça como fonte de matéria orgânica.

c) A capacidade de suporte do solo foi maior em todos os manejos nas camadas de 20-40 cm e menor na de 0-20 cm, obedecendo a seguinte ordem crescente $MCI > MSI > MCV > MA$.

d) Os manejos MSI e MCI apresentaram maiores áreas limitadas pelas curvas SI e LC, indicando que a compactação do solo influenciou decisivamente a capacidade de suporte de carga do solo.

e) Apesar da ação antrópica sobre o MCV, o comportamento tensão-deformação foi semelhante ao do MA. Esse fato reforça a preocupação da adoção de manejos que proporcionem a manutenção e/ou aumento dos teores de matéria orgânica nos solos cultivados.

LITERATURA CITADA

- Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. NBR 7182: Solo. Ensaio de adensamento unidimensional - ABNT. 1990. NBR 3. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- Alonso, E.E.; Gens, A.; Hight, D.W. "General Report - Special Problem Soils," Proceedings, Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, E. T. Hanrahan, T.L.L. Orr, and T.F. Widdis, Eds., A.A. Balkema, Dublin, v.3, p.1087-1146, 1987.
- 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. 141p. Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP, SP.
- Arvidsson, J.; Keller, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.77, n.1-2, p.85-95, 2004.
- Casagrande, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Cambridge, 1936. Proceeding. Cambridge: MA Harvard University, D-34, p.60-64, 1936.
- 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, No. Paper ID GTJ10724_262, p.1-9, 2003.
- De´fossez, P.; Richard, G.; Boizard, H.; O’Sullivan, M.F. Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. *Geoderma*, Amsterdam, v.116, p.89-105, 2003.
- 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, Suplemento 11. Catena, Cremligen-Destedt, p.53-71, 1988.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.P.; Fallow, B. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.68, p.17-24, 2004.
- Maia, J.C.S. Determinação de esquema de amostragem para avaliação de propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de preparo. 1999. 172f. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- Miranda, E.E.V.; Dias Junior, M.S.; Guimarães, P.T.G. et al. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. *Ciência Agrotecnica*, p. 1506-1515, 2003 (Edição especial).
- Mosaddeghi, M.R.; Hajabbas, M.A.; Hemmat, A. et al. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.55, n.1-2, p.87-97, 2000.
- Oliveira, G.C.; Dias Junior, M.S.; Resck, D.V.S. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.1, p. 47-50, 2003.
- Pereira, J.O., Defossez, P.I.; Richards, G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science*, London, v.58, n.1, p.34-44, 2007.
- Silva, A.R.; Dias Junior, M.S.; Guimarães, P.T.G.; Araújo Júnior, C.F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.30, p.207-216, 2006.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho Escuro e de um Podzólico Vermelho Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, n.2, p.239-349, 2000.
- Soane, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.179-201, 1990.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, p.9-15, 2002b.
- 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.

CONCLUSÕES FINAIS

CONCLUSÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos podemos tirar as seguintes conclusões em relação a agregação do solo, que foi evidenciado em todos os manejos diminuição da estabilidade de agregados com o aumento da profundidade. Os tratamentos cultivados tiveram seus índices de agregação reduzidos em relação à mata nativa na seguinte seqüência: Mata nativa > manejo com vinhaça > manejo com irrigação > manejo sequeiro. O manejo sequeiro apresentou os menores índices de agregação. O manejo com vinhaça foi o que mais se aproximou da condição de mata, apresentando melhor estabilidade de agregados em água. As correlações entre COT e os índices de estabilidade estudados foram significativas e positivas.

Os valores das densidades máximas do solo obedeceram a seguinte ordem crescente quanto à susceptibilidade à compactação: sequeiro > irrigado > vinhaça > mata, enquanto a umidade crítica de compactação acompanhou a ordem decrescente. Portanto, os solos onde se encontram as condições de sequeiro e irrigados podem sofrerem degradação, em relação a mata nativa, através da compactação, mesmo a teores de umidade mais baixos, necessitando de maiores cuidados quanto ao preparo do solo e a colheita da cana-de-açúcar.

Quanto ao comportamento compressivo, os resultados mostraram que para a profundidade de 0-20 cm, em todos os manejos, foram mais susceptível à compactação em relação à profundidade de 20-40 cm. O manejo MCV alterou o comportamento compressivo do solo em ambas as profundidades (0-20 e 20-40 cm) por meio da mudança na tensão de pré-consolidação, menor em relação aos demais manejos cultivados, devido à adoção da vinhaça como fonte de matéria orgânica. A capacidade de suporte de carga do solo foi maior em todos os manejos nas camadas de 20-40 cm em relação a 0-20 cm, obedecendo a seguinte ordem crescente MCI > MSI > MCV > MA. Os manejos MSI e MCI apresentaram maiores áreas limitadas pelas curvas SI e LC, indicando que a compactação do solo influenciou decisivamente a capacidade de suporte de carga do solo.