



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: SOLOS E NUTRIÇÃO DE
PLANTAS

RAFAELA WATANABE

SUSCEPTIBILIDADE A COMPACTAÇÃO DE SOLOS EM AGROECOSSISTEMAS
NO SEMIÁRIDO CEARENSE

FORTALEZA
2015

RAFAELA WATANABE

SUSCEPTIBILIDADE A COMPACTAÇÃO DE SOLOS EM AGROECOSSISTEMAS NO
SEMIÁRIDO CEARENSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Agronomia: Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

W294s Watanabe, Rafaela.
Susceptibilidade a compactação de solos em agroecossistemas no semiárido cearense / Rafaela Watanabe. – 2015.
103 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Fortaleza, 2015.
Orientação: Prof. Dr. Teógenes Senna de Oliveira.

1. Agricultura irrigada. 2. Funções de pedotransferência. 3. Capacidade de suporte de cargas. 4. Pisoteio animal. I. Título.

CDD 631.4

RAFAELA WATANABE

SUSCEPTIBILIDADE A COMPACTAÇÃO DE SOLOS EM AGROECOSSISTEMAS NO
SEMIÁRIDO CEARENSE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Agronomia: Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

Aprovada em: ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Teógenes Senna de Oliveira – Orientador
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof. Dr. Liovando Marciano da Costa
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof. Dr. Raphael Bragança Alves Fernandes
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof. Dr. Igor Rodrigues de Assis
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e pelas oportunidades concedidas.

Aos meus pais, Jorge e Cleonice, carinho e auxílio em todos os momentos que necessitei obrigado por tudo.

Aos meus irmãos Marcel e Marcielly.

Aos meus avós, Ana e Carlos Bellei (*in memoriam*), e , Juko (*in memoriam*) e Kotoko

Ao prof. Teógenes pela orientação, amizade, oportunidades de crescimento e pelo apoio.

Ao prof. Álvaro, pelas valiosas sugestões e auxílio prestado na realização desse projeto.

Obrigado por ter disponibilizado o laboratório e auxiliado no desenvolvimento desse trabalho

Ao prof. Jaedson pela ajuda e sugestões.

Ao prof. Júlio por dispor de seu tempo tirando dúvidas e auxiliando nas análises estatísticas.

Ao prof. Chaves pela disponibilização do laboratório de mecânica do solo

Ao Getúlio, pela paciência em ensinar e por sempre compartilhar o seu conhecimento.

A Sâmia Paiva de Oliveira, minha gratidão pelo imenso auxílio prestado nas análises.

Ao Brás pelo auxílio no laboratório e boas conversas.

As minhas amigas de república em Fortaleza: Aurenívia, Alexandra, Ayrles, Dani e Raiana.

Aos meus colegas de mestrado Alcione, Alide, Ana Paula, Antônia Arleudina, Bruno,

Eurileny, Hermes, Jordânia, José Aridiano, Maria Auxiliadora, Naiara e Rafael.

Aos amigos Camila, Leo e Aridiano pelo apoio e amizade.

Aos colegas da sala de estudo do manejo Janine, Adonai, Marlete, Juliana, Fred, Liliane,

Robson, Sacramento, Rafaela M., Tiago, Marcela e Marrom.

Aos motoristas Paulo e Geraldo.

A Maisa, Rodrigo e Poliene pelo carinho e acolhimento em minha estadia em Piracicaba.

A Isabel, Stella e Carol pela amizade e companheirismo.

A Nazareth e Carol pelo carinho e amizade.

A Alinne pela amizade.

Aos colegas Larissa, Lucas e Eduardo pela imensa ajuda no Laboratório de Matéria Orgânica.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e o

Departamento de Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade da realização do mestrado.

A Escola Superior Luiz de Queiroz e a Universidade Federal de Viçosa pela disponibilização da estrutura para realização das análises.

A Fazenda Amway Nutrilite e a Empresa Frutacor.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	8
REFERÊNCIAS	11
1. COMPRESSIBILIDADE E GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS IRRIGADOS NO SEMIÁRIDO CEARENSE.....	14
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	17
1.2.1 <i>Compressão solo</i>	21
1.2.2 <i>Granulometria e densidade de partículas</i>	22
1.2.5 <i>Análise estatística</i>	23
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
1.3.1 <i>Influência da textura no comportamento compressivo</i>	23
1.3.2 <i>Grau de Compactação</i>	27
1.3.3 <i>Densidade máxima e umidade crítica</i>	28
1.3.4 <i>Pressão de preconsolidação e índice de compressão</i>	32
1.3.5 <i>Estimativa da pressão de preconsolidação</i>	37
1.4 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41
2. COMPACTAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E COMPRESSIBILIDADE EM AGROECOSSISTEMAS ORGÂNICOS IRRIGADOS.....	48
2.1 INTRODUÇÃO	49
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	51
2.2.1 <i>Caracterização das áreas</i>	51
2.2.2 <i>Ensaio Proctor</i>	53
2.2.3 <i>Compressão solo</i>	54
2.2.4 <i>Intervalo hídrico ótimo (IHO)</i>	55
2.2.5 <i>Granulometria e densidade de partículas do solo</i>	56
2.2.6 <i>Matéria orgânica leve e carbono</i>	57
2.2.7 <i>Análise estatística</i>	57
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
2.3.1 <i>Influência da textura no processo compressivo do solo</i>	58
2.3.2 <i>Grau de compactação</i>	59
2.3.3 <i>Densidade máxima e umidade crítica</i>	63
2.3.4 <i>Intervalo hídrico ótimo</i>	64
2.3.5 <i>Compressibilidade do solo</i>	72
2.4 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS	76
3. QUALIDADE FÍSICA DE UM LUVISSOLO CRÔMICO SOB SISTEMAS AGROFLORESTAIS.....	82
3.1. INTRODUÇÃO.....	83
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	85
3.2.1. <i>Caracterização da área de estudo e amostragem</i>	85
3.2.2 <i>Ensaio Proctor</i>	86
3.2.3 <i>Compressão solo</i>	87
3.2.4 <i>Granulometria e densidade de partículas do solo</i>	88
3.2.5 <i>Matéria orgânica leve e carbono e nitrogênio</i>	88

3.2.6	<i>Análise estatística</i>	89
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
3.4	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS	100

INTRODUÇÃO GERAL

A sociedade, cada vez mais preocupada com a sustentabilidade da vida no planeta, aumentou a cobrança por processos de produções menos impactantes ao ambiente. Diante dessa preocupação, o grande desafio dos sistemas de produção agrícola é explorar o solo e conservar sua qualidade química, física e biológica.

A retirada da vegetação natural para a utilização do solo com fins agrícola promove mudanças na estrutura física do solo que serão influenciadas principalmente pelo manejo, a intensidade de exploração e o tempo. Nesse contexto a compactação é uma das principais formas de degradação da qualidade física dos solos, com impactos diretos na estrutura do solo e indiretos na retenção de água, absorção de nutrientes pelas plantas, assim como na degradação ambiental devido ao aumento da emissão de dióxido de carbono, das taxas de erosão, contaminação das águas e redução da diversidade biológica (SOANE; VAN OUWERKERK, 1995; PENGTHAMKEERATI et al., 2011).

Nas regiões semiáridas, o aumento das áreas compactadas está principalmente relacionado a intensificação do uso da terra, ao tráfego intenso de máquinas, pisoteio animal e aos baixos teores de matéria orgânica do solo (HAMZA, ANDERSON, 2005; QUIROGA et al., 1999). A relação entre matéria orgânica e compactação está associada aos efeitos na qualidade estrutural do solo como a redução da susceptibilidade do solo a compactação, melhoria da agregação, aumento da estabilidade estrutural e dos agregados do solo (ABIVEN et al., 2009; BARZEGAR et al., 2000; DIAZ-ZORITA; GROSSO, 2000; HUANG et al., 2005, HERENCIA et al., 2011; KRZIC et al., 2004).

A qualidade do solo é definida como a capacidade do solo em funcionar dentro dos limites do ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde vegetal e animal. (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2012), no qual só pode ser avaliada através da mensuração de parâmetros (CARTER et al., 1997).

Na literatura a avaliação da compactação do solo é realizada em função de vários parâmetros como a resistência a penetração, densidade do solo, tamanho e continuidade dos poros, etc. Além destes, a pressão de preconsolidação (σ_p) também tem sido utilizada com a vantagem de ser o único dos indicadores que fornece valores de pressão máxima que o solo é capaz de suportar sem que haja compactação adicional (DEXTER, 1988; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

O grau de compactação expresso pela relação entre a densidade atual e a densidade de referência do solo (D_{sref}) é um parâmetro mais útil do que a densidade do solo para comparar solos de diferentes texturas. A D_{sref} pode ser obtida por amostras de solos deformadas aplicando uma pressão de 200 kPa (HÅKANSSON, 1990; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000) ou a partir de amostras indeformadas com aplicação de uma pressão de 1600 kPa (SUZUKI et al., 2007).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um indicador de qualidade do solo, pois integra parâmetros físicos determinados pelas propriedades intrínsecas e da estrutura do solo (SILVA et al., 1994, TORMENA et al., 1998). Através da densidade crítica (D_{scrit}) obtida pelo IHO é possível estabelecer o valor de densidade do solo limitante para o desenvolvimento das plantas.

Utilizando como parâmetros a pressão de preconsolidação e a resistência à penetração em laboratório (RP) para amostras de solos com umidades padronizadas, Pacheco e Cantalice (2011) verificaram maiores valores para RP e σ_p em áreas com 30 anos de cultivo de cana de açúcar do que com 14 ou 4 anos. Já Oliveira et al. (2011) analisando compressibilidade do solo em diferentes manejos na cultura da cana de açúcar, observaram nas áreas com 25 anos de aplicação de vinhaça comportamento compressivo mais próximo a condição natural do que nas áreas sem aplicação de vinhaça, com ou sem uso de irrigação.

Os benefícios da fertilização orgânica na estrutura do solo também foi verificado por Celik et al. (2011) em áreas que foram fertilizadas por compostos orgânicos, esterco e fertilizantes minerais por um período de 13 anos, sob condições de clima semiárido em um solo argiloso. Avaliando o efeito da fertilização orgânica e mineral na estrutura do solo, os autores verificaram menores valores de resistência a penetração e densidade do solo nas áreas que utilizavam fertilizantes orgânicos. De acordo com Hati et al. (2007) a associação de fertilizantes minerais e esterco, em solo argiloso com propriedades vérticas cultivado intensamente, promoveu aumento na estabilidade de agregados e porosidade total quando comparado com áreas que utilizavam apenas fertilizantes minerais.

Michelon et al. (2009) sugerem que a intensificação dos cultivos em áreas irrigadas pode resultar em aumento da compactação. Para isso avaliaram a compactação num total de 480 áreas sob pivô central nos estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Através dos indicadores de densidade e macroporosidade, verificaram indícios de compactação nas camadas superficiais em 14,2%, 9,5% e 34% das áreas amostradas nos respectivos estados, com ocorrências de valores de densidade do solo superiores ao limite crítico em várias áreas.

Avaliando a compactação em áreas de pastagens, Lima et al. (2004) encontraram em um Argissolo Vermelho cultivado com capim Tanzânia (*Panicum maximum*), maiores valores de pressão de preconsolidação nas áreas irrigadas do que nas não irrigadas após quatro ciclos de pastejo intensivo. Em um estudo no mesmo local, Silva et al. (2003) demonstram que o aumento da intensidade de pastejo resultou em aumento do grau de compactação em pastagens irrigadas. Esses dados demonstram a necessidade de maior controle do tráfego de máquinas e pisoteio animal em áreas irrigadas.

No Brasil, estudos de compressibilidade para a região Nordeste são poucos (PACHECO, CANTALICE 2011; VASCONCELOS et al., 2010, pois a maioria das pesquisas na área tem focado em solos das regiões sul e sudeste (IMHOFF et al., 2004; FREDDI et al., 2008; MENTGES et al., 2010; SILVA et al., 2000; SILVA et al., 2002).

Diante do exposto, o estudo das condições físicas solos e a determinação da capacidade de suporte de cargas nas áreas irrigadas das regiões semiáridas do Nordeste brasileiro são de grande importância prática, pois auxiliará no conhecimento do estado estrutural, assim como na determinação de práticas adequadas de uso e manejo do solo. As hipóteses deste trabalho são: (i) O comportamento compressivo do solo pode ser utilizado como um indicador de qualidade do manejo adotado. (ii) Os sistemas de uso que acumulam mais matéria orgânica no solo apresentam menor grau de compactação.

Os objetivos do trabalho foram:

- Determinar a pressão de preconsolidação, a curva de compressão do solo, o intervalo hídrico ótimo e o grau de compactação nos solos sob diferentes sistemas de uso.
- Avaliar a relação entre as propriedades físicas e químicas e a compressibilidade de solos sob diferentes usos no semiárido cearense.

REFERÊNCIAS

- ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. **Soil Biol. Bioch.**, v. 41, , p. 1-12,2009.
- BARZEGAR, A. R.; ASSODAR, M. A. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil Till. Res.**, v. 57, n. 3, p. 167-172, 2000.
- CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G.; ANDERSON, D.W.; DORAN, J.W.; JANZEN, H.H. & PIERCE, F.J. Concepts of soil quality and their significance, In: GREGORICH, E.G. and CARTER, M.R. **Dev. Soil Sci.**, cap.1, v. 25, p. 1-19, 1997.
- CELIK, I.; GUNAL, H.; BUDAK, M.; AKPINAR, C. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 236-243, 2010.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil Till. Res.**, v. 11, n.3-4, p. 199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, n.2, p.175-182, 1996.
- DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil Till. Res.**, v. 54, n.1-2, p.121-126, 2000.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Till. Res.**, v.16, p.105-120, 1990.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Till. Res.**, 53:71-85, 2000.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, v.82, n. 2, p.121-145, 2005
- HATI, K. M., SWARUP, A.; DWIVEDI, A.K.; MISRA K.K, BANDYOPADHYAY K.K. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. **Agric. Ecosys. Environ.**, v. 119, p. 127-134, 2007.
- HERENCIA, J.F. GARCIA-GALAVIS, P.A; MAQUEDA, C. Long-term effect of organic and mineral fertilization on soil physical properties under greenhouse and outdoor management practices. **Pedosphere**, v. 21, p. 443-453, 2011.
- HUANG, P.M., WANG, M.K. & CHIU, C.Y. Soil mineral-organic matter-microbe interactions: Impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMPACTS OF SOIL BIODIVERSITY ON BIOGEOCHEMICAL PROCESS IN ECOSYSTEMS**, TAIPEI, TAIWAN: 2004. *Pedobiologia*, v. 49, n. 6, p. 609-635, 2005.

- KRZIC, M.; BULMER, C.E.; TESTE, F.; DAMPIER, L.; RAHMAN, S. Soil properties influencing compactability of forest soils in British Columbia. **Can. J. Soil Sci.**, v.84, p. 219–226, 2004.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S; LEAO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p. 945-951, 2004.
- MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesq. agropec. Bras.**, v. 45, n. 3, p.315-321, 2010.
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHE, R. B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v.13, p.39-45, 2009.
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. DE F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v. 15, n. 5, p. 435-442, 2011.
- PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, p.403-415, 2011.
- PENGTHAMKEERATI, P.; MOTAVALLI, P.P.; KREMER, R.J. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil. *Appl. Soil Ecol.*, v. 48, p.71-80, 2011.
- QUIROGA, A.R., BUSCHIAZZO, D.E., PEINEMANN, N. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. **Soil Till. Res.**, v.52, p. 21-28, 1999.
- SILVA A. P., IMHOFF S., CORSI M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil Till. Res.**, v. 70, n. 1, p. 83-90, 2003.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. ; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p.1775-1781, 1994.
- 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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, n.2, p.239-249, 2000.
- SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK C., Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment, **Soil Till. Res.**, v. 35, n. 1-2, p.5-22, 1995.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: www.soils.org/publications/soils-glossary. Acesso em: 6 de setembro de 2012.

SUZUKI, L.E.A. S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LI **Soil Till. Res.**, v. 57, n. 3, p. 167-172, 2000. DI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p.573-581, 1998.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.309-316, 2010.

1. COMPRESSIBILIDADE E GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS IRRIGADOS NO SEMIÁRIDO CEARENSE

Autora: Rafaela Watanabe

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

RESUMO

O conhecimento do comportamento compressivo do solo e a determinação da capacidade de suporte de cargas podem contribuir na manutenção da qualidade dos solos nos cultivos irrigados. Considerando a importância agrícola, social e econômica do Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, este trabalho teve como objetivos: (i) avaliar o grau de compactação em áreas irrigadas com diferentes sistemas de uso e cultivo; (ii) avaliar o efeito do uso do solo na pressão de preconsolidação e no índice de compressão; e (iii) desenvolver funções de pedotransferência para estimar a capacidade de suporte de cargas para os solos da Chapada do Apodi. Avaliou-se quatro áreas com cultivos irrigados de banana (B2 e B15), pastagem (P), sucessão milho e feijão (MF), além de quatro vegetações de referência (VNB2, VNB15, VNP e VNMF). As amostras foram coletadas em todas as áreas nas profundidades: 0,0-0,1 m e 0,2-0,3m. Nos solos B2 e B15 coletaram-se também nas posições linha e entrelinha de cultivo. As amostras foram submetidas aos ensaios Proctor e de compressão uniaxial. Os parâmetros físicos avaliados foram o grau de compactação, a densidade máxima, a umidade crítica, a pressão de preconsolidação e o índice de compressão do solo e os parâmetros químicos foram a matéria orgânica leve e os carbonos orgânico total do solo e da matéria orgânica leve. De modo geral, os solos com cultivos irrigados apresentaram maior grau de compactação e reduziram a susceptibilidade a compactação dos solos quando comparados com as vegetações naturais.. Os solos da Chapada do Apodi apresentaram alta capacidade de cargas e alta susceptibilidade a compactação. Os coeficientes de determinação (R^2) das funções de pedotransferência desenvolvidas para estimar a capacidade de suporte de cargas foram de 0,59 e 0,75, o que possibilita a utilização das funções para os solos avaliados.

Palavras chaves: agricultura irrigada, funções de pedotransferência, capacidade de suporte de cargas, pisoteio animal.

1. COMPRESSIBILITY AND DEGREE OF COMPACTNESS OF IRRIGATED SOILS IN THE SEMIARID REGION OF CEARÁ STATE

ABSTRACT

The knowledge of the compressive behavior of soil and determination of load bearing capacity may contribute in maintaining soil quality in irrigated crops. Considering the importance of agriculture, social and economic to irrigated district Jaguaribe/Apodi, This study aimed to: (i) assess the degree of compactness in irrigated areas with different uses and cultivation, (ii) evaluate the effect of land use on the preconsolidation pressure and compression index, and (iii) develop pedotransfer functions for estimating the load bearing capacity of the soil to the Chapada do Apodi. Four areas were evaluated with irrigated crops of banana (B2 and B15), pasture (P), succession corn and beans (MF), and four vegetations reference (VN B2, B15 VN, VN and VN P MF). The samples were collected in all areas at the depths 0,0-0,1 m and 0,2-0,3 m. In soils B2 and B15, were also collected in row and interrow positions cultivation. The samples were subjected to tests of Proctor and uniaxial compression. The physical parameters evaluated were the degree of compactness, maximum bulk density, the critical water content, the preconsolidation pressure and compression index of soil and chemical parameters were total organic carbon of the soil, light organic matter and light organic matter carbon. In general, soils irrigated crops had a higher degree of compactness and had the susceptibility to soil compaction reduced when compared with natural vegetation. In MF cultivation, the intensive use of land and inadequate management promoted the degradation of soil structure. Soils of the Apodi Plateau showed high load capacity and high susceptibility to compaction. The coefficient of determination (R^2) of pedotransfer functions developed to estimate the load bearing capacity were 0.59 and 0.75, which enables the use of functions for soils evaluated.

Keywords: irrigated agriculture, pedotransfer functions, load bearing capacity, animal trampling.

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a região nordeste é caracterizada por baixas precipitações, elevada evapotranspiração e baixa disponibilidade de águas superficiais (PAZ et al., 2000). Dessa forma, a irrigação é essencial para o desenvolvimento de uma agricultura mais competitiva, pois possibilita um maior número de cultivos ao longo do ano, além de garantir as necessidades hídricas das plantas no ciclo produtivo. A área de cultivo irrigado no nordeste brasileiro é de aproximadamente 732.840 hectares, destes 76.140 hectares estão localizados no estado do Ceará (CRISTOFIDIS, 2008).

De acordo com o Banco Mundial (2004), a implantação dos sistemas de irrigação nos municípios do semiárido brasileiro promoveu a redução do êxodo rural, a expansão do PIB regional e a melhoria da qualidade de vida da população local. Diante da importância social e econômica dos sistemas agrícolas irrigados, a manutenção da qualidade do solo é um dos fatores essenciais para garantir a sustentabilidade dos sistemas em longo prazo.

Pesquisas desenvolvidas no perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi evidenciaram a redução da qualidade química e física nos solos onde foram implantados os cultivos irrigados. Segundo Dantas et al. (2012), a degradação das propriedades físicas teve maior contribuição na redução da qualidade dos solos localizados no perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi do que os impactos nas propriedades químicas do solo. Em solos do mesmo perímetro irrigado, Pereira et al. (2012) verificaram que a intensificação do uso do solo e o manejo inapropriado resultaram na redução da água disponível e no aumento da compactação do solo.

Nos solos agrícolas, uma das principais causas da redução da qualidade física é a compactação (HAMZA; ANDERSON, 2005), cujo aumento geralmente está associado ao tráfego de máquinas e pisoteio animal em condições de alta umidade no solo (HAMZA; ANDERSON, 2005; MICHELON et al., 2009). A compactação compromete a capacidade do solo em desempenhar importantes funções, pois reduz o armazenamento e disponibilidade de água e nutrientes, diminui as trocas gasosas e reduz a eficiência da fertilização do solo, aumenta as taxas de lixiviação e de erosão, além de reduzir a biodiversidade do solo (SAFFI-HDADI et al., 2009; SOANE; VAN OUWERKERK, 1995).

Uma medida para prevenir o aumento da compactação nos solos agrícolas é evitar a aplicação de cargas superiores à capacidade de suporte de carga do solo (ALAKUKKU et al., 2003). A pressão de preconsolidação expressa o valor da máxima carga que o solo é capaz de suportar em determinado conteúdo de água e também é utilizada como indicativo da máxima pressão exercida sobre o solo no passado (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Quando o solo

sofre uma pressão menor que a pressão de preconsolidação, este suportará essa carga sem que ocorram mudanças que levem ao aumento da compactação, mas para a situação inversa, onde a pressão exercida é superior à pressão de preconsolidação, ocorrerá a compactação adicional do solo e a degradação da estrutura do solo (ARVIDSSON; KELLER, 2004).

Considerando que o aumento do conteúdo de água reduz a resistência do solo diante da aplicação de forças externas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; OLIVEIRA et al., 2003; SILVA et al., 2002b; SILVA; CABEDA, 2006; VASCONCELOS et al., 2012), nos solos irrigados o aumento da compactação pode ser favorecido pela maior frequência com que os solos encontram-se sob condições de elevada umidade.

Nesse sentido, a avaliação do grau de compactação e a determinação da pressão de preconsolidação dos solos do perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi poderão auxiliar na elaboração de estratégias de manejo que visem a manutenção da qualidade do solo e da produtividade agrícola. Por sua vez, a pressão de preconsolidação ainda é um parâmetro pouco utilizado devido a sua difícil determinação e a dependência de um equipamento específico de custo elevado.

Funções de pedotransferências (FP) que estimam parâmetros difíceis de serem obtidos a partir de outros mais fáceis podem ser utilizadas na estimativa da pressão de preconsolidação. Diversas pesquisas desenvolveram FPs para solos das regiões sudeste (IMHOFF et al., 2004; PIRES et al., 2012; SILVA et al., 2006) e sul (SUZUKI et al., 2008) do Brasil, havendo ainda poucos estudos para os solos da região nordeste (VASCONCELOS et al., 2012).

A hipótese desse trabalho é que a mudança de uso do solo de mata para cultivos agrícolas irrigados altera a capacidade de suporte de cargas e reduz a qualidade do solo. Deste modo, os objetivos deste trabalho são: (i) avaliar o grau de compactação em áreas irrigadas com diferentes sistemas de uso e cultivo; (ii) avaliar o efeito do uso do solo na pressão de preconsolidação e no índice de compressão em diferentes profundidades; e (iii) desenvolver funções de pedotransferência para estimar a capacidade de suporte de cargas para os solos da Chapada do Apodi.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, localizado na Chapada do Apodi no município de Limoeiro do Norte-CE. A topografia é plana, com altitude variando de 100 a 130m. O clima da região é classificado como semiárido quente do tipo BSw'h,

segundo a classificação de Köppen. As médias anuais da precipitação pluvial e temperatura são 772 mm ano^{-1} e $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Foram avaliadas quatro áreas de cultivo com diferentes sistemas de uso e manejo (Figura 1) e, para cada uma dessas áreas, foi selecionada como referencia, uma área sob vegetação natural. A descrição das áreas, o tipo de solo e o histórico de manejo são apresentados na tabela 1.

Figura 1: Localização das áreas com sistemas de cultivos irrigados com banana (B2 e B15), sucessão milho e feijão (MF) e pastagem (P) no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro do Norte-CE



Tabela 1: Uso, classificação do solo e histórico das áreas de estudos do perímetro irrigado Jaguaribe/Apodí, Limoeiro do Norte-CE.

Uso do solo e coordenadas geográficas	Classificação do solo	Descrição e histórico da área
Banana ⁽¹⁾ 5°09'15"S e 37°59'55"W	(B15) Cambissolo Háplico Eutrófico típico	Ta Antes da implantação do cultivo foi cultivada com hortaliças por um período de cinco anos. Em 1998 foi implantado o cultivo de banana (<i>Musa sp.</i>), cultivar prata anã, com irrigação por microaspersão. Na implantação da cultura da banana utilizou-se esterco caprino (20 L planta ⁻¹) e constantemente é realizada fertirrigação (600 L ha ⁻¹ semana ⁻¹) com um composto líquido preparado com os resíduos da colheita. Os restos culturais são mantidos na superfície do solo. As pragas, doenças e plantas invasoras são controladas com aplicação de defensivos químicos. A adubação mineral é feita mensalmente com uréia e sulfato de potássio e magnésio. O tráfego de máquinas e implementos na área envolvem: trator e carreta agrícola, na colheita, e subsolador e grade, por ocasião de renovação da área. Na ocasião da coleta, o solo havia sendo utilizado com cultivo de banana há 15 anos.
Banana (B2) 5°09'29"S 38°01'52"W	Cambissolo Háplico Eutrófico típico	Tb Entre os anos de 1990 e 1999 foi cultivada com milho em sucessão com feijão utilizando irrigação por pivô central. No período de 2000 até 2007 foi cultivada com goiaba com irrigação por microaspersão. Em 2008, o cultivo de goiaba foi removido para implantação do cultivo de bananeiras. O preparo do solo para implantação da cultura envolveu operações de subsolagem e gradagem. O controle das pragas, doenças e plantas invasoras é realizado com defensivos químicos. A adubação mineral é feita eventualmente conforme a necessidade. O trânsito de máquinas na área é associado principalmente a operação de colheita e envolve trator e carreta agrícola. Na ocasião da coleta, a cultura havia sido implantada há dois anos.
Pastagem (P) 5°12'54"S 38°01'52"W	Cambissolo Háplico Eutrófico típico	Ta Após a retirada da vegetação natural, foi cultivada entre os anos de 1990 e 2001 com a sucessão milho-feijão sob irrigação por pivô central. Em 2001, foi implantado o capim Tifton (<i>Cynodon niemfluesis</i>) e a área passou a ser utilizada como pastagem para alimentação de 300 animais. Toda a área é dividida em 16 piquetes de 3 hectares. Os animais permanecem, em média, por 36 horas em cada piquete, retornando no mesmo piquete após um período aproximado de 24 dias. A adubação mineral é realizada com uréia (100 kg ha ⁻¹) aplicada a cada ciclo de pastejo e NPK (10-50-00) 50 kg ha ⁻¹ a cada quatro aplicações de uréia. A adubação orgânica é realizada com esterco de animais que permanecem na área. Na época das chuvas o solo sofre inundação, podendo ocorrer a retirada dos animais. No final do período chuvoso faz-se a produção de feno.
Milho/feijão ⁽¹⁾ (MF) 5°10'9"S 37°58'58"W	Latossolo Vermelho Eutrófico cambissólico	Desde 1990 é cultivada com milho (<i>Zea mays</i> L.) em sucessão com feijão (<i>Vigna unguiculata</i>) utilizando irrigação por pivô central. Anualmente são colhidas três safras de milho (30.000 espigas ha ⁻¹) e uma de feijão (1.600 kg ha ⁻¹). Após a colheita das espigas a parte aérea do milho é retirada e vendida para fabricação de silagem. O preparo do solo envolve operações de subsolagem, aração e gradagem. Na adubação mineral utiliza-se 250 kg ha ⁻¹ de NPK (10-28-20), sendo também realizada a fertirrigação com micronutrientes. O controle das pragas, doenças e plantas invasoras é realizado com defensivos químicos.
Vegetação natural próximo ao cultivo de banana B15 (VN B15)	Cambissolo Háplico Eutrófico Típico	Ta Área com vegetação natural preservada do tipo Caatinga, formada por espécies arbustivas, de porte baixo e estrato herbáceo estacional entre espécies perenes, espinhosas e caducifólias.
Vegetação natural próximo ao cultivo de banana B2 (VN B2)	Cambissolo Háplico Eutrófico típico	Tb Idem VN B15.
Vegetação natural próximo à pastagem (VN P)	Cambissolo Háplico Eutrófico típico	Ta Idem VN B15. A área é utilizada como abrigo do sol nos horários de maior temperatura durante o dia.
Vegetação natural próximo ao cultivo milho/feijão (VN MF)	Argissolo Vermelho-amarelo Eutrófico típico	Idem VN B15.

⁽¹⁾Fonte: Dantas et al. (2012) e Pereira et al. (2012).

A amostragem do solo foi realizada nas profundidades de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m. Para os solos com cultivos de banana (B2 e B15) as amostras foram coletadas nas linhas e entrelinhas da cultura, enquanto que nas demais áreas não foi adotado esse critério devido a impossibilidade de estabelecer essas posições.

Em cada área de estudo, foram coletadas quatro amostras indeformadas (anéis com 2,5 cm de altura e 7,4 cm de diâmetro) obtidas com um amostrador do tipo Uhland, e quatro amostras deformadas simples. Adicionalmente foi coletada uma amostra composta representativa das quatro pontos amostrados para a realização do ensaio Proctor. As amostras deformadas simples foram utilizadas para determinação da textura, densidade de partículas, carbono orgânico total e matéria orgânica leve. As amostras indeformadas foram utilizadas na determinação da curva de compressão do solo.

1.2.1 Ensaio Proctor

O ensaio Proctor Normal foi realizado de acordo com a Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986). Para cada área amostrada no campo foram realizadas três repetições, considerando cinco teores de água, obtendo-se a curva de compactação, sendo o terceiro ponto da curva próximo à umidade crítica. As amostras indeformadas de solo foram compactadas em um anel metálico com 10 cm de diâmetro e altura de 12,8 cm, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 0,31 m. Após aplicação dos golpes foi retirada uma amostra do corpo de prova para determinação da umidade do solo (U_g). Assim, para cada amostra, obtiveram-se cinco pares de valores de umidade (U_g) e densidade do solo (D_s), com os quais se ajustou o seguinte modelo matemático: $D_s = xU_g^2 + yU + z$, em que: D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); U_g é o teor de água no solo (kg kg^{-1}); x , y e z são coeficientes obtidos no ajuste do modelo. Os valores da umidade crítica ($U_{crít}$) e de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) foram obtidos pela primeira derivada do modelo matemático expresso pelas equações $U_{crít} = -y/2x$ e $D_{s_{máx}} = (-y^2 - 4xz)/4x$. A densidade máxima e a umidade crítica foram representadas pela média das três repetições.

O grau de compactação (GC) foi determinado a partir dos dados de densidade do solo (D_s) e da densidade máxima ($D_{s_{máx}}$), de acordo com a equação proposta por Håkansson (1990): $GC = D_s/D_{s_{máx}} \times 100$ em que GC é o grau de compactação em %, D_s é densidade do solo em Mg m^{-3} e $D_{s_{máx}}$ é a densidade máxima do solo em Mg m^{-3} .

1.2.2 Compressão solo

As amostras indeformadas foram saturadas com água por ascensão capilar durante 24 horas e equilibradas em potencial mátrico de -0,01 MPa utilizando câmaras de Richards (KLUTE, 1986), tendo sido previamente pesadas para determinação do conteúdo de água.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado utilizando equipamento consolidômetro pneumático, desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (FIGUEIREDO et al., 2011). O ensaio consistiu da aplicação sucessiva e contínua de carregamentos crescentes de 0; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 600; 800; 1000 e 1200 kPa, por um período de cinco minutos, o suficiente para atingir 99% da deformação máxima do solo (SILVA et al., 2000). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24h, para determinação da densidade do solo (BLAKE; HARTAGE, 1986) e do teor de água da amostra.

A partir dos valores de deslocamento do solo no ensaio de compressão uniaxial foram calculados os índices de vazios para cada pressão aplicada, obtendo-se para cada amostra, 11 pares de valores de índice de vazios e pressão aplicada. Estes dados foram utilizados na construção da curva de compressão pela equação de Gompertz (1925), como sugerido por Gregory et al. (2006), ajustada pelo método dos mínimos quadrados: $e = j + k \exp[-\exp(l((\log_{10} \sigma') - m))]$, em que e é o índice de vazios, σ' é a pressão aplicada (kPa) e j , k , l e m são coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados. Os coeficientes obtidos foram utilizados no cálculo do índice de compressão do solo (C_c) pelo modelo de Gregory et al. (2006) que estima a inclinação da reta de compressão virgem sendo o módulo da inclinação no ponto de inflexão (m) calculado pela equação $C_c = lk/\exp(1)$, em que: C_c é o índice de compressão, l e k são coeficientes obtidos no ajuste do modelo de Gompertz aos dados e $\exp(1)$ é a função exponencial do número 1.

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi determinada a partir da curva ajustada pela equação de Gompertz (1925) utilizando o algoritmo proposto por Imhoff et. al (2004) no software Mathcad. Calcula-se, inicialmente, a derivada segunda da curva de compressão que corresponde ao ponto máximo da curvatura da curva de compressão e, em seguida, o valor mínimo da segunda derivada cujo valor corresponde ao logaritmo da pressão de preconsolidação.

1.2.3 Granulometria e densidade de partículas

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta para a determinação dos teores argila (EMBRAPA, 1997), utilizando dispersão ultrassônica. A energia adotada para a sonificação foi de 204 J mL^{-1} . As frações de areia grossa e fina foram determinadas por peneiramento e o silte por diferença. A composição granulométrica dos solos é apresentada na Tabela 2.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do deslocamento do gás (FLINT; FLINT, 2002) com a utilização do picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®, utilizando amostras de solo passadas em peneira de 2,0 mm e secas em estufa a 105° C .

1.2.4 Análises de matéria orgânica leve e carbono orgânico

A matéria orgânica leve (MOL) foi avaliada apenas para a camada de 0,0-0,1 m. Inicialmente foram peneirados 500 g de solo seco ao ar em peneiras com malha de diâmetro 8 mm, 4 mm, 2 mm e 0,25 mm, sendo o material de solo retido em cada peneira, separado, pesado e armazenado. Posteriormente, utilizou-se 13 g de cada uma das frações de solo retidas nas peneiras de 4 mm, 2 mm e 0,25 mm, agitados em solução de NaI (densidade de $1,8 \text{ kg L}^{-1}$) e, em seguida, centrifugadas a 3.200 rpm por 15 minutos, seguido de separação da MOL por flotação (SOHI et al., 2001). O material suspenso foi separado em peneira de 0,025 mm, lavado com água destilada para remoção do NaI e seco em estufa a 65° C , sendo, posteriormente, pesado.

Os teores de carbono da matéria orgânica leve (C_{mol}) de cada fração foram determinados por combustão via seca em analisador elementar e os de carbono orgânico total (COT) do solo por oxidação da matéria orgânica via úmida na presença de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio sulfúrico e aquecimento externo (YEOMANS; BRENMER, 1988).

Os estoques de matéria orgânica leve (E_{mol}) e de carbono da matéria orgânica leve ($E_{C_{\text{mol}}}$) em cada uma das frações de solo separadas foram calculados pela expressão: E_{MOL} ou $E_{C_{\text{mol}}} = t \times D_s \times h$ em que E_{MOL} ou $E_{C_{\text{mol}}}$ é o estoque em Mg ha^{-1} ; t é o teor de MOL ou C_{mol} em kg Mg^{-1} ; D_s é a densidade do solo em Mg m^{-3} ; h é a espessura da camada solo (m).

1.2.5 Análise estatística

O conjunto de variáveis obtidas para cada área amostrada foram comparadas com base na variância e na média, pelo teste F e *t*, considerando a comparação entre as áreas cultivadas e as sob vegetação natural.

Para verificar a homogeneidade das variâncias entre as populações foi realizado o teste *F* unilateral pelo quociente entre a maior e a menor variância: $F = S_{A^2} / S_{B^2}$, em que S_{A^2} : é a variância de maior valor e S_{B^2} : é a variância de menor valor.

A avaliação de diferenças nas variáveis entre os diferentes usos, quanto à média, foi feito com base no teste *t* bilateral. Para as populações com variância homogênea, o teste *t* foi aplicado conforme as equações: $t = (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) / \sqrt{S_c^2(1/n_1 + 1/n_2)}$ e $S_c^2 = ((n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)$, em que: $n_1 + n_2 - 2$ são os graus de liberdade; $\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$: são as médias das variáveis para as diferentes populações; s_1^2 e s_2^2 : são as variâncias para as duas populações utilizadas em cada comparação; S_c^2 : é a variância comum entre as populações; n_1 e n_2 : são os números de amostras de cada população (1 e 2) em comparação.

Nos casos em que a variância foi heterogênea, o cálculo do teste *t* foi feito utilizando a equação anterior, mas para o cálculo do número de graus de liberdade (n^*) utilizou-se a equação: $n^* = ((S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)) / ((S_1^2/n_1)/(n_1 - 1) + (S_2^2/n_2)/(n_2 - 1))$

O teste *t* foi realizado aos níveis de 5, 10, 15 e 20 % de probabilidade, considerando $p < 0,05$ como diferença estatística e para as demais probabilidades ($p > 0,05$ a $p < 0,20$) foram consideradas como tendência. O teste *F* foi realizado ao nível de 5% de probabilidade.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.3.1 Influência da textura no comportamento compressivo

O comportamento compressivo do solo diante da aplicação de forças externas é governado por diversos fatores, tais como: o conteúdo de água (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; VASCONCELOS et al., 2012), densidade do solo (SILVA et al., 2002a), estrutura do solo (AJAYI et al., 2010) e a textura do solo (IMHOFF et al., 2004; SPOOR et al., 2003).

Diante do reconhecimento da influência da textura no comportamento compressivo do solo, comparou-se a granulometria dos solos sob diferentes usos agrícolas e suas respectivas áreas de referência (VNs) pelo teste *t*, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Observou-se que, de modo geral, os teores de argila, silte e areia total das situações estudadas

foram semelhantes estatisticamente ($p>0,05$), com exceção do solo sob uso MF. Nesta situação, os teores de argila da camada 0,0-0,1 m de MF diferiram estatisticamente ($p<0,05$) de VNMF, o que certamente se deve às diferenças naturais destes solos, uma vez que pertencem a diferentes classes de solo (Tabela 1).

Tabela 2: Médias e significâncias de contrastes de médias e variâncias das propriedades físicas e químicas do solo nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m em áreas sob sistemas de cultivo irrigado e vegetação natural (VN) localizados no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi-CE.

Variável	P ⁽¹⁾	VN P	MF	VN MF	B2L	B2E	VN B2	B15L	B15E	VNB15	P vs VNP ⁽¹⁾	MF vs VNMF	B2L vs VNB2	B2E vs VNB2	B2L vs B2E	B15L vs VNB15	B15E vs VNB15	B15L vs B15E	
	Média										Contrastes								
0,0-0,1 m																			
<i>Argila</i> ⁽²⁾	459	300	493	305	394	403	420	340	321	379	n.s. (n.s.)	*(*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>Silte</i>	112	227	65	70	113	77	87	111	97	105	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>AF</i>	111	114	180	297	239	224	168	250	223	148	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>AG</i>	319	359	262	328	254	295	324	299	358	367	n.s. (n.s.)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	—	*(n.s.)	*(n.s.)	—	
<i>AT</i>	430	473	442	625	493	520	492	549	581	515	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s.(n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>Dp</i>	2.62	2.7	2.68	2.68	2.66	2.67	2.65	2.65	2.68	2.66	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Cc</i> ^l	0,31	0,26	0,25	0,31	0,25	-	0,42	0,30	0,24	0,31	* (*)	* (*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Σp</i>	118	127	83	135	110	-	71	137	131	124	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	
<i>eo</i>	0,74	0,67	0,65	0,69	0,62	0,58	0,95	0,66	0,60	0,70	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Ds</i>	1,52	1,62	1,62	1,59	1,64	1,69	1,36	1,59	1,68	1,57	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>GC</i>	97,17	135,53	93,89	85,22	90,95	96,27	76,84	91,91	97,58	90,47	+(n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)					
<i>Sr</i>	68,18	65,63	79,05	55,99	74,06	57,28	57,33	65,44	85,49	66,20	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	
<i>Uv</i>	0,29	0,26	0,31	0,23	0,28	0,21	0,28	0,26	0,32	0,27	*(n.s.)	* (*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Ug</i>	0,19	0,16	0,19	0,14	0,17	0,12	0,20	0,16	0,19	0,17	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(*)	*(n.s.)	
<i>DS_{máx}</i>	1,56	1,19	1,73	1,87	1,80	1,76	1,77	1,73	1,72	1,73	* (*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>U_{crit}</i>	32,35	37,67	19,23	13,51	16,46	17,15	16,92	18,09	19,25	17,36	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	+(n.s.)	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>COT</i>	81,02	38,13	14,05	21,99	15,75	16,43	19,34	16,72	16,03	20,83	+++ (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	
<i>Argila</i>	459	300	493	305	394	403	420	340	321	379	n.s. (n.s.)	*(*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>Silte</i>	112	227	65	70	113	77	87	111	97	105	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	
<i>AF</i>	111	114	180	297	239	224	168	250	223	148	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	

Continua.

Cont., tabela 2.

Variável	P ⁽¹⁾	VN P	MF	VN MF	B2L	B2E	VN B2	B15L	B15E	VNB15	P vs VNP ⁽¹⁾	MF vs VNMF	B2L vs VNB2	B2E vs VNB2	B2L vs B2E	B15L vs VNB15	B15E vs VNB15	B15L vs B15E	
	Média										Contrastes								
0,2-0,3 m																			
<i>Argila</i> ⁽²⁾	465	245	514	505	460	494	586	538	488	387	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	—	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	
<i>Silte</i>	90	163	61	87	85	83	72	65	66	89	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	—	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	
<i>AF</i>	109	115	164	187	211	199	120	196	181	150	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	
<i>AG</i>	335	478	260	222	244	225	222	200	265	373	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	—	
<i>AT</i>	445	592	424	408	455	424	343	396	446	524	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	—	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	—	
<i>Dp</i>	2.65	2.7	2.7	2.69	2.68	2.67	2.7	2.68	2.69	2.7	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Cc</i>	0,29	0,33	0,35	0,33	0,30	0,32	0,31	0,37	0,30	0,36	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>σp</i>	154	219	128	116	126	72	122	64	106	142	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	
<i>eo</i>	0,72	0,81	0,51	0,84	0,75	0,78	0,85	0,90	0,79	0,83	*(n.s.)	*(*)	*(*)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Ds</i>	1,54	1,49	1,79	1,46	1,53	1,50	1,46	1,41	1,50	1,47	*(n.s.)	*(*)	*(*)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>GC</i>	93,19	84,72	108,90	84,45	85,59	87,06	81,33	81,75	84,41	81,92	n.s. (n.s.)	++ (*)	n.s. (*)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	++ (n.s.)	
<i>Sr</i>	73,50	69,38	92,70	66,23	72,45	69,72	73,10	57,02	65,89	58,26	n.s. (n.s.)	+ (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Uv</i>	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,30	0,33	0,27	0,29	0,26	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>Ug</i>	0,20	0,21	0,17	0,21	0,20	0,20	0,23	0,19	0,19	0,18	*(n.s.)	*(n.s.)	*(*)	*(*)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>DS_{máx}</i>	1,65	1,76	1,64	1,73	1,79	1,72	1,80	1,72	1,78	1,80	*(n.s.)	*(*)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	*(n.s.)	
<i>U_{crít}</i>	21,28	18,25	17,98	18,01	18,08	19,01	19,36	17,87	17,68	17,28	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	*(n.s.)	n.s. (n.s.)	++ (*)	*(*)	*(n.s.)	+++ (n.s.)	
<i>COT</i>	22,11	21,89	10,66	11,40	10,05	7,82	13,23	6,52	7,03	10,07	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	+++ (n.s.)	+++ (n.s.)	n.s. (n.s.)	

⁽¹⁾P: Pastagem irrigada; VNP: vegetação natural próximo a P; MF: Sucessão de milho e feijão irrigado; VNMF: vegetação natural próximo a MF; B2L: linha de plantio de banana irrigada com dois anos de cultivo; B2E: entrelinhas das plantas de banana irrigada com dois anos de cultivo; VNB2: vegetação natural próximo a B2; B15L: linha de plantio de banana irrigada com 15 anos de cultivo; B15E: entrelinhas das plantas de banana irrigada com 15 anos de cultivo; VNB15: vegetação natural próximo ao B15. ⁽²⁾*Argila*: < 2μm (g kg⁻¹); *Silte*: (2-50 μm) (g kg⁻¹); *AG*: areia grossa (25-2.000 μm) (g kg⁻¹); *AF*: areia fina (25-50 μm) (g kg⁻¹); *AT*: areia total (50-2000 μm) (g kg⁻¹); *Dp*: densidade de partículas (Mg m⁻³); *Cc*: índice de compressão (adimensional); *σp*: pressão de preconsolidação (kPa); *eo*: índice de vazios (adimensional); *Ds*: densidade do solo (Mg m⁻³); *GC*: grau de compactação (%); *Sr*: grau de saturação de água (%); *Uv*: umidade volumétrica (m³ m⁻³); *Ug*: umidade gravimétrica (kg kg⁻¹); *DS_{máx}*: densidade máxima (Mg m⁻³); *U_{crít}*: umidade crítica (%); *COT*: carbono orgânico total (g kg⁻¹).

1.3.2 Grau de Compactação

A utilização do grau de compactação (*GC*) para caracterizar o estado de compactação do solo permite a comparação de diferentes tipos de solos, pois os efeitos da textura e matéria orgânica são eliminados, como utilizado por Silva et al. (1997). Nesse estudo o *GC* foi utilizado para avaliar apenas o impacto dos diferentes usos e manejo agrícolas na estrutura do solo.

Observou-se que os diferentes usos agrícolas avaliados apresentaram *GC* estatisticamente semelhantes às áreas de referência ($p < 0,05$) (Tabela 2), porém com tendência de P reduzir o *GC* na primeira camada ($p < 0,10$) e MF aumentar o *GC* na segunda camada ($p < 0,15$) (Tabela 5).

As melhores condições estruturais do solo em P podem ser associadas aos efeitos das gramíneas perenes na melhoria da estrutura do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997). Em MF, o maior *GC* do solo na camada de 0,2-0,3 m é justificado pelo preparo convencional envolvendo o uso de grade aradora, reconhecido pelos impactos sobre a estrutura do solo e formação de camadas compactadas em subsuperfície, quando comparado com sistemas em que o revolvimento do solo é mínimo (BERTOL et al., 2004; RALISCH et al., 2008).

Os valores médios de grau de compactação (*GC*) dos solos sob uso agrícola foram numericamente maiores na camada de 0,0-0,2 m e menores na camada 0,2-0,3 m, com exceção de MF, o qual apresentou maior *GC* na camada subsuperficial (Tabela 2). O trânsito de máquinas nas entrelinhas provavelmente é a causa principal dos maiores valores de *GC* nas entrelinhas dos solos cultivados com linhas com bananeiras (B2 e B15). Em solos cultivados com pomares, o tráfego de máquinas localizado nas entrelinhas de plantio resultam no aumento da compactação, o que foi evidenciado pelo aumento da resistência a penetração, da pressão de preconsolidação e da redução da macroporosidade (BECERRA et al., 2011; LIMA et al., 2004a; VAN DIJCK; VAN ASCH, 2002).

Os valores de *GC* observados na camada de 0,0-0,1 m encontram-se acima da faixa ótima de desenvolvimento para as plantas observado por outros autores. Carter (1990) descreveu valores de *GC* na faixa de 80 a 87% para a obtenção do máximo rendimento de cereais, enquanto Lipiec et al. (1991) relatam valores de *GC* entre 88 e 91% para a obtenção do máximo rendimento da cultura da cevada. Já no Brasil, a máxima produção de soja foi obtida na faixa de *GC* de 80 a 86% (SUZUKI et al., 2007; BEUTLER et al., 2005).

De acordo com Dias Junior e Estanislau (1999), um dos grandes problemas com o aumento do grau de compactação é a redução da água disponível. Outros trabalhos

demonstraram, através da avaliação do intervalo hídrico ótimo (IHO), que valores de GC superiores a 90% são limitantes ao desenvolvimento das plantas (BETIOLI JUNIOR et al., 2012; SILVA et al., 1994). Considerando esses valores restritivos como referência, constata-se que os solos P e MF apresentaram condições limitantes em ambas as camadas (0,0-0,1 m e 0,2-0,3m), enquanto que os solos B2 e B15 apenas na camada superficial. O GC das linhas de plantio em B2 e B15 apresentaram menores valores do que as entrelinhas e os demais usos (P e MF). A redução da água disponível nos solos com maior GC é confirmado pelos resultados de Pereira et al. (2012) em estudo conduzido nas mesmas áreas (P, MF, B15 e VNB15) do presente. Segundo estes autores os solos P e MF apresentaram maiores reduções da água disponível quando comparado com o uso B15.

1.3.3 Densidade máxima e umidade crítica

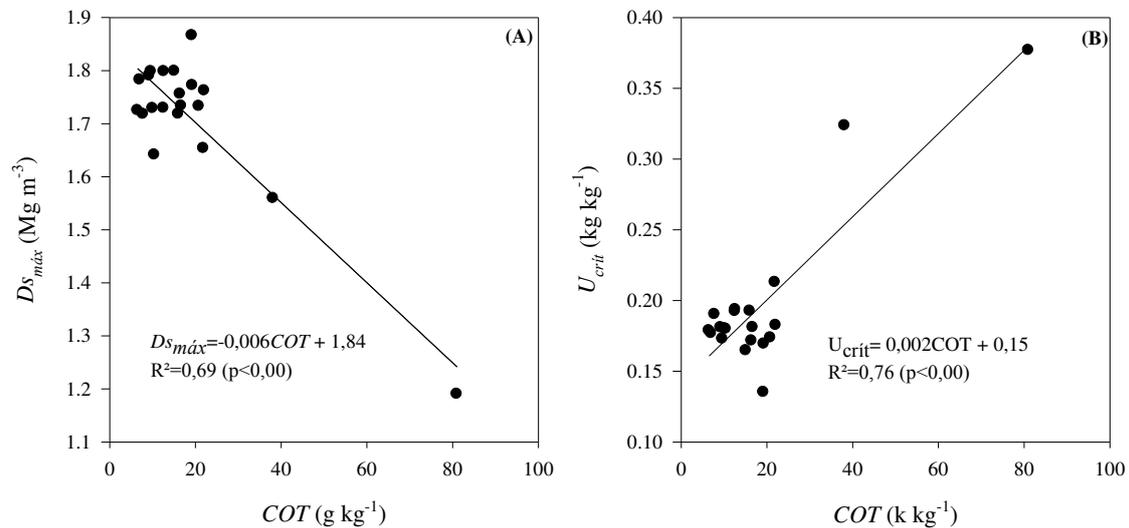
A curva de compactação obtida pelo ensaio Proctor permite a determinação da densidade máxima do solo ($D_{smáx}$) e da umidade crítica ($U_{crít}$), parâmetros que representam, respectivamente, a compactação máxima e a umidade do solo que o torna mais susceptível à compactação (BLANCO-CANQUI et al., 2009; BRAIDA et al., 2006).

A utilização dos solos alterou a densidade máxima ($D_{smáx}$) das camadas superficiais e subsuperficiais dos solos sob cultivo quando comparados com as situações de referência ($p < 0,05$) (Tabela 2). A única exceção ocorreu com a camada de 0,0-0,1 m de B15_L em que a $D_{smáx}$ foi estatisticamente semelhante a VNB15. De modo geral, a utilização do solo com cultivos agrícolas reduziram a $D_{smáx}$, com exceção do uso P que apresentou maior $D_{smáx}$ do que VNP (Tabela 2).

A redução da $D_{smáx}$ dos solos sob uso agrícola indica o aumento da resistência do solo a compactação, pois, para uma mesma força aplicada, os solos tendem a atingir menores valores de densidade do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2009).

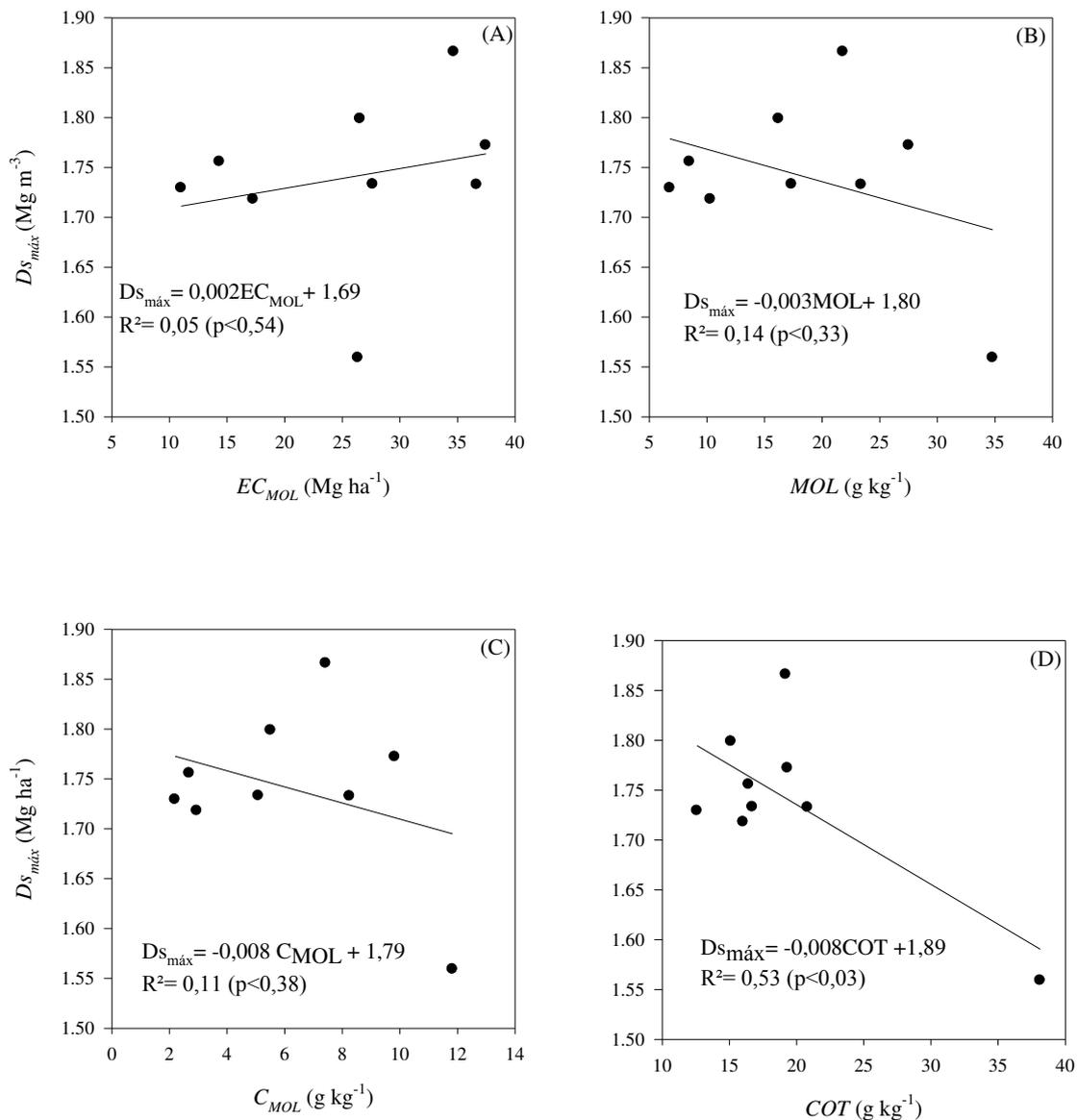
Observou-se que, para os solos avaliados, o aumento do conteúdo de carbono orgânico total (COT) levou a redução da densidade máxima ($D_{smáx}$) (Figura 2A) e aumentou a umidade crítica ($U_{crít}$) (Figura 2B). Resultados semelhantes foram verificados por outros autores (BLANCO-CANQUI et al., 2009; DIAS-ZORITA; GROSSO, 2000; VIANA et al., 2011), atribuindo-se estes resultados às características da matéria orgânica, tais como: (i) baixo peso específico da matéria orgânica, reduzindo a densidade do solo; (ii) alta superfície específica e que aumenta a retenção de água no solo; e (iii) efeito amortecedor e sua capacidade em dissipar a energia (SOANE, 1990).

Figura 2: Relações entre carbono orgânico total (COT), densidade máxima ($Ds_{m\acute{a}x}$) (A) e umidade crítica (U_{crit}) (B), para os solos sob diferentes sistemas de cultivo irrigado e vegetação natural no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro-CE



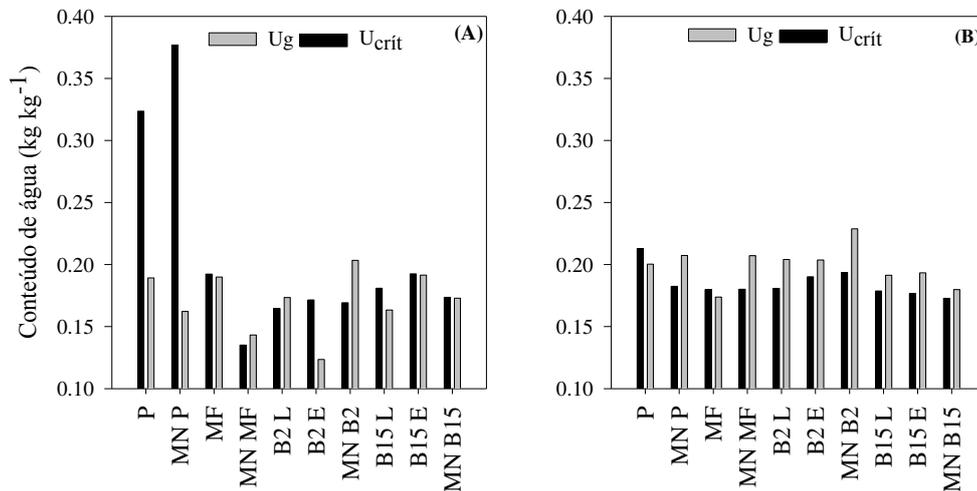
Estudos demonstraram que o grau de humificação (ZHANG et al., 1997) e os teores de matéria orgânica oxidável (ZHAO et al., 2008) contribuem mais que o COT na redução da densidade máxima ($Ds_{m\acute{a}x}$). No presente estudo foram avaliadas as relações entre $Ds_{m\acute{a}x}$ e os estoques de matéria orgânica leve (EC_{mol}) e os teores da matéria orgânica leve (MOL), carbono da matéria orgânica leve (C_{mol}) e carbono orgânico total (COT). Apenas o COT demonstrou maior grau de explicação ($R^2=0,53$), evidenciando a maior contribuição do COT em reduzir a $Ds_{m\acute{a}x}$ (figura 3).

Figura 3: Relações entre a densidade máxima ($Ds_{máx}$) obtida pelo ensaio Proctor e o estoque de carbono da matéria orgânica leve (EC_{MOL}) (A) e os teores de matéria orgânica leve (MOL) (B), carbono da matéria orgânica leve (C_{MOL}) (C) e carbono orgânico total (COT) (D), na profundidade de 0,0-0,1m para solos sob cultivos irrigados e vegetação natural do Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro do Norte-CE



O teor de água na umidade crítica ($U_{crít}$) para os solos avaliados variaram de 0,13 a 0,38 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,1 m e de 0,17 a 0,21 kg kg⁻¹ na camada de 0,2-0,3 m. Observou-se na camada de 0,0-0,1 uma maior proximidade dos valores de $U_{crít}$ e o conteúdo de água na capacidade de campo, expresso pela umidade gravimétrica (Ug) das amostras equilibradas no potencial matricial de -10 kPa. Contudo, para a camada de 0,2-0,3 m a $U_{crít}$ foi em geral menor que a Ug (Figura 4).

Figura 4: Médias de umidade crítica (U_{crit}) e conteúdo de água na capacidade de campo (U_g) nas profundidades de 0,0-0,1 m (A) e 0,2 -0,3 m (B) para solos sob pastagem (P), sucessão milho e feijão (MF) e banana (B2 e B15) irrigados e vegetação natural (VN P, VN MF, VN B2 e VN B15) no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi



Valores de U_{crit} superiores a capacidade de campo aumentam a faixa de umidade em que as operações podem ser realizadas sobre o solo, considerando que as operações sobre o solo devem ser executadas abaixo da U_{crit} (BETIOLI JUNIOR et al., 2012; FIGUEIREDO et al., 2000), ou seja, possibilitam o tráfego de máquinas ou o pisoteio dos animais em condições de maiores umidades e com menor risco de aumento da compactação.

O aumento expressivo do COT do solo em profundidade em P, comparativamente aos demais usos ($p < 0,05$) (Tabela 2), resultou em valores de U_{crit} superiores ao conteúdo de água na capacidade de campo para ambas as camadas, o que não ocorreu para os demais usos agrícolas. Gramíneas perenes favorecem o maior aporte de matéria orgânica do solo quando comparado com cultivos anuais, fato este associado a intensa produção e mortalidade de raízes nas gramíneas e a liberação de exsudatos orgânicos (KODEŠOVA et al., 2011; SILVA; MIELNICZUK, 1997). O manejo adotado também favoreceu o aumento dos teores de COT através das práticas de irrigação e adubação da pastagem (CONANT et al., 2001). Vários autores observaram em pastagens bem manejadas o aumento dos estoques de carbono em relação ao solo sob vegetação natural (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998; MAIA et al., 2009; MOSQUERA et al., 2012).

Os valores de umidade crítica (U_{crit}) foram numericamente diferentes entre as camadas 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m e, para que o aumento da compactação seja evitado, sugere-se que uma menor U_{crit} seja adotada no planejamento das atividades motomecanizadas realizadas sobre o solo. Quando altas pressões são aplicadas na superfície do solo, estas são transmitidas para as

camadas subsuperficiais (KELLER; ARVIDSSON, 2004), podendo resultar na compactação persistente das camadas profundas caso estejam associadas a condições de elevado conteúdo de água no solo (HAKKANSON; REEDER, 1994).

1.3.4 Pressão de preconsolidação e índice de compressão

Os sistemas de uso e manejo do solo são estreitamente relacionados ao comportamento compressivo do solo, pois alteram atributos do solo determinantes no processo de compressão, tais como densidade do solo, porosidade, resistência a penetração e teor de água no solo, entre outros (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; FIGUEIREDO et al., 2011; IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008).

A curva de compressão do solo obtida pelo ensaio de compressão uniaxial permite a determinação da susceptibilidade a compactação do solo, ou seja o índice de compressão (C_c), e a máxima carga que o solo é capaz de suportar sem que ocorra compactação adicional, expresso pela pressão de preconsolidação (σ_p) (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996 ; IMHOFF et al., 2004). Portanto, o conhecimento do C_c e da σ_p dos solo em diferentes usos agrícolas possibilitam a elaboração de estratégias de manejo que evitem a aplicação de cargas superiores a σ_p , evitando-se assim o aumento da compactação do solo.

A pressão de preconsolidação (σ_p) dos solos nas situações estudadas variou de 71 a 136 kPa na camada superficial e de 64 a 219 kPa na camada subsuperficial, o que permite classificá-la como de média a muito alta, na camada de 0,0-0,1 m, e médio a extremamente alto, na camada 0,2-0,3 m (Tabela 3), respectivamente, de acordo com Horn e Fleige (2003). Comparativamente com outros trabalhos, os valores de σ_p estão dentro da faixa de valores médios para outros solos sob diferentes usos agrícolas. Suzuki et al. (2008) verificaram, em amostras equilibradas na tensão de 33 kPa, valores médios de σ_p entre 55 a 196 kPa em solo sob plantio direto. Em solos sob cultivo de cana-de-açúcar, foram observados valores de σ_p entre 22 a 305 kPa para amostras equilibradas nas tensões de 10 e 100 kPa (IMHOFF et al., 2004). Para solos cultivados com pomares de laranja, em amostras equilibradas na mesma tensão desse estudo, foram verificados valores médios de σ_p de 170 kPa na linha da cultura e de 300 a 310 kPa na linha do rodado e na projeção da copa (LIMA et al., 2004a).

Tabela 3: Classificação da pressão de preconsolidação (σ_p) dos solos irrigados sob pastagem (P), sucessão milho e feijão (MF), linhas (B2_L e B15_L) e entrelinhas (B2_E e B15_E) de banana e áreas de referência (VNP, VNMF, VNB2, VNB15) nas profundidades de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m

Profundidade	P	VNP	MF	VNMF	B2 _L	B2 _E	VNB2	B15 _L	B15 _E	VNB15
0,0-0,1 m	alto ⁽¹⁾	Muito	médio	muito	Alto	-	médio	muito	muito	muito
		Alto		alto				alto	alto	alto
0,2-0,3 m	muito	extremamente	muito	alto	muito	médio	muito	médio	alto	muito
	alto	alto	alto		alto		alto			

⁽¹⁾muito baixo (<30 kPa); baixo (30-60 kPa); médio (60-90 kPa); alto (90-120kPa); muito alto (120-150 kPa); extremamente alto (>150 kPa), de acordo com Horn e Fleige (2003).

Não foram verificadas diferenças significativas da σ_p entre solos sob usos agrícolas e suas respectivas áreas de referência ($p < 0,05$), assim como também não foram observadas tendências ($p < 0,20$) (Tabela 2). Os solos sob vegetação natural estudados, mesmo sem uso agrícola, apresentaram elevada σ_p , o que pode estar associado ao adensamento natural, resultante das alterações de estrutura caracteristicamente de grau de desenvolvimento fraco a moderado em conjunto com alternâncias de ciclos de umedecimento e secagem (GIAROLA; SILVA, 2002; PIRES; BACCHI, 2010). Nos solos estudados e sob uso agrícola, os valores de σ_p estão associados principalmente aos efeitos dos sistemas de manejo e uso do solo (ASSIS; LANÇAS, 2005; FIGUEIREDO et al., 2011; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; PIRES et al., 2012).

Observou-se que a σ_p na camada de 0,0-0,1 m dos solos sob uso agrícola B2_L, B2_E, B15_L e B15_E apresentaram valores médios numericamente superiores aos observados nas suas respectivas VNs, enquanto que em P e MF foram menores. Na camada subsuperficial (0,2-0,3 m), apenas os solos sob uso MF e B2_L aumentaram a σ_p quando comparado com as correspondentes VNs.

Os valores médios de σ_p em P foram 7% menores que em VNP na camada de 0,0-0,1 m e 29% menores na camada 0,2-0,3 m. A redução da σ_p observada em P está associada ao preparo do solo ocorrido na implantação da cultura e a atividade das raízes. As gramíneas apresentam grande capacidade em recuperar a estrutura do solo (KODEŠOVA et al., 2011; SILVA; MIELNICZUK, 1997) pois, ao contrário dos cultivos anuais, possuem uma constante produção e mortalidade de raízes (ACHARYA et al., 2012), que favorecem a formação de bioporos e o acúmulo de carbono, promovendo melhor qualidade física do que os cultivos anuais (BLAINSKI et al., 2008).

Apesar dos valores σ_p observados em P sejam classificados como alto e muito alto nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m, respectivamente, eles são numericamente inferiores a pressão que o pisoteio de bovinos exerce sobre o solo, cujos valores atingem a faixa de 350 a 400 kPa (NIE et al., 2001; PROFFITT et al., 1993). Assim, o controle da intensidade do pastejo e o monitoramento da umidade do solo nas eventuais operações que envolvem máquinas e implementos agrícolas em P deve ser realizado para evitar o aumento da compactação do solo (FLORES et al., 2007; SILVA et al., 2003).

A menor σ_p na camada de 0,0-0,1 m de MF em relação a VNMF não indica uma melhor condição estrutural de MF, mas justamente o contrário, pois é resultado da destruição da estrutura do solo com o cultivo intensivo nesta área. O preparo pulveriza o solo, diminuindo a sua resistência a compactação (FIGUEIREDO et al., 2011; SILVA et al., 2002), aumentando a profundidade em que as tensões aplicadas pelo trânsito de máquinas são distribuídas, o que torna as camadas mais profundas do solo susceptíveis ao processo de compactação (ALAKUKKU et al., 2003; ARVIDSSON et al., 2001). Tal observação explica os elevados valores de densidade do solo observados na camada 0,2-0,3 m de MF.

O maior grau de saturação de água (S_r) em MF na camada 0,0-0,1 m em relação a VNMF ($p < 0,10$) (Tabela 2), aproximadamente 40%, reduz a capacidade de suporte de cargas e a resistência a compactação do solo (IMHOFF et al., 2004; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999). A formação de um filme de água entre os agregados do solo facilita o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo (HILLEL, 1980), o que certamente contribui para o processo de compactação do solo. Da mesma forma, na camada de 0,2-0,3 m, o maior S_r pode também estar associado ao valor de pressão de preconsolidação (σ_p) numericamente inferior nesta camada (Tabela 2). Silva et al. (2002) observaram que aumentos de S_r da faixa de 46 a 60% para 61 a 75% reduziram em 2,4 vezes a σ_p da camada superficial de um Latossolo sob plantio convencional, ou seja, o aumento nos teores de água resultaram em deformações plásticas com a aplicação de menores pressões.

A elevada densidade do solo das amostras na camada de 0,0-0,1 m de B2L resultou na em pouca variação do índice de vazios do ensaio de compressão uniaxial, o que impossibilitou a estimativa da σ_p e do índice de compressão (C_c). A pequena variação do índice de vazios nas amostras coletadas resulta em valores do parâmetro m da equação de Gompertz (1925) superiores à máxima pressão aplicada (1.200 kPa) no ensaio, o que não é recomendado, pois m deve ser estimado dentro da faixa das pressões aplicadas. Caso seja feita, a estimativa do C_c é baseada em dados insuficientes para definir a faixa de variação linear, e consequentemente, a inclinação da curva que representa o C_c , enquanto que, para a estimativa

da pressão de preconsolidação, ocorre o erro de superestimação dos valores (ARTHUR et al., 2012; GREGORY et al., 2006; KELLER et al., 2011).

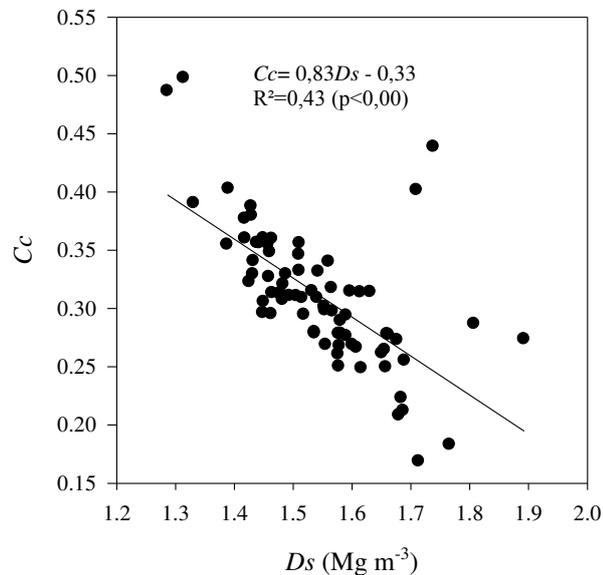
Os valores médios de σ_p observados em B2_L e B2_E foram próximos, respectivamente a B15_L e B15_E (Tabela 2), o que pode ser associado, principalmente, ao preparo do solo na implantação da cultura e ao trânsito de máquinas e implementos agrícolas não só no período de colheita, mas também de aplicação de tratos culturais. Os valores de σ_p corroboram com essa hipótese, pois encontram-se dentro da faixa de pressão de 30 a 150 kPa exercida por tratores agrícolas (PROFFITT et al., 1993).

Os índices de compressão (C_c) dos solos sob uso agrícola apresentaram-se menores que as VN's na camada de 0,0-0,1 m, com exceção de P onde foi observado um aumento de C_c ($p < 0,05$). Na camada 0,2-0,3 m, apenas P, B2_L e B15_E reduziram o C_c ($p < 0,05$) (Tabela 2). Tais resultados sugerem que a utilização do solo com cultivos irrigados reduzem a susceptibilidade a compactação, aumentando a resistência do solo à compactação. Estes valores variaram de 0,42 a 0,24 na camada de 0,0-0,1 m e 0,29 a 0,37 na camada de 0,2-0,3 m. Estes resultados encontram-se na faixa de C_c de 0,50 a 0,24 observados por Veiga et al. (2007) em um Nitossolo Vermelho e acima da faixa de valores de 0,04 a 0,23 de C_c encontrados por Arthur et al. (2012) para solos de textura franco arenosa.

Os valores de C_c observados indicam que os solos nas situações estudadas apresentam elevada susceptibilidade a compactação. Solos com maiores teores de argila apresentam maior susceptibilidade a compactação quando comparado com solos arenosos, devido a maior capacidade de retenção de água dos solos argilosos, o que facilita a movimentação das partículas diante da aplicação de pressões externas (GREGORY et al., 2006; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SUZUKI et al., 2008). Enquanto que em solos arenosos, a areia apresenta maior atrito entre as partículas do que as partículas de argila, dificultando o rearranjo e movimentação das partículas de solo (LIMA et al., 2004a).

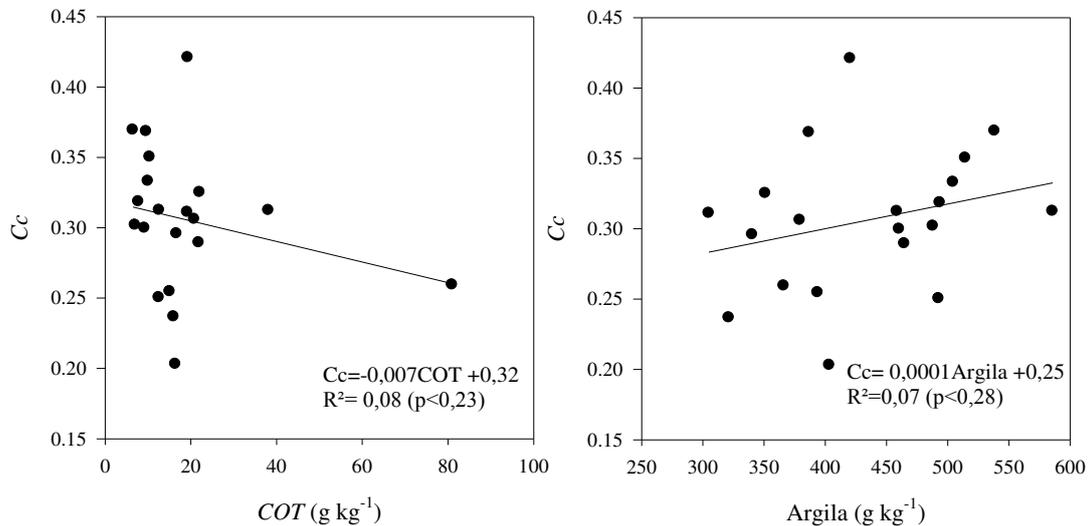
Na camada de 0,0-0,1 m, o aumento da resistência a compactação dos solos sob usos agrícolas está relacionado ao aumento da densidade do solo (Figura 5) com a intensificação do uso do solo nos cultivos agrícolas (BLAINSKI et al., 2008). O aumento da densidade do solo diminui o espaço poroso e aumenta a força de fricção entre as partículas de solo, dificultando o movimento e o rearranjo das partículas de solo para um estado mais denso (KELLER et al., 2011).

Figura 5: Relação entre a densidade do solo (D_s) e o índice de compressão (C_c) nas profundidades de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m, para solos com cultivos irrigados e vegetação natural do perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro do Norte, CE (n=76)



Nesse estudo, o C_c foi reduzido com o aumento da densidade do solo corroborando com trabalhos conduzidos por Imhoff et al. (2004), Figueiredo et al. (2011), Silva et al. (2002) e Suzuki et al. (2008). Avaliou-se a influência da textura e da matéria orgânica sobre a densidade do solo, verificando-se a existência de correlação do C_c com os teores de argila e carbono orgânico total (COT) (Figura 6). A possível razão pela qual o C_c apresente baixa correlação com o COT e a os teores de argila é a maior influência do uso e manejo sobre a densidade do solo.

Figura 6: Relação entre o índice de compressão (C_c) e o carbono orgânico total (COT) (A) e teor de argila (B) para solos com cultivos irrigados e vegetação natural do perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro do Norte-CE.



1.3.5 Estimativa da pressão de preconsolidação

As funções de pedotransferência (FP) permitem a estimativa de parâmetros difíceis de serem mensurados a partir de outros de mais fácil obtenção. Apesar de existirem FP para a determinação da σ_p na literatura, estas não devem ser extrapoladas para outras regiões e tipos de solos (MC BRATNEY et al, 2002; IMHOFF et al., 2004). Modelos foram desenvolvidos por Imhoff et al. (2004) e Suzuki et al. (2008), os quais encontraram a densidade inicial, a pressão aplicada ao solo e a resistência a penetração, como as variáveis a serem utilizadas na determinação da curva de compressão e da pressão de preconsolidação.

Considerando os dados obtidos neste estudo, foram desenvolvidas FP para a estimativa da σ_p dos solos da Chapada do Apodi para possível uso como ferramenta no planejamento agrícola e ambiental para os solos deste importante pólo de produção agrícola do estado do Ceará. Neste trabalho, as FP foram elaboradas para as camadas de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m, utilizando variáveis de fácil obtenção nas análises de rotina nos laboratórios de solos: índice de vazios (e_0), densidade do solo (D_s), umidade volumétrica (U_v), grau de saturação de água (S_r), umidade gravimétrica (U_g), argila (ARG), silte (Sil), areia grossa (AG), areia fina (AF), areia total (AT) e carbono orgânico total (COT). Adicionalmente, todas as variáveis

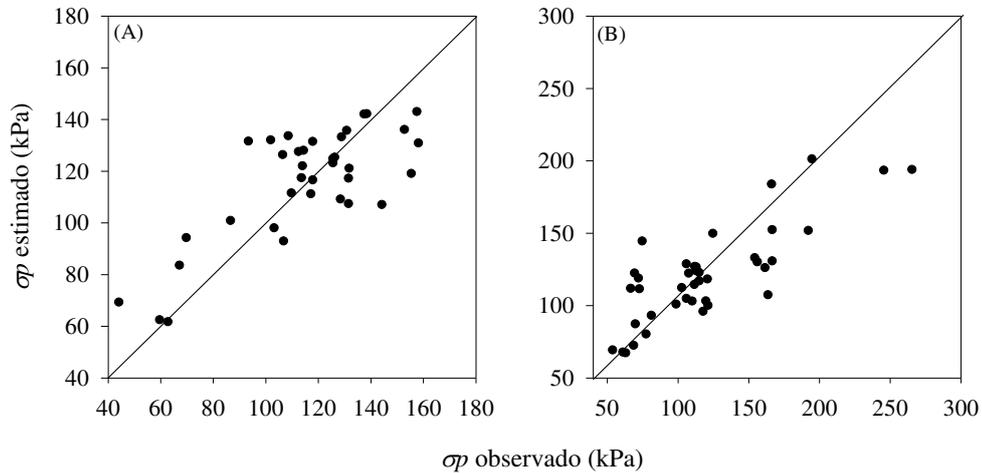
selecionadas foram transformadas em outra duas variáveis: uma que representa o valor original elevado ao quadrado (x^2) e, a outra que representa o valor inverso do número ($1/x$).

A transformação matemática do valor numérico das variáveis foi uma ferramenta para obtenção de um modelo não linear com maior grau de explicação. Selecionou-se o modelo com variáveis de maior grau de explicação da σ_p e com parâmetros significativos a 15% de probabilidade.

O melhor modelo obtido para estimar a pressão de preconsolidação da camada 0,0-0,1 m foi descrita pela equação: $\sigma_p = -488,91 e_0^2 + 0,93/Ug + 1302,64/Ds + 114,15 R^2 = 0,59$ ($p < 0,00$). Já para a da camada 0,2-0,3 m obteve-se o seguinte modelo de estimativa da σ_p : $\sigma_p = 4,20COT^2 + 596,47Uv^2 + 2,79 AG - 1530,22/Ds + 710,03e_0 + 102,41R^2 = 0,75$ ($p < 0,00$) em que: σ_p é a pressão de preconsolidação em kPa; COT é o carbono orgânico total do solo em $g\ kg^{-1}$; Uv é a umidade volumétrica do solo em $m^3\ m^{-3}$; AG é o teor de areia grossa do solo em $g\ kg^{-1}$; Ds é a densidade do solo em $Mg\ m^{-3}$; e_0 é o índice de vazios do solo (adimensional).

Na Figura 7 os valores estimados de σ_p pelos modelos desenvolvidos foram plotados em função dos valores observados, apresentando ajustes moderadamente satisfatórios. Nas FP desenvolvidas neste estudo, o índice de vazios (e_0), a densidade (Ds) e a umidade do solo (Uv e Ug) tiveram importância para as duas camadas avaliadas. Diversos trabalhos demonstram a influência da densidade (CANARACHE et al., 2000; FIGUEIREDO et al., 2011), do índice de vazios (ARTHUR et al., 2012; KELLER et al., 2011; VEIGA et al., 2007) e da umidade do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; OLIVEIRA et al., 2008; VASCONCELOS et al., 2012) no comportamento compressivo do solo e na σ_p .

Figura 7: Relação entre os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) observados e estimados pelas funções de pedotransferência obtidas para as camadas de 0,0-0,1 m (A) e 0,2-0,3 m (B) de solos com cultivos irrigados e vegetação natural do Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, Limoeiro do Norte-CE.



O carbono orgânico do solo (COT) e os teores de areia grossa (AG) foram as variáveis importantes para explicar a σ_p da camada 0,2-0,3 m. Para a camada 0,0-0,1 m, possivelmente os efeitos do COT e da AG na σ_p foram reduzidos pela maior ação antrópica sobre a estrutura do solo (KELLER et al., 2011), indicado pelos maiores valores de GC dessa camada.

Estas funções de pedotransferência (FP) poderão, por exemplo, serem utilizadas na tomada de decisão da pressão dos pneus de tratores utilizados nas áreas avaliadas. De acordo com Hamza e Anderson (2005) e Keller e Arvidsson (2004), a compactação em superfície pelo tráfego de máquinas está associado a pressão dos pneus, enquanto que em subsuperfície à magnitude da carga total aplicada.

1.4 CONCLUSÕES

Os sistemas de uso e manejo dos solos estudados alteraram as propriedades físicas dos solos avaliadas, tais como a densidade do solo e a capacidade de retenção de água, os quais resultaram na modificação do comportamento compressivo dos solos avaliados.

Os solos da Chapada do Apodi apresentam alta capacidade de suporte de cargas e susceptibilidade a compactação, evidenciados pela pressão de preconsolidação e índice de compressão.

Quando excedido a capacidade de cargas esses solos atingem altas densidades, por isso, a prevenção da compactação nos cultivos irrigados requer o controle rigoroso da umidade no momento das operações motomecanizadas, da intensidade de pastejo e a adoção de técnicas que preservem a estrutura do solo.

As funções de pedotransferência desenvolvidas demonstraram praticidade na estimativa da pressão de preconsolidação, pois a partir de parâmetros simples, obtidos nas rotinas de laboratórios de análises de solo, tornando-os ferramentas práticas para a utilização no planejamento das operações para as áreas avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, B. S.; RASMUSSEN, J.; ERIKSEN, J. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. **Agricult. Ecosys. Environ.**, v. 153, p. 33-39, 2012.
- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; OKUNOLA, A.; SOUZA, T.T.T. & PIRES, B.S. Assessment of vulnerability of Oxisols to compaction in the Cerrado region of Brazil. **Pedosphere**, v.20, p.252-260, 2010.
- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: A review. Part I – Machine/soil interactions. **Soil Till. Res.**, v.73; p.145-160, 2003.
- ARTHUR, E.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P.; JONGE, de L.W., Soil resistance and resilience to mechanical stresses for three differently managed sandy loam soils, **Geo.**, v. 173–174, p. 50-60, 2012,
- ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in Southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil Till. Res.**, v.60, p.67-78, 2001.
- ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29; p.515-522, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7182**: Solo. Ensaio de compactação - Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- BARZEGAR, A. R.; ASSODAR, M. A. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil Till. Res.**, v. 57, n. 3, p. 167-172, 2000.
- BECERRA, A. T.; BOTTA, G.F; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; VAZQUEZ, J.; RIVERO, D.; LINARES, P. ; NARDON, G. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almería España. **Soil Till. Res.**, v. 107, n.1, p. 49-56, 2011.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN Jr., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo.**R. Bras. Ci. Solo**, v.28, n.1, p. 155-163, 2004.
- BETIOLI JUNIOR, E.; MOREIRA, W. H; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto.**R. Bras. Ci. Solo**, vol.36, n.3, p. 971-982, 2012.
- BEULTER, A.N.; CENTURION, J.F. Effect of soil compaction in root development and in soybean yield. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 39, p. 581-588, 2004.

- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.975-983, 2008.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, p. 363-375. 1986.
- BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R; SCHLEGEL, A.J.; LYON,D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W.; RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.73, p. 1871–1879, 2009
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. da; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **R. Bras. Ci. Solo**, vol.30, n.4 p. 605-614, 2006.
- CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil Till. Res.**, v.56, p.185-196, 2000.
- CHRISTOFIDIS, Demetrios. “O futuro da irrigação e a gestão das águas”. MISIH- DDH. Nov. 2008,15p., Brasília.
- CONANT, R.T., PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecol. Appl.**, v. 11, p. 343-355, 2001.
- DANTAS, J. A. N.; OLIVEIRA; T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, CE. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 16, n. 1, 2012
- DIAS JUNIOR, M.S.; ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.45-51, 1999.
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, n.2, p.175-182, 1996.
- DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil Till. Res.**, v. 54, n.1-2, p.121-126, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FEARNSIDE, P.M., BARBOSA, R.I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. **For. Ecol. Manag.**, v.108, p.147–166, 1998.
- FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; MORAES, S. M.; ALMEIDA, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da

compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, n. 2, p. 389-402, 2011.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, n.3, p.487-493, 2000

FLINT, A.L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis: Physical methods**. Part 4. SSSA Book Series n.5., American Society of Agronomy, p.229-240, 2002.

FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F; LEITE, J. G. D. B.; Fraga, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, n.4, p.771-780, 2007.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.da. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Sci. Agric**, v.59, n.3, p.613-620. 2002.

GREGORY, A.S.; WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil Till. Res.** v.89, p. 45–57, 2006.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Till. Res.**, v.16, p.105-120, 1990.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, v.82, n. 2, p.121-145, 2005.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Amherst, University of Massachusetts. Academic Press, 1980. 413p.

HORN, R., FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Till. Res.**, v. 73, p. 89–99. 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 68, p.17-24, 2004.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; DAWIDOWSKI, J. B.; KOOLEN, A. J. Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. **Soil Till. Res.**, v.77, p.97-108, 2004.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P; DEXTER A. R . Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geo.**, v.163, n.1-2, p.13-23, 2011.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KODESOVÁ, R.; JIRKU, V.; KODES, V.; MÜHLHANSELOVA, M.; NIKODEM, A.; ZIGOVÁ, A. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland. **Soil Till. Res.**, v. 111, n. 2, p. 154-161, 2011.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23. p.211-218, 1999.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S; LEO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p. 945-951, 2004b.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF. S.; LIMA, H.V.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28; p.409-414, 2004a.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil Till. Res.**, v.19, p.307-317, 1991.

MAIA, S.M.F., OGLE, S.M., CERRI, C.E.P. CERRI, C.C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondonia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, n. 1-2, p. 84-91, 2009.

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems, **Geoderma**, v. 109, n. 1-2, p. 41-73, 2002.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHE, R. B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambien.**, v.13, p.39-45, 2009.

MOSQUERA, O.; BUURMAN, P.; RAMIREZ, B. L.; AMEZQUITA, M. C. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. **Geoderma**, v.189–190, p. 81-86, 2012.

NIE, Z.N.; WARD, G.N.; MICHAEL, A.T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on South – Western Victoria. **Aust. J. Soil Res.**, v. 52, p.37-43, 2001.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 38, p.291-299, 2003.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambien.**, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PEREIRA, V. P. ; ORTIZ-ESCOBAR, M. E.; ROCHA G. C., ASSIS JUNIOR, R. N.; OLIVEIRA T. S. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. **Soil Res.**, v. 50, p. 455–464, 2012,

PIRES, B. S.; DIAS JUNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; CARVALHO, R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 36, n. 2, p. 635-642, 2012.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.45, n. 4, p. 391-400, 2010.

PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red - Brown earth. **Aust. J. Agric. Soil Res.**, v.44, p.317-331, 1993.

RALISCH, R.; MIRANDA, T.M.; OKUMURA, R.S.; BARBOSA, G.M.de C.; GUIMARÃES, M. de F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L.C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambien.**, v.12, n.4, p.381-384, 2008.

SAFFIH-HDADI, K., DÉFOSSEZ, P., RICHARD, G., CUI, Y.-J., TANG, A.-M., CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil Till. Res.**, v. 105, p. 96–103, 2009.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, n. 6, p. 921-930, 2006.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil Till. Res.**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARAES, P.T.G. ; ARAUJO JUNIOR, C.F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.207-216, 2006.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.113-117, 1997.

SILVA, V. R. et al. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002b.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, n.2, p.239-249, 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 1-8, 2002a.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v.26, p. 9-15, 2002b.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK C., Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment, **Soil Till. Res.**, v. 35, n. 1-2, p.5-22, 1995.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. **Soil Till. Res.**, v. 16, p.179–201, 1990.

SPOOR, G.; TIJINK, F.G.J.; WEISSKOPF, P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil Till. Res.**, v.73, p.175-182, 2003.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, n.3, p. 963-973, 2008.

SUZUKI, L.E.A. S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

VAN DIJCK, S.J.E; VAN ASCH, T.W.J, Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. **Soil Till. Res.**, v. 63, n. 3–4, p. 141-153, 2002.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocioso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.309-316, 2010

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 Till. Res.**, v. 92, p. 104-113, 2007.

WORLD BANK. Brazil Irrigated Agriculture in the Brazilian Semi-Arid Region: Social Impacts and Externalities. Report No. 28785-BR, 2004.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p.239-245, 1997.

ZHAO, Y., M. KRZIC, C.E. BULMER, AND M.G. SCHMIDT. Maximum bulk density of British Columbia forest soils from the Proctor test: Relationships with selected physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 72, p.442–452. 2008.

2. COMPACTAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E COMPRESSIBILIDADE EM AGROECOSSISTEMAS ORGÂNICOS IRRIGADOS

Autora: Rafaela Watanabe

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

RESUMO

A qualidade física do solo é essencial para a sustentabilidade dos sistemas irrigados de produção agrícola. O objetivo desse estudo foi de avaliar o intervalo hídrico ótimo, a capacidade de suporte de cargas e o grau de compactação nas linhas e entrelinhas de solos irrigados cultivados com pomares de acerolas no estado do Ceará. O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Amway Nutrilite, onde foram selecionadas três áreas irrigadas com cultivos de acerolas sob manejo biodinâmico com pomares com 1 (A1), 6 (A6) e 10 (A10) anos de implantação. Avaliou-se o grau de compactação (GC), a densidade máxima ($D_{smáx}$), a umidade crítica ($U_{crít}$), o intervalo hídrico ótimo (IHO), a pressão de preconsolidação (σ_p), o índice de compressão (Cc), o carbono orgânico total (Cot), os estoques de matéria orgânica leve (E_{mol}) e de carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}), nas linhas e entrelinhas de plantio, nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m. A irrigação por pivô favoreceu o aumento do grau de compactação na camada de 0,0-0,1 m e, conseqüentemente, reduziu o IHO nas entrelinhas. Os solos avaliados apresentaram alta capacidade de suporte de cargas e foram semelhantes não apresentando diferenças entre a linha e entrelinha e entre os tempos de uso. As linhas de plantio apresentaram maior susceptibilidade a compactação (Cc). A irrigação localizada na linha de plantio minimizou os efeitos negativos causados pelo frequente trânsito de máquinas nas entrelinhas.

Palavras-chaves: agricultura orgânica, qualidade do solo, capacidade de suporte de cargas, susceptibilidade a compactação.

ABSTRACT

COMPACTION, LEAST LIMITING WATER RANGE AND COMPRESSIBILITY IN IRRIGATED ORGANIC AGROECOSYSTEMS

The physical quality of the soil is essential to the sustainability of irrigated agricultural production. The aim of this study was to evaluate the limiting water range, the load bearing capacity and the degree of compactness in row and inter-rows of irrigated soils cultivated with

orchards of Caribbean Cherry fruits in the state of Ceará. The study was conducted at Fazenda Amway Nutrilite, where three irrigated areas with orchards of Caribbean Cherry under biodynamic management were selected. The orchards were 1 (A1), 6 (A6) and 10 (A10) years of implantation. We evaluated the degree of compaction (GC), the maximum bulk density (D_{smax}), the critical water content ($U_{crít}$), limiting water range (LLWR), the preconsolidation pressure (σ_p) and compression index (C_c), total organic carbon (C_{ot}), the stocks of light organic matter ($Emol$) and carbon of light organic matter (ECmol), in the rows and inter-rows at the depths of 0.0-0.1 m 0.2-0.3 m. The pivot irrigation favored the increase in degree of compactness in inter-rows at the layer of 0.0-0.1m, consequently it reduced the IHO. The studied soils showed high load bearing capacity and no differences between the row and inter-rows and between times of use. The rows showed increased susceptibility to compression (C_c). The irrigation in the crop row minimized the negative effects caused by frequent machine traffic between the lines.

Keywords: organic agriculture, soil quality, load bearing capacity, susceptibility to compaction.

2.1 INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores limitantes para a produção agrícola no Nordeste brasileiro é o déficit hídrico, resultante da baixa pluviosidade, irregularidades das chuvas e elevada evapotranspiração (PAZ et al., 2000). A implantação de sistemas irrigados solucionou o problema e associada a elevada luminosidade na região, proporcionou condições adequadas para o desenvolvimento da fruticultura. Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas (ANUÁRIO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2010), dos quais o estado do Ceará é o maior exportador de frutas entre os estados brasileiros, sendo responsável por 32,3% das exportações de frutas do país no ano de 2010 (IPECE, 2011).

Na fruticultura irrigada, a manutenção da qualidade do solo é considerada um fator essencial para a sustentabilidade em longo prazo dos sistemas de produção agrícolas, pois afinal tendem a ser sistemas permanentes, sejam pelas espécies ou pela própria infraestrutura de irrigação. Qualidade do solo é definida como “a capacidade do solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde vegetal e animal” (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2012).

De modo geral, a compactação do solo é uma das principais formas de degradação dos sistemas agrícolas, sendo, por esse motivo, a sua prevenção uma exigência na legislação de proteção dos solos de vários países (TOBIAS; TIETJE, 2007). Em sistemas irrigados, o conteúdo de água no solo tende a ser maior, reduzindo a capacidade de suporte de carga e aumentando a susceptibilidade a compactação (IMHOFF et al., 2004; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; MICHELON et al., 2009; PIRES et al., 2012). Diversos estudos demonstraram o aumento da compactação nas entrelinhas de plantio nos pomares de produção de frutas em função do frequente tráfego de máquinas nas operações de manejo e colheita (BECERRA et al., 2011; LIMA et al., 2004; VAN DIJCK; VAN ASCH, 2002).

A compactação pode ser estudada por meio de diversas avaliações que vão poder indicar, direta e indiretamente e em conjunto ou não, o estado de compactação do solo, permitindo assim atitudes que possam ser preventivas ou corretivas da qualidade física do solo. Entre eles, destacam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial e Proctor. No primeiro obtém-se a pressão de preconsolidação (σ_p) e que representa a capacidade de suporte de carga do solo, um indicador da máxima pressão que pode ser aplicado ao solo sem que ocorra aumento da compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995). A partir dos resultados do ensaio Proctor e da densidade do solo pode-se estimar o grau de compactação do solo (GC), o qual elimina os efeitos da textura, mineralogia e matéria orgânica (HÅKANSSON, 1990; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000), possibilitando a avaliação somente dos efeitos do manejo na estrutura do solo (SILVA et al., 1997).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é uma variável que integra as informações referentes a resistência a penetração, densidade do solo, umidade em diferentes níveis de retenção de água e as necessidades de porosidade de aeração, indicando uma faixa de água disponível para as plantas em que as limitações quanto às variáveis analisadas são mínimas. É considerado um indicador da qualidade do solo e dos efeitos do manejo na produtividade sustentável do solo, pois integra parâmetros físicos determinados pelas propriedades intrínsecas e da estrutura do solo (SILVA et al., 1994, TORMENA et al., 1998).

Diante dessas informações e da importância da fruticultura para o estado do Ceará, a quantificação e a avaliação da qualidade do solo são essenciais no planejamento das medidas de prevenção da degradação da estrutura do solo. Assim, o objetivo desse estudo foi de avaliar o intervalo hídrico ótimo, a capacidade de suporte de cargas e o grau de compactação nas linhas e entrelinhas de solos irrigados cultivados com pomares de acerolas no estado do Ceará.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização das áreas

O estudo foi realizado na Chapada da Ibiapaba no município de Ubajara-CE. A região apresenta clima tropical chuvoso de monção, Amw', segundo classificação de Köppen. O período das chuvas concentra-se de janeiro a maio e o período seco de julho a novembro, com precipitação e temperatura médias anuais de 640 mm ano⁻¹ e 28°C, respectivamente.

Nesse estudo foram selecionadas três áreas cultivadas com acerola (*Malpighia puniceifolia* L.) sob sistema de produção biodinâmico após um, seis e dez anos de implantação do pomar, respectivamente em 2010, 2005 e 2001. Entre 1991 e 1997, após eliminação da vegetação natural de Carrasco, estas áreas foram cultivadas com melancia e morango sob manejo convencional com aplicação intensiva de fertilizantes e defensivos químicos para controle de patógenos, insetos e plantas espontâneas. Em 1998 iniciou-se o processo atual de implantação dos pomares de acerolas orgânicas e a partir de 2000, a conversão para a produção biodinâmica (XAVIER et al., 2006; 2009). Atualmente a Fazenda é certificada pelo Instituto Biodinâmico (IBD) com o selo de “Produto Orgânico”, e pelo Demeter com o selo de “Produto Biodinâmico”. Toda a produção de acerolas é destinada a produção agroindustrial de vitamina C, exportada para a fabricação de suplementos vitamínicos.

As áreas selecionadas ocorrem em Latossolos Amarelos, sendo as duas primeiras descritas como distróficas típicas e argissólica, com um (A1) e seis anos (A6) de cultivo de acerola, ambas sob irrigação por pivô central (figura 1). Na terceira área (A10) predomina também Latossolo Amarelo, porém eutrófico e argissólico, sendo a acerola cultivada nesta área a cerca de 10 anos, utilizando irrigação localizada do tipo microaspersão (figura 1). Na A1 houve renovação das plantas de acerola implantadas na mesma época da A6, porém o plantio foi feito localizado sem revolvimento total do solo da área. Três meses antes da coleta das amostras, o solo das entrelinhas das plantas de acerola na A6 foi escarificado, pois foi identificada a lenta infiltração de água no solo pelos técnicos da fazenda.

Figura 1: Localização das áreas irrigadas cultivadas com acerolas com 1 (A1), 6 (A6) e 10 (A10) anos de cultivo, no município de Ubajara-CE.



Em grande parte do ano, as frutas de acerola são colhidas manualmente, porém, nos períodos de maior produção (janeiro a abril), colheitadeiras mecânicas para café adaptadas para acerola são utilizadas em caráter complementar. A adubação das acerolas é feita anualmente com a adubação verde nas entrelinhas utilizando a crotalária (*Crotalaria juncea*), e com composto orgânico produzido na própria fazenda na dose de 20 kg ha ano (XAVIER et al., 2006). O manejo de plantas invasoras e da crotalária nas entrelinhas é realizado por roçadeira acoplada a um trator com deslocamento lateral para deposição junto às plantas do material vegetal cortado. Nas linhas a capina é manual.

Na implantação do pomar das acerolas, adicionaram-se 200 g de fosfato natural por cova. A adubação orgânica foi realizada por meio da adição de 22 kg de composto orgânico por planta aplicado na linha. Utilizou-se bagana de carnaúba como cobertura morta nas linhas nos dois primeiros anos de cultivo. No início do período chuvoso, foram semeados nas entrelinhas espécies para a adubação verde (calopogônio, soja perene e capim) na proporção de 2 kg de sementes ha⁻¹. Antes da floração das espécies realizou-se o roço mecânico nas entrelinhas cuja massa verde foi incorporada nas linhas (XAVIER et al., 2006). As propriedades químicas dos solos são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas da linha (L) e entrelinha (E) de plantio nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,50 m em área irrigada com cultivo de acerolas orgânicas na Fazenda Amway Nutrilite, Ubajara-CE.

Profundidade (m)	Posição	Ca ⁽¹⁾	Mg	K	H+Al ⁽²⁾	P ⁽³⁾	pH (1:2,5)
		cmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³	(H ₂ O)
0,00-0,05	L	2,68	1,70	0,41	1,50	197,50	5,41
0,00-0,05	E	2,45	1,03	0,43	0,56	186,30	6,06
0,05-0,10	L	2,27	1,36	0,19	1,00	115,30	5,43
0,05-0,10	E	2,12	1,50	0,21	0,44	193,70	6,09
0,10-0,20	L	1,23	0,88	0,17	0,70	109,00	5,40
0,10-0,20	E	1,42	1,08	0,24	0,46	135,00	5,98
0,20-0,50	L	1,31	1,21	0,25	2,35	163,40	5,09
0,20-0,50	E	1,11	1,05	0,21	0,72	95,10	5,75

⁽¹⁾Ca, Mg e K extraídos por acetato de amônio; ⁽²⁾H+Al extraído por KCl 1M; ⁽³⁾P extraído por Mehlich; ⁽⁴⁾pH extraído em H₂O na proporção 1:2,5. Fonte: XAVIER et al., (2009).

Amostras indeformadas de solo foram coletadas nas linhas e entrelinhas da cultura, nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m utilizando amostrador Ulhand e anéis com dimensões 2,5 cm de altura e 7,4 cm de diâmetro e 5 cm de altura e 4,7 cm de diâmetro. Adicionalmente, amostras deformadas foram também coletadas para cada profundidade e posição amostrada.

2.2.2 Ensaio Proctor

O ensaio Proctor Normal foi realizado de acordo com a Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986). Para cada área amostrada no campo foram realizadas três repetições do ensaio Proctor, considerando cinco teores de água, obtendo-se a curva de compactação, sendo o terceiro ponto da curva próximo à umidade crítica. As amostras indeformadas de solo foram compactadas em um anel metálico 10 cm de diâmetro e altura de 12,7 cm, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 0,31 m. Após aplicação dos golpes foi retirada uma amostra do corpo de prova para determinação da umidade do solo (U_g). Assim, para cada amostra, obtiveram-se cinco pares de valores de umidade (U_g) e densidade do solo (D_s), com os quais se ajustou o seguinte modelo matemático: $D_s = xU_g^2 + yU + z$, em que: D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); U_g é o teor de água no solo (kg kg^{-1}); x , y e z são coeficientes obtidos no ajuste do modelo. Os valores da umidade crítica ($U_{crít}$) e de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) foram obtidos pela primeira derivada do modelo matemático expresso pelas equações $U_{crít} = -y/2x$ e $D_{s_{máx}} =$

$(-y^2 - 4xz)/4x$. A densidade máxima e a umidade crítica foram representadas pela média das três repetições.

O grau de compactação (GC) foi determinado a partir dos dados de densidade do solo (D_s) e da densidade máxima ($DS_{máx}$), de acordo com a equação proposta por Håkansson (1990): $GC = D_s/D_{s_{máx}} \times 100$ em que GC é o grau de compactação em %, D_s é densidade do solo em $Mg\ m^{-3}$ e $D_{s_{máx}}$ é a densidade máxima do solo em $Mg\ m^{-3}$.

2.2.3 Compressão solo

As amostras indeformadas foram saturadas com água por ascensão capilar durante 24 horas, tendo sido equilibradas em potencial mátrico de -0,01 MPa utilizando câmaras de Richards (KLUTE, 1986), tendo sido previamente pesadas para determinação do conteúdo de água.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado utilizando equipamento consolidômetro pneumático, desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (FIGUEIREDO et al., 2011). O ensaio consistiu da aplicação sucessiva e contínua de carregamentos crescentes de 0; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 600; 800; 1000 e 1200 kPa, por um período de cinco minutos, o suficiente para atingir 99% da deformação máxima do solo (SILVA et al., 2000). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24h, para determinação da densidade do solo (BLAKE; HARTAGE, 1986) e do teor de água da amostra.

A partir dos valores de deslocamento do solo no ensaio de compressão uniaxial foram calculados os índices de vazios para cada pressão aplicada, obtendo-se para cada amostra, 11 pares de valores de índice de vazios e pressão aplicada. Estes dados foram utilizados na construção da curva de compressão pela equação de Gompertz (1925), como sugerido por Gregory et al. (2006), ajustada pelo método dos mínimos quadrados: $e = j + k \exp[-\exp(l((\log_{10} \sigma') - m))]$, em que e é o índice de vazios, σ' é a pressão aplicada (kPa) e j , k , l e m são coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados. Os coeficientes obtidos foram utilizados no cálculo do índice de compressão do solo (C_c) pelo modelo de Gregory et al. (2006) que estima a inclinação da reta de compressão virgem sendo o módulo da inclinação no ponto de inflexão (m) calculado pela equação $C_c = lk/\exp(1)$, em que: C_c é o índice de compressão, l e k são coeficientes obtidos no ajuste do modelo de Gompertz (1925) aos dados e $\exp(1)$ é a função exponencial do número 1.

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi determinada a partir da curva ajustada pela equação de Gompertz (1925) utilizando o algoritmo proposto por Imhoff et. al (2004) no software Mathcad. Calcula-se, inicialmente, a derivada segunda da curva de compressão que corresponde ao ponto máximo da curvatura da curva de compressão e, em seguida, o valor mínimo da segunda derivada cujo valor corresponde ao logaritmo da pressão de preconsolidação.

2.2.4 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Os procedimentos para a obtenção do intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo nas áreas estudadas foram desenvolvidos de acordo com Silva et al. (1994). Em cada área (A1, A6 e A10) foram coletadas 30 amostras de solo indeformadas em cada uma das posições, linha e entrelinha, e para cada profundidade 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m, totalizando 360 amostras. No laboratório, as amostras foram saturadas e equilibradas nas tensões de 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01 MPa, em mesa de tensão, e 0,02; 0,04; 0,08; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,2 e 1,5 MPa em câmara de Richards (KLUTE, 1986), utilizando-se duas amostras representativas para cada tensão. Após o equilíbrio, cada uma das amostras foi pesada e submetida ao ensaio de resistência a penetração utilizando penetrômetro de bancada com cone de 4 mm de diâmetro, ângulo de 30° e taxa constante de penetração na velocidade de 1 mm min⁻¹. Em seguida as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, para determinação da densidade e teor de água no solo.

Para a obtenção do IHO utilizou-se o algoritmo desenvolvido em software Excel ® proposto por Silva e Leão (2004). A curva de retenção de água no solo foi ajustada pela função não linear $\theta = \exp(a + bDs) \Psi^c$, em que: Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³), Ψ é o potencial de água no solo (MPa); a , b e c são coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados. A curva de RP foi ajustada pelo modelo não linear proposto por Busscher (1990): $RP = d\theta^e Ds^f$, em que: θ é o conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³); Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³); d , e e f são coeficientes obtidos no ajuste do modelo aos dados.

Os coeficientes obtidos na curva de retenção de água e de resistência a penetração foram utilizados para estimar os valores críticos para o crescimento das culturas associados com o potencial mátrico do solo, resistência a penetração e porosidade de aeração. Assumiu-se que o teor de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente equivalem ao conteúdo de água no potencial de -0,01 MPa (HAISE et al.,1955) e -1,5 MPa, respectivamente. Os valores críticos de conteúdos de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foram estimados pela função da curva de retenção de

água aplicando os potenciais de -0,01 e -1,5 MPa, resultando nas seguintes equações: $\theta_{cc} = \exp(a + bDs) 0,01^c$ e $\theta_{PMP} = \exp(a + bDs) 1,5^c$.

Os valores críticos de conteúdo de água em que ocorre a resistência a penetração limitante (θ_{RP}) foi obtido isolando o conteúdo de água no modelo de Busscher (1990). Para tal considerou-se o valor crítico de resistência a penetração de 3 MPa (CANARACHE, 1990), resultando na seguinte equação: $\theta_{RP} = (3/dDs^f)^{1/e}$

O conteúdo de água no qual a porosidade de aeração (θ_{PA}) limitante é igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foi calculada pela equação: $\theta_{PA} = [(1 - Ds/Dp) - 0,1]$, em que: Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e Dp é a densidade de partículas do solo (Mg m^{-3})

Por fim, o intervalo hídrico ótimo foi calculado pela diferença entre os limites superiores e inferiores, sendo considerado no limite superior o menor valor de conteúdo de água na capacidade de campo ou na porosidade com ar de 10%, e no limite inferior o maior valor de conteúdo de água no ponto de murcha permanente ou na resistência a penetração de 3 MPa.

2.2.5 Granulometria e densidade de partículas do solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta para a determinação dos teores argila (EMBRAPA, 1997), utilizando dispersão ultrassônica, adotando-se energia de sonificação de 204 J mL^{-1} . As frações de areia grossa e fina foram determinadas por peneiramento e o silte por diferença.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do deslocamento do gás (FLINT; FLINT, 2002) com a utilização do picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®, utilizando amostras de solo passadas em peneira de 2,0 mm e secas em estufa a 105° C .

2.2.6 Matéria orgânica leve e carbono

Para a determinação da matéria orgânica leve (MOL), inicialmente, foram peneirados 500 g de solo seco ao ar em peneiras com malha de diâmetro 8, 4, 2 e 0,25 mm, sendo o material de solo retido em cada peneira, separado, pesado e armazenado. Posteriormente, utilizou-se 13 g de cada uma das frações de solo retidas nas peneiras de 4, 2 e 0,25 mm, agitados em solução de NaI (densidade de 1,8 kg L⁻¹) e, em seguida, centrifugadas a 3.200 rpm por 15 minutos, seguido de separação da MOL por flotação (SOHI et al., 2001). O material suspenso foi separado em peneira de 0,025 mm, lavado com água destilada para remoção do NaI e seco em estufa a 65°C, sendo, posteriormente, pesado. Os teores de carbono da matéria orgânica leve (C_{mol}) de cada fração foi determinado por combustão via seca em analisador elementar.

Os teores de carbono orgânico total (COT) do solo foram determinados por oxidação da matéria orgânica via úmida na presença de K₂Cr₂O₇ em meio sulfúrico e aquecimento externo (YEOMANS; BRENMER, 1988).

Os estoques de matéria orgânica leve (E_{mol}) e de carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) em cada uma das frações de solo separadas foram calculados pela expressão: E_{MOL} ou $E_{Cmol} = t \times Ds \times h$ em que E_{MOL} ou E_{Cmol} é o estoque em Mg ha⁻¹; t é o teor de MOL ou C_{mol} em kg Mg⁻¹; Ds é a densidade do solo em Mg m⁻³; h é a espessura da camada solo (m).

2.2.7 Análise estatística

O conjunto de variáveis obtidos para cada área amostrada (A1, A6 e A10) foram comparadas com base na variância e na média pelo teste F e t considerando a comparação entre as médias e variâncias das posições linha e entrelinha

Para verificar a homogeneidade da variância entre as populações foi realizado o teste F unilateral pelo quociente entre a maior e a menor variância: $F = S_{A^2} / S_{B^2}$, em que S_A^2 é a variância de maior valor e S_B^2 : é a variância de menor valor.

A avaliação de diferenças nas variáveis entre os diferentes usos, quanto à média, foi feito com base no teste t bilateral. Para as populações com variância homogênea, o teste t foi aplicado conforme as equações: $t = (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) / \sqrt{S_c^2 (1/n_1 + 1/n_2)}$ e $S_c^2 = ((n_1 - 1)s_1^2 + (n_1 - 1)s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)$, em que: $n_1 + n_2 - 2$: são os graus de liberdade;

$\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$: são as médias das variáveis para as diferentes populações; s_1^2 e s_2^2 são as variâncias para as duas populações utilizadas em cada comparação; s_c^2 : é variância comum entre as populações; n_1 e n_2 são os números de amostras de cada população (1 e 2) em comparação.

Nos casos em que a variância foi heterogênea, o cálculo do teste t foi feito utilizando a equação anterior, mas para o cálculo do número de graus de liberdade (n^*) utilizou-se a equação: $n^* = \left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right) / \left(\frac{S_1^2}{n_1} / (n_1 - 1) + \frac{S_2^2}{n_2} / (n_2 - 1) \right)$.

Os testes t e F foram realizados aos níveis de 5, 10, 15 e 20 % de probabilidade, considerando $p < 0,05$ como a existência de diferenças estatística e as demais probabilidades ($p > 0,05$ a $p < 0,20$) como tendência quando significativas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Influência da textura no processo compressivo do solo

A textura do solo pode influenciar as propriedades mecânicas do solo (KELLER; HÅKANSSON, 2010), principalmente as associadas ao comportamento compressivo (ARTHUR et al., 2011; HORN; FLEIGE, 2003; LARSON et al., 1980) e a susceptibilidade a compactação do solo (IMHOFF et al., 2004; JONES et al., 2003; SPOOR et al., 2003). A modificação da proporção das partículas de diferentes tamanhos (argila, silte e areia) altera a pressão de reconsolidação do solo (σ_p), como verificado por Imhoff et al. (2004) e Saffih-Hdadi et al. (2009), em que o aumento dos teores de argila resultou no aumento da σ_p .

No presente estudo, esta possível influência da composição textural pode ser descartada para as comparações das linhas e entrelinhas, pois observou-se que não houveram diferenças estatísticas significativas pelo teste t ($p < 0,05$) entre os teores das classes granulométricas, considerando contrastes de médias, principalmente aquelas que comparam as linhas e entrelinhas das plantas de acerola. As exceções identificadas estão associadas aos teores de silte e areia grossa. No primeiro caso, o silte obtido por diferença em relação as demais frações, está associado a possíveis variações uma vez que pode contabilizar limitações envolvidas nas determinações das demais classes granulométricas (RUIZ, 2005). As diferenças observadas para areia grossa podem ser minimizadas pela não existência de diferenças em relação a areia total, o que leva a inferir a não influência desta classe textural sobre o comportamento compressivo do solo.

Quando comparado os solos de diferentes áreas, o solo A10 diferenciou-se dos solos A1 e A6 na camada de 0,2-0,3 m, fato associado às diferenças de classe textural, franco-arenosa em A1 e A6 e areia franca em A10.

2.3.2 Grau de compactação

O grau de compactação do solo (*GC*), é a relação entre a densidade do solo e a sua densidade de referência, expressa em porcentagem, no caso a densidade máxima obtida pelo ensaio de Proctor, frequentemente utilizada em estudos de *GC* (BEUTLER et al., 2005; FIGUEIREDO et al., 2000; SILVA et al., 1997), pois é um método com boa repetibilidade (BETIOLI JR. et al., 2012).

Nesse estudo, o *GC* foi utilizado para avaliar o efeito do manejo na estrutura do solo nas linhas e entrelinhas de plantio. Os valores médios de *GC* variaram de 75 a 99% na camada superior e de 75 a 92% na camada inferior (Tabela 2).

Não foram verificadas diferenças estatísticas no *GC* para os contrastes que comparam as linhas e entrelinhas de plantio ($p < 0,05$) (Tabela 2) em A1 e A10, porém observou-se tendência de haver na camada superior ($p < 20\%$) e inferior ($p < 10\%$) para A6. Os valores médios de *GC* foram maiores nas entrelinhas em ambas as camadas avaliadas, com exceção do uso A1 na camada superior que apresentou maior *GC* na linha ($A1_L$), assim como foi maior quando comparado com o *GC* das linhas dos solos $A6_L$ e $A10_L$. É de se esperar que nas entrelinhas o solo esteja sujeito a maiores pressões pelo pisoteio e trânsito de máquinas, mesmo que sejam tratores leves. O maior valor médio de *GC* da linha do uso A1 pode estar associado às perturbações recentes nessa camada de solo decorrente das operações de remoção e substituição do pomar.

Verificou-se que os solos A1 e A6 apresentaram valores médios de *CG* numericamente maiores na camada superior (Tabela 2), comparativamente a A10. No solo A10, o *GC* apresentou comportamento inverso, ou seja, maiores valores de *CG* na camada inferior. Em A1 e A6, a irrigação do tipo aspersão por pivô central, diferentemente da localizada utilizada, irriga as entrelinhas de plantio, o que pode estar favorecendo o aumento da densidade do solo na camada superior, uma vez que o aumento do conteúdo de água no solo resulta na redução da resistência a compactação do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2002, SILVA E CABEDA, 2006). Consequentemente o aumento da densidade resulta no aumento da capacidade de suporte de cargas do solo (FLORES et al., 2007; SUZUKI et al., 2007), evitando assim a transmissão da compactação para as camadas mais profundas. A compactação superficial pode ser benéfica na prevenção da compactação em camadas subsuperficiais, desde que não atinja valores limitantes de resistência a penetração e porosidade de aeração do solo ao desenvolvimento das raízes (VEIGA et al.,

2007). No solo A10 a irrigação é de microaspersão e abrange apenas a linha de plantio, portanto o solo da entrelinha encontra-se com maior frequência com baixos teores de umidade, quando a resistência do solo a compactação é maior (KONDO E DIAS JUNIOR, 1999; VASCONCELOS et al., 2010).

Tabela 2, Cont.

Variável	Média						Variância						<i>t</i>								
	A1L		A1E		A10L		A1L		A1E		A10L		A1L	A1L	A1L	A6L	A6L	A10L	A1E	A1E	A10E
	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs
	0,2-0,3 m																				
Argila (g kg ⁻¹)	176	175	183	180	120	129	17,41	4,98	16,69	9,10	13,57	12,62	n.s.	n.s.	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	*
Silte (g kg ⁻¹)	38	40	46	42	23	10	7,10	26,82	3,05	3,21	5,17	5,81	n.s.	*	*	*	*	*	n.s.	n.s.	*
AG (g kg ⁻¹)	189	253	209	218	166	135	7,82	70,03	4,79	17,85	97,18	47,74	n.s.	*	n.s.						
AF (g kg ⁻¹)	598	533	562	559	691	726	22,66	54,96	16,12	13,47	103,13	40,29	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
AT (g kg ⁻¹)	786	786	771	777	857	861	23,85	26,73	16,57	10,06	8,59	14,93	n.s.	n.s.	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	*
Dp (Mg m ⁻³)	2,61	2,62	2,62	2,62	2,62	2,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Cc	0,29	0,26	0,29	0,24	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
σp (kPa)	114	135	101	187	205	138	189,30	523,58	28,30	1767,61	1938,16	805,45	ns	n.s.	n.s.	ns	n.s.	ns	n.s.	n.s.	n.s.
Ds (Mg m ⁻³)	1,48	1,49	1,46	1,59	1,48	1,51	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	+	*	n.s.	*	*	*	*	*	*
GC (%)	80,84	78,82	75,35	81,52	86,89	92,33	10,04	24,91	2,75	4,87	3,67	11,04	ns	n.s.	n.s.	+	*	ns	n.s.	n.s.	n.s.
Uv (m ³ m ⁻³)	0,18	0,19	0,15	0,18	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	n.s.	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.	*
Ug(kg kg ⁻¹)	0,12	0,13	0,10	0,11	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	*	*	*	*	*	*	*	*
D _{S^{máx}} (Mg m ⁻³)	1,82	1,88	1,94	1,95	1,70	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U _{crit} (kg kg ⁻¹)	0,14	0,13	0,12	0,12	0,14	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Cot (dag kg ⁻¹)	0,86	0,40	0,90	0,63	0,67	0,57	0,06	0,08	0,03	0,02	0,00	0,01	*	n.s.	*	*	*	*	*	*	*

Argila: < 2µm; *Silte*: (2-50 µm) *AG*: areia grossa (25-2.000 µm); *AF*: areia fina (25-50 µm); *AT*: areia total (50-2000 µm); *Dp*: densidade de partículas; *Cc*: índice de compressão (adimensional); *σp*: pressão de preconsolidação (kPa; *Ds*: densidade do solo no início do ensaio de compressão uniaxial ; *GC*: grau de compactação; *Uv*: umidade volumétrica; *Ug*: umidade gravimétrica; *D_{S^{máx}}*: densidade máxima; *U_{crit}*: umidade crítica; *Cot* carbono orgânico total do solo; *E_{Mol}*: estoque de matéria orgânica leve do solo; *E_{Cmol}*: estoque de carbono da matéria orgânica leve do solo do solo; . n.s. não significativo, * significativo a 5%; + significativo a 10%, %; + + significativo a 15%, + + + significativo a 20% pelo teste *t* bilateral para as médias.

2.3.3 Densidade máxima e umidade crítica

A umidade crítica do solo ($U_{crít}$) refere-se a umidade em que é obtida a maior compactação para uma determinada quantidade de energia aplicada, o que leva a recomendação de se fazer as operações motomecanizadas quando a umidade do solo abaixo da $U_{crít}$ (FIGUEIREDO et al., 2000). Nos solos avaliados a umidade crítica ($U_{crít}$) foi superior ao conteúdo de água na capacidade de campo (U_g) representado pela umidade gravimétrica das amostras equilibradas no potencial de -0,01 MPa (tabela). O maior valor de $U_{crít}$ em relação a U_g pode estar associado ao acúmulo de material orgânico no solo que aumenta a $U_{crít}$ de compactação do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2009, ARAGÓN et al., 2000).

A densidade máxima ($D_{smáx}$) foi superior em todas as áreas (A1_E, A6_E e A10_E) nas entrelinhas de plantio quando comparado com as linhas (A1_L, A6_L e A10_L), enquanto que a umidade crítica ($U_{crít}$) foi inferior. Para a mesma carga aplicada, os solos das entrelinhas atingem uma densidade mais elevada que os solos das linhas, o que pode estar associado aos maiores teores de carbono orgânico total (Cot) e estoque de carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) nas linhas. Verificou-se que o carbono orgânico total do solo (Cot) explicou melhor a variação da $U_{crít}$ e da $D_{smáx}$ do que o E_{Cmol} (Figuras 2 e 3), o que pode estar associado a ausência de diferenças estatísticas entre os estoques de matéria orgânica leve (E_{Mol}) e E_{Cmol} (Tabela 2). Outros trabalhos também verificaram com o aumento dos teores de carbono orgânico do solo a redução da $D_{smáx}$ e aumento da $U_{crít}$ (BLANCO-CANQUI et al., 2009; ARAGÓN et al., 2000),.

Segundo Zhang (2004), o aumento dos teores de carbono e matéria orgânica são associados ao aumento das forças de ligação entre as partículas de solo, resultando no aumento da compactação. Além disso, as propriedades da matéria orgânica como a elevada área superficial e o baixo peso específico, proporcionam o aumento da retenção de água e a redução da densidade do solo (SOANE, 1990).

Sugere-se assim, que se adotem práticas para o aumento dos teores de matéria orgânica nas entrelinhas, objetivando aumentar a $U_{crít}$ nas entrelinhas onde normalmente há maiores perturbações pelo trânsito de máquinas.

Figura 2: Relação entre o carbono orgânico total (Cot) e a umidade crítica (U_{crit})(A), densidade máxima ($D_{smáx}$) (B) nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m para Latossolos Amarelos com cultivos irrigados de acerolas orgânicas em Ubajara-CE.

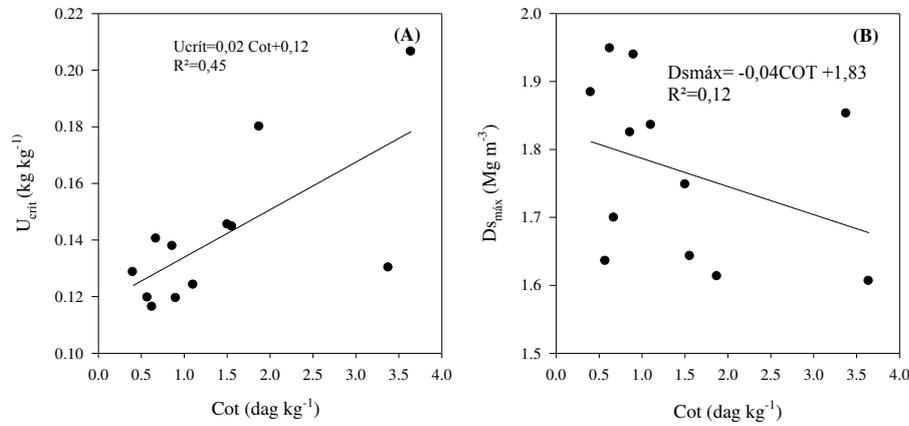
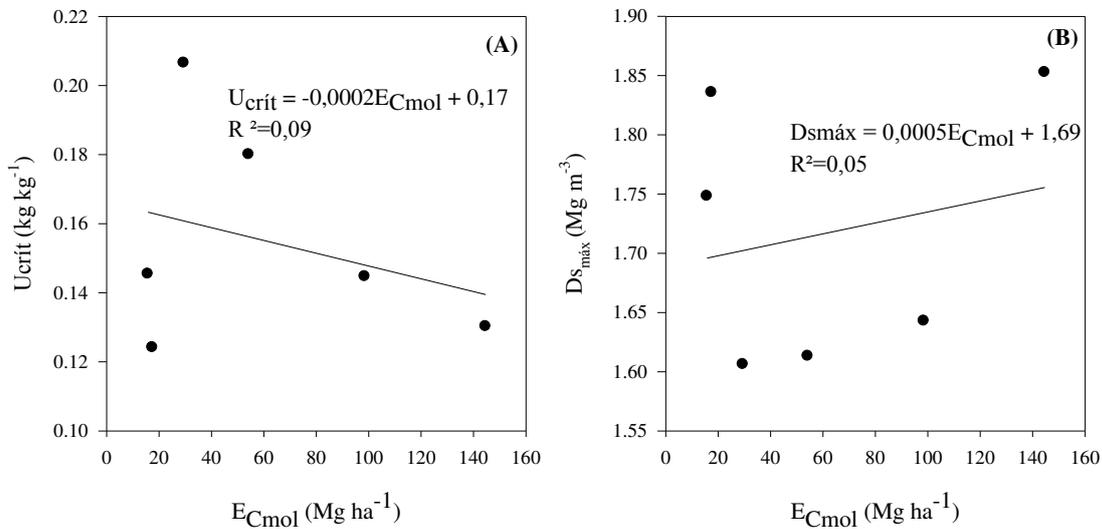


Figura 3: Relação entre o estoque de carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) e a umidade crítica (U_{crit}) (A) e a densidade máxima ($D_{smáx}$) (B), nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m para Latossolos Amarelos com cultivos irrigados de acerolas orgânicas em Ubajara-CE.



2.3.4 Intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) considera, além dos potenciais matriciais, a porosidade de aeração e a resistência a penetração, portanto é um conceito aperfeiçoado do de água disponível no solo, representado pela diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (CAVALIERI et al., 2006).

De modo geral, o IHO foi menor que o conteúdo de água entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo (Figuras 4, 5 e 6), sendo a resistência a penetração o fator mais limitante. Essa relação também foi verificada por outros autores (PACHECO; CANTALICE, 2011; PEREIRA et al., 2012; SILVA et al., 1994; SILVA et al.; 2011; TORMENA et al., 1998).

A amplitude do IHO em A1 e A6 foi maior nas linhas (A1_L e A6_L) do que nas entrelinhas (A1_E e A6_E), o que pode ser justificado pelo maior resistência a penetração observada nas entrelinhas (Figuras 4, 5 e 7) provavelmente proporcionado pelo maior densidade do solo (D_s) e menores teores de matéria orgânica (Tabelas 2 e 3). Enquanto que A10_E da camada superior apresentaram maior faixa de IHO do que A10_L, mesmo apresentando um maior número de amostras acima da densidade crítica ($D_{s\text{crít}}$) (Figuras 6 e 7). A menor amplitude do IHO nas entrelinhas aumenta a probabilidade das condições físicas do solo limitar o desenvolvimento da cultura por falta de água (SILVA; KAY, 1997; IMHOFF et al., 2001), mesmo sendo irrigados como são os casos estudados.

Figura 4: Variação do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência a penetração (θ_{RP}) de 3,0 MPa em função da densidade do solo A1 nas camadas de 0,0-0,1 m (P1) e 0,2-0,3 m (P2) nas linhas (L) e entrelinhas (E) (As áreas na cor cinza correspondem ao intervalo hídrico ótimo).

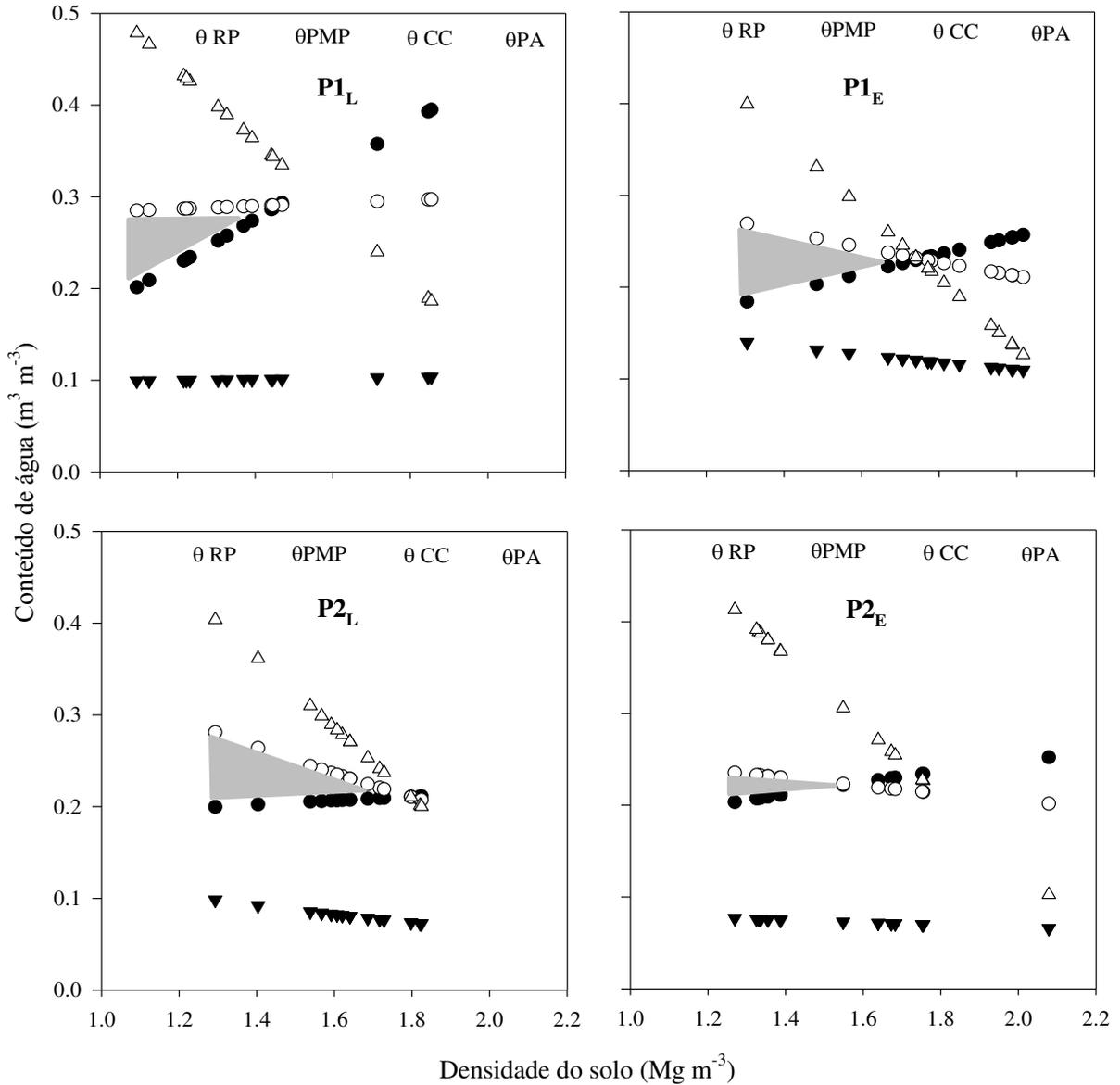


Figura 5: Variação do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência a penetração (θ_{RP}) de 3,0 MPa em função da densidade do solo A6 nas camadas de 0,0-0,1 m (P1) e 0,2-0,3 m (P2) nas linhas (L) e entrelinha (E) (As áreas na cor cinza correspondem ao intervalo hídrico ótimo)

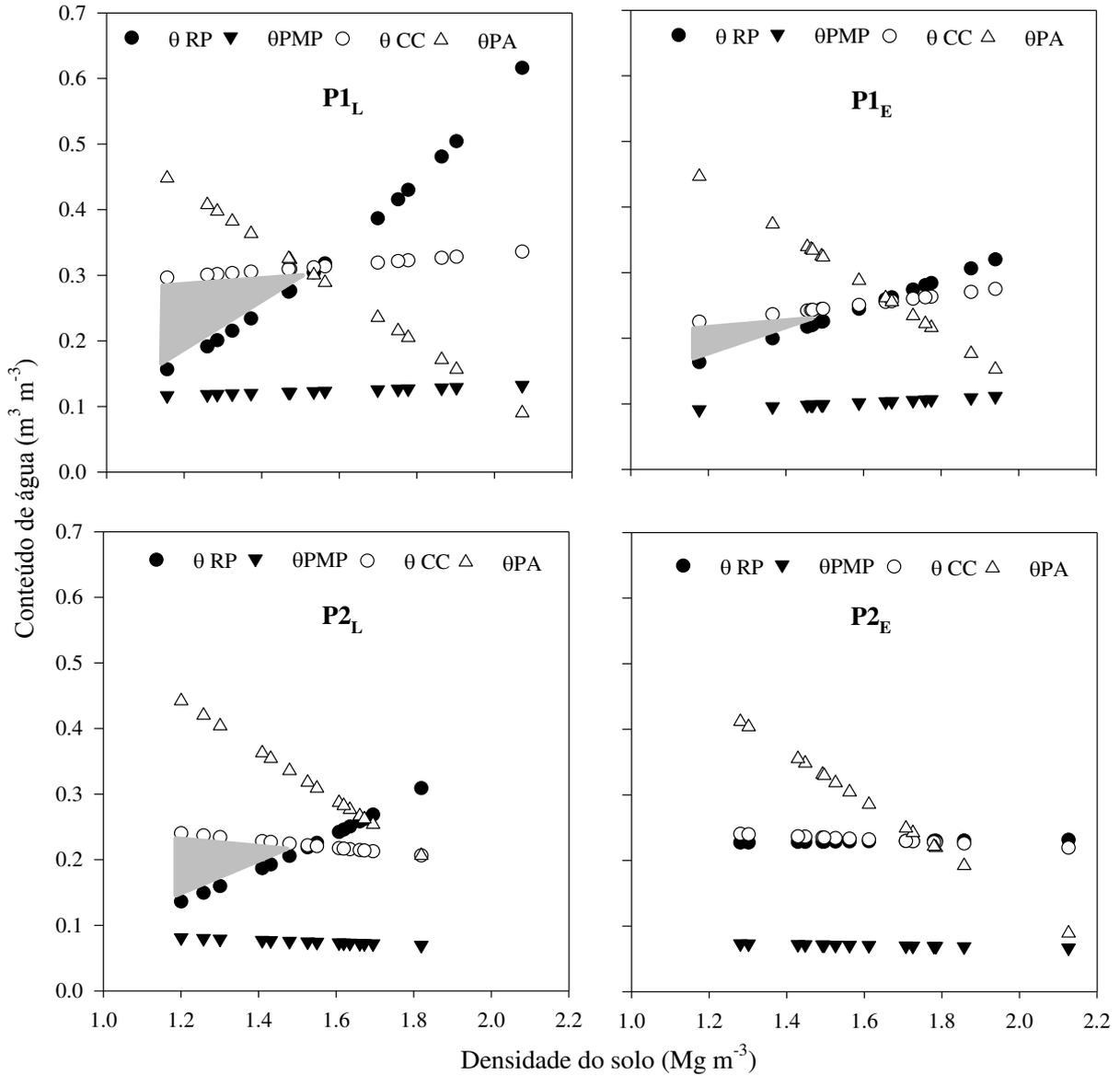


Figura 6: Variação do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência a penetração (θ_{RP}) de 3,0 MPa em função da densidade do solo A10 nas camadas de 0,0-0,1 m (P1) e 0,2-0,3 m (P2) nas linhas (L) e entrelinha (E) (As áreas na cor cinza correspondem ao intervalo hídrico ótimo)

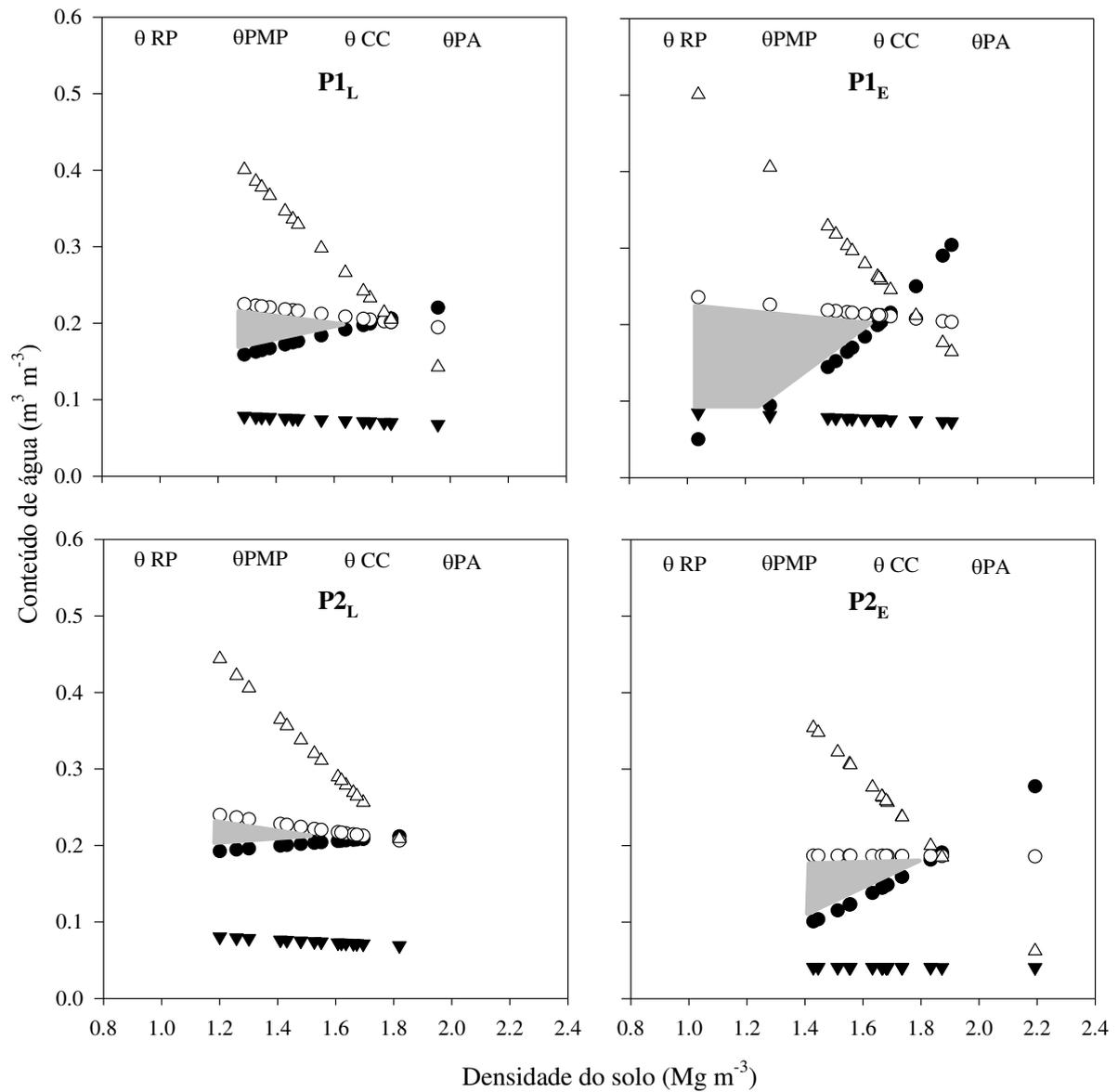
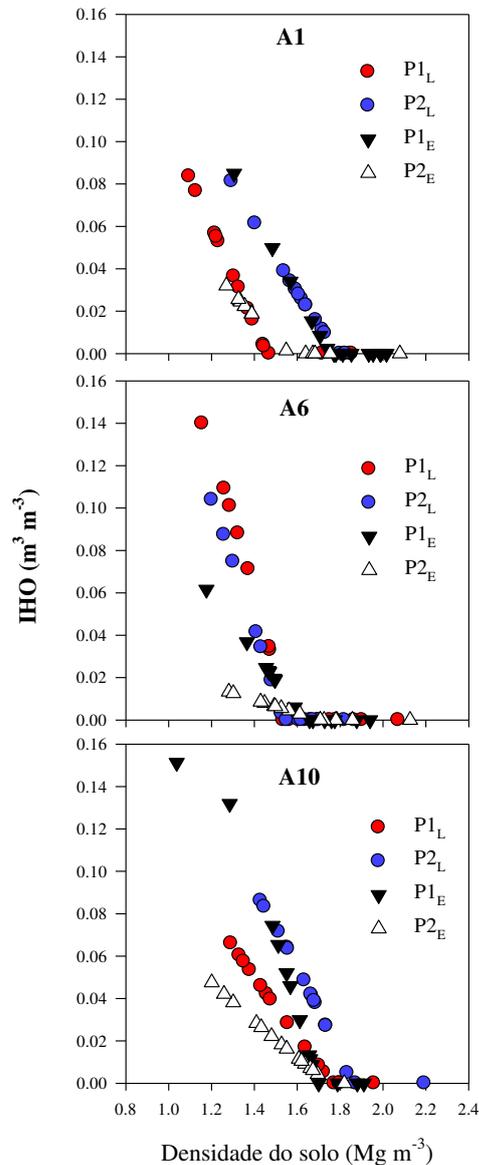


Tabela 3: Médias de macroporosidade (Ma), porosidade total (Pt), densidade do solo (Ds) e densidade crítica (Ds_{crit}) para solos coletados nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,2-0,3 m das linha (L) e entrelinha (E) de plantas de acerola em áreas com 1 (A1), 6 (A6) e 10 (A10) anos de cultivo, Ubajara-CE. ($n=30$).

Variável	A1 _L	A1 _E	A6 _L	A6 _E	A10 _L	A10 _E
0,00 - 0,10 m						
Ma ($m^3 m^{-3}$)	0,24	0,10	0,14	0,17	0,13	0,14
Pt ($m^3 m^{-3}$)	0,53	0,31	0,48	0,44	0,37	0,38
Ds ($kg dm^{-3}$)	1,40	1,75	1,56	1,59	1,57	1,58
Ds_{crit} ($kg dm^{-3}$)	1,49	1,75	1,51	1,63	1,76	1,69
0,20 - 0,30 m						
Ma ($m^3 m^{-3}$)	0,08	0,24	0,15	0,24	0,17	0,19
Pt ($m^3 m^{-3}$)	0,39	0,49	0,38	0,50	0,41	0,43
Ds ($kg dm^{-3}$)	1,63	1,54	1,55	1,58	1,68	1,60
Ds_{crit} ($kg dm^{-3}$)	1,80	1,56	1,54	1,71	1,85	1,75

Figura 7: Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) para solos coletados nas profundidades de 0,0-0,1 m (P1) e 0,2-0,3 m (P2) das linhas (L) e entrelinhas (E) de plantas de acerola em áreas com 1 (A1), 6 (A6) e 10 (A10) anos de cultivo, Ubajara-CE



Neste estudo, a escarificação nas entrelinhas em A6 proporcionou o aumento da $D_{s_{crit}}$ na camada superior, porém não melhorou as condições hídricas e nem físicas da camada inferior (Figuras 5 e 7). Em Latossolos sob plantio direto a escarificação proporcionou a ampliação do IHO pela redução da resistência a penetração (KLEIN; CAMARA, 2007). A contradição desses resultados pode estar associada as condições de umidade em que houve o transito de máquinas após a escarificação em A6. A pulverização do solo pela escarificação reduz a susceptibilidade à compactação do solo nas camadas superiores (PAIS et al., 2011),

consequentemente aumentou a profundidade em que as tensões aplicadas pelo trânsito de máquinas são distribuídas principalmente quando associada as condições de elevada umidade (ALAKUKKU et al., 2003;ARVIDSSON et al., 2001).

Assim como as áreas irrigadas por pivô apresentaram maior grau de compactação, também observou-se maior redução do intervalo hídrico ótimo (IHO) nas entrelinhas dos solos irrigados por pivô ($A1_E$ e $A6_E$), sugerindo que esse tipo de irrigação favorece a degradação dos solos. O aumento do conteúdo de água nas entrelinhas pela irrigação aumenta a susceptibilidade a compactação do solo aumentando o impacto do tráfego de máquinas na estrutura do solo, principalmente para estes solos que apresentarem baixos valores de U_{crit} , sendo facilmente compactados em baixos conteúdo de água. Dessa forma a irrigação localizada em solos com pomares pode contribuir na prevenção do aumento da compactação nas entrelinhas.

A ausência ou estreitas faixas de intervalo hídrico ótimo (IHO) apresentadas nas entrelinhas ($A1_E$ e $A6_E$) demonstram situação de solo degradado, pois embora haja disponibilidade de água, o IHO é inferior a água disponível (Figuras 4, 5 e 6). Segundo Pacheco e Cantalice (2011) nos sistemas de manejo que propiciam melhoria na qualidade estrutural do solo, o IHO é numericamente igual a água disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

Os efeitos da elevada resistência a penetração podem ser minimizados com aumento da frequência das irrigações, de maneira que os solos sejam mantidos sob maiores conteúdos de água, quando as condições são menos limitantes (TORMENA et al., 1999). Por outro lado, irrigações frequentes podem reduzir a eficiência da irrigação, aumentar a lixiviação de nutrientes e aumentar a susceptibilidade a compactação.

2.3.5 Compressibilidade do solo

A curva de compressão do solo obtida pelo ensaio de compressão uniaxial permite estimar o índice de compressão do solo (C_c) e a pressão de preconsolidação (σ_p), os quais, respectivamente, indicam a susceptibilidade a compactação do solo e a capacidade de carga que o solo é capaz de suportar sem que ocorra compactação adicional (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Os valores obtidos no ensaio de compressão foram ajustados pela equação de Gompertz (GREGORY et al., 2006). O parâmetro m da equação de Gompertz representa o ponto de inflexão da curva de compressão e deve ser restringido ao valor do logaritmo da máxima pressão aplicada, nesse caso $m \leq \log 1200 \text{ kPa}$, que é igual a 3,08. Quando o ponto de inflexão m encontra-se fora da dimensão das pressões mensuradas, a estimativa do índice de compressão resulta em valores incoerentes e a pressão de preconsolidação é superestimada (ARTHUR et al., 2011; GREGORY et al., 2006; KELLER et al., 2011).

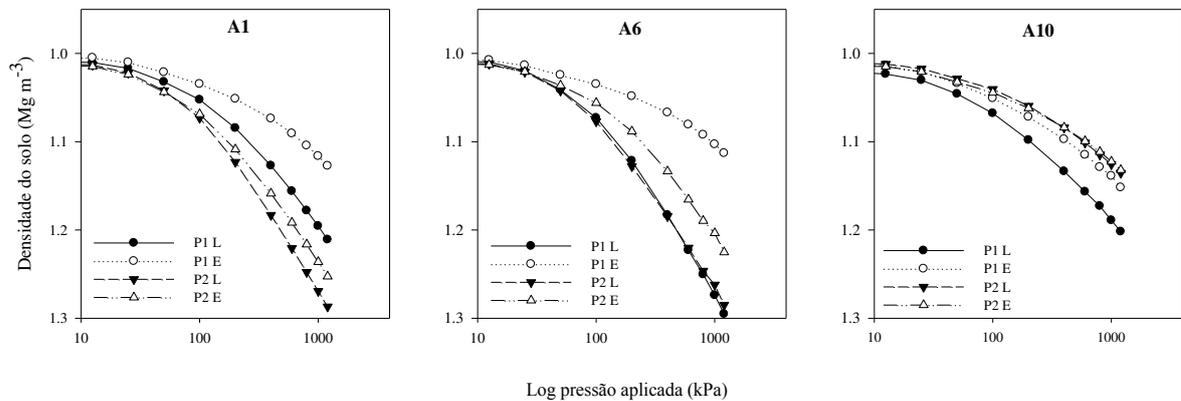
Todas as amostras em A6_E ficaram restringidas pelo elevado valor do parâmetro m em função da baixa variação do índice de vazios no início e no final do ensaio de compressão uniaxial o que impossibilitou a estimativa de C_c e σ_p . Esse resultado é explicado pela elevada densidade do solo nas amostras analisadas, o que resultou na menor curvatura da curva de compressão do solo (GREGORY et al., 2006; SILVA et al., 2002).

De modo geral, todas as linhas de plantio apresentaram valores superiores de C_c ($p < 0,05$) em ambas as camadas, com exceção do uso A10, a qual não apresentou diferenças significativas (Tabela 2).

As curvas de compressão representadas na Figura 8 foram normalizadas para eliminar o efeito da densidade inicial das amostras (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; OLIVEIRA et al., 2003). Observou-se no solo A10 menor redução da densidade do solo em função das cargas aplicadas, como pode ser observado na Figura 8. De modo geral, as entrelinhas da camada superior de A1 e A6 apresentaram menores reduções de densidade diante das cargas aplicadas, diferentemente do comportamento apresentado pelas linhas que apresentaram maiores reduções na densidade. Isso indica que o manejo adotado nas entrelinhas reduziu a susceptibilidade a compactação.

Os maiores valores de C_c nas linhas estão associados ao maior índice de vazios e a menor densidade do solo. Quanto maior o valor do C_c , maior é a susceptibilidade a compactação. Os solos mais adensados deformam menos quando são aplicadas pressões externas, resultando em menores valores de C_c (SUZUKI et al., 2008; FIGUEIREDO et al., 2011; KELLER et al., 2011).

Figura 8: Curvas de compressão normalizadas para solos coletados nas profundidades de 0,0-0,1 m e 0,2-0,3 m das linhas (L) e entrelinhas (E) de plantas de acerola em áreas com 1 (A1), 6 (A6) e 10 (A10) anos de cultivo, Ubajara-CE.



Os valores médios de σ_p variaram de 101 a 205 kPa para as situações avaliadas e encontram-se dentro da faixa de pressões de aplicadas por tratores, em torno de 30 a 150 kPa (PROFITT et al., 1993). Os valores observados foram inferiores a 274 kPa, observados por Lima et al. (2004) em Latossolo cultivado com citros, mas estão próximos aos obtidos por Silva et al. (2000) em amostras de solo com densidade de 1,46 a 1,60 Mg m⁻³ em Latossolo sob plantio direto e convencional.

Apesar do comportamento distinto da densidade do solo diante da pressão aplicada, os valores médios de σ_p das linhas e entrelinhas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) e nem tendências ($p < 0,20$). A ausência de diferenças entre os valores de σ_p observados pode estar associado aos maiores teores de carbono orgânico total das linhas ($p < 0,05$) que reflete a matéria orgânica do solo. A matéria orgânica aumenta a estabilidade de agregados pelo aumento nas ligações entre as partículas e os agregados do solo, o que resulta na preservação da estrutura do solo, proporcionando maior capacidade de suporte de carga e maior resistência à compactação adicional do solo (ASSIS; LANÇAS, 2005).

Considerando que a aplicação de cargas ao solo superiores a sua capacidade de suporte resulta no aumento da compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; DEC et al., 2011) e que o intervalo hídrico ótimo dos solos A1, A6 e A10 é reduzido com o aumento da densidade do solo, sugere-se que o manejo do tráfego de máquinas considere a capacidade de suporte de cargas dos solos de modo que esta não seja excedida.

Nos solos avaliados, a alta susceptibilidade a compactação em baixos teores de água dificultam o controle da umidade do solo para a entrada de maquinários, uma vez que as condições ideais de umidade para o trânsito de máquinas pode representar limitações hídricas

a cultura. Dessa forma a não irrigação das entrelinhas de plantio nos sistemas irrigados por microaspersão facilita o manejo das operações motomecanizadas sem reduzir a disponibilidade hídrica para a cultura.

2.4 CONCLUSÕES

Os principais efeitos negativos do uso e manejo sobre o solo foram o aumento da densidade e da resistência a penetração, o que possivelmente foi ocasionado pelo tráfego de máquinas em condições de alta umidade no solo. Consequentemente, o aumento do grau de compactação resultou na redução do intervalo hídrico ótimo.

A irrigação por pivô favoreceu o aumento da compactação nas entrelinhas de plantio, resultando em maiores reduções na disponibilidade hídrica para as plantas. A irrigação localizada pode auxiliar na redução dos efeitos negativos na estrutura do solo causados pelo frequente trânsito de máquinas em solos cultivados com pomares. Caso novas áreas de produção de acerolas irrigadas sejam implantadas na fazenda, sugere-se que a adoção de sistemas de irrigação localizados.

REFERÊNCIAS

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: A review. Part I – Machine/soil interactions. **Soil Till. Res.**, v.73; p.145-160, 2003.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2010. 129 p.
- ARAGÓN, A.; GARCIA, M. G.; FILGUEIRA, R. R.; PACHEPSKY, Y. A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. . **Soil Till. Res.**, v. 56, p. 197-204, 2000.
- ARTHUR, E.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P.; JONGE, de L.W. Soil resistance and resilience to mechanical stresses for three differently managed sandy loam soils, **Geoderma**, v. 173–174, p. 50-60, 2012.
- ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in Southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil Till. Res.**, v.60, p.67-78, 2001.
- ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.515-522, 2005.
- BECERRA, A. T.; BOTTA, G.F; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; VAZQUEZ, J.; RIVERO, D.; LINARES, P. ; NARDON, G. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almería España. **Soil Till. Res.**, v. 107, n.1, p. 49-56, 2011.
- BETIOLI JUNIOR, E.; MOREIRA, W. H; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, vol.36, n.3, p. 971-982, 2012.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, v.48, p.863-871, 2005.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, p. 363-375. 1986.
- BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W.; RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.73, p. 1871–1879, 2009
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Am. Soc. Agric. Eng.**, v.33, p.519-524, 1990.

- CANARACHE, A. Penetr – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Res.**, v.16, p.51-70, 1990.
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Effects of tillage systems on the soil physical properties of a dystrophic Red Latosol. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.137-147, 2006.
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technol.**, 8:139-151, 1995.
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, n.2, p.175-182, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; MORAES, S. M.; ALMEIDA, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, n. 2, p. 389-402, 2011.
- FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, p.487-493, 2000.
- FLINT, A.L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis: Physical methods**. Part 4. SSSA Book Series n.5., American Society of Agronomy, p.229-240,2002.
- FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F; LEITE, J. G. D. B.; Fraga, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, n.4, p.771-780, 2007.
- GREGORY, A.S.; WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil Till. Res.** v.89, p. 45–57, 2006.
- HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some Great Plain soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage and "minimum point" as related to 15- and 26-atmosphere percentages. **Soil Sci. Soc. Am. Pro.**, v.34, p.20-25, 1955.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Till. Res.**, v.16, p.105-120, 1990.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Till. Res.**, 53:71-85, 2000.
- HORN, R., FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Till. Res.**, v. 73, p. 89–99. 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.11-18, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 68, p.17-24, 2004.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 68, p.17-24, 2004.

IPECE. Informe - Nº 11 - Agronegócio Cearense: Um Balanço de 2010 e Desempenho no 1º Trimestre de 2011 [do] Instituto de Pesquisa e Planejamento Econômico do Estado do Ceará. Mensal.

JONES, R.J.A.; SPOOR, G.; THOMASSON, A.J. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: A preliminary analysis. **Soil Till. Res.**, v.73, p.131-143, 2003.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma.**, v.54, p.398-406, 2010.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P; DEXTER A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma.** v.163, n.1-2, p.13-23, 2011.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.221-227, 2007.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23. p.211-218, 1999.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.44, p.450-457, 1980.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Sci. Agric.**, v.61, n.6, p.649-654, 2004.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V. ; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.409-414, 2004.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHE, R. B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambien.**, v.13, p.39-45, 2009.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 38, p. 291-299, 2003.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

PAIS, P. S. A. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, G. A.; DIAS, A. C., GUIMARÃES, P. T. G.; Alcântara, E. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em latossolo vermelho-amarelo cultivado com cafeeiros. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 1949-1957, 2011.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambien.**, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PEREIRA, V. P. ; ORTIZ-ESCOBAR, M. E.; ROCHA, G. C.; ASSIS JUNIOR, R. N.; OLIVEIRA T. S. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. **Soil Res.**, v. 50, p. 455–464, 2012.

PIRES, B. S.; DIAS JUNIOR, M. S; ROCHA, W. W.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; CARVALHO, R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 36, n. 2, p. 635-642, 2012.

PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red - Brown earth. **Aust. J. Agric. Soil Res.**, v.44, p.317-331, 1993.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.297-300, 2005.

SAFFIH-HDADI, K., DÉFOSSEZ, P., RICHARD, G., CUI, Y.-J., TANG, A.-M., CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil Till. Res.**, v. 105, p. 96–103, 2009.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, n. 6, p. 921-930, 2006.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil Till. Res.**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil Till. Res.**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. ; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p.1775-1781, 1994.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M, GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v.167–168, p. 61-70, 2011.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. **Soil Till. Res.**, v. 16, p.179–201, 1990.

SOHI, S.; MAHIEU, N.; ARAH, J.R.M.; POLWSON, D.S.P.; MADARI, B. ;GAUNT, J.L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.65, p.1121-1128, 2001

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. Glossary of soil science terms. Disponível em: www.soils.org/publications/soils-glossary. Acesso em: 6 de setembro de 2012.

SPOOR, G.; TIJINK, F.G.J.; WEISSKOPF, P. Subsoilcompaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil Till. Res.**, v.73, p.175-182, 2003.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, n.3, p. 963-973, 2008.

SUZUKI, L.E.A. S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

TOBIAS, S.; TIETJE, O. Modelling experts' judgments on soil compaction to derive decision rules for soil protection-: A case study from Switzerland. **Soil Till. Res.**, v.92, p.129-143, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, v.3, p.286-292, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LI **Soil Till. Res.**, v. 57, n. 3, p. 167-172, 2000. DI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p.573-581, 1998.

VAN DIJCK, S.J.E; VAN ASCH, T.W.J, Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. **Soil Till. Res.**, v. 63, n. 3–4, p. 141-153, 2002.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de Tabuleiro Costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.309-316, 2010.

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 Till. Res.**, v. 92, p. 104-113, 2007.

XAVIER, F.A.S., OLIVEIRA, T.S.; ANDRADE, F. V., MENDONÇA, E.S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil, **Geoderma.**, v.151, p. 417-423, 2009.

XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30, p.247-258, 2006.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, H. Organic matter incorporation effects on mechanical properties of soil aggregates. **Soil Till. Res.**, v.31, p.263-175, 1994.

3. QUALIDADE FÍSICA DE UM LUVISSOLO CRÔMICO SOB SISTEMAS AGROFLORESTAIS

Autora: Rafaela Watanabe

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

RESUMO

A utilização do solo com sistemas agroflorestais (SAFs) em regiões semiáridas apresentam inúmeros benefícios ambientais como a preservação das espécies vegetais, ciclagem de nutrientes, redução da erosão, proteção de fontes de água, entre outros. O objetivo desse trabalho foi avaliar o grau de compactação e o comportamento compressivo de um Luvissole Crômico após 14 anos de uso com sistemas agrossilvipastoril (AGP) e silvipastoril (SILV), comparativamente a um solo sob vegetação natural (VN). Foram coletadas amostras de solos deformadas e indeformadas na profundidade de 0-5 cm para a avaliação do grau de compactação (GC), índice de compressão (Cc), pressão de preconsolidação (σ_p), densidade máxima ($D_{Sm\acute{a}x}$), umidade crítica ($U_{cr\acute{i}t}$) e os estoques de carbono orgânico total (E_{Cot}), matéria orgânica leve (E_{Mol}), carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) e nitrogênio da matéria orgânica leve (E_{Nmol}) dos solos. A implantação do SAFs resultou no aumento da $D_{Sm\acute{a}x}$ e na redução da $U_{cr\acute{i}t}$ e dos estoques de E_{Nmol} . O Cc e o GC não foram alterados. Os solos sob SAFs apresentaram condições físicas adequadas ao desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: compactação do solo, capacidade de suporte de cargas, semiárido, pisoteio animal.

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) have numerous environmental benefits in semiarid regions such as the preservation of plant species, nutrient cycling, reduction of erosion, protection of water sources, among others. The aim of this study was to evaluate the degree of compaction and compressive behavior of a Chromic Luvisol after 14 years of use with systems agrosilvopastoral (AGP) and silvopastoral (SILV), compared to a soil under natural vegetation (NV). Samples were collected from disturbed and undisturbed soil at a depth of 0-5 cm for the assessment of physical attributes (degree of compactness (GC), compression index (Cc), preconsolidation pressure (σ_p), maximum bulk density ($D_{Sm\acute{a}x}$) and critical water content

(U_{crit}) and chemical (total organic carbon stocks (E_{Cot}), light organic matter (E_{Mol}), carbon light organic matter (E_{Cmol}) and nitrogen light organic matter (E_{Nmol}) soils. deploying the SAF did not result in negative and limiting conditions for plant growth. Overall the negative effects of the implementation of the SAF were associated with reduced inventories of E_{Cot} , E_{Mol} , E_{Nmol} e E_{Cmol} , which resulted in changing the water holding capacity of soils.

Keywords: soil compaction, load bearing capacity, semiarid, animal trampling.

3.1. INTRODUÇÃO

A compactação é uma das principais causas da degradação da qualidade física dos solos com impactos diretos na estrutura do solo e indiretos na retenção e movimentação de água no perfil, comprometendo, assim, o desenvolvimento das plantas (HAMZA; ANDERSON, 2005; LIPIEC et al., 1998). Num contexto mais amplo, a tendência do aumento excessivo da compactação é a degradação ambiental, pois há o aumento das taxas de erosão, a contaminação das águas e a redução da diversidade biológica (PENGTHAMKEERATI et al., 2011; SOANE; VAN OUWERKERK, 1995).

As principais características do solo que influenciam o comportamento compressivo do solo são influenciadas pelo sistema de manejo adotado, principalmente o teor de matéria orgânica (ZHANG et al., 1997), a estrutura (SILVA et al., 2002a), a umidade do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999) e a densidade do solo (SUZUKI et al., 2007). Práticas e sistemas de manejos conservacionistas, comparativamente aos convencionais, como o plantio direto, o cultivo mínimo e a rotação de culturas degradam menos a estrutura do solo, reduzem as taxas de erosão e melhoram a qualidade do solo, além de aumentarem o sequestro de carbono no solo (LAL, 2004). A realização de operações motomecanizadas, o revolvimento excessivo do solo e o pisoteio dos animais em condições de umidade do solo excessiva estão entre as principais causas associadas ao aumento da compactação e degradação da estrutura dos solos (HAMZA; ANDERSON, 2005, LIPIEC; HATANO, 2003).

Alternativas como os sistemas agroflorestais (SAFs), uma combinação de espécies arbóreas com lavoura e/ou forrageiras, tais como algumas herbáceas nativas, gramíneas e leguminosas para alimentação animal, apresentam inúmeros benefícios, tanto ambientais como na produção. De acordo com Murgueitio et al. (2011), os benefícios com os SAFs envolvem a redução de erosão superficial e a minimização da compactação do solo devido a maior cobertura do solo, o aproveitamento eficiente dos nutrientes com a intensificação do

processo de ciclagem de nutrientes, pois combina um complexo sistema radicular com exploração de camadas mais profundas por diferentes espécies vegetais, além de curtos períodos de pastejo dos animais.

Diversos estudos abordam os impactos dos sistemas de uso e manejo do solo na compactação do solo utilizando, principalmente, os parâmetros físicos de densidade do solo e resistência à penetração (ALTIKAT; CELIK, 2011; BECERRA et al., 2010; COLLARES et al., 2008; FREDDI et al., 2007). Entretanto poucos buscam compreender o processo de compactação dos solos através das curvas de compressão do solo (SILVA et al., 2002) obtidos pelos ensaios Proctor e de compressão uniaxial.

A partir dos ensaios Proctor podem ser obtidos a densidade máxima ($D_{s_{máx}}$) e a umidade crítica (U_{crit}) do solo, os quais representam a densidade e a umidade em que ocorre a máxima compactação do solo. A $D_{s_{máx}}$ é utilizada como densidade de referência ($D_{s_{ref}}$) na determinação do grau de compactação do solo (GC), o que permite a comparação de diferentes tipos de solos para fins agrícolas, pois elimina o efeito da textura (HÅKANSSON, 1990; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000). Já o ensaio de compressão uniaxial fornece os valores de pressão de preconsolidação (σ_p), o que indica a máxima carga que o solo é capaz de suportar, e o índice de compressão (C_c), que expressa a susceptibilidade do solo a compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995).

De modo geral, os trabalhos de compressibilidade no Brasil foram aplicados principalmente para os sistemas de plantio direto (FIGUEIREDO et al., 2011; SILVA et al., 2002; VEIGA et al., 2007), plantio convencional (SILVA et al., 2002; VEIGA et al., 2007), pastagens (LIMA et al., 2004a), canaviais (PACHECO; CANTALICE, 2011; VASCONCELOS et al., 2012) e pomares (LIMA et al., 2004b), não havendo ainda estudos em áreas que adotaram SAFs. Considerando este aspecto e o fato de que o uso do solo promove alterações na qualidade física do solo, o objetivo desse trabalho foi avaliar o grau de compactação e o comportamento compressivo de um Luvissole Crômico após 14 anos de uso com sistemas agrossilvipastoril (AGP) e silvipastoril (SILV), comparativamente a um solo sob vegetação natural (VN).

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Caracterização da área de estudo e amostragem

A área de estudo faz parte de experimento de longa duração com sistemas agroflorestais em desenvolvimento pela Embrapa Caprinos e Ovinos, na Fazenda Crioula, Sobral-CE (Figura 1). A região apresenta clima tropical equatorial seco, muito quente e semiárido do tipo Bsw'h, de acordo com a classificação de Köppen, altitude média de 69 m, temperatura e precipitação pluvial médias anuais de 30°C e 798 mm, respectivamente. Os solos da área de estudo foram classificados como Luvisolo Crômico Órtico típico (AGUIAR et al., 2006). A caracterização química dos solos da área é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas de um Luvisolo, na camada de 0-6 cm, sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE

Sistema de uso	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CTC	H+Al	P	V	pH em água	pH em KCl	ΔpH
	----- cmol _c dm ⁻³ -----						mg kg ⁻¹	- % -			
AGP	20,80	4,50	0,19	1,57	27,36	0,32	461,50	98,70	7,26	6,40	-0,86
SILV	11,30	2,70	0,10	1,07	17,42	2,27	172,30	86,70	6,66	5,96	-0,70
VN	22,00	6,70	0,17	1,49	32,28	1,97	295,80	93,70	7,00	6,16	-0,84

AGP: agrossilvipastoril, SILV: silvipastoril, VN: vegetação nativa. Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis extraídos com KCl 1 mol.L⁻¹; Na⁺ e K⁺ trocáveis extraídos com Mehlich-1, H+Al extraídos por NH₄Ac pH 7; e pH na relação 1:2,5 (EMBRAPA, 1997). Fonte: Maia et al. (2006) e Nogueira et al. (2008).

Três áreas de estudo foram selecionadas no experimento, sendo duas sob SAFs: agrossilvipastoril (AGP) e silvipastoril (SILV) e uma área sob vegetação natural de caatinga (VN). De acordo com Maia et al. (2006), os dois SAFs (AGP e SILV) foram implantados em 1997, tendo sido ambos submetidos a um processo de redução da cobertura arbórea natural (raleamento), conservando-se aproximadamente 200 e 260 árvores ha⁻¹, respectivamente. Vinte matrizes ovinas pastejam nas áreas de SILV e AGP durante o período chuvoso e seco, quando a disponibilidade de forragens é reduzida. No AGP são realizados cultivos de milho (*Zea mays* L.) ou sorgo (*Sorghum bicolor* L) no período chuvoso, sendo estes destinados à complementação da alimentação dos animais no período seco. No AGP, o plantio é feito em faixas de 3,0 m de largura, separado por fileiras de leucena (*Leucaena sp.*), sendo realizadas,

ainda, podas da parte aérea da leucena e das brotações dos troncos e arbustos, os quais são depositados na superfície do solo. Antes do plantio no AGP, todo o esterco recolhido do aprisco utilizado pelo rebanho é aplicado ao solo manualmente para fertilização. O controle de plantas espontâneas e capinas é feito regularmente com tração animal. Esporadicamente no final do período seco e início do chuvoso, os animais são deslocados para a área VN onde passam o tempo suficiente para a recuperação da cobertura vegetal do SILV e também o preparo do solo do AGP para o plantio. Na região, os períodos chuvosos e secos compreendem os meses de dezembro/janeiro a maio/junho e junho/julho a dezembro, respectivamente, com precipitações pluviométricas bastantes variáveis no tempo e no espaço.

Em cada área de estudo, cinco amostras indeformadas na profundidade de 0-2,5 cm (anéis com 2,5 cm de altura e 7,4 cm de diâmetro), obtidas com amostrador do tipo Uhland e quatro deformadas foram coletadas aleatoriamente em dezembro de 2011 na profundidade de 0-5 cm. A profundidade de 0-2,5 cm foi escolhida pela presença de grande quantidade de cascalhos e calhaus nas camadas inferiores, típico de um Luvissole (EMBRAPA, 2006), o que dificulta a obtenção de amostras indeformadas.

3.2.2 Ensaio Proctor

O ensaio Proctor Normal foi realizado de acordo com Stancati et al. (1981). Para cada área amostrada no campo foram realizadas três repetições do ensaio de Proctor, considerando cinco teores de água, obtendo-se a curva de compactação, sendo o terceiro ponto da curva próximo à umidade crítica. As amostras indeformadas de solo foram compactadas em um anel metálico 10 cm de diâmetro e, altura de 12,73 cm, em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 0,305 m. Após aplicação dos golpes foi retirada uma amostra do corpo de prova para determinação da umidade do solo (U_g). Assim, para cada amostra, obtiveram-se cinco pares de valores de umidade (U_g) e densidade do solo (D_s), com os quais se ajustou o seguinte modelo matemático: $D_s = xU_g^2 + yU + z$, em que: D_s é a densidade do solo (kg dm^{-3}); U_g é o teor de água no solo (kg kg^{-1}); x , y e z são coeficientes obtidos no ajuste do modelo. Os valores da umidade crítica (U_{crit}) e de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) foram obtidos pela primeira derivada do modelo matemático expresso pelas equações $U_{crit} = -y/2x$ e $D_{s_{máx}} = (-y^2 - 4xz)/4x$. A densidade máxima e a umidade crítica foram representadas pela média das três repetições.

O grau de compactação (GC) foi determinado a partir dos dados de densidade do solo (D_s) e da densidade máxima ($D_{s_{máx}}$), de acordo com a equação proposta por Håkansson

(1990): $GC = D_s/D_{s_{m\acute{a}x}} \times 100$ em que GC é o grau de compactação em %, D_s é densidade do solo em kg dm^{-3} e $D_{s_{m\acute{a}x}}$ é a densidade máxima do solo em kg dm^{-3} .

3.2.3 Compressão solo

Para o ensaio de compressão uniaxial, as amostras indeformadas foram saturadas com água (capilaridade por 24h) e equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa, utilizando câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Posteriormente, estas amostras foram pesadas antes do início do ensaio de compressão uniaxial, para determinação do conteúdo de água. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado com um consolidômetro pneumático, desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (FIGUEIREDO et al., 2011). O ensaio consistiu da aplicação sucessiva e contínua dos carregamentos crescentes de 0; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 600; 800; 1000 e 1200 kPa, por um período de cinco minutos, o suficiente para atingir 99 % da deformação máxima do solo (SILVA et al., 2000). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24h, para determinação da densidade do solo (BLAKE; HARTAGE, 1986) e do teor de água da amostra expresso pelo grau de saturação. O índice de vazios foi determinado pela

A partir dos valores de deslocamento do solo no ensaio de compressão uniaxial foram calculados os índices de vazios para cada pressão aplicada, de acordo com a equação proposta por McBride e Joosse (1996), $e = D_p/D_s - 1$, em que D_p é a densidade de partículas do solo (kg dm^{-3}) e D_s é a densidade do solo (kg dm^{-3}). Para cada amostra, obteve-se 11 pares de valores de índice de vazios e pressão aplicada os quais foram utilizados na construção da curva de compressão pela equação de Gompertz (1925), como sugerido por Gregory et al. (2006), ajustada pelo método dos mínimos quadrados: $e = j + k \exp[-\exp(l((\log_{10} \sigma') - m))]$, em que e é o índice de vazios, σ' é a pressão aplicada (kPa) e j, k, l e m são coeficientes obtidos no ajuste dos dados ao modelo. Os coeficientes obtidos foram utilizados no cálculo do índice de compressão do solo (C_c) pelo modelo de Gregory et al. (2006) que estima a inclinação da reta de compressão virgem sendo o módulo da inclinação no ponto de inflexão (m) calculado pela equação $C_c = lk/\exp(1)$, em que: C_c é o índice de compressão, l e k são coeficientes obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Gompertz (1925) e $\exp(1)$ é a função exponencial do número 1.

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi determinada a partir da curva de compressão ajustada pela equação de Gompertz (1925), utilizando o algoritmo proposto por Imhoff et al. (2004) no software Mathcad®. Na primeira etapa o programa calcula a derivada segunda da

curva de compressão, que corresponde ao ponto máximo da curvatura da curva de compressão. No passo seguinte, o programa determina o valor mínimo da segunda derivada, cujo valor corresponde ao logaritmo na base 10 da pressão de preconsolidação.

3.2.4 Granulometria e densidade de partículas do solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta para a determinação dos teores argila (EMBRAPA, 1997), utilizando dispersão ultrassônica. A energia adotada para a sonificação foi de 204 J mL^{-1} . As frações de areia grossa e fina foram determinadas por peneiramento e o silte por diferença.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do deslocamento do gás (FLINT; FLINT, 2002) com a utilização do picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®, utilizando amostras de solo passadas em peneira de 2,0 mm e secas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2.5 Matéria orgânica leve e carbono e nitrogênio

Para a determinação da matéria orgânica leve (*MOL*), inicialmente, foram peneirados 500 g de solo seco ao ar em peneiras com malha de diâmetro 8 mm, 4 mm, 2 mm e 0,25 mm, sendo o material de solo retido em cada peneira, separado, pesado e armazenado. Posteriormente, 13 g de solo de cada uma das frações de solo retidas nas peneiras de 4mm, 2mm e 0,25 mm foram agitados em solução de NaI (densidade de $1,8 \text{ kg L}^{-1}$) e, em seguida, centrifugadas a 3.200 rpm por 15 minutos, seguido de separação da MOL por flotação (SOHI et al., 2001). O material suspenso foi separado em peneira de 0,025 mm, lavado com água destilada para remoção do NaI e seco em estufa a 65°C , sendo, posteriormente, pesado. Os teores de carbono e nitrogênio da matéria orgânica leve (C_{mol} e N_{mol}) de cada fração foi determinado por combustão via seca em analisador elementar.

Os teores de carbono orgânico total (*COT*) do solo foram determinados por oxidação da matéria orgânica via úmida na presença de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio sulfúrico e aquecimento externo (YEOMANS; BRENMER, 1988).

Os estoques de carbono orgânico total (E_{cot}), matéria orgânica leve (E_{mol}) e de carbono e nitrogênio da matéria orgânica leve (E_{Cmol} e E_{Nmol}) em cada uma das frações de solo separadas foram calculados pela expressão: E_{Cot} ou E_{MOL} ou E_{Cmol} ou $E_{Nmol} = t \times Ds \times h$, em que: E_{MOL} ou E_{Cmol} e E_{Nmol} é o estoque em Mg ha^{-1} ; t é o teor de *Cot* ou *MOL* ou C_{mol} ou N_{mol} em g kg^{-1} ; Ds é a densidade do solo em kg dm^{-3} ; h é a espessura da camada solo (dm).

3.2.6 Análise estatística

O conjunto de variáveis obtidos para cada uso (AGP, SILV e VN) foram comparadas pelo teste F e t considerando a comparação entre as médias e variâncias das situações de manejo (AGP e SILV) e destas com área de vegetação natural (VN).

Para verificar a homogeneidade da variância entre as populações foi realizado o teste F unilateral pelo quociente entre a maior e a menor variância: $F = S_A^2/S_B^2$ em que S_A^2 é a variância de maior valor e S_B^2 é a variância de menor valor.

A avaliação de diferenças nas variáveis entre os diferentes usos, quanto à média, foi feito com base no teste t bilateral. Para as populações com variância homogênea, o teste t foi aplicado conforme as equações: $t = (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) / \sqrt{S_c^2(1/n_1 + 1/n_2)}$ e $S_c^2 = ((n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)$, em que: $n_1 + n_2 - 2$ são os graus de liberdade; $\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$: são as médias das variáveis para as diferentes populações; s_1^2 e s_2^2 : são as variâncias para as duas populações utilizadas em cada comparação; S_c^2 : é a variância comum entre as populações; n_1 e n_2 : são os números de amostras de cada população (1 e 2) em comparação.

Nos casos em que a variância foi heterogênea, o cálculo do teste t foi feito utilizando a equação anterior, mas para o cálculo do número de graus de liberdade (n^*) utilizou-se a equação: $n^* = ((S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)) / ((S_1^2/n_1)/(n_1 - 1) + (S_2^2/n_2)/(n_2 - 1))$

O teste t foi realizado aos níveis de 5, 10, 15 e 20 % de probabilidade, considerando $p < 0,05$ como diferença estatística e para as demais probabilidades ($p > 0,05$ a $p < 0,20$) como tendência. O teste F foi realizado ao nível de 5% de probabilidade.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Não foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) pelo teste t entre os teores de argila, silte e areia fina e grossa, na camada de 0-5 cm, nas comparações entre os dois tipos de SAFs e VN (Tabela 2). Tais resultados permitem inferir que as diferenças quantitativas das classes texturais das situações estudadas não influenciaram os demais obtidos, principalmente os associados aos ensaios de compressibilidade, como também observado por Imhoff et al. (2004), Keller; Hakkanson (2010), Nhantumbo; Cambule (2006) e Spoor et al. (2003).

A densidade de partículas (Dp) diferiu entre os solos sob SAFs e VN ($p < 0,05$) pelo teste t , tendo sido observada a seguinte ordem: SILV > VN > AGP (Tabela 2). O maior valor de

Dp em SILV pode ser devido aos menores teores de argila e a redução dos estoques de carbono orgânico total (E_{Cot}).

Os estoques de carbono orgânico total (E_{Cot}), matéria orgânica leve (E_{Mol}) e carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) não foram alterados pela implantação dos SAFs. No entanto, os estoques e nitrogênio da matéria orgânica leve (E_{Nmol}) foram estatisticamente diferentes entre o uso AGP e VN ($p < 0,05$) e apresentaram numericamente a seguinte sequência: VN=SILV>AGP. Entre os usos SILV e VN, os estoques estudados apresentaram a tendência de serem estatisticamente diferentes ($p < 0,10$) (Tabela 2). Maia et al. (2008) também verificaram na mesma área de estudo maiores reduções dos estoques E_{Mol} e E_{Nmol} no solo sob AGP, o que foi atribuído a mobilização do solo realizada anualmente no AGP. Os estoques de matéria orgânica leve (E_{Mol}), carbono da matéria orgânica leve (E_{Cmol}) e nitrogênio da matéria orgânica leve (E_{Nmol}) são muito sensíveis as mudanças de uso e manejo do solo, razão pela qual são utilizados como indicadores de alterações no solo (MAIA et al., 2008; RANGEL-VASCONCELOS et al., 2012; XAVIER et al., 2006).

O grau de compactação (GC) expressa a densidade do solo em relação a uma densidade de referência, sendo um parâmetro mais útil que a primeira, pois permite eliminar as diferenças de textura e matéria orgânica. A densidade de referência (D_{sref}) utilizada na estimativa do GC pode ser obtida por amostras de solos deformadas aplicando uma pressão de 200 kPa (HÅKANSSON, 1990; HÅKANSSON; LIPIEC, 2000), em amostras indeformadas com aplicação de uma pressão de 1.600 kPa (SUZUKI et al., 2007) e a partir da densidade máxima obtida pelo ensaio Proctor (CARTER, 1990).

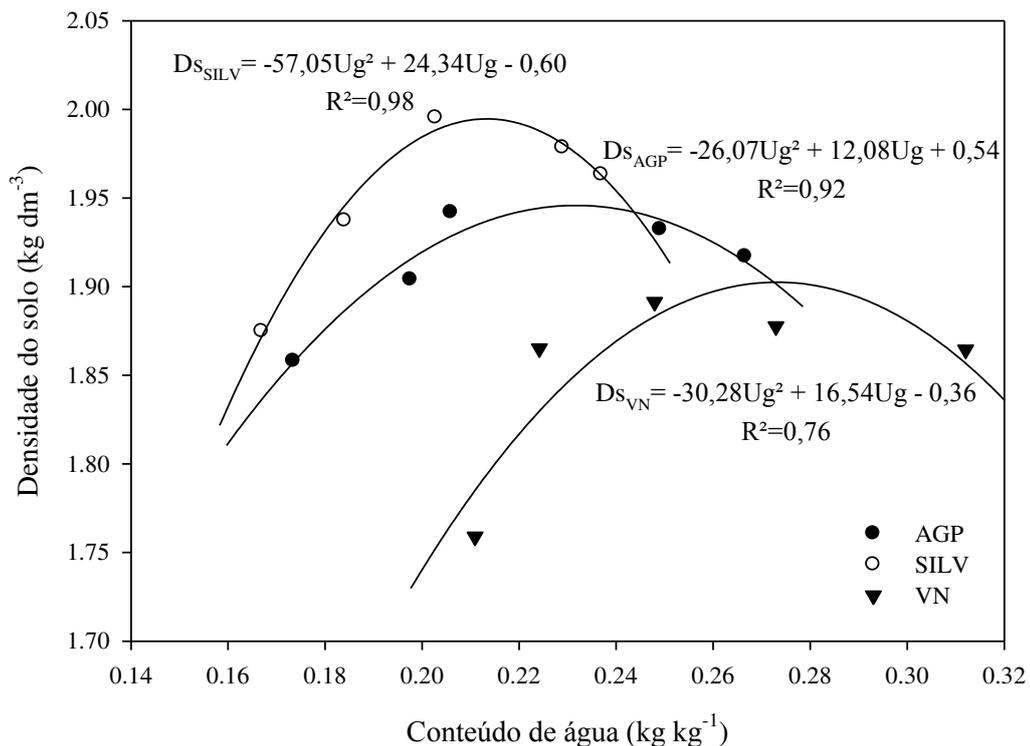
O grau de compactação (GC) das áreas AGP, SILV e VN foram iguais a 80, 81 e 83 %, respectivamente, sendo estatisticamente semelhantes ($p > 0,05$), não apresentando tendência de serem diferentes ($p > 0,20$) (Tabela 2), ou seja, a implantação do SAF não promoveu alterações na estrutura do solo que comprometessem o espaço poroso dos solos das áreas estudadas.

BETIOLI JUNIOR et al. (2012) e SILVA et al. (1994) verificaram que valores de GC iguais ou acima de 90% são limitantes ao desenvolvimento das plantas, o que indica que o GC dos solos avaliados encontram-se dentro da faixa de valores ótimos para o desenvolvimento das plantas. A produtividade máxima da cultura da soja foi obtida quando o GC foi de 80 % em um Latossolo de textura média (BEUTLER; CENTURION, 2004) e de 86 % num Argissolo (SUZUKI et al., 2007). Já para produção de cereais valores de GC na faixa de 77 a 84 % foram associados a máxima produtividade (CARTER, 1990). Também não foram

observadas diferenças ($p < 0,05$) e tendências ($p > 0,20$) estatísticas significativas (Tabela 2) entre as médias de $Ds_{máx}$.

No entanto, mesmo não havendo diferenças na $Ds_{máx}$ entre situações, observou-se que o solo em VN apresentou comportamento compressivo no ensaio Proctor diferenciado dos solos sob AGP e SILV (Figura 1). De modo geral, os solos sob SAFs apresentaram nos primeiros pontos da curva valores de densidades próximos ao ponto máximo do solo VN, ou seja, os solos sob SAFs (AGP e SILV) são mais facilmente compactados do que o solo sob VN, pois tendem a apresentar maiores densidades de solo em condições de menor conteúdo de água.

Figura 1. Densidade do solo (Ds) em função do conteúdo de água (Ug) obtido no ensaio Proctor em Luvissole Crômico sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.



Nhantumbo e Cambule (2006) avaliaram 22 solos de Moçambique com teores de argila variando de 9 a 60 %, no qual observaram os maiores valores de $Ds_{máx}$ para solos com teores de argila próximo a 20 %, como é o caso dos solos avaliados. Segundo os autores, a

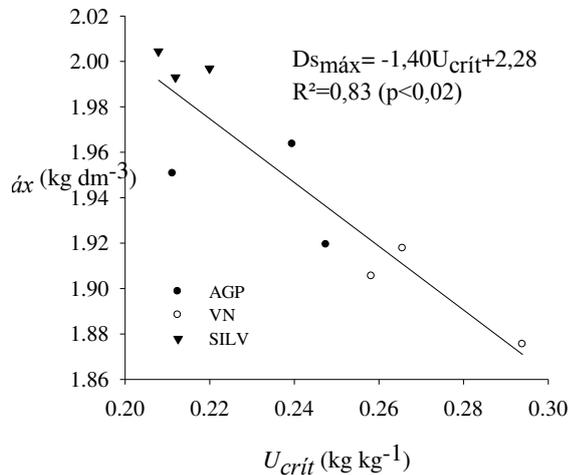
diversidade de partículas de solos distribuídas em diversas classes de tamanho favoreceram os elevados valores de $D_{smáx}$, pois aumentam as possibilidades do rearranjo das partículas para posições mais próximas.

Neste estudo, observou-se que os valores de $D_{smáx}$ obtidos pelo ensaio Proctor foram próximos aos resultados de densidade do solo após a aplicação da carga de 1200 kPa, representado pela densidade final do solo (D_{sf}). A utilização do ensaio de compressão uniaxial para obtenção da $D_{smáx}$ foi proposta por Reichert et al. (2011) e Suzuki et al. (2007). Esse autores sugerem a aplicação de cargas superiores a 800 a 1600 kPa para a obtenção da densidade de referência a partir de amostras indeformadas pelo ensaio de compressão uniaxial.

Para testar a similaridade das variáveis $D_{smáx}$ e D_{sf} , utilizou-se o intervalo de confiança das médias ao nível de confiança de 95 % ($IC\ 95\ \%$), conforme Payton et al. (2000), e constatou-se que as variáveis $D_{smáx}$ (média = 1,95 kg dm⁻³; $IC\ 95\ \% = 0,03\ \text{kg dm}^{-3}$) e D_{sf} (média = 2,00 kg dm⁻³; $IC\ 95\ \% = 0,04\ \text{kg dm}^{-3}$) foram estatisticamente iguais (sobreposição do intervalo de confiança), ou seja, o valor de densidade de amostras indeformadas após a aplicação da carga de 1200 kPa no ensaio de compressão uniaxial podem ser utilizadas como densidade de referência dos solos estudados.

A mudança de VN para AGP e SILV influenciou a $U_{crít}$ obtida no ensaio Proctor, apresentando a seguinte sequência: VN>SILV>AGP, sendo estatisticamente diferentes ($p<0,05$) pelo teste t em todas as comparações feitas entre SAFs e também com VN (Tabela 2). Observou-se que, tanto os valores de $U_{crít}$ quanto os (U_g), foram maiores em VN, o que pode ser explicado pelos valores numericamente maiores dos teores de argila e dos estoques de carbono orgânico total (E_{Cot}) e de matéria orgânica leve (E_{Mol}). Os resultados de $U_{crít}$ indicam que a mudança de uso de VN para AGP e SILV e consequente redução dos estoques de E_{Cot} e E_{Mol} favoreceram a maior compactação do solo em menores umidades do solo, como são os casos de SILV e AGP, pois quanto menor a $U_{crít}$ maior a densidade máxima ($D_{smáx}$) ($R^2=0,83$) (Figura 2).

Figura 2. Relação entre densidade máxima ($D_{smáx}$) e umidade crítica ($U_{crít}$) pelo ensaio Proctor em um Luvissole sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.



Arágon et al. (2000) atribuíram aos maiores teores de COT , a menor $D_{smáx}$, independente da classe textural (BLANCO-CANQUI et al., 2009; DÍAS-ZORITA; GROSSO, 2000). O COT foi a variável determinante nas funções de pedotransferência para determinação da $D_{smáx}$ e $U_{crít}$ para os solos da região dos Pampas na Argentina sendo a variável com maior grau de explicação da $D_{smáx}$ (ÁLVAREZ et al., 2010).

Segundo Soane (1990), a influência da matéria orgânica sobre a densidade e a umidade do solo estão associados: (i) ao baixo peso específico da matéria orgânica quando adicionada ao solo; (ii) ao aumento da retenção de água devido a sua alta superfície específica; e (iii) ao efeito amortecedor dissipando energia.

Os valores de umidade crítica ($U_{crít}$), os quais resultam na máxima densidade do solo foram inferiores aos da umidade gravimétrica (U_g) das amostras indeformadas equilibradas no potencial matricial de -10 kPa, cujos valores correspondem a umidade do solo na capacidade de campo. Mesmo em condições de elevado conteúdo de água, como na capacidade de campo (U_g), os solos apresentam menor probabilidade de atingirem a densidade máxima, pois o conteúdo de água encontra-se abaixo do valor de $U_{crít}$ (BETIOLI JUNIOR et al., 2012; FIGUEIREDO et al., 2000).

Tabela 2: Médias, coeficiente de variação (CV), variâncias e significâncias das comparações das propriedades físicas e químicas da camada de 0-5 cm de um Luvissole Crômico sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.

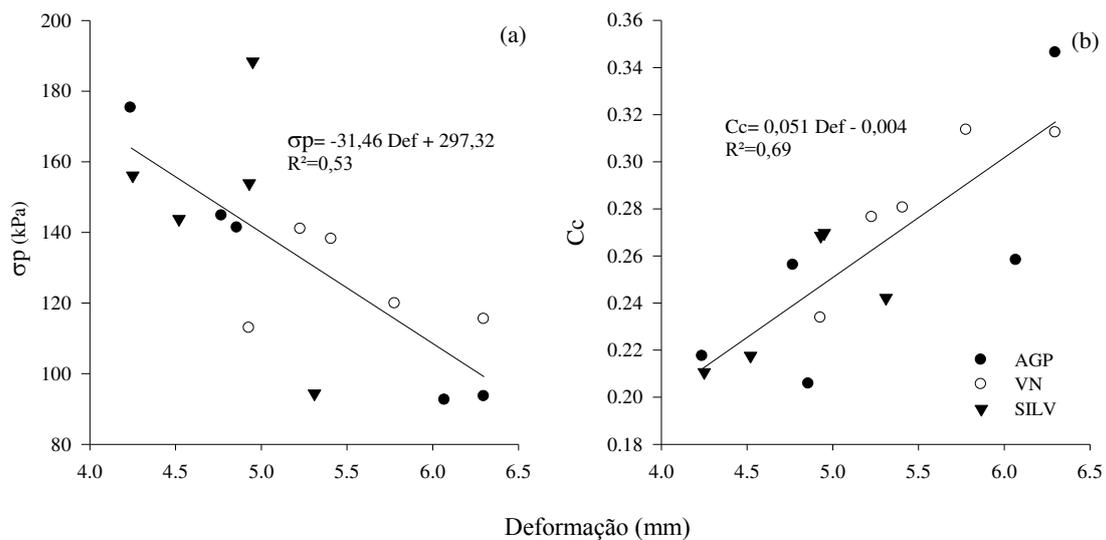
Variável	Média			CV (%)			Variância			AGP	SILV	AGP
	AGP	SILV	VN	AGP	SILV	VN	AGP	SILV	VN	vs VN	vs VN	vs SILV
<i>Argila</i> (g kg ⁻¹)	174,55	126,03	186,33	11,21	14,10	17,38	19,57	17,77	32,39	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>Silte</i> (g kg ⁻¹)	219,05	179,09	219,75	12,72	8,01	18,37	27,87	14,34	40,38	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>AG</i> (g kg ⁻¹)	280,08	468,09	335,26	19,27	8,75	27,72	53,96	40,96	92,94	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>AF</i> (g kg ⁻¹)	326,32	226,79	258,67	10,16	13,89	15,57	33,15	31,5	40,27	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>AT</i> (g kg ⁻¹)	606,40	694,88	593,93	5,47	4,55	11,89	33,17	31,64	70,6	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>Dp</i> (kg dm ⁻³)	2,64	2,73	2,65	0,60	0,69	0,76	0,04	0,04	0,04	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>Cc</i> (-)	0,26	0,24	0,28	21,50	11,42	11,54	>0,00	>0,00	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>σ_p</i> (kPa)	129,42	147,31	125,39	27,65	23,08	10,46	1280,77	1155,75	172,04	n.s.(*)	n.s. (*)	n.s. (n.s.)
<i>D_smax</i> (kg dm ⁻³)	1,94	2,00	1,90	1,17	0,29	1,15	>0,00	>0,00	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>U_{crit}</i> (kg kg ⁻¹)	0,23	0,21	0,27	8,18	2,88	6,91	>0,00	>0,00	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>D_sσ_p</i> (kg dm ⁻³)	1,69	1,74	1,70	6,83	4,25	2,23	0,01	0,01	>0,00	n.s. (*)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>e₀</i> (-)	0,70	0,69	0,68	17,58	13,44	5,77	0,01	0,01	>0,00	* (*)	* (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>D_{si}</i> (kg dm ⁻³)	1,56	1,62	1,57	6,96	5,34	2,28	0,01	0,01	>0,00	* (*)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>D_{sf}</i> (kg dm ⁻³)	1,98	2,00	2,02	5,45	4,36	2,96	0,01	0,01	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>GC</i> (%)	80,40	80,91	82,86	6,96	5,34	2,28	31,35	18,68	3,56	n.s. (*)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>U_v</i> (m ³ m ⁻³)	0,24	0,21	0,30	12,57	6,20	8,15	>0,00	>0,00	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>U_g</i> (kg kg ⁻¹)	0,16	0,13	0,19	11,32	5,31	6,17	>0,00	>0,00	>0,00	* (n.s.)	* (n.s.)	* (n.s.)
<i>Def</i> (mm)	5,25	4,79	5,53	16,98	8,60	9,57	0,79	0,17	0,28	n.s. (n.s.)	* (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>E_{Cor}</i> (Mg ha ⁻¹)	22,12	31,55	44,36	31,16	17,57	21,44	47,51	30,71	90,46	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>E_{Mol}</i> (Mg ha ⁻¹)	19,24	29,08	33,40	39,94	46,36	53,21	59,05	181,73	>0,00	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)
<i>E_{Nmol}</i> (Mg ha ⁻¹)	0,30	0,45	0,55	39,98	42,83	47,33	0,01	0,04	0,07	* (n.s.)	+ (n.s.)	* (n.s.)
<i>E_{Cmol}</i> (Mg ha ⁻¹)	6,23	11,11	10,68	39,80	48,70	55,18	6,15	29,27	34,76	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)	n.s. (n.s.)

Argila: < 0,002 mm; *Silte*: (0,002-0,053 mm); *AG*: areia grossa (0,20-2,00 mm); *AF*: areia fina (0,053-0,20 mm); *AT*: areia total (0,053-2,00 mm); *Dp*: densidade de partículas; *Cc*: índice de compressão; *σ_p*: pressão de preconsolidação; *D_smax*: densidade máxima; *U_{crit}*: umidade crítica; *D_sσ_p*: densidade do solo na pressão de preconsolidação; *e₀*: índice de vazios; *D_{si}*: densidade do solo no início do ensaio de compressão uniaxial; *D_{sf}*: densidade do solo no final do ensaio de compressão uniaxial; *GC*: grau de compactação; *U_v*: umidade volumétrica; *U_g*: umidade gravimétrica; *Def*: deformação do solo após aplicação da carga de 1200 kPa; *E_{Cor}*: estoque de carbono orgânico total do solo; *E_{Mol}*: estoque de matéria orgânica leve do solo; *E_{Nmol}*: estoque de nitrogênio da matéria orgânica leve do solo do solo; *E_{Cmol}*: estoque de carbono da matéria orgânica leve do solo do solo; ^{n.s.} não significativo, * significativo a 5 %, + significativo a 10 %, +++ significativo a 20 % pelo teste *t* para as médias e pelo teste *F* para a variância; Média (variância).

A susceptibilidade a compactação do solo foi avaliada pelo índice de compressibilidade (*Cc*), o qual apresentou valores estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) pelo teste *t* (Tabela 2) para as comparações realizadas. Os valores médios de *Cc* e a deformação do solo ao final do ensaio (*Def*) seguiram a seguinte ordem: VN>AGP>SILV (Tabela 2). Quanto maior a deformação maior foi o *Cc* (Figura 4a) e menor a pressão de preconsolidação (σ_p) (Figura 4b), ou seja, solos que apresentaram menor σ_p foram mais compactados durante o ensaio de compressão uniaxial, pois deformaram mais facilmente quando sujeitos a aplicação de cargas externas, sendo, portanto, mais suscetíveis a compactação. Essas relações também

foram verificadas por Suzuki et al. (2008) e demonstraram a maior susceptibilidade a compactação em solos com baixa capacidade de suporte de cargas.

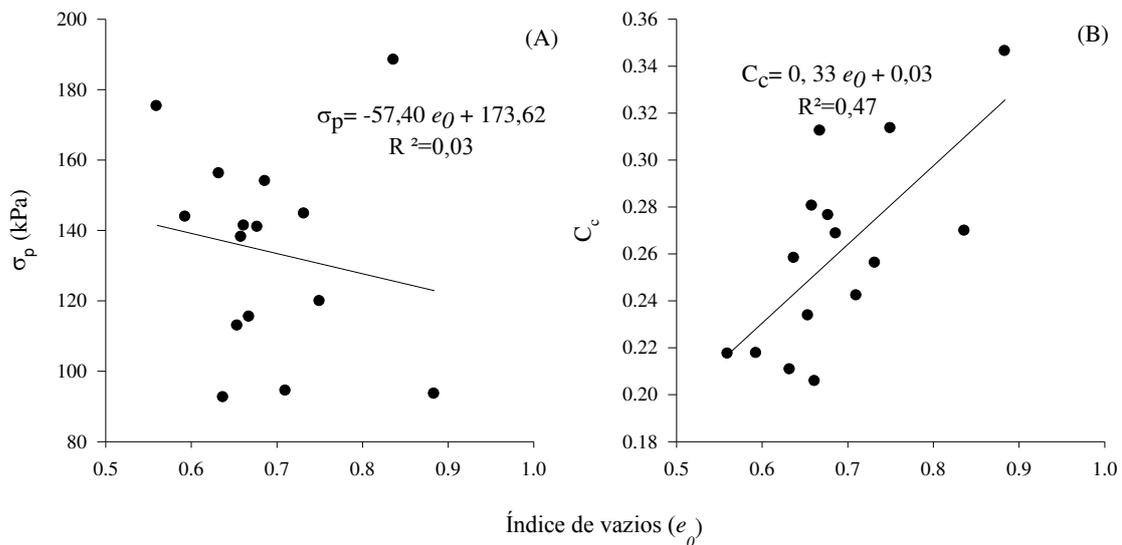
Figura 3: Relação entre a deformação do solo ao final do ensaio de compressão uniaxial e o índice de compressão (C_c) (a) e a pressão de preconsolidação (σ) (b), em um Luvisolo Crômico sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.



De maneira geral, os solos avaliados apresentaram homogeneidade das condições granulométricas, o que sugere que a variação no índice de compressão (C_c) foi influenciado principalmente pela umidade volumétrica inicial (UV_i) nas diferentes situações estudadas. A UV_i foi estatisticamente diferente entre os solos AGP, SILV e VN ($p < 0,05$) (Tabela 3), sendo maior em VN, o que pode ter influenciado na sua maior susceptibilidade à compactação. O aumento da umidade do solo resulta no aumento da susceptibilidade a compactação (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; OLIVEIRA et al., 2008; SILVA et al., 2002b; SILVA; CABEDA, 2006; VASCONCELOS et al., 2012).

Vários autores verificaram uma alta relação entre o índice de compressão (C_c) e o índice de vazios (e_0). Para os solos avaliados, a relação entre o índice de vazios e a pressão de preconsolidação (σ_p) foi baixa ($R^2 = 0,03$) (Figura 5a) e com o C_c não foi muito alta ($R^2 = 0,47$) (Figura 5b). No entanto verificou-se a mesma tendência dos demais estudos, pois, com o aumento do e_0 , o solo torna-se mais susceptível a compactação, uma vez que apresentam maior espaço poroso para a movimentação e arranjo das partículas do solo para posições mais próximas quando forças externas são aplicadas.

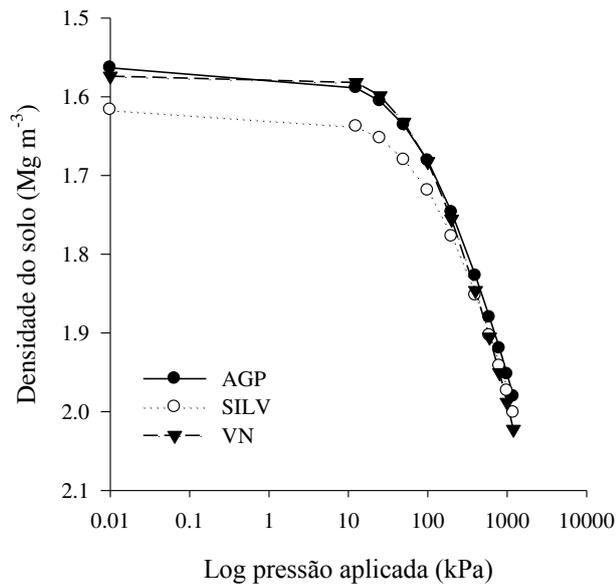
Figura 4: Relação entre o índice de vazios (e_0) e a pressão de preconsolidação (σ_p) (A), e o índice de compressão (C_c) (B), em um Luvissole sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.



Os valores médios de σ_p dos solos AGP e SILV foram estatisticamente semelhantes a VN ($p < 0,05\%$) (Tabela 3), ou seja, não foram alterados pela implantação dos SAFs. Esses resultados sugerem que o uso e manejo do solo sob SAFs não impactaram negativamente o solo em relação à vegetação nativa, como pode ser observado na Figura 6, em que os solos AGP, SILV e VN apresentaram curvas de compressão do solo com comportamento semelhantes.

Os valores próximos de GC e de densidade do solo (D_s) entre os solos AGP, SILV e VN (Tabela 2) evidenciam o baixo impacto da implantação do SAFs sobre as propriedades físicas do solo, justificando as semelhanças entre os valores de σ_p dos solos avaliados. Diversos trabalhos demonstraram a influência da D_s sobre a σ_p , nos quais se verificam o aumento da σ_p a medida que os valores de D_s aumentam (CANARACHE et al., 2000; FIGUEIREDO et al., 2011; IMHOFF et al., 2004).

Figura 5: Densidade do solo (D_s) em função da pressão aplicada no ensaio de compressão uniaxial em Luvissole sob sistemas agroflorestais (AGP e SILV) e vegetação natural (VN) em Sobral-CE. AGP: agrossilvipastoril; SILV: silvipastoril e VN: vegetação natural.



A semelhança de pressão de pré-consolidação (σ_p) dos solos sob SAFs em relação ao solo VN pode estar associado a ausência de efeitos negativos sobre a estrutura do solo como verificado por Goosey et al. (2005) e Hatfield et al. (2007) e ao controle do pastejo dos animais adotado nos SAFs. Os animais pastejam por curtos períodos durante o dia e em alguns meses do ano na época da seca, quando o solo apresenta baixos teores de umidade, o que conseqüentemente proporciona maior resistência às deformações causadas por forças externas aplicadas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; VASCONCELOS et al., 2012).

Os valores médios de pressão de pré-consolidação (σ_p) para as amostras equilibradas na capacidade de campo (-10 kPa) encontram-se na faixa de 119 a 132 kPa, o que de acordo com a classificação de Horn e Fleige (2003), podem ser considerados muito altos, uma vez que esta classe envolve o intervalo das σ_p entre 120 e 150 kPa. Segundo Willatt e Pullar (1983) *apud* PROFFITT et al. (1993), a pressão exercida pelo pisoteio de ovinos pode atingir valores superiores a 200 kPa, ou seja, solos com σ_p inferiores a 200 kPa como os solos avaliados (AGP, SILV e VN) são susceptíveis ao aumento da compactação pelo pisoteio de ovinos.

Os valores médios de densidade do solo na pressão de pré-consolidação (Ds_{σ_p}) foram estatisticamente maiores para o solo sob SILV ($p < 0,05$). Resultados encontrados por Silva et al. (2011) demonstraram que as densidades críticas (IHO = 0) para o intervalo hídrico ótimo (IHO) para as mesmas áreas deste estudo, na profundidade de 0-5 cm, foram de 1,69; 1,62; e 1,56 kg dm⁻³ para AGP, SILV e VN, respectivamente. Comparando os resultados de densidade crítica obtidos por Silva et al. (2011) com os de Ds_{σ_p} (Tabela 2), verificou-se que a aplicação de cargas iguais ou superiores a σ_p resultará condições limitantes para o desenvolvimento das plantas.

3.4 CONCLUSÕES

A utilização dos solos com os sistemas agroflorestais (silvipastoril e agrossilvipastoril) reduziram a umidade crítica do solo e aumentaram a densidade máxima, no entanto a alteração dessas propriedades após o período de 14 anos não refletiram no aumento do grau de compactação do solo e na alteração da capacidade de suporte de cargas dos solos.

Os estoques de nitrogênio da matéria orgânica leve foram reduzidos nas áreas em que os SAFs (AGP e SILV) foram implantados.

Os sistemas agroflorestais avaliados preservaram a qualidade física dos solos.
alternativas

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M.I.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S., MENDONÇA, E.S.; ARAUJO FILHO, J.A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Rev. Ci. Agron.**, v.37, n.03, p.270-278, 2006.
- ALTIKAT, S.; CELIK, A. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions. **Soil Till. Res.**, v.114, p.1-8, 2011.
- ALVAREZ, C.R.; MICUCCI, F.G.; BUSTINGORRI, C.; TABOADA, M.A. Pedotransfer functions to estimate proctor test parameters under different tillage systems. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.34, p. 1787-1793, 2010.
- ARAGÓN, A.; GARCIA, M.G.; FILGUEIRA, R.R.; PACHEPSKY, Y.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. **Soil Till. Res.**, v.56, p.197-204, 2000.
- BECERRA, A.T.; BOTTA, G.F; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; VAZQUEZ, J.; RIVERO, D.; LINARES, P. ; NARDON, G. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almería España. **Soil Till. Res.**, v. 107, n.1, p. 49-56, 2011.
- BETIOLI JUNIOR, E.; MOREIRA, W.H; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, vol.36, n.3, p.971-982, 2012.
- BEULTER, A.N.; CENTURION, J.F. Effect of soil compaction in root development and in soybean yield. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.39, p.581-588, 2004.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, p.363-375. 1986.
- BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R; SCHLEGEL, A.J.; LYON,D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W.; RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.73, p.1871-1879, 2009.
- CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil Till. Res.**, v.56, p.185-196, 2000.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Can. J. Soil Sci.**, v.70, p.425-433, 1990.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.933-942, 2008.
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technol.**, v.8, p.139-151, 1995.

DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil Till. Res.**, v.54, n.1-2, p.121-126, 2000.

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

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

FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S. M.; ALMEIDA, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, n.2, p.389-402, 2011.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, p.487-493, 2000.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis: Physical methods**. Part 4. SSSA Book Series n.5., American Society of Agronomy, p.229-240, 2002

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.M.; ARATANI, R.G., LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.627-636, 2007.

GOOSEY, H.B.; HATFIELD, P.G.; LENSSEN, A.W.; BLODGETT, S.L.; KOTT, R.W. The potential role of sheep in dryland grain production systems. **Agr. Ecosyst. Environ.**, v.111, p.349-353, 2005.

GREGORY, A.S.; WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil Till. Res.** v.89, p. 45-57, 2006.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Till. Res.**, v.16, p.105-120, 1990.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Till. Res.**, 53:71-85, 2000.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, v.82, n. 2, p.121-145, 2005.

HATFIELD, P.G.; GOOSEY, H.B.; SPEZZANO, T.M.; BLODGETT, S.L.; LENSSEN, A.W.; KOTT, R.W.; MARLOW, C.B. Incorporating sheep into dryland grain production

systems III. Impact on changes in soil bulk density and soil nutrient profiles. **Small Ruminant Res.**, v.67, p.222-231, 2007.

HORN, R., FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Till. Res.**, v.73, p.89-99, 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.68, p.17-24, 2004.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v.54, p.398-406, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-662.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, p. 1-22, 2004.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEAO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, vol.28, n.6, p. 945-951, 2004a.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.409-414, 2004b.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil Till. Res.**, v.19, p.307-317, 1991.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v.116, p.107-136, 2003.

MAIA, S.M.F., XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ARAÚJO FILHO, J.A. Frações de nitrogênio em Luvisolo sob sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.382-392, 2008.

MAIA, S.M.F.; XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ARAÚJO FILHO, J.A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. **Rev. Árvore**, v.30, p.837-848, 2006.

MURGUEITIO, E.; CALLE, Z.; URIBE, F.; CALLE, A.; SOLORIO, B. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. **For. Ecol. Manage.**, v. 261, p.1654-1663, 2011.

- 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 Till. Res.**, v. 87, p.231-239, 2006.
- PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, p.403-415, 2011.
- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Comm. Soil Sci. Plant. Anal.**, v.31, p.547-551, 2000.
- PENGTHAMKEERATI, P., MOTAVALLI, P.P., KREMER, R.J. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil. **Appl. Soil Ecol.**, v.48, p.71-80, 2011.
- PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red - Brown earth. **Aust. J. Soil Res.**, v.44, p.317-331, 1993.
- RANGEL-VASCONCELOS, L.G.T.; KATO, O.R.; VASCONCELOS, S.S. Matéria orgânica leve do solo em sistema agroflorestral de corte e trituração sob manejo de capoeira. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.47, p. 1142-1149, 2012.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop, production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till. Res.**, v.102, p.242-254, 2009.
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, n. 6, p. 921-930, 2006.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p.1775-1781, 1994.
- SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M; GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v.167-168, p. 61-70, 2011.
- 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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002b.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.4, p.239-249, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M; SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 1-8, 2002a.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. **Soil Till. Res.**, v. 16, p.179–201, 1990.

SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C., Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment, **Soil Till. Res.**, v.35, n.1-2, p.5-22, 1995.

SOHI, S.; MAHIEU, N.; ARAH, J.R.M.; POLWSON, D.S.P.; MADARI, B.; GAUNT, J.L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.65, p.1121-1128, 2001.

SPOOR, G.; TIJINK, F.G.J.; WEISSKOPF, P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil Till. Res.**, v.73, p.175-182, 2003.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, n.3, p.963-973, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, n.3, p. 963-973, 2008.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório de mecânica dos solos**. São Carlos: USP, 1981. 208 p.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.309-316, 2010.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; MOURA, G.B.A.; ROLIM, M.M.; MONTENEGRO, C.E.V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v.36, p.525-536, 2012.

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 Till. Res.**, v.92, p.104-113, 2007.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p.239-245, 1997.