

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO TEOR DE ÁGUA NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO
DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO AGRÍCOLA E SEU REFLEXO
NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO**

BARBARA BARRETO FERNANDES

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Maio – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO TEOR DE ÁGUA NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO
DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO AGRÍCOLA E SEU REFLEXO
NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO**

BARBARA BARRETO FERNANDES

Orientador: Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Campus
de Botucatu, para obtenção do título de mestre
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Maio – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F363e **Fernandes, Barbara Barreto, 1989-**
Efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo causada pelo tráfego agrícola e seu reflexo nos atributos físicos do solo / Barbara Barreto Fernandes. - Botucatu : [s.n.], 2015
xii, 97 f. : fots. color., grafs. color., ils. color, tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015
Orientador: Kleber Pereira Lanças
Inclui bibliografia

1. Solos - Compactação. 2. Máquinas agrícolas. 3. Física do solo. I. Lanças, Kleber Pereira. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu. Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EFEITO DO TEOR DE ÁGUA NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO AGRÍCOLA E SEU REFLEXO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

AUTORA: BARBARA BARRETO FERNANDES

ORIENTADOR: Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS

Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu



Profa. Dra. MARIA HELENA MORAES

Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu



Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Data da realização: 22 de maio de 2015.

DEDICO

*Aos meus pais, que são os meus professores e
exemplos de conduta, que nunca mediram esforços
para me proporcionar bom estudo e vida saudável.*

*“A terra não pertence ao homem, é o homem que pertence à terra
Tudo quanto fere a terra, fere os filhos da terra
Ferir a terra é demonstrar desprezo pelo Criador.
Com força, poder e coração conserva-a para teus filhos
E ama-a como Deus nos ama a todos.
Nosso Deus é o mesmo Deus, esta terra é querida por Ele”
(Cacique Seattle, Tribo Duwamish, 1854)*

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Quem confio todos os meus passos.

Ao Mestre Jesus, minha eterna fonte de inspiração.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA-UNESP), campus de Botucatu e à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura, pela vaga concedida e apoio durante o curso de Mestrado.

Ao Professor Doutor Kleber Pereira Lanças, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, pela oportunidade e disponibilidade desde o primeiro momento, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À família NEMPA – Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrofloretais, por todo o suporte e amizade. Miguel Pascucci, Jefferson Sandi, Murilo Batistuzzi, João Vitor Testa, Fellipe Damasceno, Ronilson Santos, Carlos Renato Guedes e em especial aos amigos Emanuel Rangel Spadim e Indiamara Marasca pela consideração, amizade e ajuda sempre de forma incondicional. Tenho por vocês grande apreço.

Às amigas Renata Coscolin, Raquel Berna e em especial minha amiga-irmã, Marcella Guerreiro de Jesus, que desde a graduação é meu anjo da guarda, agradeço seu espírito altruísta, seus conselhos e apoio em tantas etapas da minha vida.

Aos Professores Doutores Saulo Phillipi Sebastião Guerra e Maria Helena Moraes pelas sugestões e contribuição na qualificação da Dissertação, além da ajuda e orientação nos procedimentos técnicos do trabalho.

À Professora Doutora Maria Márcia Sartori que muito me ajudou na escrita e estatística.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural em especial ao Técnico de Laboratório Maury Torres e Gilberto Winckler, pelo grande auxílio prestado.

À Biblioteca da FCA, lugar que tão bem me acolheu e ajudou.

Aos estagiários Leornado e Eduardo da UFSC, Gabriel, Otavio e Fernando da FIO.

Ao meu pai José Fernandes, mãe Luciana Barreto Fernandes e irmã Bruna Barreto Fernandes pelo apoio, carinho e incentivo. Ao meu namorado Hélio Samuel pela paciência e apoio incondicional. Há muito mais a quem agradecer. A todos aqueles que, embora não nomeados, direta ou indiretamente me ajudaram de alguma maneira.

O meu sincero MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Compactação em solos agrícolas	8
2.2 Causas e efeitos da compactação em solos agrícolas	11
2.3 Metodologias utilizadas para avaliação da compactação do solo	14
2.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração	15
2.3.1.1 Efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo	17
2.3.2 Estrutura do solo	19
2.3.2.1 Densidade do solo	19
2.3.2.2 Ensaio de compactação – Ensaio de Proctor normal	20
2.3.2.3 Densidade relativa do solo (DR)	20
2.3.2.4 Porosidade do solo	21
2.3.3 Consistência do solo	22
2.3.4 Infiltração da água no solo	22
2.3.5 Determinação de área de solo mobilizada e recalque	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais	25
3.2 Clima e precipitação	27
3.3 Delineamento experimental e tratamentos	28
3.4 Características dos equipamentos utilizados	29
3.5 Instalação e condução do experimento	30
3.6 Características avaliadas	32
3.6.1 Determinação da resistência do solo à penetração (RP)	32
3.6.1.1 Índice de Cone do Solo	34
3.6.2 Teor de água do solo a base de massa – Umidade gravimétrica	35
3.6.3 Limites de consistência do solo	36
3.6.4 Densidade de partículas (Dp)	36
3.6.5 Densidade aparente do solo (Ds)	36

3.6.6 Densidade máxima do solo ($D_{m\acute{a}x}$)	36
3.6.7 Densidade relativa do solo (DR)	37
3.6.8 Porosidade do solo	38
3.6.9 Água disponível no solo	38
3.6.10 Infiltração de água no solo	39
3.6.11 Determinação de área e profundidade de recalque do solo	40
3.7 Análise estatística.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Área 1	43
4.1.1 Limites de consistência do solo	43
4.1.2 Água disponível no solo	44
4.1.3 Teor de água e Índice de Cone do solo (IC)	44
4.1.4 Efeito do teor de água no perfil do solo nas avaliações de IC	49
4.1.5 Área e profundidade de recalque	55
4.1.6 Densidade	56
4.1.7 Porosidade	57
4.1.8 Infiltração de água no solo	59
4.1.9 Efeito do teor de água na compactação do solo	61
4.2 Área 2	65
4.2.1 Limites de consistência do solo	65
4.2.2 Água disponível no solo	65
4.2.3 Teor de água e Índice de Cone do solo (IC)	66
4.2.4 Efeito do teor de água nas avaliações de IC	70
4.2.5 Área e profundidade de recalque	75
4.2.6 Densidade	77
4.2.7 Porosidade	78
4.2.8 Infiltração de água no solo	79
4.2.9 Efeito do teor de água na compactação do solo	81
4.3 Comparação área 1 x área 2	84
5. CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	87

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Valores de classificação do solo a partir da VIB (mm h^{-1})	23
2. Resultado inicial da análise química do solo da área experimental 1	26
3. Caracterização granulométrica da área experimental 1	26
4. Resultado inicial da análise química do solo da área experimental 2	27
5. Caracterização granulométrica da área experimental 2	27
6. Limites de consistência do solo	43
7. Valores médios de teor de água no solo (%) nas tensões 0,01 e 1,5 MPa para as camadas estudadas	44
8. Valores médios de teor de água do solo (%), nas diferentes avaliações de resistência à penetração do solo e profundidades de amostragem	44
9. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem I (teor de água 17,8%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	45
10. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem II (teor de água 20,3%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	47
11. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem III (teor de água 22,5%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	48
12. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem VI (teor de água 23,9%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	49
13. Valores médios de área mobilizada (AM) e profundidade de recalque (R) para os tratamento T1, T2 T3 T4 e T5	55
14. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}) e densidade máxima do solo (g cm^{-3}) para os tratamentos e camadas estudados	56
15. Valores médios de densidade relativa do solo (%) para os tratamentos e camadas estudados	57
16. Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente aos diferentes tratamentos	58

17. Valores médios de teor de água do solo (%), no momento da avaliação de infiltração de água do solo para calculo da VIB	60
18. Valores médios de VIB (velocidade de infiltração básica) para os tratamentos T0, T1, T2, T3, T4 e T5	60
19. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10m	64
20. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,10-0,20m	64
21. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,20-0,30m	64
22. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,30-0,40m	64
23. Limites de consistência do solo	65
24. Valores médios de teor de água no solo (%) nas tensões 0,01 e 1,5 MPa para as camadas estudadas	66
25. Valores médios de teor de água do solo (%), nas diferentes avaliações de resistência à penetração do solo e profundidades de amostragem	66
26. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem I (teor de água 10%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	67
27. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem II (teor de água 12,2%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	68
28. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem III (teor de água 14,0%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	69
29. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem IV (teor de água 16,1%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m	70
30. Valores médios de área mobilizada (AM) e profundidade de recalque (R) para os tratamento T1, T2, T3, T4 e T5	75
31. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}) e densidade máxima do solo (g cm^{-3}) para os tratamentos e camadas estudados	77
32. Valores médios de densidade relativa do solo (%) para os tratamentos e camadas estudados	77

33. Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente aos diferentes tratamentos	78
34. Valores médios de teor de água do solo (%), no momento da avaliação de infiltração de água do solo para calculo da VIB	79
35. Valores médios de VIB (velocidade de infiltração básica) para os tratamentos T0, T1, T3, T4 e T5	80
36. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10m	83
37. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,10-0,20m	83
38. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,20-0,30m	83
39. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,30-0,40m	83

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Efeito do tráfego agrícola em Nitossolo Vermelho distroférico (A) e Latossolo Vermelho (B), sob condição de alto teor de água no solo	10
2. Bulbos de tensões de carga uniforme circular (Boussinesq, 1885).....	12
3. Perfil da distribuição das forças no solo, influenciado por distintas cargas de compressão e área de contato constante do pneu (50 cm) com o solo	13
4. Dimensões normalizadas pela ASABE (2012) para penetrômetros de cone	16
5. Relação entre o teor de água do solo e os estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC)	22
6. Vista da área 1: NVd, Fazenda Experimental Lageado, 17/04/2014	26
7. Vista da área 2: LV, Fazenda Experimental Lageado, 16/04/2014	27
8. Precipitação no município de Botucatu/SP, durante o período de janeiro de 2014 a agosto de 2014	28
9. Vista geral: área 1: 0,36 ha (A) e área 2: 0,42 ha (B)	28
10. Preparo do solo: subsolador (A) e grade niveladora (B).....	29
11. Peso do trator indicado por balança	29
12. Área de contato do pneu	30
13. UMAS	32
14. Célula de carga e haste (1), sensor de profundidade (2), sistema de aquisição dos dados “NIDAQ 6009” (3) e programa de leitura em computador portátil(4)	33
15. Visualização de aquisição de dados no computador	33
16. Transepto no rodado, com indicação dos pontos amostrados.....	34
17. Amostras de IC coletadas em transepto.....	35
18. Ensaio de Proctor, amostra de solo sendo retirada do cilindro com o auxílio do extrator de amostras	37
19. Mesa de tensão (A) e câmaras de pressão de Richards (B)	39

20. Determinação da velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB) através do método dos anéis concêntricos	40
21. Perfilômetro utilizado na medição de área mobilizada, área 1	41
22. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 0 para amostragens em diferentes teores de água no solo	52
23. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 1 para amostragens em diferentes teores de água no solo	52
24. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 2 para amostragens em diferentes teores de água no solo	53
25. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 3 para amostragens em diferentes teores de água no solo	53
26. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 4 para amostragens em diferentes teores de água no solo	54
27. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 5 para amostragens em diferentes teores de água no solo	54
28. Área mobilizada do solo para os tratamentos T1, T2 T3 T4 e T5	55
29. Capacidade de infiltração de água no solo para os tratamentos estudados	61
30. Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m	63
31. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 0 para amostragens em diferentes teores de água no solo	73
32. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 1 para amostragens em diferentes teores de água no solo.....	73
33. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 3 para amostragens em diferentes teores de água no solo	74
34. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 4 para amostragens em diferentes teores de água no solo	74
35. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 5 para amostragens em diferentes teores de água no solo	75
36. Área mobilizada do solo para os tratamentos T1, T2 T3 T4 e T5	76
37. Capacidade de infiltração de água no solo para os tratamentos estudados	80

38. Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m	82
--	----

RESUMO

As modificações causadas por atividades antrópicas como o tráfego de máquinas afetam diretamente a estrutura do solo, por isto, a importância de avaliar a compactação do solo devido ao tráfego agrícola, assim como a magnitude dos impactos do rodado sobre a qualidade física dos solos. O trabalho teve por objetivo avaliar a influência do teor de água na avaliação de resistência mecânica a penetração do solo medida através do índice de cone (IC), a ocorrência e distribuição da compactação ao longo do perfil do solo causada pelo tráfego agrícola, assim como os consequentes reflexos nos atributos físicos do solo. O experimento foi realizado na Fazenda Lageado da UNESP/FCA, Botucatu/SP, sendo selecionadas duas classes de solo, o Nitossolo Vermelho distroférico (NVd) de textura argilosa, com 50 % de teor de argila e o Latossolo Vermelho (LV) de textura média, com 25 % de teor de argila. O delineamento experimental foi casualizado, com os seguintes tratamentos de compactação: T0 = 0; T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4=5 e T5 = 10 passadas consecutivas de um trator agrícola. Utilizou-se um penetrômetro hidráulico-eletrônico para a amostragem da resistência mecânica do solo a penetração nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40m em 4 condições de teor de água, que variou de 17,1 a 24,5% para o NVd e de 10,0 a 17,8% para o LV. Também foram determinados os seguintes atributos: recalque do solo, infiltração de água no solo,

densidade do solo e porosidade, os maiores valores de resistência a penetração do solo foram detectados próximos ao limite de contração do solo e nos tratamentos com maior intensidade de tráfego agrícola, já nas condições de solo com elevado teor de água, os valores de resistência do solo à penetração foram reduzidos, sendo considerados não impeditivos para o crescimento de raízes. O solo argiloso demonstrou ser o mais sensível ao efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo, sendo a maior variação entre as amostragens realizadas com o teor de água próximo a CC e PMP foi de 4,8 MPa e 1,9 MPa para o solo de textura média. Também foi possível constatar as modificações nas propriedades físicas e hidráulicas do solo, o NVd atingiu valor máximo de IC de 6,7 MPa e o LV 5,6 MPa, ambos para o tratamento cujo tráfego foi o mais intenso. Para as duas classes de solo, os maiores valores de recalque foram observados também no T5, assim como a densidade do solo que atingiu valores máximos de $1,91 \text{ g cm}^{-3}$ para o LV e $1,76 \text{ g cm}^{-3}$ para o NVd. Foi observado no NVd e também no LV a redução da macroporosidade do solo e não interferência na microporosidade. Constatou-se que a velocidade de infiltração básica do solo foi baixa para ambos os solos em todos os tratamentos que houve o tráfego. Os resultados demonstraram o efeito do teor de água sobre a avaliação de resistência a penetração do solo. O IC e os demais atributos mostraram-se um excelente procedimento para localizar e visualizar pontos de elevada resistência mecânica, constituindo-se importantes recursos para avaliar o impacto do tráfego agrícola sobre qualidade física dos solos.

EFFECT OF WATER CONTENT IN SOIL COMPACTION ASSESSMENT CAUSED BY TRAFFIC AGRICULTURAL AND HIS REFLECTION IN PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL. Botucatu, 2015, 97p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: BARBARA BARRETO FERNANDES

Adviser: KLEBER PEREIRA LANÇAS

SUMMARY

The changes caused by human activities such as machinery traffic directly affect soil structure, therefore, the importance of assessing soil compaction due to agricultural traffic, as well as the magnitude of the impact of the wheelset on the physical quality of the soil. The study aimed to evaluate the influence of water content in soil penetration resistance evaluation measured by the soil Cone Index (CI), the occurrence and distribution of compression along the soil profile, caused by agricultural traffic, as well as the resulting consequences on soil physical properties. The experiment area was at Lageado Experimental Farm, UNESP/FCA, Botucatu/São Paulo, two different soil type was used, Nitossolo Vermelho distroférico (NVD) clayey, 50% clay content and Latossolo Vermelho (LV) of medium texture, 25% clay content. Was used an randomized experimental design with the following compaction treatments: T0 = 0; T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4= 5 and T5 = 10 consecutive passes of an tractor. An hydraulic-electronic penetrometer was used to measure the soil resistance at 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.40 m in 4 different water content ranging from 17.1 to 24.5% for NVD and 10 to 17.8% for LV. It was also determined the following attributes: soil repression, water infiltration into the soil, bulk density and porosity. The major soil penetration resistance values were detected near the ground shrinkage limit and the treatment with increased intensity agricultural traffic, already in high moisture soil conditions, the soil penetration resistance values were reduced being considered not hindering the growth of roots. The clay soil proved to be the most sensitive to the effect of water content in soil compaction evaluation, the greater variation among samples collected with water content between field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP)

was 4.8 MPa and 1.9 MPa for medium texture soil. It was also possible to observe changes in soil physical and hydraulic properties, NVD reached a maximum soil penetration resistance value of 6.7 MPa and 5.6 MPa for LV, to both soils this happened for the treatments which has occurred the most intense traffic. For both types of soil, the highest soil repression values were also observed in T5 as well as the bulk density of which reached maximum values of 1.91 g cm⁻³ for LV and 1.76 g cm⁻³ for NVd. It was observed in NVD and also in LV, reducing on soil macroporosity and non-interference in microporosity. It was found that the rate of soil infiltration was low for both soil in all treatments that there were traffic. The results showed the effect of water content on soil penetration resistance evaluation. The IC and the other attributes proved to be an excellent procedure to locate and display high mechanical strength points, becoming important resources for evaluating the impact of agricultural traffic on physical soil quality.

Keywords: soil compaction, machinery traffic, penetration resistance.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população e da demanda por alimentos, o solo é considerado fundamental na sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Por isto, mudanças nas técnicas de produção e novas tecnologias têm surgido ao longo dos anos com o objetivo de aperfeiçoar e aumentar a produtividade. Se por um lado essas tecnologias tem o objetivo de elevar a produção, por outro, o constante incremento do peso de tratores e máquinas agrícolas e o uso cada vez mais intenso do solo nas diversas etapas do processo de produção é um dos principais fatores responsáveis pelas mudanças prejudiciais às propriedades físicas do solo, tornando-o compactado, comprometendo assim a permanência dos sistemas agrícolas.

A compactação resultante do tráfego de máquinas é induzida, principalmente, pelo teor de água do solo, o teor de matéria-orgânica, o tipo de solo, o peso total da máquina, juntamente com a intensidade com que acontece o trânsito no solo. Os diferentes solos são afetados de modo desigual e a compactação implica, principalmente, na criação de um ambiente desfavorável para o desenvolvimento das raízes das plantas e contribui para a degradação de sua estrutura.

Trabalhos científicos constataram que a maior compactação do solo ocorre logo após as primeiras passadas das máquinas e o tráfego posterior adiciona menor

compactação, a não ser que haja aumento da carga aplicada em relação a anterior ou que ocorra mudança no teor de água do solo. Outros trabalhos citam que a compactação se dá de maneira diferenciada, no horizonte superficial do solo é que gerada pelo contato entre o rodado e o solo, enquanto em relação à profundidade, a carga do eixo torna-se o fator mais importante.

Sugere-se que a compactação seja identificada através de atributos físicos do solo, como a resistência à penetração, densidade aparente, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, estabilidade de agregados, infiltração de água, condutividade hidráulica, curva de retenção de água, entre outros atributos. Dentre estes, a resistência do solo a penetração é a mais recomendada, por possibilitar maior facilidade na obtenção dos dados.

A resistência do solo a penetração é obtida através do penetrômetro, equipamento este que quantifica a força necessária para empurrar uma haste cônica no solo a uma determinada profundidade, buscando estimar o impedimento mecânico que o solo exerce no desenvolvimento das raízes das plantas. Esta avaliação sofre grande interferência do teor de água do solo no momento da coleta dos dados, isto porque a água funciona como “agente lubrificante” que age diminuindo a atuação das forças de coesão entre partículas do solo, facilitando a penetração da haste. Este efeito pode comprometer a avaliação da compactação do solo, pois os valores de resistência do solo à penetração podem ser considerados não impeditivos ao crescimento de raízes, quando o são.

Esta interferência do teor de água para a obtenção de resultados de resistência a penetração, tem motivado estudos que buscam quantificar esta influência na tentativa de diminuir ou até isolar este fator. O ideal seria realizar a coleta de dados, medir o teor de água no momento da avaliação e posteriormente efetuar algum tipo de correção para um teor de água padronizado, assim facilitaria a obtenção do valor real do impedimento mecânico do solo ao crescimento das raízes das plantas.

Levando em consideração a importância do estudo da compactação e qualidade física dos solos, o presente trabalho teve como objetivo avaliar em duas classes de solos, a influência do teor de água na avaliação de resistência mecânica a penetração do solo medida através do índice de cone, bem como estudar a ocorrência e distribuição da compactação ao longo do perfil do solo causada pelo tráfego agrícola, assim como os

consequentes reflexos nos atributos físicos do solo, tais como, a resistência do solo à penetração, a densidade do solo, a porosidade e a infiltração de água do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compactação em solos agrícolas

A compactação do solo não acontece naturalmente (SOANE e OUWERKERK, 1994), neste processo ocorre a diminuição de volume do solo quando uma determinada pressão externa é aplicada, sejam por máquinas agrícolas, equipamentos e animais (LIMA, 2004). Essa compactação pode ser definida como sendo a alteração da estrutura física do solo, reduzindo os espaços internos que, normalmente, são ocupados por água e ar. Com isso a disponibilidade desses elementos no solo torna-se reduzida, dificultando, assim, o bom desenvolvimento das culturas (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Startsev e McNabb (2001) acrescentaram ainda que a compactação reduz a infiltração de água, intensificando a erosão e o assoreamento dos mananciais de água.

A principal razão do surgimento da compactação do solo são as operações no campo (plantio, tratos culturais e colheita) realizadas repetidamente ao longo dos anos (OLIVEIRA, 2002), pois com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e equipamentos e o uso do solo têm aumentado significativamente, como nos sistemas de cultivo intensificado, onde nota-se maior risco de compactação por causa das

operações culturais adicionais e aumento da frequência do tráfego de máquinas (AMURI; BRYE, 2008).

Para Blanco-Canqui et al. (2010) o impacto do tráfego no solo tem influencia significativa sobre todas as suas propriedades físicas e são muito maiores do que a influência dos diferentes sistemas de cultivo. Por isto, o estudo da compactação do solo torna-se complexo e abrangente no cenário agrícola, pois a este processo estão ligados vários fatores, destacando-se a textura do solo (LARSON et al., 1980; IMHOFF et al., 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água no momento em que as operações são realizadas (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003).

Horn et al. (2003) observou que a passada do rodado no solo pode resultar em aumento da resistência à penetração e enfraquecimento da estrutura do mesmo. Este estudo ressaltou também os efeitos negativos da compactação sobre a produtividade das culturas.

Shafer-Landefeld et al. (2004) estudaram o comportamento do solo devido ao tráfego de máquinas após as operações de preparo em solos de diferentes classes texturais e observaram que os efeitos de uma única passada da máquina com grande peso, fez com que as propriedades físicas do solo diferissem entre textura e profundidade e que as variações das condições de umidade e estrutura das propriedades iniciais do solo contribuíram para que os resultados de compactação não tenham sido uniformes.

Foi observado por Raghavan et al (1976) mudança na densidade do solo em testes de campo através do aumento na densidade do solo seco, após várias passadas de um conjunto mecanizado, ele encontrou evidencias de que o número de vezes que uma carga é repetida sobre um mesmo local afeta não só a magnitude da densidade do solo, mas também o volume de solo. A densidade inicial do solo variou de 1 para 1,3 t/m³ desde a superfície até uma profundidade de 30 cm, e umidade média de 18%.

Coleti e Demattê (1982) verificaram que a tendência dos valores de densidade do solo é aumentar com a intensidade do tráfego, sendo que aproximadamente 50 a 60% da compactação do solo se manifestaram com as primeiras passadas. À medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação, seguindo uma escala logarítmica (JAKOBSEN e GREACEN, 1985). Para Fenner (1999) as maiores deformações da superfície do solo ocorreram logo após a

primeira passagem da máquina. Outros autores também verificaram este comportamento do tráfego e seus efeitos cumulativos na compactação, concluindo de modo geral que a maior parte da compactação total ocorre nas primeiras passadas de uma máquina

As operações agrícolas, quando realizadas sem o controle do teor de água do solo (Figura 1) provocam aumento da área compactada (PEDROTTI e DIAS JUNIOR, 1996 e SEVERIANO et al., 2008) também relatado por Gysi et al. (1999), que observou que um teor de água ligeiramente inferior na camada mais superficial do solo, pôde reduzir o efeito da compactação causada pelo tráfego.

Yavuzcan et al. (2005) também estudou o efeito da água na compactação do solo e notou que o teor de água no solo pareceu ser o mais decisivo fator para a compactação provocada pelo rodado. Sob condição de umidade crítica, o solo deformou-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas permanentes (deformação plástica do solo) (SILVA, et al., 2006; ASSIS et al., 2009).



Figura 1. Efeito do tráfego agrícola em Nitossolo Vermelho distroférico sob condição de alto teor de água no solo.

Há uma tendência de se avaliar a suscetibilidade do solo à compactação causada pelo tráfego agrícola associado ao momento ideal para executar as operações mecanizadas no campo, por considerar coerente o uso de medidas preventivas da compactação, o que minimizaria os problemas de degradação dos solos agrícolas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999). O conhecimento da magnitude dos impactos do tráfego agrícola na qualidade física do solo contribui para uma melhor gestão do solo para minimizar a compactação e para avaliar como a física do solo e as suas propriedades hidráulicas estão interligadas (LIPIEC; HATANO, 2003).

2.2 Causas e efeitos da compactação em solos agrícolas

Pesquisas têm demonstrado que a compactação aumenta a resistência do solo à penetração, o peso específico aparente do solo (DIAS JUNIOR et al., 1999) dificulta a infiltração de água, a aeração do solo e o crescimento das raízes, isto porque ela causa diminuição da porosidade e modificação na continuidade dos poros (DIAS JÚNIOR, 2000).

As tensões nos solos devido a ação externa são geralmente de curta duração, sendo aplicadas sobre uma pequena área de carregamento. As características mecânicas dos solos agrícolas variam entre as diferentes classes de solos e, para um mesmo solo, de acordo com a sua consistência. Para melhor conhecimento dos fatores que afetam a distribuição de tensões são necessários os conceitos de Dinâmica do Solo. As propriedades dinâmicas do solo foram propostas por Vanden Berg e Gill (1962) e podem ser definidas como a relação entre as forças que são aplicadas e a reação do solo. Essa reação é associada às tensões no solo e sua distribuição.

Quando um corpo está sujeito a forças externas, ele sofre deformação. Essa reação é associada às tensões no solo e sua distribuição que juntamente com outras teorias, estabelecem as bases teóricas dos fenômenos de reação do solo às pressões impostas, como no caso dos rodados das máquinas (MIALHE, 1993).

A tensão no solo sempre se distribui de forma tridimensional. A primeira aproximação do modelo de distribuição das tensões segundo Vanden Berg e Gill (1962), foi feita com um sistema de equação diferencial descrito por Boussinesq em 1885 (Figura 2), considerando uma carga pontual vertical o qual foi descrito para confirmar a distribuição vertical relacionada com a tensão (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). De acordo com essa teoria, uma carga vertical sobre a superfície do solo, atuando sobre um meio homogêneo, isotrópico e de elasticidade linear, tem efeito igual sobre as duas metades da área que foi aplicada a carga; assim, descreveu-se pela primeira vez o método da pressão em um ponto. A equação de Boussinesq portanto, determina os acréscimos de tensões verticais devidos a uma carga pontual aplicada na superfície. A distribuição das tensões no solo é visualizada através das isóbaras, que são linhas de iguais valores de tensão. O conjunto de isóbaras é denominado de bulbo de tensões.

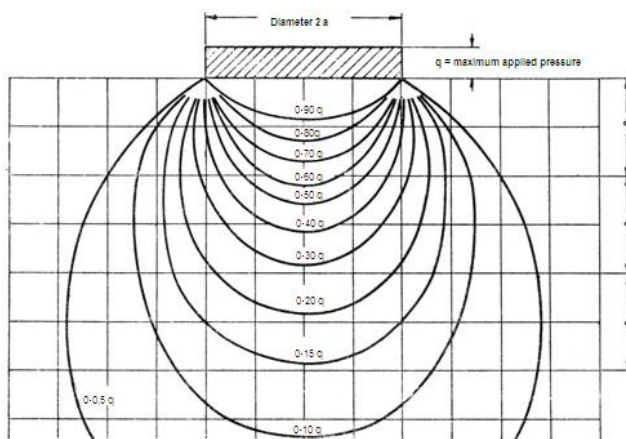


Figura 2 : Bulbos de tensões de carga uniforme circular (Boussinesq, 1885)

Segundo Barata (1984), em geral, solos se afastam das condições ideais de validade da teoria de Boussinesq, pois não são materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. No entanto, a teoria é considerada razoável, observada as seguintes condições, como: Não pode haver rachaduras no interior do solo; A resistência ou módulo de deformação deve ser constante na profundidade. Para solos muito heterogêneos, deve-se usar uma correção. A solução de Boussinesq é válida para carga concentrada, o que equivale a dizer que a teoria só se aplica para profundidades razoavelmente grandes. Para profundidades menores deve-se utilizar cargas aplicadas numa área em que não seja pontual.

A compactação no perfil do solo se dá de forma diferenciada, sendo que a incidência da compactação na superfície é determinada pela pressão de contato entre o solo e o rodado, enquanto que em subsuperfície, a carga do eixo torna-se o fator mais importante (HAKANSSON; VOORHEES, 1998).

Horn e Rostek (2000) encontraram resultados similares e concluíram que a pressão aplicada ao solo é transmitida às camadas mais profundas em função da carga do eixo e se a resistência mecânica interna dos elementos estruturais do solo for excedida (Figura 3).

As pressões normais à superfície de compressão têm uma tendência de se concentrarem ao redor do eixo vertical abaixo do centro da carga aplicada. Esta tendência é tanto maior quanto maior for a plasticidade do solo devido ao aumento do teor de água e coesão dependente do teor de argila. Soehne (1958), constatou que os valores de pressão a 30 cm abaixo da superfície, podem ser 50% maiores para um solo fofo e plástico e 35% menor para um solo duro e resistente se comparado a um solo normal.

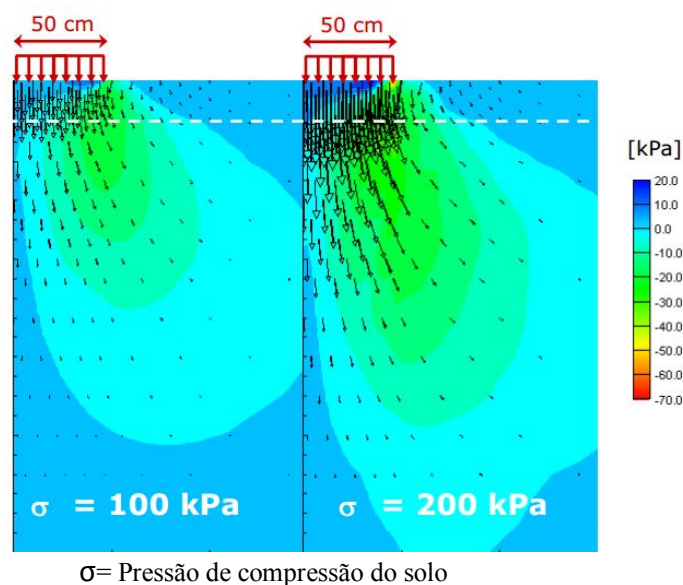


Figura 3. Perfil da distribuição das forças no solo, influenciado por distintas cargas de compressão e área de contato constante do pneu (50 cm) com o solo (Horn, 2008).

O termo compressibilidade indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma carga mecânica, sendo definido como a facilidade com que o solo diminui o volume quando uma determinada pressão é aplicada (HORN e LEBERT, 1994).

A manutenção de condições físicas adequadas ao crescimento das plantas está relacionada com a preservação da estrutura do solo e pode ser alcançada por meio do conhecimento do comportamento compressivo do solo e monitoramento das operações realizadas já que elas têm ocorrido em virtude das operações de manejo que envolve o tráfego de máquinas em conteúdos inadequados de água no solo (SEVERIANO et al., 2008). Para Dias Junior (1994), o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é o teor de água. Assim, quando os solos estão com teor de água reduzido, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa. Entretanto, sob condições de alto teor de água, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (VOORHEES et al., 1987).

Segundo Silva et al (2002) as alterações nas relações massa/volume e na resistência mecânica do solo interagem entre si, alterando o ambiente radicular. Em geral, os efeitos da pressão no solo acarretaram em aumento da densidade na sua superfície

(CAVALIERI et al., 2009). Rosa et al. (2011), estudaram o tráfego de máquinas em sistema de plantio direto e observaram que a macroporosidade reduziu a níveis críticos para o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração, que ultrapassaram 2 MPa.

2.3 Metodologias utilizadas para avaliação da compactação do solo

A avaliação dos níveis de compactação do solo é de fundamental importância, pois busca prevenir ou minimizar seus efeitos negativos na produção agrícola. Lanças (1996) descreveu três métodos de avaliação da compactação do solo sendo o primeiro deles o visual, que consiste na identificação de sulcos de erosão, fendas nos rastros dos rodados, formação de crosta na superfície do solo, raízes com má formação, sistema radicular raso e subdesenvolvido, planta com deficiência de crescimento e com coloração não característica, água empoçada, erosão. O segundo método é o preciso, obtido através da determinação do peso específico do solo, porosidade do solo e a condutividade hidráulica e o terceiro método é o intermediário, onde estão inclusos os indicadores secundários da compactação do solo tais como a taxa de difusão de oxigênio, condutividade hidráulica saturada e a resistência do solo à penetração utilizando os penetrômetros ou penetrógrafos.

A análise das modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação pode ser identificada ou avaliada por propriedades físicas ou atributos do solo que fornecem parâmetros da situação na qual ele se encontra. Dentre os métodos de avaliação da compactação do solo estão, a resistência do solo a penetração (SILVA et al., 1994), densidade do solo (CAMPBELL, 1994), porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (BEUTLER et al., 2001), estabilidade de agregados (SOANE, 1990), infiltração de água no solo (BELLINASSO et al., 1994), curva de retenção de água (DEXTER; BIRD, 2001), pressão de pré-consolidação (MIRANDA, 2006), intervalo hídrico ótimo (TORMENA et al., 1999), perfil cultural do solo (TAVARES FILHO et al., 1999) entre outros.

Algumas avaliações são mais difíceis de serem realizadas, pela demora ou alto custo e podem também diferir nos resultados. Desta forma, tem-se recomendado utilizar uma associação de metodologias de avaliação da compactação do solo, procurando reduzir o erro, aumentar a confiabilidade e diminuir os custos para se

obter os resultados. Segundo Acosta (2008), inúmeros pesquisadores sugerem que a compactação do solo seja identificada, através da densidade do solo, distribuição dos poros por tamanho, estabilidade de agregados e através da resistência do solo a penetração sendo que a resistência do solo a penetração é a mais utilizada por ser mais simples e barata.

2.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração

As raízes das plantas são órgãos flexíveis que se desenvolvem através do solo seguindo, aparentemente, os caminhos de menor resistência (VEPRASKAS, 1994). A resistência do solo à penetração tem sido frequentemente utilizada como indicador da compactação do solo sendo um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (LANÇAS, 1996).

Dentre as mais variadas aplicações pode-se dizer que, a resistência à penetração é utilizada para detecção de camadas compactadas, estudo da ação de ferramentas e de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento das raízes das plantas, predição da força de tração necessária para a realização de trabalho de mobilização do solo, conhecimento do processo de infiltração de água no solo, conhecimento do processo de umedecimento e de ressecamento, entre outros (CUNHA et al., 2002).

O penetrômetro, equipamento usado para medir a resistência do solo à penetração de uma haste (AGGARWAL et al., 2006), é recomendado como um dispositivo de medição que fornece um método padrão e uniforme de mensurar a resistência do solo. Esta resistência é inferida através da força (por unidade de área) necessária para cravar uma haste, que tem em sua ponta um cone circular, até uma determinada profundidade no solo. A norma ASABE S313.3 descreve a resistência do solo à penetração como a pressão, exercida no solo, de um cone maciço de aço inoxidável com ângulo de 30 graus. Esta norma especifica dois padrões de cone (Figura 4) sendo um de 323 mm² e 20,27 mm de diâmetro de base (A) e o outro com 130 mm² e 12,83 mm de diâmetro de base (B) (ASABE, 2012).

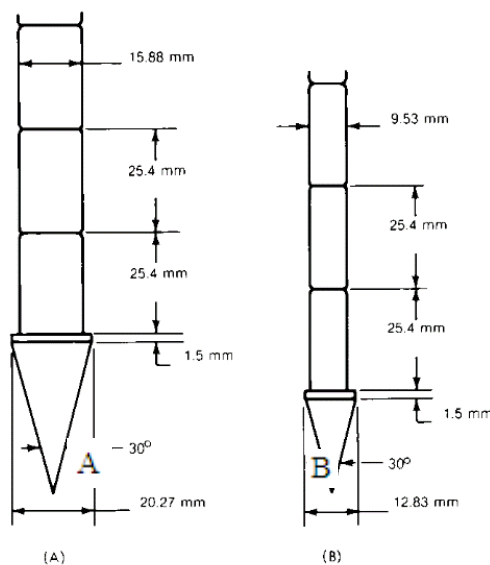


Figura 4. Dimensões normalizadas para penetrômetros de cone.

A leitura de resistência do solo a penetração inicia-se no instante em que a base do cone é introduzida no solo a uma velocidade de penetração constante de 30 mm s^{-1} até a profundidade determinada. A força necessária para fincar a haste à determinada profundidade deve ser medida por um índice de resistência do solo chamado Índice de Cone (IC). Este se refere à média da força por unidade de área (kPa ou kgf/cm^2), ocorrida em determinada profundidade (camada). ASABE (2009)

Os níveis críticos de resistência à penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo, o teor de água e a espécie cultivada (KLEIN et al., 1998).

Canarache (1990) sugere que valores acima de $2,5 \text{ MPa}$ começam a restringir o pleno crescimento das raízes da maioria das plantas. Materechera et al. (1991) consideraram que o crescimento das raízes foi nulo quando os valores de resistência do solo à penetração atingiram 5 MPa .

Merotto Jr. e Mundstock (1999) indicam que RP maior que $3,5 \text{ MPa}$ causa severa limitação ao crescimento de plantas de trigo, enquanto Petter (1990) verificou que o valor da resistência do solo à penetração de $2,8 \text{ MPa}$ já foi limitante ao crescimento radicular da soja. Arshad et al. (1996) afirmaram que os valores entre $2,0$ e $4,0 \text{ MPa}$ dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Nesmith (1987) e Taylor et al. (1966) adotaram o valor de 2 MPa como valor limitante ao crescimento das raízes.

Segundo a ASABE (2009) o entendimento de dados obtidos com o penetrômetro deve ser associado às seguintes propriedades do solo: tipo de solo e textura; teor de matéria orgânica; teor de água por horizonte ou camada; densidade da camada; cultivo e história da área; retenção de umidade do solo e curva por horizonte; condição de drenagem, limites de plasticidade e tamanho das unidades estruturais do solo (torrões).

2.3.1.1 Efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo

Os dois maiores fatores que afetam o IC são a densidade e o teor de água do solo. Para minimizar o efeito do teor de água na medição do IC, é desejável realizar a amostragem quando o seu conteúdo esteja próximo ao da capacidade de campo. Para obter uma melhor compreensão das forças que as raízes estão sujeitas, as medições de IC são, por vezes, tomadas em outros teores de água do que o teor na capacidade de campo (ASABE, 2009).

A resistência do solo à penetração apresenta correlação inversa com o teor de água no solo (CUNHA et al., 2002; ASSIS et al., 2009) e diretamente proporcional com a sua densidade (TORMENA et al., 1999). Assis (2009) concluiu que maiores valores de resistência do solo à penetração foram detectados mais próximos do limite de contração do solo e nas condições de solo mais úmido, os valores de resistência do solo à penetração foram drasticamente reduzidos. Henderson (1989) salienta ainda que o período na agricultura em que o solo permanece em condições de alto teor de umidade é pequeno, de modo que a resistência do solo pode rapidamente variar de níveis tidos como não impeditivos para impeditivos com a secagem do mesmo.

Cunha et al. (2002) explicaram que o aumento no teor de água no solo, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, provocando a diminuição na resistência mecânica do solo. Com a redução do teor de água no solo acontece o oposto, a resistência à penetração da haste do penetrômetro ao solo tende a aumentar. Segundo Iaia et al. (2006), o solo com maior teor de areia foi mais sensível ao solo com teores menores de água.

Segundo Assis et al. (2009) o tipo de solo mostrou-se significativamente influente nos resultados de índice de cone, e os solos mais argilosos apresentaram valores mais elevados para esse índice do que o mais arenoso.

Para Klein et al. (1998), a determinação da resistência do solo à penetração não deve ser realizada apenas quando o solo se encontra na capacidade de campo, pois grandes variações da compactação do solo poderão não ser detectadas. Corroborando com Castro Neto (2001), que afirma que o índice de cone é um bom parâmetro para avaliação da compactação do solo e da trafegabilidade, desde que as determinações sejam efetuadas com baixo teor de água no solo, aumentando assim a sensibilidade das avaliações, uma vez que em solos com elevado teor de água, apesar do menor esforço exigido para cravar a haste no solo, o efeito lubrificante da água poderá mascarar as diferenças de compactação nas camadas do solo. Porém, por outro lado, ele cita que baixos teores de água no solo exigem a utilização de penetrômetros mecânicos ou hidráulicos, uma vez que a pressão necessária para avaliações de resistência à penetração em solos secos não é praticável pelos penetrômetros manuais.

Guerra (2000) avaliou o efeito da compactação do solo utilizando um penetrômetro hidráulico eletrônico, ele também concluiu que o teor de água no solo foi de fundamental importância na determinação do índice de cone, sendo que a presença da água inibiu a diferenciação da compactação pelo efeito lubrificante que provoca no solo, deixando-o muito plástico, facilitando a penetração da haste, indicando que, para uma melhor sensibilidade dos efeitos de carga sobre o solo, os dados de resistência à penetração deveriam ser tomados com o solo relativamente seco.

Devido ao efeito minimizador do teor de água do solo sobre o IC, todo o esforço deve ser feito para garantir que o conteúdo significativo de água não mude enquanto as múltiplas leituras de IC são obtidas. Segundo Lanças (1996), é possível realizar comparações da resistência à penetração do solo em um mesmo local, em épocas diferentes, mas para isso o solo deve estar nas mesmas condições de teor de água, isso quando se deseja realizar uma avaliação da evolução da compactação ao longo do tempo.

Para Cunha et al. (2002) o conhecimento da relação entre resistência à penetração do solo, densidade e teor de água do solo é de extrema importância, pois permite prever as condições nas quais poderá ocorrer impedimento ao crescimento radicular das plantas.

2.3.2 Estrutura do solo

Segundo Klein (2008) uma definição muito simples para estrutura do solo, é o arranjo e aglomeração das partículas que formam agregados maiores, por isto pode ser alterada por consequência das diversas práticas agrícolas.

2.3.2.1 Densidade do solo

Lanças (1996) explica que a compactação é o resultado do rearranjo das partículas do solo, quando submetidas a forças externas, ocasionando o aumento na sua densidade pela diminuição do seu volume para uma massa de partículas constante. Reichardt e Timm (2004) salientam que o solo é um material poroso e, por compressão, a mesma massa pode ocupar um volume menor, afetando a sua estrutura, o arranjo e o volume dos poros. Por isto, a facilidade com que as raízes penetrarem no perfil do solo é reduzida quando a densidade e a resistência do solo a penetração aumentam.

A densidade do solo (D_s) é definida pela razão entre a massa de solo seco e o volume do solo, ela constitui um parâmetro prático para detectar a ocorrência da compactação, porém sofre influência da textura e estrutura do solo o que dificulta a escolha de valores críticos para este atributo (CAMARGO; ALLENI, 1997). Para Raghavan et al. (1977), das muitas variáveis envolvendo a interação máquina-solo, o deslocamento dos rodados parece ser um dos mais importantes, provocando sensíveis aumentos na densidade global do solo, durante as operações com máquinas agrícolas. O peso do veículo atinge o solo através das rodas, portanto, conforme a área de contato do sistema de rodagem, esta pressão se modifica.

Solos arenosos apresentam densidade do solo superior aos argilosos enquanto que solos silteosos apresentam densidade intermediária (LIBARDI, 2005). Segundo Reichert et al. (2003) a densidade crítica para solos franco-arenosos está entre 1,70 a 1,80 t m⁻³, para solos franco-argilosos entre 1,40 a 1,50 t m⁻³ e 1,30 a 1,40 t m⁻³ para solos argilosos, já Reynolds et al. (2007) sugere uma faixa mais ampla para solos argilosos que é de 0,9 a 1,20 t m⁻³.

Rosolem et al (1999) trabalhando com milho, em solos com 41 % de argila, descobriu que havia diminuição no crescimento radicular quando a densidade era

1,18 g cm³, em solos com 22 % de argila, a densidade limite que promoveu maior desenvolvimento das raízes foi 1,27 g cm³.

2.3.2.2 Ensaio de compactação – Ensaio de Proctor normal

O ensaio de Proctor normal determina a relação existente entre a densidade, umidade e energia de compactação de um solo com estrutura alterada, sendo o ponto em que se obtém a máxima densidade, denomina-se “umidade ótima” de compactação para um dado nível de energia aplicada (BUENO; VILAR, 1998). Este ensaio possibilita conhecer o valor de máxima densidade que um solo pode atingir, que é dependente da composição mineral do solo, em função disto, solos argilosos possuem densidade menor do que solos arenosos.

2.3.2.3 Densidade relativa do solo (DR)

A Ds não fornece informações suficientes para se quantificar o grau de compactação de um solo agrícola. Visando normalizar os limites de densidade do solo em função da textura e outras propriedades do solo, tem sido utilizado o conceito de densidade relativa do solo, que foi apresentado por Klein (2006), surgiu para facilitar a comparação e obter parâmetros para analisar valores obtidos de densidades aparente do solo. Ela é obtida pela relação da densidade do solo com a densidade máxima do solo (ensaio de Proctor).

Estudos comprovam a correlação entre o grau de compactação (GC) e a produtividade das culturas. Suzuki (2005) estudando o grau de compactação em sistema de plantio direto verificou que o maior rendimento da soja foi obtido quando o GC atingiu a média de 82% em Argissolos e 85% para os Latossolos. Suzuki et al. (2007) também verificaram que o aumento do GC provocou uma redução linear da macroporosidade, da condutividade hidráulica saturada e aumento da resistência mecânica.

Em Argissolo de textura arenosa, Beutler et al. (2009) constataram decréscimo na produtividade do milho a partir da densidade relativa de 0,89. Pesquisas têm demonstrado que o GC é sensível as alterações nas propriedades físicas do solo e realça o efeito do tipo de manejo e intensidade do tráfego de máquinas sobre o solo.

2.3.2.4 Porosidade do solo

Para um solo com mesma densidade de sólidos, quanto maior for a porosidade, menor será a densidade. A compactação do solo diminui o espaço poroso, aumentando, conseqüentemente, a densidade do solo. Merotto Jr. e Mundstock (1999) relatam que as reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos.

A composição de um solo ideal pode ser compreendida como: 45% a relação de sólidos, 5 % de matéria orgânica, 34 % a composição de água e nutrientes e por fim 16 % preenchida de ar. É imprescindível que no espaço poroso do solo sempre exista certa proporção de ar mínima igual a 10 %, para evitar deficiência na aeração do sistema radicular das plantas. (KLEIN, 2008).

A porosidade do solo pode ser de origem estrutural ou textural, e os poros resultam do arranjo das partículas elementares do solo. A porosidade estrutural é mais alterada pelo manejo e pela compactação (Tamari, 1994; Richard et al., 2001), caracterizados principalmente pelo decréscimo da porosidade total e da macroporosidade e do aumento da microporosidade (Richard et al., 2001; Tarawally et al., 2004). Com isto, ocorre aumento da densidade e da resistência à penetração das raízes (MORAES et al., 1995).

Segundo Ottoni (2005) diversos trabalhos concluíram que, em camadas compactadas, tanto a porosidade total como os macroporos representaram redução de volume em relação ao seu estado original, acompanhada pelo aumento da microporosidade e da densidade dos solos.

O decréscimo dos poros de maior diâmetro pela compactação, ocorre devido a fragmentação dos agregados, por causa da ação dos equipamentos de preparo do solo ou pelo peso das máquinas que trafegam o solo ser superior à máxima resistência interna dos agregados, destruindo os espaços interagregados que são de maior diâmetro (Horn et al., 1995). Em consequência disso, forma-se um denso rearranjo dos agregados menores do solo e a formação de poros de menor diâmetro (Horn et al., 1995), que alteram a retenção e a redistribuição de água no perfil do solo (Tarawally et al., 2004). Sendo assim, o ar e o movimento da água no solo são seriamente prejudicados (BEUTLER et al., 2001).

2.3.3 Consistência do solo

A consistência do solo pode ser definida como o efeito das ações externas sobre o solo, que tendem a deforma-lo e ocasionar fluxo, fratura ou compressão (FORSYTHE, 1975; KIEHL, 1979) que variam conforme o teor de água do solo. Os pontos de transição dos diferentes estados de consistência foram definidos por Atterberg (1911), são classificados como sólido (duro), semi-sólido (friável), plástico e líquido. A umidade do solo do ponto de transição entre o estado friável e o plástico é denominada limite de plasticidade (LP), o teor de água no ponto de transição entre o estado plástico e o líquido é denominada de limite de liquidez (LL) (Figura 5).

Para o manejo do solo a condição do teor de água é muito importante, uma vez que os efeitos sobre sua estrutura são dependentes dessa condição.

A condição ideal de umidade do solo no qual ele pode ser trafegado é a friável, isto é, entre o limite de contração e o limite plástico, pois menores danos são causados a estrutura do solo. As demais faixas de teor de água não são recomendadas para o tráfego ou preparo de solo, pois nessa condição, o solo pode sofrer deformações não recuperáveis. (KONDO e DIAS JÚNIOR 1999; SILVA, 2002).

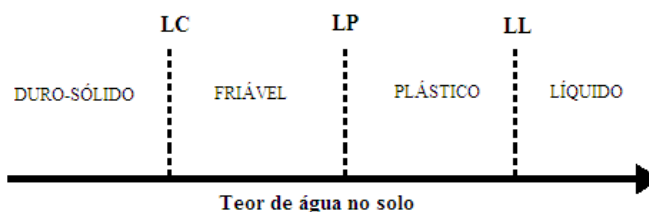


Figura 5. Relação entre o teor de água do solo e os estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC). Fonte: Adaptado de Ashburner J. E.; Simm, B. G. (1984)

2.3.4 Infiltração da água no solo

Segundo Libardi (2005), a infiltração de água é definida como o processo pelo qual a água penetra no perfil do solo no sentido descendente através de sua superfície. A quantidade de água que passa pelo perfil do solo por unidade de tempo é denominada taxa de infiltração ou velocidade de infiltração da água no solo (VI), expressa

em cm h^{-1} ou mm h^{-1} . É esse parâmetro que indica qual o comportamento de uma lâmina de água sobre o solo em relação ao tempo para nele infiltrar.

Esta taxa de infiltração vai diminuindo ao longo do tempo de infiltração, tendendo a uma taxa constante. Esta constância ao longo do tempo é denominada de velocidade de infiltração básica (VIB), valor que deve corresponder à condutividade hidráulica média saturada ou quase saturada do perfil superficial do solo (Bouwer, 1978; Reichardt e Timm, 2004).

Em irrigação, tão importante quanto a VI é a VIB, sendo que ela quem indica se o solo suporta a intensidade de aplicação de água imposta por determinado tipo de emissor.

Klein (2008) ressalta que a capacidade de infiltração de água no solo é afetada por diversos fatores, como a textura, porosidade, teor de água inicial do solo, estabilidade dos agregados, rugosidade superficial, cobertura da superfície do solo, tipos de manejo, entre outros. José (2013) comparando a taxa de infiltração de água em solos sob pousio, após terem sido cultivados em plantio convencional, obteve valores de taxa de infiltração básica de 31,85 e 15,38 mm h^{-1} para Nitossolo Vermelho distroférrico (76% de argila) e Latossolo Vermelho distrófico (21% de argila) respectivamente.

Na tabela 1 está apresentada a classificação do solo a partir da velocidade de infiltração básica segundo CIENTEC (2010).

Tabela 1. Valores de classificação do solo a partir da VIB (mm h^{-1})

Solo	VIB (mm h^{-1})
Solo de VIB muito alta	> 30
Solo de VIB alta	15-30
Solo de VIB média	5-15
Solo de VIB baixa	<5

Fonte: Adaptado de CIENTEC (2010)

2.3.5 Determinação de área de solo mobilizada e recalque

O método do perfilômetro consiste na utilização de um aparelho que foi proposto por Allmares et al. (1966) para determinar o índice de rugosidade superficial do solo.

Gamero e Benez (1990) utilizaram o perfilômetro para determinação da área mobilizada do solo, definindo-a como sendo a área situada entre o perfil original e o perfil de fundo de um sulco de preparo do solo, enquanto a área de elevação é aquela situada entre o perfil original e o perfil da superfície do solo após a mobilização.

Segundo Paula (2008), para ensaios e estudos das interações entre rodado e solo, o perfilômetro tem como função obter o perfil, área e volume de solo mobilizado devido às cargas aplicadas pelo rodado. Foi observado que, baixas pressões de inflação ou altas cargas, podem levar a uma sobrecarga nos pneus, provocando grandes deformações no solo. Estas deformações no solo são a área de contato e a profundidade do recalque do pneu no solo (Paula, 2008).

Segundo Mialhe (1993) recalque é uma designação técnica com base no conceito de mecânica do solo e se trata do rebaixamento do leito de rolamento pelos rodados causando uma diminuição de volume e macroporos, com expulsão do ar e água neles existentes.

Conforme Leite et al., (2010) observaram em Latossolo Vermelho distroférico típico de textura arenosa, a influência de diferentes teores de água sobre área de solo mobilizada e recalque ocasionados pelo contato do pneu com o solo foi maior quando o teor de água do solo estava em 0,18 g.g-1, com valores de 916,62 cm² e 18,83 cm de área mobilizada e profundidade de recalque, respectivamente.

Couto et al., (2013) estudaram a compactação e recalque superficial em solo de textura argilosa, analisaram a regressão para o recalque do solo em função da intensidade de tráfego, o comportamento apresentou ajuste linear. Com o aumento do tráfego houve tendência de aumento no recalque do solo. Os maiores recalques foram obtidos para oito passadas em movimento vai-e-vem do rodado de um trator agrícola, com valor médio de 15,74 cm; para uma passada o valor foi 9,11cm.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais

O presente trabalho iniciou-se em abril de 2014, na Fazenda Experimental Lageado pertencente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agronômicas, localizada no município de Botucatu, no estado de São Paulo.

O experimento foi realizado em duas áreas, sendo a primeira, denominada como “Área 1”, localizada geograficamente a: 22° 50' 24” Latitude Sul, 48° 25' 23” Longitude Oeste e altitude de 791 m e a segunda como “Área 2” localizada a 22° 51' 17” Latitude Sul, 48° 26' 10” Longitude Oeste e altitude de 822 m. (Figura 6 e 7).

O solo da Área 1 foi classificado conforme os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (2013), correspondente como Nitossolo Vermelho distroférico (NVd) de textura argilosa, com 50 % de teor de argila. A área para o estudo foi de 3.670 m² situada em relevo plano e estava compactada, por ser utilizada como pista de solo mobilizado para ensaio de máquinas, não apresentando restos vegetais.



Figura 6. Vista da área 1: NVd, Fazenda Experimental Lageado, 17/04/2014.

Para a caracterização química inicial e composição granulométrica, foram coletadas amostras (compostas de 5 subamostras simples) nas camadas de 0,00 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, em toda a área experimental, com o auxílio de um enxadão e uma fita métrica. A análise química foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Recursos Ambientais. Determinou-se o pH (em CaCl₂), matéria orgânica, H e Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ e P(resina) segundo a metodologia adaptada de Raij et al., (2001). A composição granulométrica foi realizada no Laboratório de Física do Solo do mesmo departamento, conforme metodologia da Embrapa (1997). Os resultados da caracterização química e física do solo da área 1 são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Resultado inicial da análise química do solo da área experimental 1

Camadas	pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
m	CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	mmol/dm ³						
0,0-0,20	4,0	22	10	189	2,1	12	3	17	205	8
0,20-0,40	4,0	20	6	181	2,2	17	3	22	203	11

Tabela 3: Caracterização granulométrica da área experimental 1

Camadas (m)	Frações granulométricas			
	Areia	Silte	Argila	Textura
		g kg ⁻¹		
0,0-0,20	348	156	496	Argilosa
0,20-0,40	345	153	502	Argilosa

A segunda área experimental, denominada Área 2, o solo foi classificado segundo a Classificação de Solos da Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho (LV), com textura

media, teores de argila entre 15 a 35 % e elevado grau de intemperização. O relevo predominante era suave ondulado e ocupam as partes mais elevadas da Fazenda Experimental Lageado. A área para o estudo foi de 4.239 m² e encontrava-se coberta por vegetação espontânea, a mesma não vem sendo cultivada há vários anos.



Figura 7. Vista da área 2: LV, Fazenda Experimental Lageado, 16/04/2014.

Os resultados da caracterização química e física do solo da área 1 são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Resultado inicial da análise química do solo da área experimental 2

Camadas	pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
m	CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmol/dm ³ -----						
0,0-0,20	4,2	12	4	48	1,1	7	2	10	58	17
0,20-0,40	4,1	12	4	53	0,9	6	2	9	63	15

Tabela 5. Caracterização granulométrica da área experimental 2

Camadas (m)	Frações granulométricas			
	Areia	Silte	Argila	Textura
	g kg ⁻¹			
0,0-0,20	706	38	256	Média
0,20-0,40	696	41	263	Média

3.2 Clima e precipitação

O clima da região é do tipo Cfa, clima temperado quente (mesotérmico) úmido, segundo a classificação de Köppen (1948), com estação seca, que vai de abril a agosto segundo a classificação de Thornthwaite (CUNHA E MARTINS, 2009).

Os dados de precipitação mensal, Figura 8, foram coletados na Estação Meteorológica da Fazenda Lageado, entre janeiro de 2014 a agosto de 2014. O período de coleta dos dados foi conciliado com o período de estiagem da região, que se iniciou no fim de maio, por isto foi necessário utilizar um sistema de irrigação, com o objetivo de elevar os valores de teor de água no solo possibilitando as demais avaliações.

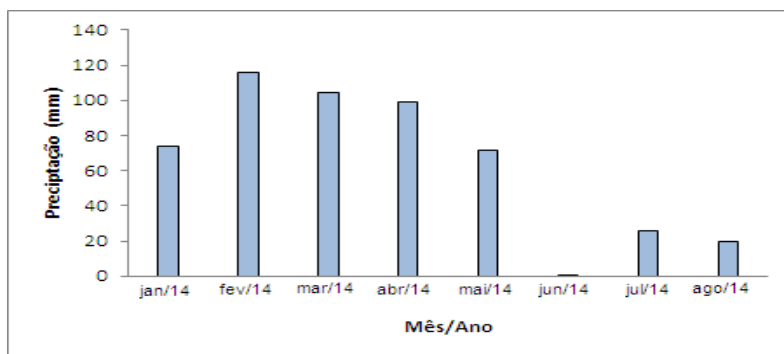


Figura 8. Precipitação no município de Botucatu/SP, durante o período de janeiro de 2014 a agosto de 2014.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, sendo os tratamentos de compactação realizados após o preparo do solo, em parcelas de 150 m² (5x30 m) quando o teor de água do solo estava próximo à capacidade de campo (2 dias após a chuva). Os tratamentos foram constituídos de acordo com a intensidade do tráfego: T0 = 0 controle (sem passada do trator); T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4 = 5 e T5 = 10 passadas consecutivas do trator, em movimento unidirecional, no mesmo local. Ocorreu discrepância nas avaliações do tratamento T2 da Área 2, portanto não está na análise estatística (Figura 9).

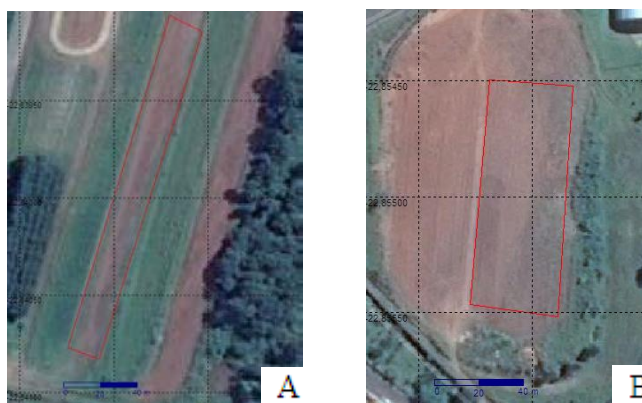


Figura 9. Vista geral: área 1: 0,36 ha (A) e área 2: 0,42 ha (B).

3.4 Características dos equipamentos utilizados

O solo de ambas as áreas, foi inicialmente subsolado e gradeado a uma profundidade média de 0,35 m. Para as operações de preparo do solo, foi utilizado um trator com potência máxima de 89 kW (121 cv). O subsolador utilizado foi de arrasto, com cinco hastes subsoladoras, equipado com rodas de controle de profundidade acionadas por atuadores hidráulicos, profundidade máxima de 0,40 m. A grade utilizada após a subsolagem foi a niveladora - tipo "off set", com 32 discos de 180 mm de diâmetro e profundidade média de trabalho de 0,12 m (Figura 10).



Figura 10. Preparo do solo: subsolador (A) e grade niveladora (B).

O trator usado para simular a compactação do solo tinha potência máxima de 121 kW (165 cv), tração dianteira auxiliar (4x2 TDA), montado em pneus 16.9-28" R1 com 22 psi e 20.8-38" R1 com 24 psi, todos com 75% de lastro líquido. O peso total do trator, 91300 N (9310 kg), foi determinado por meio de balança de piso com célula de carga e receptor de pesagem, tendo uma distribuição de carga de aproximadamente 40 % no eixo dianteiro e 60% no eixo traseiro (Figura 11).



Figura 11. Peso do trator indicado por balança.

As áreas de contato do pneu foram mensuradas, sendo a área do pneu dianteiro de 52 cm de comprimento e 43 cm de largura e do traseiro de 60 cm de comprimento e 52 cm de largura (Figura 12).



Figura 12. Área de contato do pneu.

3.5 Instalação e condução do experimento

A instalação do experimento iniciou-se no dia 09/04/2014 com o preparo do solo e delimitação das áreas experimentais. Em ambas as áreas foram realizadas uma operação com o subsolador e duas operações com a grade niveladora quando o solo encontrava-se com teor de água na região de friabilidade. Os tratamentos ($T_0 = 0$; $T_1 = 1$; $T_2 = 2$; $T_3 = 3$ e $T_4 = 5$ e $T_5 = 10$ passadas do trator) e a primeira avaliação de resistência do solo a penetração foram realizados 2 dias após uma chuva forte (100 mm aproximadamente) no dia 16/04/2014 para a área 2 com teor de água de 16,12%, próximo a capacidade de campo (CC) e 3 dias após a chuva forte para área 1 no dia 17/04/2014 em que o solo encontrava-se com teor de água de 23,5% também próximo a CC.

A segunda avaliação de resistência à penetração do solo foi realizada quando o solo encontrava-se com teor de água em ponto de murcha permanente (PMP) em ambas as áreas, na área 2 a avaliação foi realizado no dia 30/04/2014 com 10,03% de teor de água e na área 1 no dia 08/05/2014 quando o solo encontrava-se com 17,07% de teor de água.

Nos dias 28/05 (área 2) e 29/05 (área 1) foram realizadas a coleta de anéis indeformados do solo para: densidade do solo, retenção de água e porosidade do solo.

O período de coleta dos dados de resistência à penetração do solo foi conciliado com o período de estiagem da região, que se iniciou ao fim de maio. Devido a necessidade de elevar o teor de água do solo para realizar as avaliações, foi utilizado um sistema de irrigação, através de caminhão tanque de 6000 L. No dia 23/06/2014 foi realizada a irrigação da área 1, utilizando-se uma lâmina de água de 25 mm, e na área 2 a irrigação foi realizada no dia 24/06/2014 utilizando-se uma lâmina de água de 40 mm. A lâmina aplicada foi monitorada por pluviômetros instalados nas áreas e os cálculos de irrigação foram realizados segundo as equações 1 e 2, do Manual de Irrigação (BERNARDO, S. 1995).

$$\frac{DTA = (CC - PMP) \times Da}{10} \quad (1)$$

Em que,

DTA = disponibilidade total de água (mm cm^{-1} de solo)
CC = teor de água na capacidade de campo (%)
PMP = teor de água no ponto de murcha permanente (%)
Da = densidade aparente do solo (g/cm^3)

$$CTA = DTA \times z \quad (2)$$

Em que,

CTA = capacidade total de água no solo (mm)
DTA = disponibilidade total de água (mm cm^{-1} de solo)
z = profundidade

A terceira avaliação de resistência a penetração do solo foi realizada em 26/06/2014 nas duas áreas, quando o teor de água da área 1 encontrava-se com 21,53% e da área 2 com 14,0%. A quarta e ultima avaliação de resistência a penetração do solo foi realizada na área 2 no dia 30/06/2014 sendo que o teor de água do solo encontrava-se em 12,22% e na área 1 dia 02/07/2014 quando o teor de água encontrava-se em 19,14%. Os valores de teor de água citados são referentes apenas a profundidade 0 a 0,1m (embora tenha sido avaliado até a 0,4 m de profundidade), foi

tomada como referência esta camada a fim de padronizar as avaliações, já que o teor de água do solo variou em profundidade. Os dados de teor de água do solo neste trabalho foram dispostos em ordem crescente de teor de água e não em ordem que foram coletados, isto para facilitar a visualização do efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo.

A avaliação de infiltração de água do solo foi realizada, pelo método dos anéis concêntricos, dia 15/07/2014 na área 1 e dia 16/07/2014 na área 2.

3.6 Características avaliadas

3.6.1 Determinação da resistência do solo à penetração (RP)

As amostragens de solo de resistência à penetração (RP) foram coletadas com o auxílio de um penetrômetro hidráulico-eletrônico, montados na Unidade Móvel de Amostragem do Solo – UMAS (Figura 13) desenvolvida pelo NEMPA, Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrícolas do departamento de Engenharia Rural, da FCA/UNESP, Campus de Botucatu/SP, conforme descrito por Lanças e Santos Filho (1998).



Figura 13. UMAS

O penetrômetro era constituído de um cilindro hidráulico, uma haste de aço contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30° com diâmetro de 20,27 mm, e área 323 mm^2 que obedecia as características estruturais e operacionais definidas pela norma ASABE (2012). Acionado e movimentado por um pistão e válvulas hidráulicas, enviava os resultados para um sistema eletrônico de aquisição e

armazenamento de dados composto pelo NIDAQ 6009 da “National Instruments”, que forneceu os valores de força, obtidos através de uma célula de carga encaixada na haste com capacidade de 2000 kgf trabalhando na velocidade de penetração de 30 mm s^{-1} , e de profundidade de penetração no solo, que foram gerados por um potenciômetro multivoltas, que coletava os dados a cada centímetro de profundidade.

O sistema de aquisição de dados se comunicava com um computador portátil via porta USB, que fazia a leitura dos dados e, através do software criado em “Labview”, também da “National Instruments”, gerava os gráficos de resistência à penetração do solo para cada ponto (Figura 14 e 15).

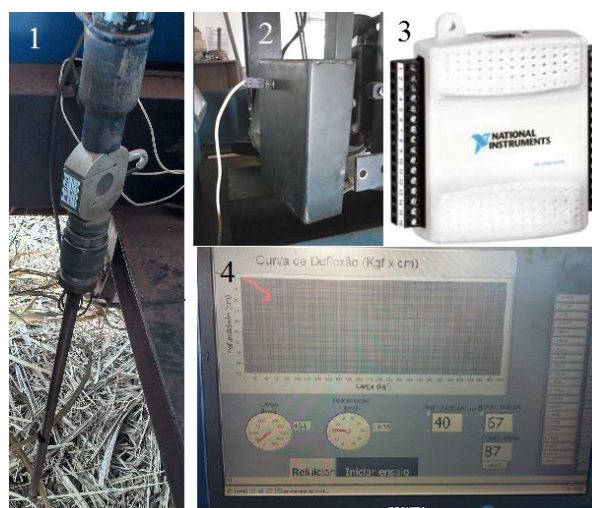


Figura 14. Célula de carga e haste (1), sensor de profundidade (2), sistema de aquisição dos dados “NIDAQ 6009” (3) e programa de leitura em computador portátil (4).

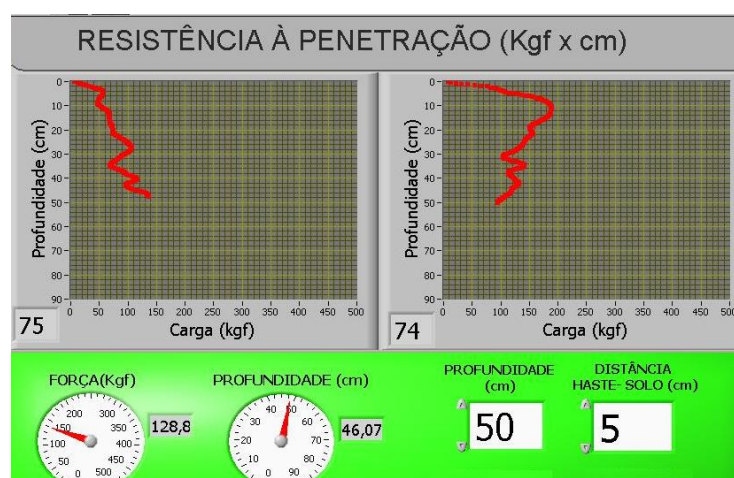


Figura 15. Visualização de aquisição de dados no computador.

Para avaliar a resistência do solo à penetração, foi realizada quatro repetições por tratamento. Para o tratamento $T0 = 0$, foram coletados três pontos por repetição. Para os demais tratamentos, foram feitas cinco leituras por repetição distanciadas aproximadamente 0,20m entre si, em transepto (sequência de pontos coletados transversalmente) à linha do rodado. A resistência à penetração do solo foi obtida até a profundidade de 0,40 m. Iniciando a coleta na entrelinha do lado esquerdo do rodado passando pela linha do rodado até a outra entrelinha do lado direito. Os transeptos foram realizados nas posições amostrais: 2 pontos coletados entre linha do rodado e 3 pontos coletados na linha que passou o rodado, conforme Figura 16. Foi realizado um total geral de 112 pontos por avaliação de teor de água, para cada área.



Figura 16. Transepto no rodado, com indicação dos pontos amostrados.

Os valores referentes aos 3 pontos coletados no local em que passou o rodado foram usados para calcular o efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo. Os 5 pontos coletados em transepto foram para estudar a distribuição da compactação e o efeito do teor de água nesta avaliação no perfil do solo.

3.6.1.1 Índice de Cone do Solo

A resistência do solo à penetração foi utilizada para calcular o Índice de Cone do solo (IC), que segundo a ASABE (2012), é definido para uma determinada faixa de profundidade. Avaliou-se o IC nas camadas de 0 a 0,1, 0,1 a 0,2, 0,2 a 0,3 e 0,3 a 0,4m, sendo calculado o valor médio por tratamento de IC obtido nas faixas de profundidades e nas 5 posições amostrais citadas anteriormente.

Para gerar as figuras da distribuição da compactação no perfil do solo através do IC, foi utilizado o programa Surfer 9.0 (Golden software). A interpolação

dos valores foi realizada pela krigagem, conforme descreve SALVIANO et al.(1998). Os transeptos das 5 posições amostrais foram representados nas figuras pela distância entre eles, ou seja, ponto 1= 0 cm, 2=20 cm, 3=40 cm, 4=60 cm e ponto 5=80 cm, conforme Figura 17.

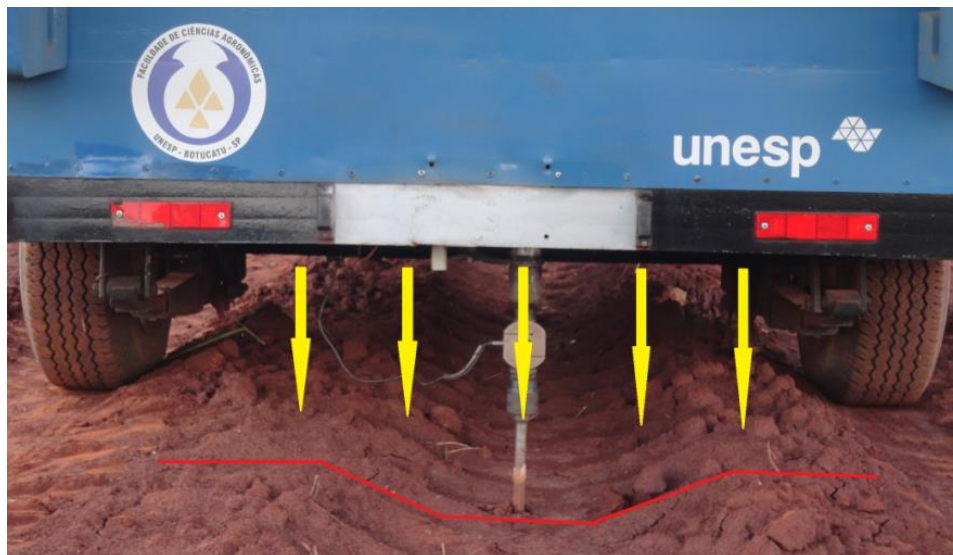


Figura 17. Amostras de IC coletadas em transepto.

3.6.2 Teor de água do solo a base de massa – Umidade gravimétrica

A determinação do teor de água do solo foi monitorada durante as avaliações de resistência a penetração, através de 4 amostras para as quatro camadas estudadas: 0 a 0,1, 0,1 a 0,2, 0,2 a 0,3 e 0,3 a 0,4m. Realizado pelo método gravimétrico padrão de estufa, o teor de água no solo foi determinado de forma direta e seu valor expresso em percentagem de umidade em massa (base seca), que consiste na pesagem anterior e posterior à secagem em estufa a 105°C por 24 horas.

$$U = \left[\left(\frac{M_a - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \times 100 \right] \quad (3)$$

Em que,

U = umidade gravimétrica (% de massa)

M_a =massa de solo com água (g)

M_{ss} =massa de solo seco a 105-110°C (g)

3.6.3 Limites de consistência do solo

Os limites de plasticidade foram determinados conforme o método de Sowers (1965). Os limites de liquidez (LL) e limite de contração (LC) foram determinados de acordo com Bowels (1986).

3.6.4 Densidade de partículas (Dp)

A densidade de partícula (Dp) foi determinada através do método do balão volumétrico, com álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

3.6.5 Densidade aparente do solo (Ds)

A densidade aparente do solo foi determinada utilizando-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). A amostragem foi realizada na linha do rodado, coletando-se amostras indeformadas (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro) das camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade. Foram realizadas 3 amostragens por tratamento para cada faixa de profundidade, totalizando 36 anéis para cada área. Os anéis contendo amostras indeformadas foram levados para o laboratório e pesados em uma balança analítica, depois de serem utilizados para fazer a porosidade e a curva de retenção de água no solo, foram colocados na estufa a 105 – 110 °C por no mínimo 24 horas.

$$D_a = \left(\frac{M_s}{V_s} \right) \quad (4)$$

Em que,

D_s = Densidade aparente do solo (g/cm³)

M_s = massa do solo seco (g)

V_s = volume do solo contido no cilindro (cm³)

3.6.6 Densidade máxima do solo (Dmáx)

Para a coleta de amostras para determinação da densidade máxima do solo, utilizou-se enxadão, balde, balança de precisão e estufa elétrica com temperatura

de 105°C. Foram coletados aproximadamente 5 kg de solo de forma aleatória em cada área nas profundidades, 0-0,20 e 0,20-0,40m . Para a determinação das curvas de ajuste foi utilizada a metodologia do ensaio de Proctor conforme preconiza a norma MB-33 da ABNT para Ensaio de Compactação (Figura 18).

Os resultados da densidade em função do teor de água do solo foram ajustados, obtendo-se uma equação polinomial de segundo grau utilizando os dados tabulados em planilha no programa Microsoft Excel e, com a equação da curva, foi possível obter a máxima densidade, bem como a umidade ótima para essa compactação.



Figura 18. Ensaio de Proctor, amostra de solo sendo retirada do cilindro com o auxílio do extrator de amostras.

3.6.7 Densidade relativa do solo (DR)

Os valores de densidade relativa do solo foram obtidos através dos valores de densidade aparente do solo e densidade máxima do solo (Teste de Proctor), conforme a Equação 5 (KLEIN, 2008). A compactação relativa é expressa em porcentagem, portanto o valor de DR deve ser multiplicado por 100.

$$DR = \frac{D_s}{D_{máx}} \times 100 \quad (5)$$

Em que,

DR = densidade relativa (%)

D_s = densidade aparente do solo (g/cm^3)

$D_{máx}$ = densidade máxima do solo (g/cm^3)

3.6.8 Porosidade do solo

A determinação da microporosidade do solo foi realizada com amostras indeformadas coletadas com cilindros de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, os mesmos utilizadas para determinação do peso específico aparente do solo. Foi utilizada uma mesa de tensão (figura 19), regulada em 60 cm de altura, no qual aplicou nas amostras de solo uma sucção de -0,006 MPa. O cálculo da porosidade total do solo foi realizado a partir das determinações de densidade do solo e de partículas. E a macroporosidade do solo foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, utilizando-se a metodologia apresentada pela Embrapa (1997).

$$M_i = \left(\frac{a-b}{c} \right) \quad (6)$$

Em que,

M_i = microporosidade ($g\ cm^{-3}$)

a = peso da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 cm de coluna de água (g)

b = peso da amostra seca a 105°C (g)

c = volume do cilindro (cm^3)

$$P_T = \left(\frac{a-b}{a} \right) \quad (7)$$

Em que,

P_T = porosidade total ($g\ cm^{-3}$)

a = densidade real (g/cm^3)

b = densidade aparente (g/cm^3)

3.6.9 Água disponível no solo

A água disponível às plantas, segundo Veihmeyer e Hendrickson (1949), corresponde a um intervalo de umidade que vai de um limite superior, a capacidade de campo (CC), até um limite inferior, o ponto de murcha permanente (PMP).

Considerando que os limites de CC e PMP dependem das propriedades físicas do solo e, que essas são alteradas pelo sistema de manejo, o grau em

que são afetadas pode refletir em menor disponibilidade de água as plantas se a quantidade adicional de água armazenada encontra-se em potenciais menores do que aqueles que as plantas conseguem extrair. (GONÇALVES, 2011).

O teor de água na capacidade de campo, pode ser definido pelo teor de água do solo no potencial matricial de $-0,01$ MPa (HAISE et al., 1955) e o ponto de murcha permanente, pelo teor de água do solo no potencial de $-1,5$ MPa (RICHARDS, 1965). Os limites foram obtidos através das câmaras de Richards (figura 19) utilizando amostras deformadas de solo (Embrapa 1997) . As diferentes avaliações de IC neste estudo foram realizadas entre os limites de teor de água próximo ao de CC e PMP, por isto a necessidade de estimar estes valores.

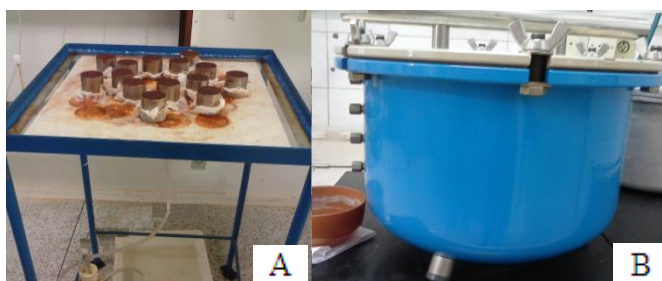


Figura 19. Mesa de tensão (A) e câmaras de pressão de Richards (B).

3.6.10 Infiltração de água no solo

A avaliação de infiltração de água no solo foi realizada utilizando-se o método do infiltrômetro de anéis concêntricos de carga constante (Figura 20). Este método é constituído de dois anéis posicionados de forma concêntrica no solo (vista superior), o anel interno possui diâmetro de $0,15\text{m}$ e o externo de $0,30\text{m}$, ambos foram enterrados aproximadamente $0,10\text{m}$ no solo e nivelados com um nível de mão.

Depois que os anéis foram instalados, a água foi colocada ao mesmo tempo nos dois anéis, utilizando uma proveta graduada no anel interno, que possibilitava saber o volume de água aplicada no cilindro. As medidas de infiltração foram feitas no anel interno, pois o anel externo tem a finalidade de bordadura, impedindo que a infiltração se processe no sentido lateral do solo.

A água era acrescentada de maneira a manter-se uma lâmina de água de aproximadamente $0,10\text{m}$, iniciado a infiltração, a água era repostada, permitindo uma variação máxima de 2 cm na altura do nível da água no anel interno, dando uma condição

de carga hidráulica constante, marcando-se o tempo e o volume de água gasto a cada 10 minutos. Em cada tratamento, foi realizada 3 repetições consecutivas, a coleta de dados era encerrada quando a velocidade de infiltração observada no anel interno tornava-se constante com o tempo. Para calcular a VIB (velocidade de infiltração básica) foi considerada a infiltração constante quando o valor da leitura da lâmina infiltrada no anel interno se mantinha constante pelo menos em três medições.



Figura 20. Determinação da velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB) através do método dos anéis concêntricos.

3.6.11 Determinação de área e profundidade de recalque do solo

As áreas e profundidade de recalque do solo foram realizadas pelo método do perfilômetro. A avaliação ocorreu no dia 16/04/2014 (área 1) e 17/04/2014 (área 2), e foram determinadas logo após as passadas do trator.

Foram utilizados dois perfilômetros de madeira graduados em centímetros, o primeiro com 31 hastes (utilizada na área 1) e o segundo com 21 hastes (utilizado na área 2), espaçadas a cada 5 cm, instaladas sobre marcadores de madeira (Figura 21). Efetuou-se o levantamento do perfil da superfície do solo, conforme a metodologia descrita por Lanças (1987). Após a obtenção dos dados, estes foram plotados no programa Microsoft Excel. A área de solo mobilizada para os diferentes tratamentos foi determinada com o auxílio do software “SPLAN” - Sistema de planimetria digitalizada, desenvolvido por Silva et al (1993). Este software possui mesa digitalizadora, marca

DIGICON, modelo MDD - 1812, com área útil de 18" x 12" (457 x 305 mm - para folha padrão - ABNT - A3).



Figura 21. Perfilômetro utilizado na medição de área mobilizada, área 1.

Efetuuou-se o levantamento do perfil da superfície do solo, conforme a metodologia descrita por Lanças (1987). Após a obtenção dos dados, estes foram plotados no programa Microsoft Excel. A área de solo mobilizada para os diferentes tratamentos foi determinada com o auxílio do software "SPLAN" - Sistema de planimetria digitalizada, desenvolvido por Silva et al (1993). Este software possui mesa digitalizadora, marca DIGICON, modelo MDD - 1812, com área útil de 18" x 12" (457 x 305 mm - para folha padrão - ABNT - A3).

3.7 Análise estatística

Utilizou-se o delineamento experimental casualizado, sendo analisados os tratamentos de ambas áreas (solo argiloso e solo de textura média) em função do teor de água e IC do solo em diferentes profundidades de amostragem e outros atributos:

Os resultados de teor de água do solo foram submetidos a análise de variância em esquema fatorial, sendo quatro amostragens (I, II, III e IV) e quatro profundidades de coleta (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40m)

Os resultados de IC do solo foram submetidos a análise de variância em esquema fatorial, sendo quatro profundidades de coleta (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40m) e seis tratamentos (T0; T1; T2; T3; T4 e T5). (Obs T2 área 2)

Os resultados de densidade do solo foram submetidos a análise de variância em esquema fatorial, sendo duas profundidades de coleta (0-0,20 e 0,20-0,40m) e seis tratamentos (T0; T1; T2; T3; T4 e T5).

Os resultados foram tabulados e submetidos à análise de variância utilizando-se o programa estatístico “MINITAB”, versão 16.0 (MINITAB®, 2010). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio da aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Área 1

As análises de caracterização do solo e efeito da compactação sobre as propriedades físico-hídrico-mecânicas do Nitossolo Vermelho distroférico, são apresentados a seguir:

4.1.1 Limites de consistência do solo

O resultado da análise física de caracterização do solo está apresentado na Tabela 6 e, quando analisado a faixa de friabilidade (FF) (LP – LC) pode-se observar que ela é reduzida, fato que pode representar uma desvantagem e necessidade de um manejo diferenciado quando refere-se ao preparo do solo ou tráfego de máquinas.

Tabela 6. Limites de consistência do solo.

Profundidade (m)	Limite de Consistência do solo (%)				
	LL	LP	FF	LC	
0,00-0,20	33,9	19,9	← 2,1 →	17,8	
0,20-0,40	35,6	18,8	← 1,6 →	17,2	

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), FF (Faixa de Friabilidade) e LC (Limite de Contração).

4.1.2 Água disponível no solo

A média dos resultados do teor de água no solo para a tensão 0,01 MPa (CC) foi de 28,01 % na profundidade de 0,00 - 0,20m e 28,52 % na profundidade 0,20 - 0,40m. Para a tensão 1,5 MPa (PMP) foi de 16,59 % na profundidade de 0,00 - 0,20m e 17,50 % na profundidade 0,20 - 0,40m. O teor de água no solo entre as tensões 0,01 e 1,5 MPa variou de 11,42 % para a profundidade 0,00 - 0,20m e 11,02 % para a profundidade 0,20 - 0,40m (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios de teor de água no solo (%) nas tensões 0,01 e 1,5 MPa para as camadas estudadas.

Profundidade	Tensões MPa	
	0,01	1,5
M	%	
0,00 - 0,20	28,01	16,59
0,20 - 0,40	28,52	17,50

4.1.3 Teor de água e Índice de Cone do solo (IC)

A síntese da análise de variância dos valores médios de teor de água no solo no momento das diferentes amostragens de resistência do solo à penetração está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios de teor de água do solo (%), nas diferentes avaliações de resistência à penetração do solo e profundidades de amostragem.

Profundidade (m)	Amostragem I	Amostragem II	Amostragem III	Amostragem IV	Média
0-0,10	17,1 dB	19,1 cC	21,5 bC	23,4 aC	20,3 D
0,10-0,20	17,2 dB	19,9 cB	22,2 bBC	23,9 aAB	20,8 C
0,20-0,30	17,9 dB	20,5 cB	22,8 bAB	23,9 aAB	21,3 B
0,30-0,40	19,2 dA	21,8 cA	23,3 bA	24,5 aA	22,2 A
Média	17,8 d	20,3 c	22,5 b	23,9 a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Pode-se observar que no período de maior estiagem (amostragem I e II) apenas a camada mais profunda (0,30-0,40m) continha maior teor de água em relação às demais ($p < 0,05$), conforme aumentou o teor de água do solo (amostragem, III e IV)

ocorreu acréscimo gradativo do teor de água conforme aumentou a profundidade. Nota-se também que houve diferença do teor de água entre as amostragens, que era o intento necessário para avaliar este efeito nos valores de resistência do solo à penetração.

As Tabelas de 9 a 12, apresentam valores médios de IC (MPa) obtidos nas avaliações em diferentes períodos de amostragem e teores de água, para os tratamentos T0, T1, T2, T3, T4 e T5 nas profundidades: 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30 e 0,30 a 0,40m.

Notou-se que os valores de IC foram sensíveis as diferentes intensidades de tráfego e diferiram em profundidade, concordando com Duruoha (2000) que observou que a intensidade de compactação depende de uma serie de fatores, principalmente o tipo de solo, teor de agua, peso do veículo e número de vezes que este se desloca sobre o terreno. Yavuzcan et al. (2005) observaram que o trafego pesado pode causar compactação até 0,3-0,4 m de profundidade.

Na amostragem I, tabela 9, realizada com teor de água do solo próximo ao PMP, os valores médios de IC apresentaram diferenças significativas entre profundidades e tratamentos.

Tabela 9. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem I (teor de água 17,8%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM I					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,5 b C	1,5 abC	1,7 aC	1,6 aBC	1,4 E
1	3,4 abB	4,2 aB	3 bcB	2 cBC	3,1 D
2	3,9 bAB	5,6 aA	3,3 bB	2,9 bAB	3,9 C
3	4 bAB	6,5 aA	4,1 bAB	3,1 bA	4,4 B
4	4,4 bAB	6,4 aA	4,5 bA	3,9 bA	4,8 AB
5	4,6 bA	6,7 aA	4,5 bA	3,9 bA	5 A
Média	3,5b	5,2a	3,5b	2,9c	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

No T0, em que não passou o rodado, observou-se que o IC aumentou conforme a profundidade, ou seja, a camada mais superficial 0-0,10m obteve menor IC, aumentando gradativamente até a ultima camada (0,30-0,40m), este

comportamento não foi observado nos demais tratamentos em que houve tráfego, pois nestes, houve aumento de IC na camada de 0,10-0,20m e redução gradativa após essa camada caracterizando interferência do rodado nas camadas superficiais do solo.

Foi observado que o IC na profundidade 0,10-0,20m não diferiu da profundidade 0-0,10m apenas para tratamento 1, no entanto, esta camada (0,10-0,20m) obteve os maiores valores de IC em relação aos demais para os tratamentos T2, T3, T4 e T5 (Tabela 9).

Na profundidade 0-0,10m, o T5 sofreu maior compactação obtendo valor de IC de 4,6 MPa, os tratamentos T4, T3 e T2 não diferiram entre si, o T0 obteve o menor valor de IC de 0,5 MPa ($P < 0,05$).

Em relação camada de profundidade 0,10-0,20m os tratamentos T5, T4, T3 e T2 tiveram maiores valores de IC, seguidos do T1 e T0. Na profundidade 0,20-0,30m os tratamentos que tiveram maior IC foram o T4 e T5, seguidos dos tratamentos T2 e T1. O T3 não diferiu destes (T5, T4, T2 e T1), e o T0 obteve o menor valor de IC, quando comparado aos demais tratamentos. Na profundidade 0,30-0,40m, os tratamentos T5, T4, T3 e T2 não diferiram ($P > 0,05$), e tiveram os maiores valores de IC; os menores valores foram observados nos tratamentos T0 e T1.

De maneira geral houve alterações significativas nas propriedades físicas do solo em função da intensidade do tráfego agrícola sendo que, a compactação ocorreu em maior intensidade na profundidade de 0,10 a 0,20m, com 32,7 % de incremento em relação às camadas com segundo maior valor de IC de cada tratamento, corroborando com Nagaoka (2003), que estudou a resistência do solo à penetração após tráfego com diferentes tipos de pneus e observou valores de índice de cone superiores na camada de 10 a 20 cm do que na camada de 0 a 10, concluindo que os maiores incrementos na compactação ocorreram nesta camada. Esses valores obtidos também estão de acordo com os resultados obtidos por Ferreira (1998) e Fernandes (1996) que verificaram maior incremento da resistência à penetração, devido ao tráfego de máquinas, para a profundidade de 0 a 15 cm.

Em relação à amostragem II, tabela 10, observou-se que o IC do T0 não diferiu entre profundidades.

Os demais tratamentos tiveram o mesmo comportamento da amostragem I cuja profundidade 0,10-0,20m teve maiores valores de IC, seguida das profundidades 0-0,10 e 0,20-0,30 e 0,3-0,4m. Blanco-Canqui et al (2010) estudaram o

tráfego agrícola em solo de argila sedimentada e observaram grandes impactos perto da superfície e também em maiores profundidades, e que a magnitude das mudanças induzidas pelo tráfego foi muito maior do que o observado em outras texturas de solo.

Tabela 10. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem II (teor de água 20,3%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM II					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,4 aC	1,2 aC	1,4 aC	1,5 aB	1,1 D
1	3 abB	3,7 aB	2,2 bcBC	1,6 cB	2,6 C
2	3,9 abAB	4,9 aAB	2,8 bcAB	2,6 cAB	3,5 B
3	4 abAB	4,8 aAB	2,9 bcAB	2,6 cAB	3,6 B
4	4 bAB	5,3 aA	3,5 bA	3,4 bA	4,1 A
5	4,4 bA	5,7 aA	3,6 bcA	3 cA	4,2 A
Média	3,3 b	4,2 a	2,7 c	2,5 c	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Em relação aos tratamentos, na profundidade 0- 0,10m, o T5 obteve maior valor de IC seguido do T4, T3 e T2 que não diferiram do T5 e T1, o T0 teve menor valor de IC. Na camada 0,10-0,20 o T5 e T4 tiveram maiores valores de IC, comportamento este que também foi observado nas demais profundidades (0,2-0,3 e 0,3-0,4) e na média geral dos tratamentos, onde T5 e T4; T3 e T2; T1; T0 obtiveram maiores valores de IC respectivamente.

Observou-se que mesmo com duas vezes mais passadas do trator (T5 em relação ao T4) não houve diferença significativa nos valores de IC ($P>0,05$) em subsuperfície. Esses resultados corroboram com os de Hamza & Anderson (2005) os quais, analisando o grau de compactação na superfície do solo, obtiveram maiores incrementos logo após as primeiras passadas. Couto et al., (2013) também observaram que o grau de compactação oriundo do tráfego de quatro passadas, diferiu dos tráfegos de zero e duas passadas, mas não de oito.

O comportamento das médias da amostragem III, tabela 11, foram muito semelhantes ao da amostragem I e II, em que a profundidade 0,10-0,20m obteve maiores valores de IC em todos os tratamentos, com exceção para o T0; e que o IC também

aumentou conforme o aumento do número de passadas do trator porém em certa intensidade de tráfego este valor não diferiu mais estatisticamente.

Tabela 11. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem III (teor de água 22,5%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM III					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,3 bC	1,1 abC	1,3 aA	1,5 aB	1,1 D
1	2 abB	2,5 aB	1,9 abA	1,7 bB	2 C
2	2,2 aB	2,5 aB	1,8 aA	2,4 aA	2,2 C
3	2,5 bB	3,3 aA	2,5 bA	2,5 bA	2,7 B
4	2,8 abAB	3,4 aA	2,6 abA	2,5 bA	2,8 AB
5	3,5 aA	3,8 aA	2,5 bA	2,2 bAB	3 A
Média	2,2 b	2,8 a	2,1 b	2,1 b	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Embora o comportamento das amostragens tenham sido semelhantes, percebe-se que os valores das médias de IC da amostragem III, foram reduzidos, evidenciando a interferência da água sobre a haste do penetrômetro, já que o teor de água da amostragem III foi superior ao da amostragem I e II.

Na tabela 12 é possível visualizar o declínio dos valores de IC ocorrido na amostragem IV. Observou-se que não houve diferença significativa do IC entre as profundidades avaliadas nos tratamentos, com exceção do T0. Isto ocorreu em função da correlação inversa da resistência do solo à penetração com o teor de água no solo, pois nesta coleta de dados, o solo encontrava-se com teor de água mais próximo ao teor de água da CC.

Estes valores demonstram que o alto teor de água proporcionou um efeito lubrificante no solo quando em contato com a haste do penetrômetro, já que não houve modificação no valor de compactação das amostragens e sim apenas no teor de água em que foram realizadas, confirmando os resultados obtidos por Klein et al. (1998), Guerra (2000), Pereira et al. (2002) e Assis et al. (2009) cujos estudos demonstraram que a resistência à penetração foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo, concluindo que o elevado teor de água do solo impediu que a compactação fosse detectada.

Tabela 12. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem IV (teor de água 23,9%) para os tratamentos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM IV					
Tratamento	IC (MPa) por camadas (m)				Média
	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	
0	0,2cC	0,7bcB	1abB	1,3aA	0,8C
1	1bB	1,7aA	1,5aA	1,4abA	1,4B
2	1,3aAB	1,6aA	1,3aAB	1,4aA	1,4B
3	1,4aAB	1,5aA	1,5aA	1,4aA	1,5AB
4	1,4aAB	1,7aA	1,4aAB	1,5aA	1,5AB
5	1,5aA	1,9aA	1,5aA	1,6aA	1,7A
Média	1,1b	1,5a	1,4a	1,4a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Percebeu-se também que a detecção da compactação ocorreu proporcionalmente ao valor numérico da resistência a penetração, ou seja, em alto teor de água no solo, quanto maior era a compactação, maior o efeito lubrificante da água sobre a haste.

4.1.4 Efeito do teor de água no perfil do solo nas avaliações de IC

A distribuição da compactação do solo causada pelo rodado e a interferência nas áreas laterais ao rodado nos diferentes tratamentos, pode ser visualizada através do perfil do solo nas figuras 22 a 27. Ao analisar visualmente cada figura, nota-se que as áreas com maior ou menor resistência a penetração estavam bem definidas de acordo com a intensidade do tráfego, e pôde ser observado semelhança com o modelo de distribuição de tensões descrito por Boussinesq, que determina os acréscimos de tensões verticais devidos a uma carga pontual aplicada na superfície.

Notou-se que houve alteração da resistência à penetração mecânica em função da variação do teor de água do solo e que o aumento do IC ocorreu devido a maior intensidade do tráfego agrícola e a diminuição deste valor conforme o aumento do teor de água do solo.

Ao analisar os valores do IC do tratamento 0 (Figura 22), consegue-se perceber redução deste índice da amostragem I para IV, com uma media geral de 1,4 para 0,8 MPa. Na amostragem que o teor de água do solo foi o menor, pode ver-se uma predominância das faixas da cor verde (1 a 2 MPa), na avaliação com teor de água elevado, foi observado proporções maiores na faixa da cor verde claro (0 a 1 MPa).

Ao analisar os valores do IC do tratamento 1 (Figura 23), consegue-se perceber um aumento neste índice visivelmente acentuados na amostragem I, com predominância das faixas da cor amarelo e laranja (2 a 2,5 MPa e 2,5 a 3,5 MPa, respectivamente), e em proporções menores a cor vermelha (3,5 a 4,5 MPa). Na avaliação com teor de água elevado, proporções maiores na faixa da cor verde e verde claro foram predominantes (1 a 2 MPa e 0 a 1 MPa, respectivamente).

No caso da figura 24 do IC do tratamento 2, houve valores de resistência a penetração do solo acentuados na amostragem I, consegue-se perceber uma redução deste índice da amostragem I para IV, com media geral de 3,9 para 1,4 MPa. Para os valores médios do IC obtidos na amostragem I teve predominância da faixa laranja e vermelho (2,5 a 3,5 MPa e 3,5 a 4,5 MPa, respectivamente) e em proporções menores a cor amarelo e laranja (2 a 2,5 MPa e 2,5 a 3,5 MPa, respectivamente) na camada 0,30-0,40m. Na amostragem IV a predominância foi da cor verde claro (0 a 1 MPa).

Pode ser observado no tratamento 3 (Figura 25), um comportamento parecido do IC em função do teor de agua no solo com o mapa anterior (Tratamento 2). Ao analisar os valores do IC consegue-se perceber um aumento com uma media geral de 1,5 para 4,4 MPa, sobretudo visivelmente acentuado na amostragem I, pode ver-se uma predominância das faixas da cor vermelho e laranja (3,5 a 4,5 MPa e 2,5 a 3,5 MPa, respectivamente) e em proporções menores a cor amarelo e laranja (2 a 2,5 MPa e 2,5 a 3,5 MPa, respectivamente) na camada 0,30-0,40m. Na amostragem IV a predominância foi da cor verde claro (0 a 1 MPa).

No caso da figura 26 do índice de cone do tratamento 4, surgem valores de resistência a penetração do solo acentuados na amostragem I, com um índice médio que variou de 1,5 para 4,8 MPa nas amostragens. Foi observado que a amostragem com teor de água reduzido houve predominância das faixas de cor vermelha (3,5 a 4,5 MPa), e alguma inserção da faixa marrom claro (4,5 a 5,5 MPa). Na avaliação com teor de água elevado, proporções maiores na faixa da cor verde foram predominantes (1 a 2 MPa).

Para o tratamento cujo tráfego foi o mais intenso (Figura 27), na amostragem IV também foi observado acentuada diminuição do IC em comparação ao IC da amostragem I, com um índice médio de 1,7 para 5,0 MPa. Pode-se observar maior predominância da faixa cor vermelha (3,5 a 4,5 MPa) e inserção da faixa marrom claro (4,5 a 5,5 MPa) e proporções menores de marrom escuro (e 5,5 a 6,5 MPa). De acordo com Silva et al. (2002), os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas acima de 2 MPa indicam uma possibilidade de compactação, limitando o crescimento radicular para a maioria das culturas e que variam com o tipo de solo e com a espécie cultivadas.

De modo geral, houve diferença de IC entre os tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) sendo que, os maiores valores de IC foram observados nos tratamentos com maior número de passadas consecutivas do trator, resultado também obtido por Iaia et al. (2006), que avaliaram a resistência do solo à penetração em dois tipos de solo e observaram a dependência da resistência ao tipo de solo e à intensidade de tráfego, fatores que levaram a compactação a profundidades maiores. Foi observado que para os tratamentos que houve tráfego, na camada 0,1-0,2m ocorreu um grande incremento dos valores de IC em relação as demais camadas e que nesta profundidade também houve acréscimo da compactação nos pontos laterais ao rodado, sendo este acréscimo também percebido na camada 0,20-0,30 e minimizado na camada 0,30-0,40m.

Nas amostragens III e IV, cujos teores de água foram os mais elevados, a detecção da compactação do solo foi quase imperceptível, diferente do ocorrido nas amostragens I e II, confirmando que o elevado teor de água no solo diminuiu a sensibilidade das avaliações de resistência do solo à penetração e que os maiores valores de resistência do solo à penetração, ocorreram em função dos menores teores de água no solo, tendendo a um decréscimo com o aumento do teor de água. (PEREIRA et al., 2002 e ASSIS et al., 2009).

Rosolem et al. (1999), estudando solos com mais de 40% de argila, concluiu que quanto maior o teor de argila do solo, maior a resistência à penetração, no mesmo nível de densidade do solo, complementando que a secagem do mesmo ocasionou grande aumento da resistência à penetração.

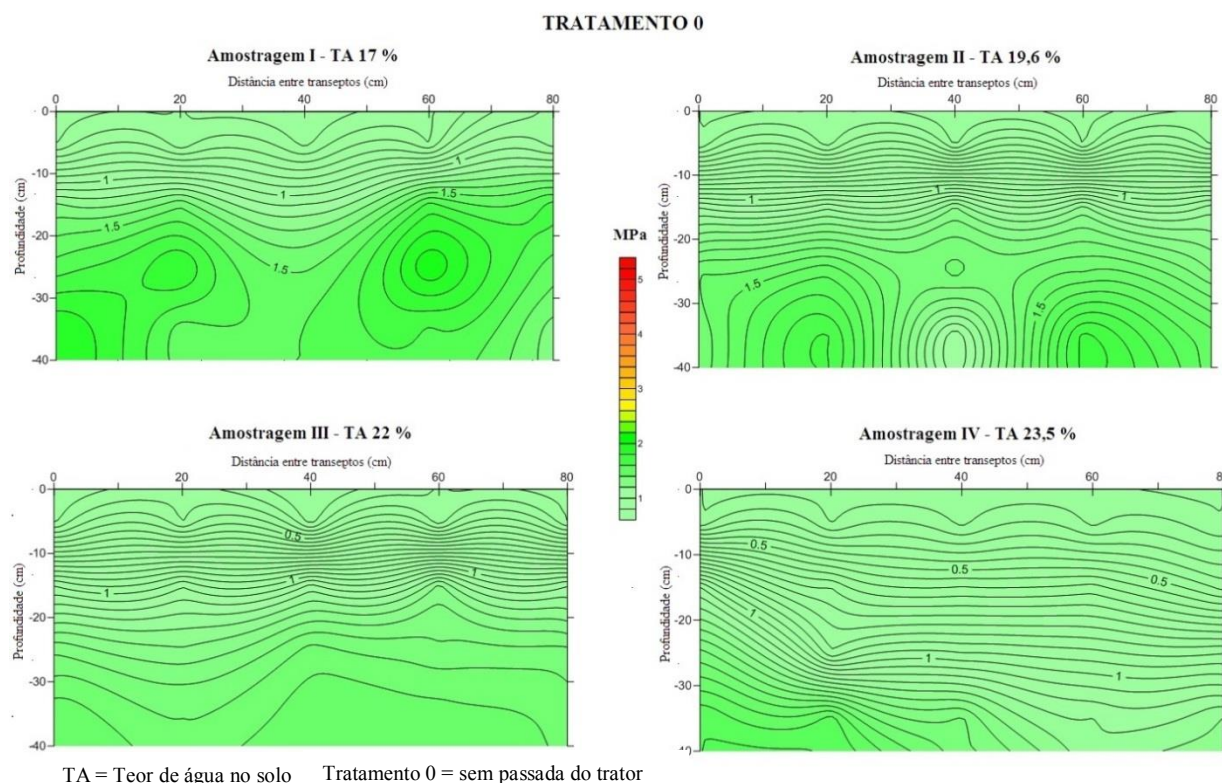


Figura 22. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 0 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

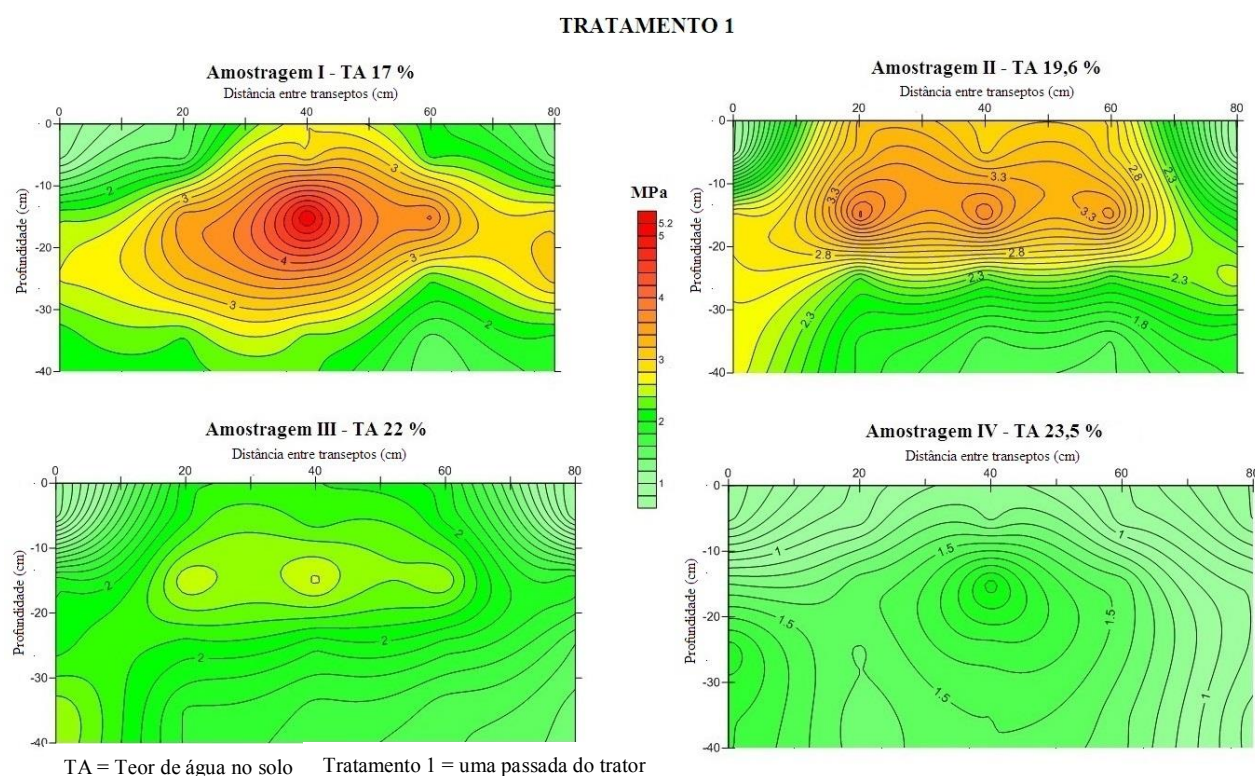
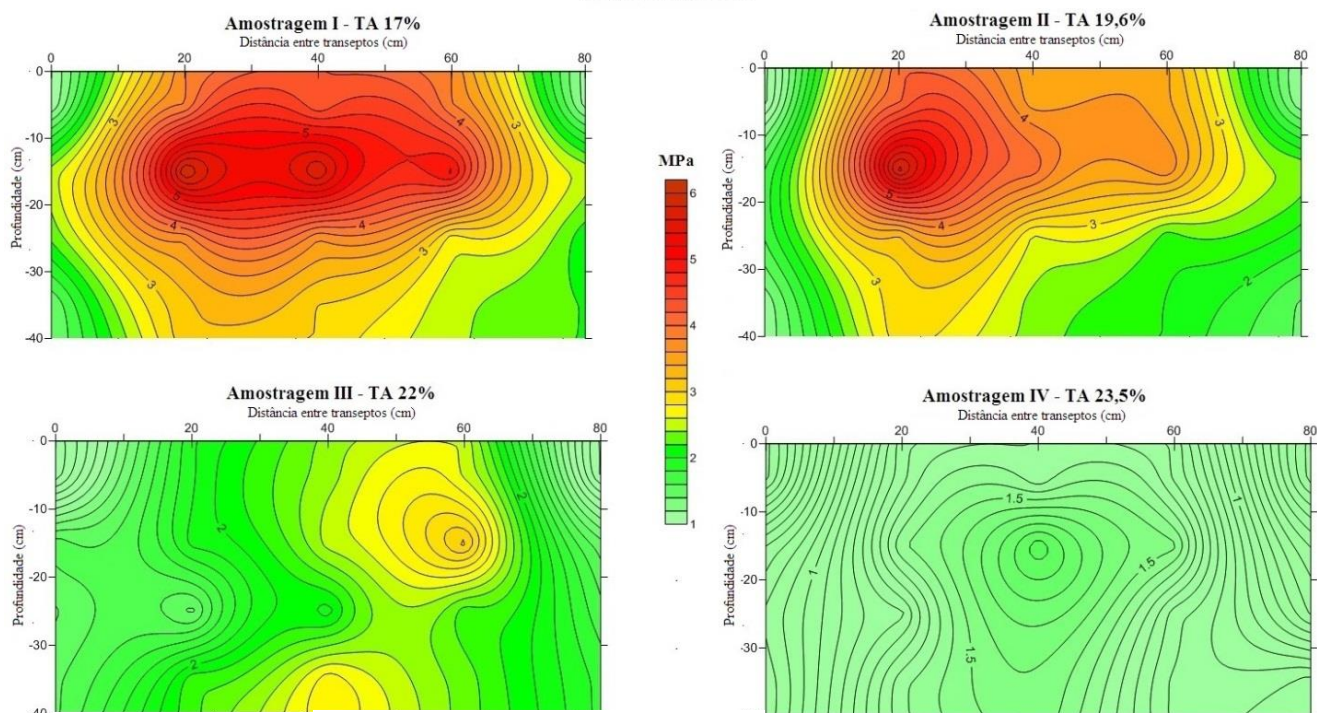


Figura 23. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 1 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

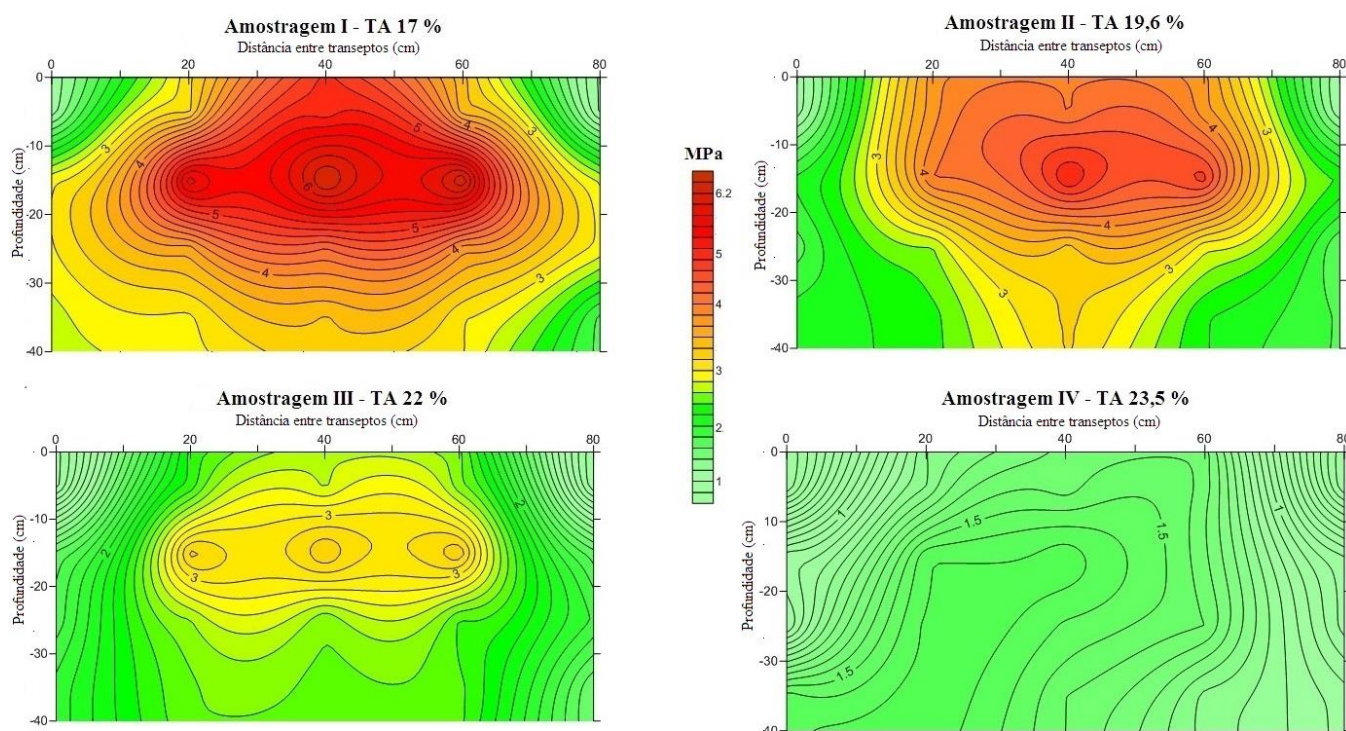
TRATAMENTO 2



TA = Teor de água no solo Tratamento 2 = duas passadas do trator

Figura 24. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 2 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

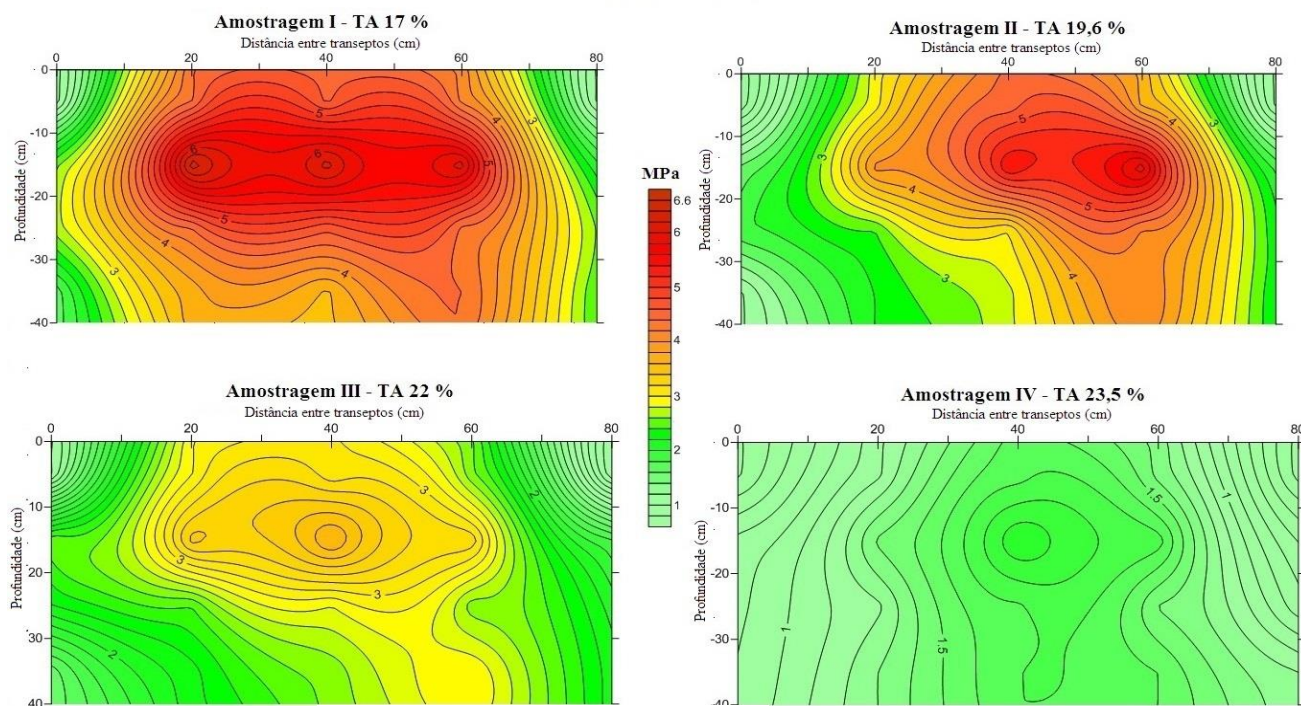
TRATAMENTO 3



TA = Teor de água no solo Tratamento 3 = três passadas do trator

Figura 25. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 3 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

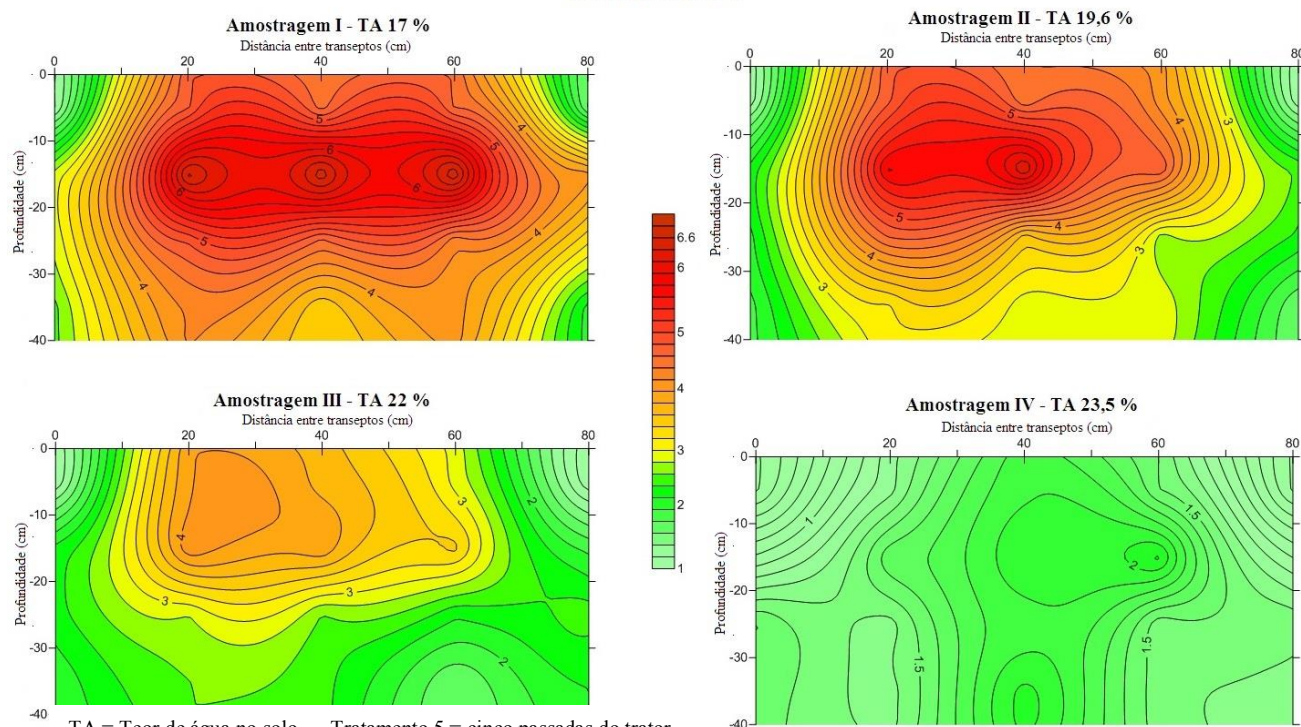
TRATAMENTO 4



TA = Teor de água no solo Tratamento 4 = quatro passadas do trator

Figura 26. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 4 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

TRATAMENTO 5



TA = Teor de água no solo Tratamento 5 = cinco passadas do trator

Figura 27. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 5 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

4.1.5 Área e profundidade de recalque

A aplicação de cargas dinâmicas no solo pelos rodados agrícolas, produziu tensões na interface solo/pneu. A intensidade de carga aplicada em alto teor de água no solo provocaram grandes deformações, que puderam ser visualizadas através do cálculo da área e profundidade do recalque do pneu no solo (Tabela 13)(Figura 28).

Tabela 13. Valores médios de área de recalque (AR) e profundidade de recalque (R) para os tratamentos T1, T2 T3 T4 e T5.

Tratamentos	AR (cm ²)	R (cm)
T1	366,5 C	7,1 B
T2	486,3 BC	8,1 B
T3	628,7 BC	9,4 AB
T4	738,1 AB	9,7 AB
T5	914,0 A	12,0 A

Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey.

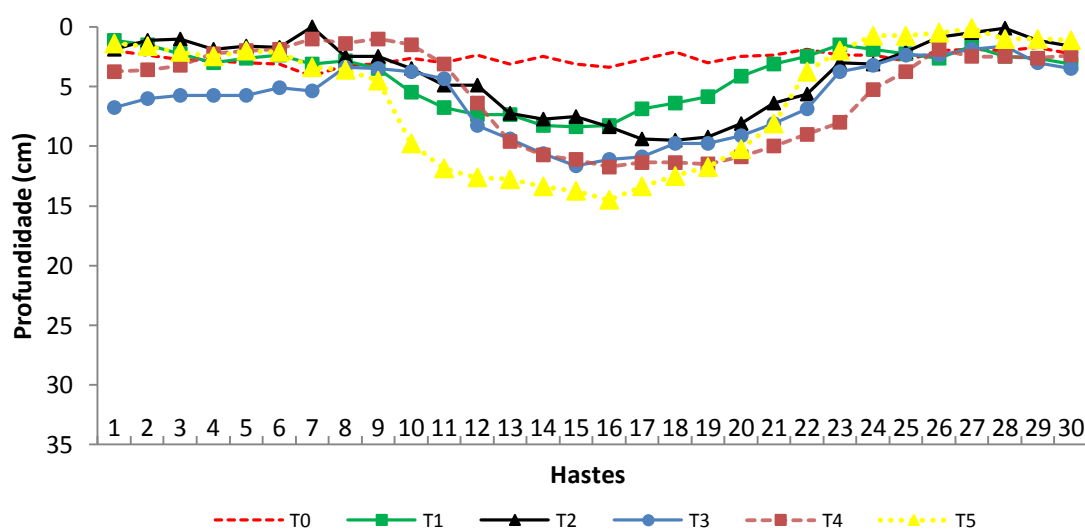


Figura 28. Área de recalque do solo para os tratamentos T1, T2 T3 T4 e T5

T0 = perfil natural do solo antes do rodado
T1 = uma passada do rodado
T2 = duas passadas consecutivas do rodado
T3 = três passadas consecutivas do rodado
T4 = cinco passadas consecutivas do rodado
T5 = dez passadas consecutivas do rodado

O T1 obteve menores valores de área e profundidade de recalque ($p < 0,05$). Foi observado que o tráfego intensivo, do tratamento T5, implicou no maior valor destes atributos, indicando sérios problemas de compactação do solo, corroborando com Couto et al., (2013) que demonstraram que os maiores recalques foram obtidos para o tratamento com cujo tráfego era mais intenso com oito passadas do pneu e que foram estatisticamente diferentes dos recalques obtidos para uma única passada.

Resultados semelhantes foram obtidos por Leite et al. (2010) que estudaram a influência de diferentes teores de água e níveis de pressão no pneu, sobre a área e profundidade de recalque, e concluíram que quanto maior o teor de água no solo, maior foi a área e altura do recalque. Com o teor de água no solo reduzido não observaram mudanças nestes atributos.

4.1.6 Densidade

Na Tabela 14, encontra-se a análise da variância para os valores de densidade do solo.

Tabela 14. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}) e densidade máxima do solo (g cm^{-3}) para os tratamentos e camadas estudados.

Camada	Tratamento						dmáx.
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	
m	g cm^{-3}						
0,00-0,20	1,37cA	1,64bA	1,67abA	1,64bA	1,68abA	1,76aA	1,64
0,20-0,40	1,42cA	1,58bA	1,59bA	1,67abA	1,65abA	1,71aA	1,62
Média	1,395c	1,61b	1,63b	1,65b	1,66b	1,73a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Nos tratamentos que passou o rodado, não foi observado diferença estatística da densidade do solo nas camadas 0,00-0,20 m e 0,20-0,40. Notou-se incremento da densidade de acordo com a intensidade do tráfego, para tratamento com tráfego mais intenso, este valor atingiu a maior densidade que foi de $1,76 \text{ g cm}^{-3}$, discordando, portanto, dos resultados de Silva et al. (2011) e Couto et al.,(2013) que avaliaram a intensidade do tráfego de duas, quatro e oito passadas do rodado e concluíram

que o número de passadas igual a oito causou menor compactação que o número de passadas igual a quatro na profundidade de 0-0,03 cm.

Foi observado que os tratamentos T2, T3, T4 e T5 para camada 0-0,2m ultrapassaram o valor de densidade máxima do solo ($1,64 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 14), estes tratamentos foram os mesmo que obtiveram maiores valores de recalque (diminuição dos seus vazios) devido as diferentes passadas consecutivas do rodado. Isto pode ter ocorrido devido ao tráfego agrícola ter sido praticado quando o solo encontrava-se com teor de água próximo ao da capacidade de campo.

Foi observado que os tratamentos T2, T4 e T5 ultrapassaram o valor de densidade máxima do solo na profundidade 0-0,20m (101,82%, 102,43% e 107,31 respectivamente) (Tabela 15). Na profundidade 0,20-0,40m a densidade relativa aumentou conforme a maior intensidade do tráfego, alcançando 105,55% para o T5. Fato este que pode ser explicado por Voorhees et al., (1987) que observaram que sob condições de alto teor de água, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas.

Tabela 15. Valores médios de densidade relativa do solo (%) para os tratamentos e camadas estudados.

Camada m	Tratamento					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
	%					
0,00-0,20	85,53	100	101,82	100	102,43	107,31
0,20-0,40	87,65	97,53	98,14	103,08	101,85	105,55

Para Mantovani (1987), quanto maior o teor de água do solo no momento do tráfego, mais suscetível à compactação ele ficará, sendo que a umidade mais crítica que favorecer a compactação corresponde aquela faixa próxima da capacidade de campo.

4.1.8 Porosidade

O resultado referente à porosidade total, macroporosidade e microporosidade das amostras coletadas em duas profundidades no perfil do solo, para os diferentes tratamentos estão apresentados na tabela 16. O volume de macroporos de 0,119

$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, na camada de 0,0 a 0,20 m, para o tratamento T0, foi proporcionado pelas operações de preparo de solo, superando o limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ estabelecido por Grable & Siemer (1968) como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento das plantas e corroborando com Calonego (2007) que disse que o manejo mecânico proporciona o melhor efeito na descompactação do solo, levando em consideração o efeito no aumento da macroporosidade.

Segundo Torres & Saraiva (1999), em solos de textura argilosa, é comum encontrar reduzida macroporosidade, ou seja, abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, valor estabelecido como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento das plantas.

Foi observada pouca influência na microporosidade devido à compactação, corroborando com Silva & Kay (1997) que salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pela compactação do solo. Já Silva et al. (1996) verificaram que, com o aumento do nível da compactação houve, aumento da microporosidade à custa da diminuição da macroporosidade.

Tabela 16. Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente aos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
	Total	Micro	Macro
0,00-0,20 m			
T0	0,505 a	0,385 a	0,119 a
T1	0,411 b	0,381 a	0,030 bc
T2	0,400 bc	0,397 a	0,003 c
T3	0,410 b	0,394 a	0,016 c
T4	0,395 bc	0,384 a	0,011 c
T5	0,367 c	0,351 a	0,016 c
0,20-0,40 m			
T0	0,488 a	0,416 a	0,072 a
T1	0,431 b	0,407 a	0,024 b
T2	0,429 b	0,412 a	0,016 b

T3	0,398 bc	0,39 a	0,000 b
T4	0,408 bc	0,395 a	0,013 b
T5	0,384 c	0,374 a	0,011 b

Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey.

De modo geral, em ambas as profundidades (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m) notou-se maior proporção de macroporos para o tratamento T0, seguido do T1. Para os demais tratamentos, esta não foi uma medida relativamente sensível aos efeitos da intensidade (diferentes níveis de compactação) do tráfego agrícola sobre o solo, porém ficou evidente, devido à reduzida proporção de macroporos para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 que houve acomodação das partículas do solo por forças exercidas na superfície do solo, devido ao tráfego agrícola.

4.1.8 Infiltração de água no solo

A velocidade de infiltração básica de água no solo foi influenciada pelos diferentes tratamentos. O tratamento que promoveu maior valor de VIB foi o T0 com $39,3 \text{ mm h}^{-1}$, sendo classificado como solo de VIB muito alta, segundo a classificação de solos do CIENTEC (2010). Os valores obtidos para VIB, maiores no solo em que não houve tráfego agrícola podem ser explicados pelo tipo de microestrutura presente nesse solo e pela porosidade resultante. A quantidade de macroporos neste tratamento foi maior quando comparado aos demais, o que favoreceu o maior movimento de água ao longo do perfil.

Em função da discrepância do valor de VIB do T0, os tratamentos T1, T2, T3 T4 e T5 foram analisados estatisticamente sem o T0 (Tabela 18) (Figura 29).

Houve diferença entre os tratamentos T1, T2, T3 T4 e T5 ($p < 0,01$), notando-se que o T1 obteve maior valor de VIB ($4,3 \text{ mm h}^{-1}$), não diferindo do T2 ($3,6 \text{ mm h}^{-1}$) e os tratamentos T3, T4 e T5 obtiveram os menores valores. De modo geral, todos os tratamentos apresentaram valores de VIB abaixo de 5 mm h^{-1} , característica de um solo de VIB baixa, segundo a classificação de solos do CIENTEC (2010).

Tabela 17. Valores médios de teor de água do solo (%), no momento da avaliação de infiltração de água do solo para calculo da VIB.

Profundidade (mm)	%
0-200	17,69
200-400	18,26

Tabela 18. Valores médios de VIB (velocidade de infiltração básica) para os tratamentos T0, T1, T2, T3, T4 e T5.

Velocidade de infiltração básica (VIB)	
Tratamentos	...mm h ⁻¹ ...
T0	39,3 *
T1	4,3 a
T2	3,6 ab
T3	1,8 bc
T4	1,1 c
T5	1,1 c

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas não diferem pelo teste de Tukey.

*O T0 não entrou na análise estatísticas.

Resultados semelhantes foram encontrados por BLANCO-CANQUI (2010) cuja maior infiltração de água foi encontrada em linhas não trafegada, mostrando que maior chuva pode infiltrar e mais água pode se tornar disponível em solos onde o tráfego é controlado. A redução da infiltração de água com o tráfego agrícola pode ter implicações adversas para a conservação da água e crescimento da planta, podendo levar a um aumento das perdas de água por escoamento superficial, evaporação e assim reduzir consideravelmente a captura e o armazenamento de águas oriundas da precipitação.

Em um solo argiloso, Li et al. (2001) observaram que a taxa de infiltração foi reduzida em quatro a cinco vezes com o tráfego do rodado. TOMASINI et al. (2010) avaliaram o efeito do tráfego agrícola sobre a infiltração de água no solo, em cultivo de cana de açúcar e observaram que o tráfego ocasionou redução de 72-83% nos valores de infiltração de água no solo.

Nesta avaliação a redução da velocidade de infiltração básica do solo foi de aproximadamente nove vezes para o T1, aumentando conforme a intensidade

das passadas do rodado, chegando à redução da infiltração básica superior a 35 vezes para o T5 em relação ao tratamento sem tráfego.

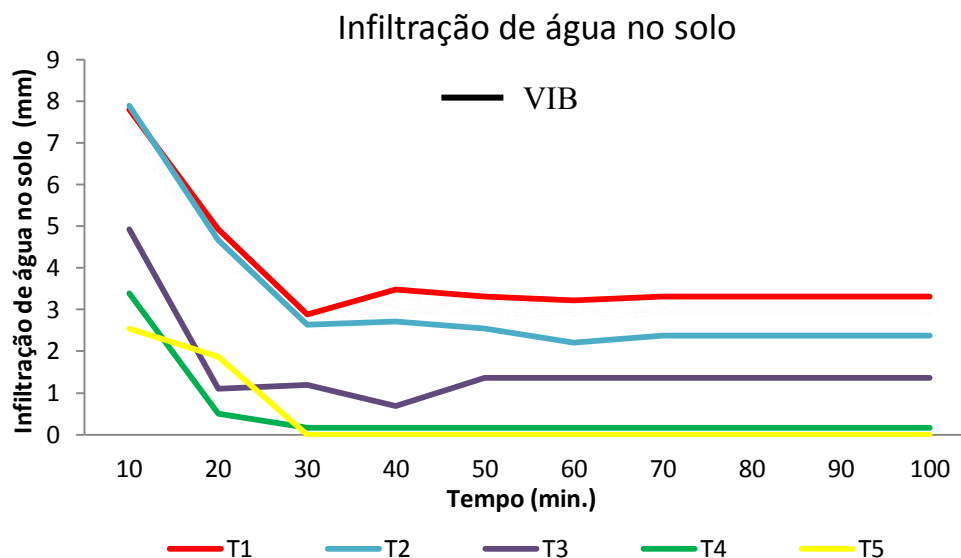


Figura 29. Capacidade de infiltração de água no solo para os tratamentos estudados.

A maior compactação do solo proporcionou menor infiltração da água, que ocorreu devido à diminuição da porcentagem da porosidade com poros maiores, influenciando negativamente a infiltração de água no solo, visto que esses poros são tipicamente de drenagem da água.

Das características do solo, a capacidade de infiltração é uma das principais, pois afeta o potencial que o solo tem em permitir a entrada de água no seu perfil, ou seja, a precipitação pode ser maior do que a capacidade de infiltração. Quando há a redução significativa da infiltração, aumenta o escoamento superficial da água no solo, que transporta sedimentos do solo e propicia o surgimento da erosão.

4.1.9 Efeito do teor de água na compactação do solo

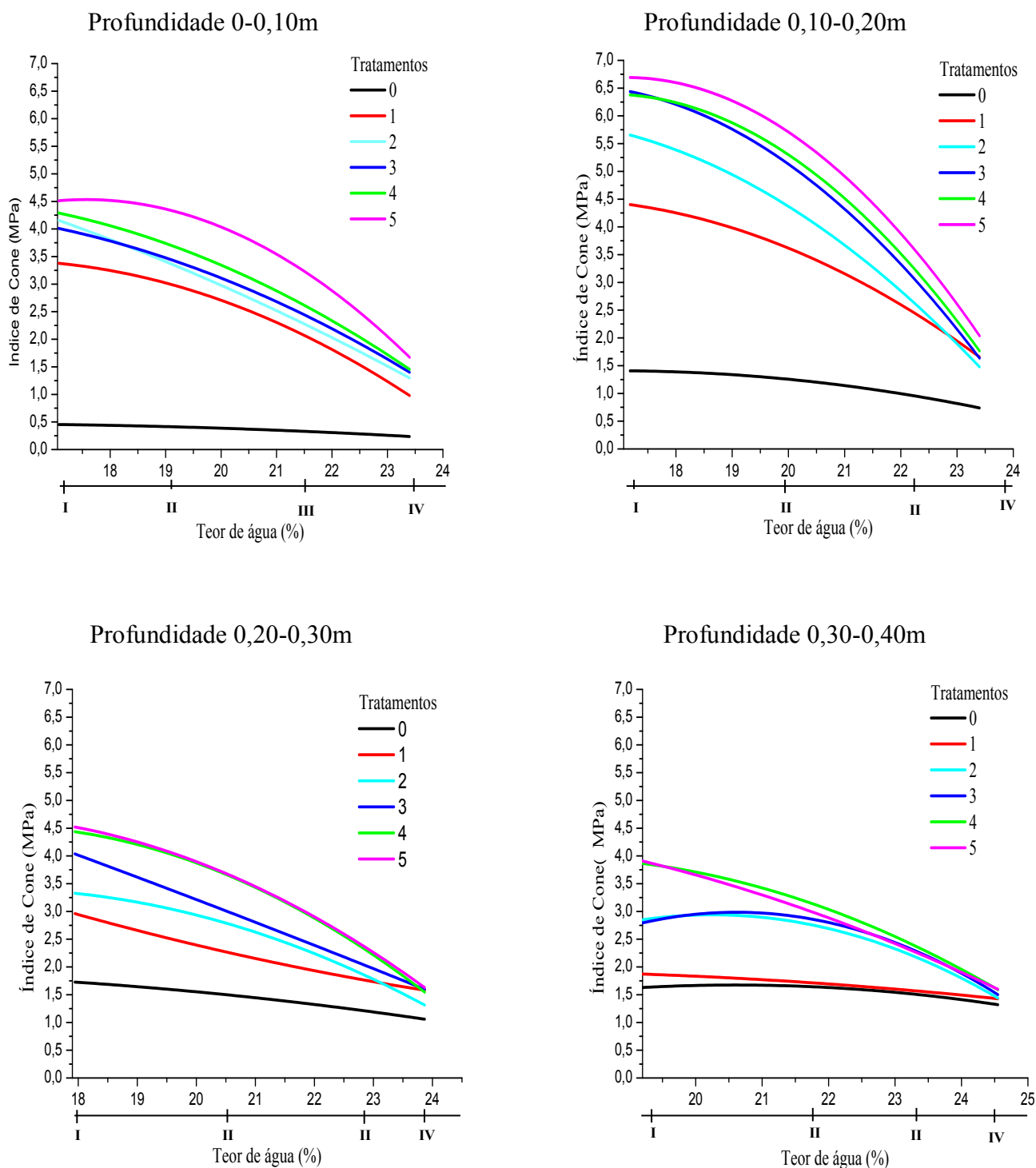
As regressões foram realizadas para avaliar o comportamento do IC em função da variação do teor de água no solo. Os ajustes polinomiais de segunda ordem, do teor de água (%) e IC (MPa) do solo, em função do número de passadas do trator, nas profundidades 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m, estão representadas na Figura 30.

Ao analisar as diferentes profundidades notou-se a variação da intensidade da resistência à penetração em função da variação do teor de água do solo. Resultados também encontrado por Pereira et al. (2002) e Assis et al. (2009) que encontraram maiores valores de resistência do solo à penetração quando no solo o teor de água estava menor, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de água.

O incremento do IC é visivelmente acentuado na amostragem I, em que o teor de água foi mais reduzido em todas as profundidades, podendo-se verificar a predominância de valores acima de 4,0 MPa. Nota-se que o valor de IC teve drástica redução quando analisado em teor de água do solo elevado, conforme ocorrido na amostragem IV, os valores de IC não mais apresentam diferença ($p > 0,5$) entre as camadas 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m.

De modo geral, com elevado teor de água no solo os valores de IC foram baixos e ficaram muito próximos independente do número de passadas do trator, o que indica a não detecção da compactação, ou seja, conforme o teor de água no solo aumentou, houve um decréscimo dos valores de IC, mascarando a compactação do solo. No entanto, quando o teor de água do solo diminuiu os valores de IC são elevados, possibilitando a visualização das diferentes compactações ocorrida nos tratamentos.

Notou-se que para o T0 o IC não variou significativamente com o aumento do teor de água do solo, isso ocasionou grande discrepância deste tratamento com relação aos demais quando o teor de água do solo foi baixo, e esta discrepância reduziu gradativamente conforme aumentou o teor de água do solo. Quanto maior for o valor de resistência à penetração do solo, maior será o efeito lubrificante da água sobre a haste, e o inverso também é verdadeiro, já que para o tratamento T0 (sem compactação), o valores de resistência a penetração do solo praticamente não variou em função do teor de água do solo.



Os algarismos I, II, III e IV são referentes às diferentes amostragens de IC.

Figura 30. Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m.

As equações das regressões representaram a variação da resistência à penetração em função do teor de água do solo para os diferentes tratamentos e profundidades estando apresentadas nas Tabelas 19 a 22.

Tabela 19. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: -0,31237 + 0,10264U - 0,00338U ²	47,95
1	IC: -7,83477 + 1,41251U - 0,04427U ²	87,39
2	IC: 6,05424 + 0,13735U - 0,01456U ²	78,15
3	IC: -1,27879 + 0,8367U - 0,03086U ²	68,8
4	IC: -2,83348 + 1,04844U - 0,03698U ²	75,87
5	IC: -21,44113 + 2,95688U - 0,08415U ²	69,45

Tabela 20. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,10-0,20m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: -3,09329 + 0,53316U - 0,01579U ²	45,81
1	IC: -7,33028 + 1,50836U - 0,04805U ²	78,33
2	IC: -8,31406 + 1,90357U - 0,06347U ²	76,89
3	IC: -16,80766 + 2,91349U - 0,09083U ²	87,19
4	IC: -23,41032 + 3,55154U - 0,1058U ²	83,42
5	IC: -27,75573 + 4,02649U - 0,11766U ²	86,78

Tabela 21. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,20-0,30m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: 0,69422 + 0,18565U - 0,00714U ²	45,76
1	IC: 11,7922 - 0,68711U + 0,01086U ²	58,76
2	IC: -7,09111 + 1,2726U - 0,03856U ²	57,04
3	IC: 10,113 - 0,28405U - 0,00304U ²	80
4	IC: -10,57885 + 1,83247U - 0,05549U ²	73,31
5	IC: -7,17661 + 1,5091U - 0,04777U ²	68,08

Tabela 22. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,30-0,40m.

	Função	R ² (%)
0	IC: -7,95871 + 0,93538U - 0,02271U ²	10,48
1	IC: -0,13233 + 0,25096U - 0,00763U ²	20,97
2	IC: -30,39873 + 3,29243U - 0,08129U ²	43,00
3	IC: -37,75024 + 3,95219U - 0,09586U ²	55,5
4	IC: -11,92302 + 1,79815U - 0,05083U ²	56,53
5	IC: -0,07385 + 0,70751U - 0,02605U ²	67,67

4.2 Área 2

As análises de caracterização do solo e efeito da compactação sobre as propriedades físico-hídrico-mecânicas do Latossolo Vermelho são apresentados a seguir:

4.2.1 Limites de consistência do solo

O resultado da análise física de caracterização do solo está apresentado na Tabela 23 e, quando analisado a faixa de friabilidade (FF) (LP – LC) pode-se observar que ela é reduzida, fato que pode representar uma desvantagem e necessidade de um manejo diferenciado quando refere-se ao preparo do solo ou tráfego de máquinas.

Tabela 23. Limites de consistência do solo.

Profundidade (m)	Limite de Consistência do solo (%)				
	LL	LP	FF	LC	
0,00-0,20	19,3	14,1	← 2,1 →	12,0	
0,20-0,40	20,7	14,4	← 1,9 →	12,5	

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), FF (Faixa de Friabilidade) e LC (Limite de Contração).

4.2.2 Água disponível no solo

A média dos resultados do teor de água no solo para a tensão 0,01 MPa (CC) foi de 17,40 % na profundidade de 0,00 - 0,20m e 16,39 % na profundidade 0,20 - 0,40m. Para a tensão 1,5 MPa (PMP) foi de 7,43 % na profundidade de 0,00 - 0,20m e 7,72 % na profundidade 0,20 - 0,40m. Observou-se que houve pequena variação do teor de água em profundidade. O teor de água no solo entre as tensões 0,01 e 1,5 MPa variou de 10,05 % para a profundidade 0,00 - 0,20m e 8,67 % para a profundidade 0,20 - 0,40m (Tabela 24).

Tabela 24. Valores médios de teor de água no solo (%) nas tensões 0,01 e 1,5 MPa para as camadas estudadas.

Profundidade	Tensões MPa	
	0,01	1,5
M	%	
0,00 - 0,20	17,48	7,43
0,20 - 0,40	16,39	7,72

4.2.3 Teor de água e Índice de Cone do solo (IC)

A síntese da análise de variância dos valores médios de teor de água no solo no momento das diferentes amostragens de resistência do solo à penetração está apresentada na Tabela 25. Pode-se observar que ocorreu acréscimo gradativo do teor de água do solo conforme aumentou a profundidade, isto aconteceu para todas as amostragens. Nota-se também que houve diferença do teor de água entre as amostragens, que era o intento necessário para avaliar este efeito nos valores de resistência do solo à penetração.

Tabela 25. Valores médios de teor de água do solo (%), nas diferentes avaliações de resistência à penetração do solo e profundidades de amostragem.

Profundidade (mm)	Amostragem 1	Amostragem 2	Amostragem 3	Amostragem 4	Média
0-100	10dC	12,2cC	14bB	16,1aC	13,1d
100-200	10,9dC	13cB	14,6bB	16,9aB	13,8c
200-300	12,7dB	14,7cAB	15,7bA	17,3aAB	14,8b
300-400	13,8cA	15,5bA	15,7bA	17,8aA	15,7a
Média	11,8D	13,8C	15,0B	17A	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey

As Tabelas 26 a 29, apresentam valores médios de IC (MPa) obtidos nas avaliações em diferentes períodos de amostragem e teores de água, para os tratamentos T0, T1, T3, T4 e T5 nas profundidades: 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30 e 0,30 a 0,40m.

Na amostragem I, tabela 26, realizada com teor de água do solo próximo ao PMP, os valores médios de IC apresentaram diferenças significativas entre tratamentos, já em relação às profundidades apresentou diferença entre camadas somente para os tratamentos T0 e T5.

Tabela 26. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem I (teor de água 10%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM I					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	1,2abB	1,5abC	1,8abB	2,1aB	1,7C
1	1,4aB	1,8aBC	1,8aB	1,9aB	1,7C
3	2,2aAB	2,5aAB	1,9aB	1,8aB	2,1B
4	2,3aA	2,5aAB	2,2aB	2,2aB	2,3B
5	2,7cA	3,4cA	4,7bA	5,6aA	4,1A
Média	2,0a	2,3b	2,5ab	2,7a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Foi observado que os valores de IC foram menores quando comparados com aos das amostragens de resistência a penetração realizadas no Nitossolo Vermelho distroférico da área 1.

No T0, em que não passou o rodado, observou-se que o IC aumentou conforme a profundidade, ou seja, a camada mais superficial 0-0,10m obteve menor IC, aumentando gradativamente até a última camada (0,30-0,40m), este comportamento não foi observado nos demais tratamentos em que houve tráfego, com exceção do T5, pois nesses, o IC não diferiu estatisticamente entre camadas ($P > 0,05$).

Na profundidade 0-0,10m, o T5 sofreu maior compactação devido ao maior número de passadas consecutivas do trator, com valor de IC de 2,7 MPa, que não diferiu do tratamento T4, seguido do T3, T1 e T0 não diferiram entre si e obtiveram os menores valores de IC. Em relação a profundidade 0,10-0,20m o tratamento T5 obteve o maior valor de IC, que não diferiu do T4 e T3. O T0 obteve menor valor de IC. Na profundidade 0,20-0,30m o tratamento que teve maior valor de IC foi o T5, seguido dos

tratamentos T4, T3, T1 e T0 que não diferiram entre si ($P>0,05$). Na profundidade 0,30-0,40m, os tratamentos tiveram o mesmo comportamento da camada anterior.

De maneira geral houve alterações significativas nas propriedades físicas do solo em função da intensidade do tráfego agrícola sendo que, a compactação ocorreu em maior intensidade na profundidade de 0,0-0,10m e 0,10 a 0,20m, nas demais camadas houve incremento reduzido na compactação, com exceção do T5, quando comparadas as respectivas camadas do perfil natural do solo (tratamento sem tráfego). Corroborando com os resultados obtidos por Ferreira (1998) e Fernandes (1996) que verificaram maior incremento da resistência à penetração, devido ao tráfego de máquinas, para a profundidade de 0 a 15 cm.

O tratamento T5 obteve maiores valores de IC, atingindo 5,6 MPa na camada de 0,30-0,40m, com 152,7 % de incremento em relação a camadas com segundo maior valor de IC nesta profundidade, este valor pode ser atribuído a vulnerabilidade do solo à compactação.

Em relação à amostragem II, tabela 27, observou-se que o IC do T0 e T5 diferiu apenas na profundidade 0,30-0,40m, o T1 diferiu entre profundidade sendo que a camada superficial (0-0,10m) teve menor valor de IC ($P<0,05\%$) e para os demais tratamentos, o IC não diferiu entre profundidades.

Tabela 27. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem II (teor de água 12,2%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM II					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,8bB	1,1bC	1,2bC	1,9aB	1,3C
1	1,2bB	1,3abC	1,5abBC	1,9aB	1,5C
3	1,9aA	2,2aB	2aB	2aB	2B
4	2,1aA	2,3aAB	2,1aB	2,3aB	2,2B
5	2,2dA	2,9cA	4,1bA	5aA	3,6A
Média	1,6c	2b	2,2b	2,6a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Em relação aos tratamentos, na profundidade 0- 0,10m, o T3, T4 e T5 obtiveram maiores valores de IC seguido do T0 e T1, corroborando com Fenner (1999)

que observou que as maiores deformações da superfície do solo ocorrem após as primeiras passagens da máquina.

Na camada 0,10-0,20 m o T5 teve o maior valor de IC comportamento este que também pôde ser observado nas demais profundidades (0,20-0,30m e 0,30-0,40m) e na média geral dos tratamentos, onde T5; T4 e T3; T1 e T0 obtiveram maiores valores de IC respectivamente. Ainda nesta camada, T3 e T4 não diferiram entre si e tiveram maiores valores de IC do que os tratamentos T0 e T1. Os tratamentos da camada 0,20-0,30m teve comportamento semelhante a camada anterior (0,10-0,20m). Na camada 0,30-0,40m com exceção do T5 que obteve maior valor de IC, os demais tratamentos não diferiram entre si ($P>0,05$).

O comportamento das médias da amostragem III, tabela 28, foi muito semelhante ao da amostragem I e II, em que o T5, T4 e T3 não diferiram na camada mais superficial. Indicando que o IC na camada 0-0,10m aumentou conforme o aumento do número de passadas do trator, porém em certa intensidade de tráfego este valor não diferiu mais estatisticamente.

Tabela 28. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem (teor de água 14,0%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m

AMOSTRAGEM III					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,7bC	1bC	1,1bC	1,8aB	1,2C
1	1aBC	1,2aBC	1,6aBC	1,6aB	1,3C
3	1,5aAB	1,8aAB	2,1aB	1,9aB	1,8B
4	1,7aA	1,9aA	1,8aB	2,1aB	1,9B
5	1,9cA	2,4cA	4,2bA	5,4aA	3,5A
Média	1,4d	1,7c	2,2b	2,5a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

As camadas 0,20-0,30 e 0,30-0,40 para o tratamento cujo tráfego foi o mais intenso (T5) obtiveram valores altos de IC, demonstrando grande interferência do rodado nesta profundidade e menor efeito do teor de água na avaliação de resistência a penetração, isto pode ser explicado devido ao teor de água nesta amostragem para estas profundidades (Tabela 25) ter sido semelhante ao da amostragem anterior.

Embora o comportamento das amostragens tenham sido semelhantes, os valores das médias de IC da amostragem VI, tabela 29, foram reduzidos, evidenciando a interferência da água sobre a haste do penetrômetro, já que o teor de água da amostragem IV foi superior ao da amostragem I II e III.

Tabela 29. Valores médios do IC dos pontos coletados na linha do rodado referente a amostragem (teor de água 16,1%) para os tratamentos 0, 1, 3, 4 e 5 nas profundidades de 0 a 0,4m.

AMOSTRAGEM IV					
IC (MPa) por camadas (m)					
Tratamento	0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	Média
0	0,3cB	0,8bB	1abB	1,4aB	0,9D
1	0,5cAB	0,9bB	1,1abB	1,4aB	1CD
3	0,6cAB	1bB	1,2abB	1,6aB	1,1BC
4	0,7cAB	1,1bB	1,2abB	1,6aB	1,1B
5	0,8dA	2cA	3,3bA	4,5aA	2,6A
Média	0,6d	1,1c	1,6b	2,1a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Isto ocorreu em função da correlação inversa da resistência do solo à penetração com o teor de água no solo, pois nesta coleta de dados, o solo encontrava-se próximo ao teor de água na capacidade de campo (17,0 %).

Estes valores demonstram que o alto teor de água proporcionou um efeito lubrificante no solo quando em contato com a haste do penetrômetro, já que não houve modificação no valor de compactação das amostragens e sim apenas no teor de água em que foram realizadas, confirmando os resultados obtidos por Klein et al. (1998), Guerra (2000), Neto (2001); Pereira et al. (2002) e Assis et al. (2009) cujos estudos demonstraram que a resistência à penetração foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo, concluindo que o elevado teor de água do solo impediu que a compactação fosse detectada.

4.2.4 Efeito do teor de água nas avaliações de IC

A distribuição da compactação do solo causada pelo rodado e a interferência nas áreas laterais ao rodado nos diferentes tratamentos, pode ser visualizada

através do perfil do solo nas figuras 31 a 35. Ao analisar visualmente cada figura, nota-se que as áreas com maior ou menor resistência a penetração estavam bem definidas de acordo com a intensidade do tráfego, variando em cada tratamento a resistência à penetração mecânica em função da variação do teor de água do solo. Notou-se aumento do IC devido a maior intensidade do tráfego agrícola e diminuição destes valores conforme o aumento do teor de água do solo.

Ao analisar os valores do IC do tratamento 0 (Figura 31), consegue-se perceber redução deste índice da amostragem I para IV, com uma média geral de 1,7 para 0,9 MPa. Na amostragem cujo teor de água do solo foi o menor, pode ver-se uma predominância das faixas da cor verde (1 a 2 MPa) na camada superficial do solo e faixas na cor amarelo e laranja (2 a 2,5 MPa e 2,5 a 3,5 MPa, respectivamente) na camada de 0,20-0,40m. Na avaliação com teor de água elevado, foi observado proporções maiores nas faixas da cor verde claro e verde (0 a 1 MPa e 1 a 2 MPa, respectivamente).

Em relação aos valores do IC do tratamento 1 (Figura 32), consegue-se perceber um comportamento semelhante ao do tratamento anterior, porém na amostragem I, principalmente na camada de 0,20-0,40m, observou-se proporções menores da faixa amarelo (2 a 2,5 MPa) e não foi observado a cor laranja (2,5 a 3,5 MPa) como no tratamento 0.

Ao analisar os valores do IC do tratamento 3 (Figura 33), consegue-se perceber um aumento neste índice visivelmente acentuados na amostragem I, com predominância na camada de 0-0,20m das faixas da cor amarelo (2 a 2,5 MPa), e em proporções menores a cor laranja (2,5 a 3,5 MPa). Na avaliação com teor de água elevado, proporções maiores na faixa da cor verde claro (0 a 1 MPa) na camada de 0-0,20m e verde (1 a 2 MPa) na camada de 0,20-0,40m foram observados. A redução do IC da amostragem I para IV, foi de 2,1 para 1,1 MPa na média geral.

Pode ser observado no tratamento 4 (Figura 34) uma redução na média geral de 2,3 para 1,1 MPa da amostragem I para IV. Na amostragem I houve predominância das faixas da cor amarelo (2 a 2,5 MPa) e em proporções menores a cor laranja (2,5 a 3,5 MPa) até 0,40m. Na amostragem IV ocorreu um comportamento parecido do IC em função do teor de água no solo ao da figura anterior (Tratamento 3).

Para o tratamento cujo tráfego foi o mais intenso (Figura 35), na amostragem IV também foi observado a diminuição do IC em comparação ao IC da amostragem I, com média geral de 2,6 para 5,6 MPa. Pode-se observar maior

predominância da faixa cor vermelha (3,5 a 4,5 MPa) na camada de 0,15 a 0,40m e em proporções menores de marrom escuro (acima de 4,5 MPa). Na camada superficial 0-0,15m foi observado predominância da cor laranja (2,5 a 3,5 MPa) com inserção de faixas na cor amarelo (2 a 2,5 MPa). Na avaliação com teor de água elevado, proporções maiores de verde claro e verde foram predominantes (0 a 1 MPa e 1 a 2 MPa, respectivamente) na camada de 0-0,15m, na camada de 0,15-0,25m a cor amarelo (2 a 2,5 MPa) e na camada de 0,25-0,40 a cor vermelho foi predominante (3,5 a 4,5 MPa).

De modo geral, a diferença de IC entre os tratamentos T1, T3 e T4 foi pouco significativa. Foi observado que para os tratamentos ocorreu incremento dos valores de IC conforme aumento da profundidade, comportamento semelhante ao do tratamento sem tráfego (Tratamento 0) portanto as camadas 0,30-0,40m foram as que apresentaram maiores valores de IC.

Percebe-se que na amostragem com menor teor de água no solo, o rodado influenciou na compactação até a camada de 0,20m, com exceção do T5, nas demais camadas não foi observado acréscimo de IC quando comparado com o tratamento sem tráfego, resultado similar foi encontrado por Gysi et al. (1999) em que após uma única passagem com máquina de alto peso em solo arenoso o solo foi compactado a uma profundidade de pelo menos 0,17 m. Em profundidades de $0,32 \pm 0,37$ e $0,52 \pm 0,57$ m, no entanto, não foram observadas alterações.

Os maiores valores de IC em todas as profundidades foram observados no tratamento com maior número de passadas consecutivas do trator (Tratamento 5). Notou-se discrepância destes valores em relação aos demais tratamentos, resultado que pode ser explicado devido as condições de água excessiva no momento do tráfego, que se tornou crítica para suscetibilidade do solo a compactação, possivelmente a estrutura do solo quando as pressões foram aplicadas excederem a sua capacidade de suporte de carga.

Nas amostragens III e IV, cujos teores de água foram os mais elevados, a detecção da compactação do solo foi reduzida, diferente do ocorrido nas amostragens I e II, confirmando que o elevado teor de água no solo diminuiu a sensibilidade das avaliações de resistência do solo a penetração e que os maiores valores de resistência do solo à penetração, ocorreram em função dos menores teores de água no solo, tendendo a um decréscimo com o aumento do teor de água. (PEREIRA et al. , 2002 e ASSIS et al., 2009).

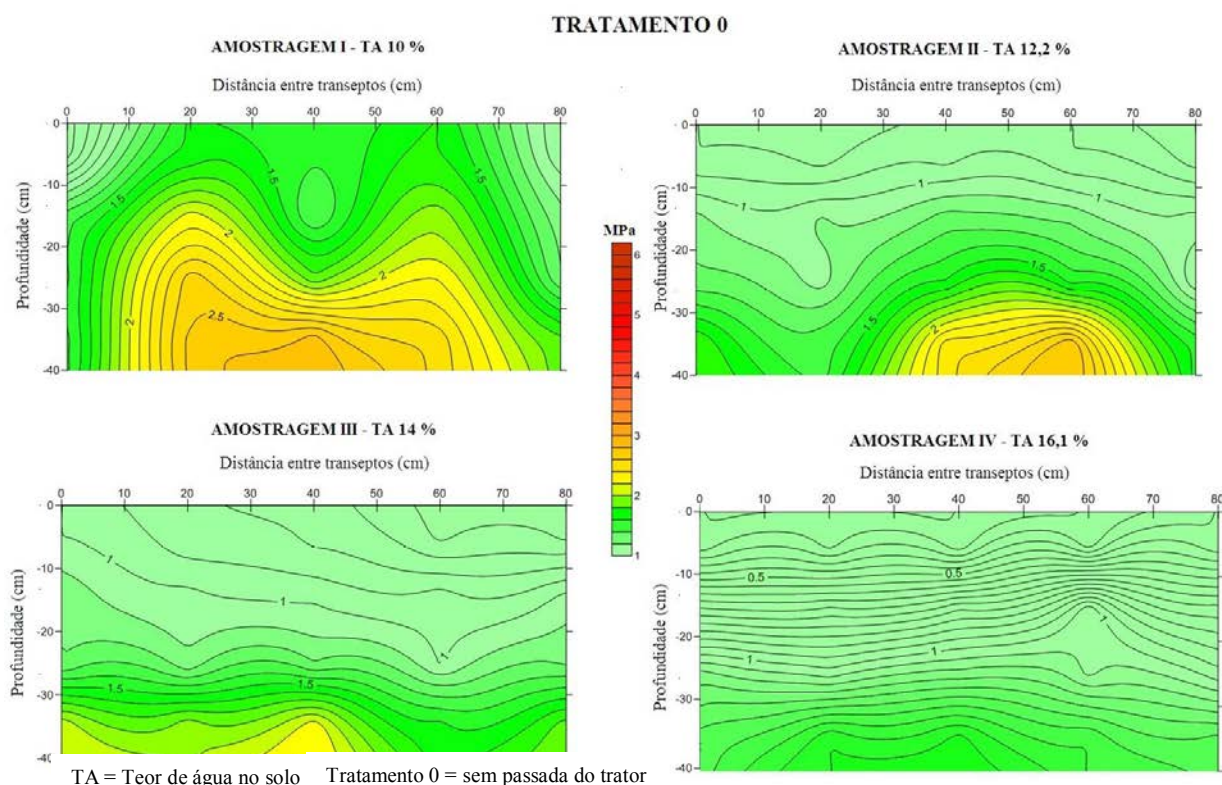


Figura 31. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 0 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

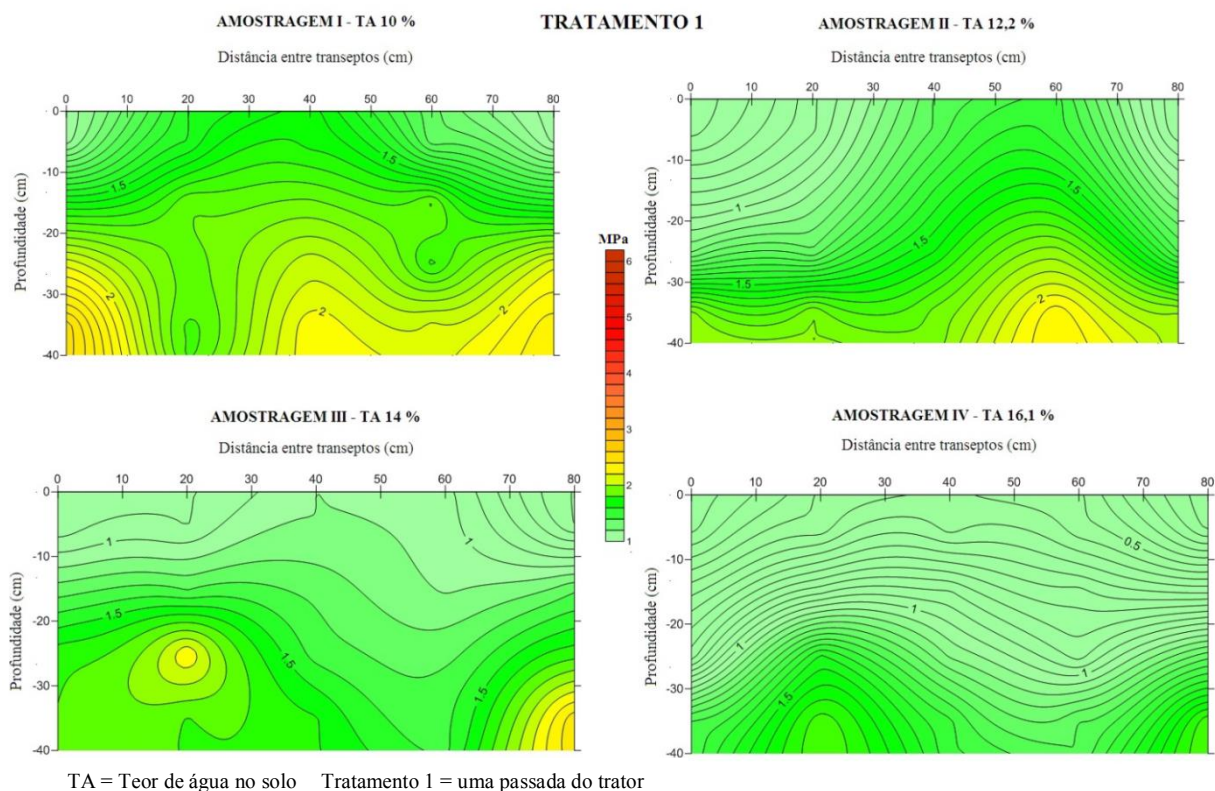
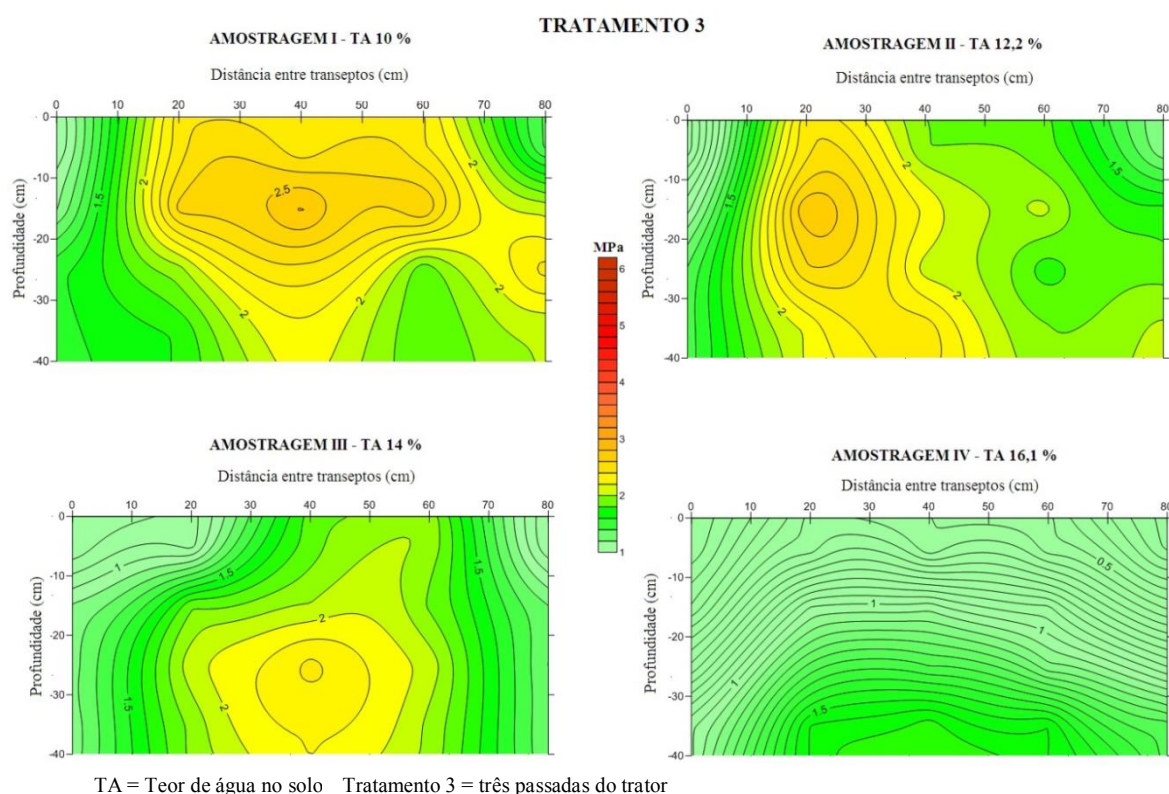
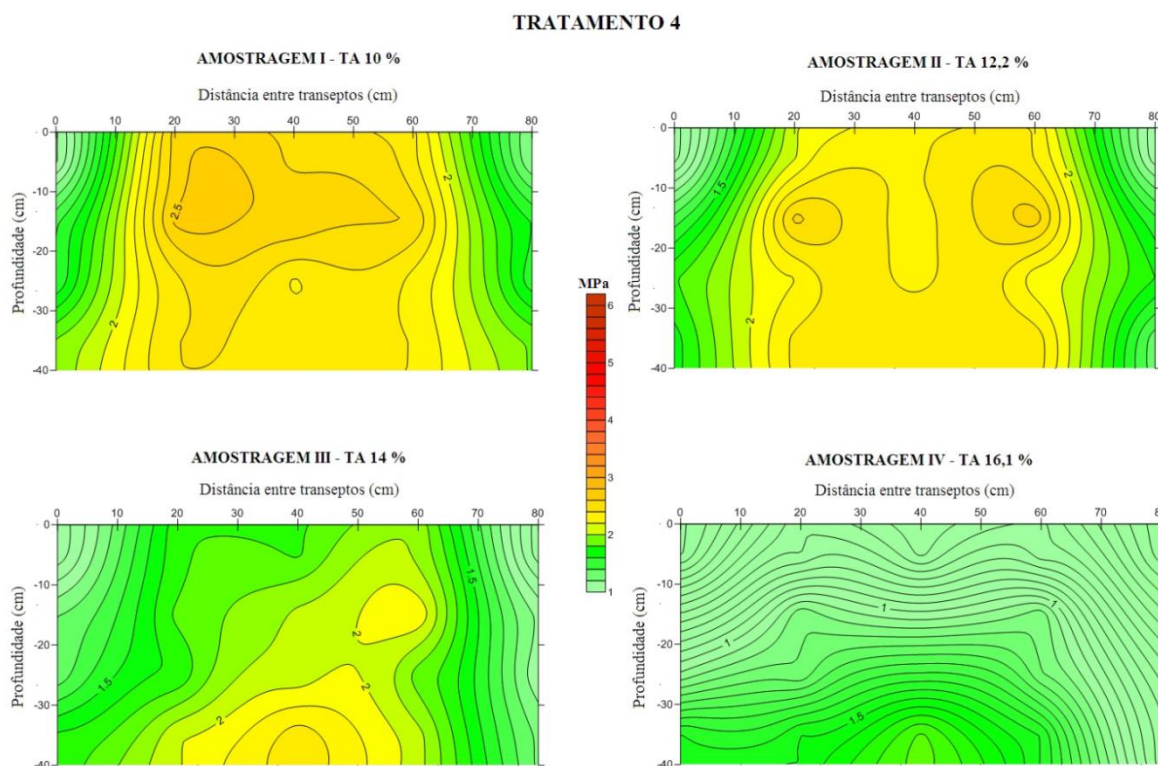


Figura 32. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 1 para amostragens em diferentes teores de água no solo.



TA = Teor de água no solo Tratamento 3 = três passadas do trator

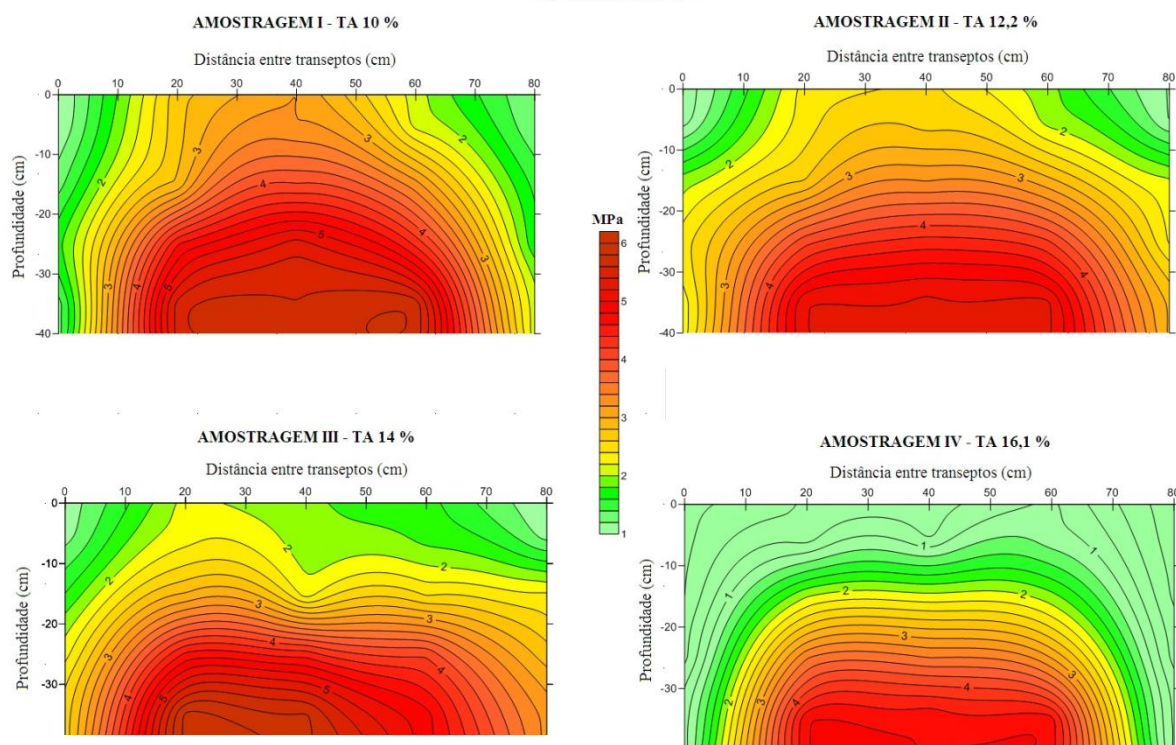
Figura 33. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 3 para amostragens em diferentes teores de água no solo.



TA = Teor de água no solo Tratamento 4 = quatro passadas do trator

Figura 34. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 4 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

TRATAMENTO 5



TA = Teor de água no solo Tratamento 5 = cinco passadas do trator

Figura 35. Imagem de atributos do índice de cone por profundidade, do tratamento 5 para amostragens em diferentes teores de água no solo.

4.2.5 Área e profundidade de recalque

A aplicação de cargas dinâmicas no solo pelos rodados agrícola produziu tensões na interface solo/pneu. A intensidade de carga aplicada em alto teor de água no solo provocaram grandes deformações, que puderam ser visualizadas através do cálculo da área e profundidade do recalque do pneu no solo (Tabela 30).

Tabela 30. Valores médios de área de recalque (AR) e profundidade de recalque (R) para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.

Tratamentos	AM (cm ²)	R (cm)
T1	625,3 B	9,5 B
T2	650,9 B	9,3 B
T3	778,6 AB	10,7 B
T4	897,0 AB	12,6 B
T5	1172,4 A	26,8 A

Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey

O T1, T2, T3 e T4 obtiveram menores valores de profundidade de recalque. Foi observado que o tráfego mais intenso (tratamento T5) implicou no maior valor deste atributo com 26,8cm.

Em relação à área de recalque do solo, os tratamentos T1 e T2 obtiveram menores valores, seguidos do T3 e T4. O tratamento T5 obteve maior área de recalque do solo, com 1172,4cm², este valor é 87,5%, 80,2%, 50,6% e 30,7% superior ao da área de recalque do T1, T2, T3 e T4, respectivamente (Figura 36).

Estes valores foram superiores aos obtidos por Leite et al., (2010) em Latossolo Vermelho distroférrico típico de textura média. Isto indica sérios problemas de compactação e que as condições de água excessiva combinada com intenso tráfego, tornou-se crítica para suscetibilidade do solo à compactação, corroborando com Mantovani (1987), que diz que quanto maior o teor de água do solo mais suscetível à compactação ficará o solo, sendo que a umidade mais crítica a favorecer a compactação corresponde a faixa de umidade próxima da capacidade de campo.

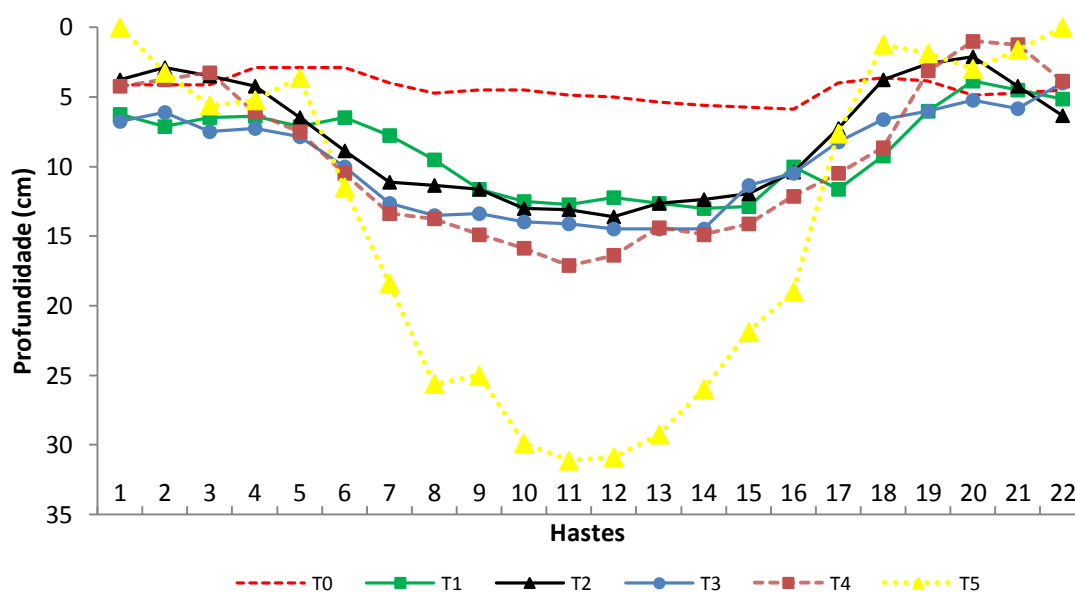


Figura 36. Área de recalque do solo para os tratamentos T1, T2 T3 T4 e T5

T0 = perfil natural do solo antes de passar o rodado

T1 = uma passada do rodado

T2 = duas passadas consecutivas do rodado

T3 = três passadas consecutivas do rodado

T4 = cinco passadas consecutivas do rodado

T5 = dez passadas consecutivas do rodado

4.2.6 Densidade

Na Tabela 31, encontra-se a análise da variância para os valores de densidade do solo.

Tabela 31. Valores médios de densidade do solo (g cm^{-3}) e densidade máxima do solo (g cm^{-3}) para os tratamentos e camadas estudados.

Camada	Tratamento					dmáx.
	T0	T1	T3	T4	T5	
m	g cm^{-3}					
0,00-0,20	1,62bA	1,83aA	1,84aA	1,85aA	1,83aB	1,83
0,20-0,40	1,60cA	1,84bA	1,79bA	1,84bA	1,92 aA	1,84
Média	1,61 b	1,84 a	1,82 a	1,84 a	1,87 a	

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey.

Não foi observado incremento da densidade de acordo com a intensidade do tráfego, com exceção do T5, que atingiu o maior valor de densidade do solo, $1,92 \text{ g cm}^{-3}$ para a camada 0,20-0,40m, porém para a camada 0-0,20 não foi observado diferença entre os tratamentos ($P>0,5$). O tratamento sem tráfego, apresentou os menores valores de densidade do solo com 1,62 e 1,60 para a camada 0-0,20m e 0,20-0,40m respectivamente.

Foi observado que os tratamentos T3 e T4 ultrapassaram o valor de densidade máxima do solo na profundidade 0-0,20m (100,5% e 101,1%, respectivamente) (Tabela 32), notou-se que nesta profundidade, a densidade não foi sensível a compactação em função da intensidade do tráfego.

Tabela 32. Valores médios de densidade relativa do solo (%) para os tratamentos e camadas estudados.

Camada	Tratamento				
	T0	T1	T3	T4	T5
m	%				
0,00-0,20	88,52	100	100,5	101,1	100
0,20-0,40	86,95	100	97,28	100	104,3

Na profundidade 0,20-0,40m a densidade relativa aumentou conforme a maior intensidade do tráfego, alcançando 104,3% para o T5. Isto pode ter ocorrido devido ao tráfego agrícola ter sido praticado quando o solo encontrava-se com teor de água próximo ao da capacidade de campo. Fato este que pode ser explicado por Voorhees et al., (1987) e Mantovani (1987), que quanto maior o teor de água do solo no momento do tráfego, mais suscetível à compactação ele ficará, sendo que a umidade mais crítica que favorecer a compactação corresponde aquela faixa próxima da capacidade de campo.

4.2.8 Porosidade

O resultado referente à porosidade total, macroporosidade e microporosidade das amostras coletadas em duas profundidades no perfil do solo, para os diferentes tratamentos estão apresentados na tabela 33.

Tabela 33. Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, referente aos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Porosidade (m ³ /m ³)		
	Total	Micro	Macro
0,00-0,20 m			
T0	0,387 a	0,276 a	0,111 a
T1	0,306 b	0,293 a	0,013 b
T3	0,303 b	0,278 a	0,024 b
T4	0,299 b	0,266 a	0,033 b
T5	0,306 b	0,279 a	0,027 b
0,20-0,40 m			
T0	0,392 a	0,277 a	0,115 a
T1	0,303 b	0,284 a	0,020 b
T3	0,320 b	0,284 a	0,037 b
T4	0,303 b	0,289 a	0,014 b
T5	0,274 b	0,256 a	0,017 b

Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey.

O volume de macroporos de $0,111 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na camada de 0,0 a 0,20 m e $0,115 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na camada de 0,20 a 0,40 m, para o tratamento T0, provavelmente foi proporcionado pelas operações de preparo de solo, e está acima do limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ estabelecido por Grable & Siemer (1968) como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento das plantas e corroborando com Calonego (2007) que disse que o manejo mecânico proporciona o melhor efeito na descompactação do solo, levando em consideração o efeito no aumento da macroporosidade.

Não foi observada influência do tráfego na microporosidade do solo. De modo geral, em ambas as profundidades (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m) notou-se maior proporção de porosidade total e macroporos para o tratamento T0. Para os demais tratamentos, esta não foi uma medida relativamente sensível aos efeitos da intensidade (diferentes níveis de compactação) do tráfego agrícola sobre o solo, porém ficou evidente, devido ao decréscimo de poros de maior diâmetro para os tratamentos T1, T3, T4 e T5 que houve acomodação das partículas do solo por forças exercidas na superfície do solo, devido ao tráfego agrícola.

4.2.9 Infiltração de água no solo

A velocidade de infiltração básica de água no solo não sofreu influência pelos diferentes tratamentos de compactação. O tratamento que promoveu maior valor de VIB foi o T0 com $23,6 \text{ mm h}^{-1}$ (Tabela 35) sendo classificado como solo de VIB alta, segundo a classificação de solos do CIENTEC (2010).

Tabela 34. Valores médios de teor de água do solo (%), no momento da avaliação de infiltração de água do solo para cálculo da VIB.

Profundidade (mm)	%
0-200	10,29
200-400	11,19

Os valores obtidos para VIB, maiores no solo em que não houve tráfego agrícola podem ser explicados pelo tipo de microestrutura presente nesse solo e

pela porosidade resultante. A quantidade de macroporos neste tratamento foi maior quando comparado aos demais, o que favoreceu o maior movimento de água ao longo do perfil

Tabela 35. Valores médios de VIB (velocidade de infiltração básica) para os tratamentos T0, T1, T3, T4 e T5.

Velocidade de infiltração básica (VIB)	
Tratamentos	...mm h ⁻¹ ...
T0	23,6*
T1	2,3 a
T3	1,7 a
T4	1,2 a
T5	1,4 a

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas não diferem pelo teste de Tukey.

*O T0 não entrou na análise estatística.

Em função da discrepância do valor de VIB do T0, os tratamentos T1, T3, T4 e T5 foram analisados estatisticamente sem o T0 (Tabela 35) (Figura 37).

Não houve diferença entre os tratamentos T1, T3, T4 e T5 ($p>0,01$), esses apresentaram valores de VIB abaixo de 5mm h⁻¹, característica de um solo de VIB baixa, segundo a classificação de solos do CIENTEC (2010).

Nesta avaliação a redução da velocidade de infiltração básica do solo foi de aproximadamente dez vezes para o T1, chegando à redução da infiltração básica de aproximadamente 19 vezes para o T4 em relação ao tratamento sem tráfego.

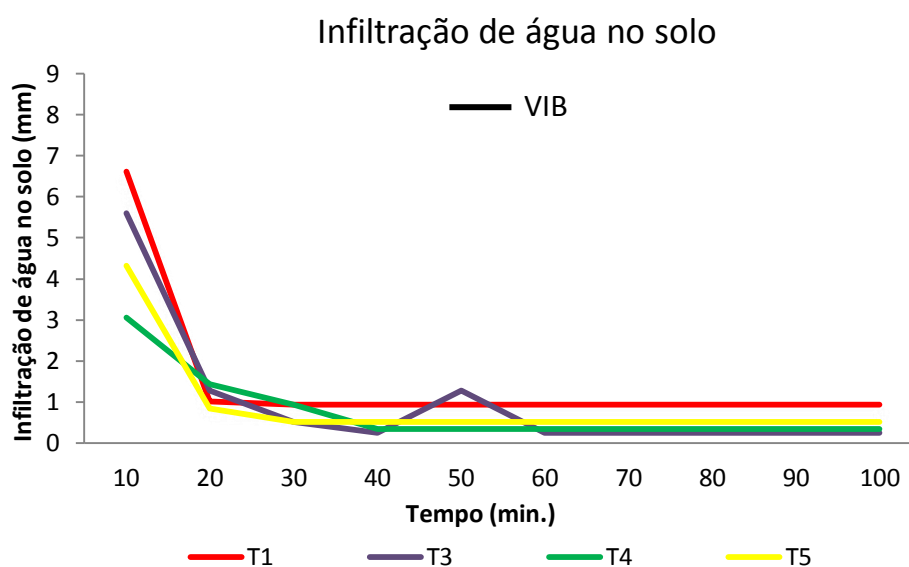


Figura 37. Capacidade de infiltração de água no solo para os tratamentos estudados.

Nos tratamentos que ocorreu tráfego, foi observado menor infiltração de água no solo, provavelmente devido à diminuição da porcentagem de poros com diâmetro maior, influenciando negativamente a infiltração de água no solo, visto que esses poros são tipicamente de drenagem da água.

Das características do solo, a capacidade de infiltração é uma das principais, pois afeta o potencial que o solo tem em permitir a entrada de água no seu perfil, ou seja, a precipitação pode ser maior do que a capacidade de infiltração. Quando há a redução significativa da infiltração, aumenta o escoamento superficial da água no solo, que transporta sedimentos do solo e propicia o surgimento da erosão.

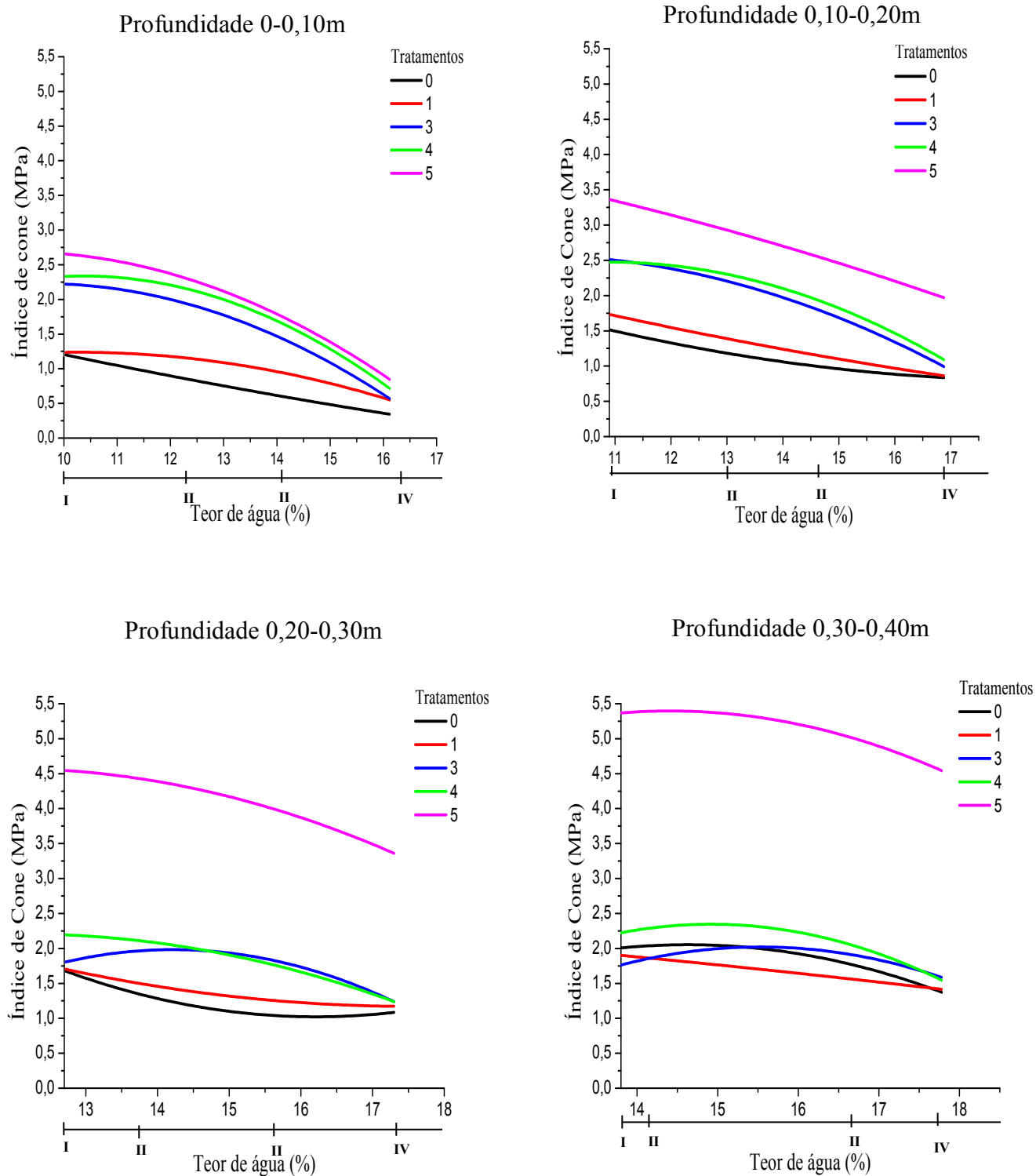
4.2.9 Efeito do teor de água na compactação do solo

As regressões foram realizadas para avaliar o comportamento do IC em função da variação do teor de água no solo. Os ajustes polinomiais de segunda ordem, do teor de água (%) e IC (MPa) do solo, em função do número de passadas do trator, nas profundidades 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m, estão representadas na Figura 38.

Ao analisar as diferentes profundidades notou-se a variação da intensidade da resistência à penetração em função da variação do teor de água do solo. Resultados também encontrado por Pereira et al. (2002) e Assis et al. (2009) que encontraram maiores valores de resistência do solo à penetração quando no solo o teor de água estava menor, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de água.

Notou-se incremento do IC na amostragem I, cujo teor de água foi o menor em todas as profundidades, pode-se verificar a predominância de valores acima de 2,0 MPa. Nota-se que o valor de IC teve redução quando analisado em teor de água do solo elevado como na amostragem IV, com predominância de valores próximo a 1 MPa, os valores de IC não mais apresentam diferença ($p > 0,5$) entre as camadas 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m e os tratamentos, com exceção do T5.

De modo geral, com elevado teor de água no solo os valores de IC foram reduzidos e ficaram muito próximos, independente do número de passadas do trator, com exceção do T5. Isto indica que conforme o teor de água no solo aumentou, houve um decréscimo dos valores de IC. No entanto, quando o teor de água do solo diminuiu, os valores de IC aumentaram, possibilitando a visualização dos diferentes níveis de compactações realizados nos tratamentos.



Os algoritmos I, II, III e IV são referentes às diferentes amostragens de IC.

Figura 38. Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40m.

As equações das regressões que representam à variação da resistência a penetração em função do teor de água do solo para os diferentes tratamentos e profundidades, estão dispostas nas Tabelas 36 a 39.

Tabela 36. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: $3,1255 - 0,22392U + 0,00318U^2$	57,05
1	IC: $-0,87411 + 0,41141U - 0,02004U^2$	65,75
3	IC: $-1,31098 + 0,74005U - 0,03868U^2$	74,13
4	IC: $-2,92306 + 1,01514U - 0,04897U^2$	83,9
5	IC: $-0,36856 + 0,67382U - 0,03712U^2$	66,34

Tabela 37. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,10-0,20m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: $4,84987 - 0,43034U + 0,0114U^2$	48,75
1	IC: $4,17342 - 0,27445U + 0,00464U^2$	52,25
3	IC: $0,14057 + 0,52184U - 0,02792U^2$	68,75
4	IC: $-2,0846 + 0,83809 - 0,03851U^2$	67,02
5	IC: $4,64767 - 0,0436U - 0,00682U^2$	56,63

Tabela 38. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,20-0,30m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: $15,09738 - 1,73656U + 0,05356U^2$	33,83
1	IC: $8,19907 - 0,80126U + 0,02284U^2$	13,07
3	IC: $-13,8382 + 2,22566U - 0,07828U^2$	54,49
4	IC: $-3,06975 + 0,87126U - 0,03597U^2$	70,29
5	IC: $-1,22382 + 0,9774U - 0,04118U^2$	23,5

Tabela 39. Funções estimadas por tratamento na profundidade 0,30-0,40m.

Tratamento	Função	R ² (%)
0	IC: $-12,58147 + 2,00116U - 0,06841U^2$	23,06
1	IC: $2,84025 - 0,02626U - 0,00303U^2$	4,69
3	IC: $-18,73504 + 2,67272U - 0,08604U^2$	14,47
4	IC: $-19,40942 + 2,91656U - 0,09775U^2$	51,7
5	IC: $-10,16914 + 2,1611U - 0,07501U^2$	27,12

Observa-se a necessidade de reformulação da norma EP542 da ASABE (2009), pois devido à correlação negativa do teor de água e IC, este modifica os valores da compactação do solo.

Esse estudo possibilitou a compreensão da relação entre as alterações do IC em função do teor de água do solo, foi observado um comportamento específico nessa relação, portanto há a possibilidade de desenvolver modelos para esse comportamento para diferentes condições e tipos de solo, o que permitirá padronizar o teor de água nas amostragens de resistência do solo a penetração, assim valores reais de impedimento do desenvolvimento da raiz no solo poderão ser estimados.

4.3 COMPARAÇÃO ÁREA 1 x ÁREA 2

A granulometria dos solos argilosos apresentam maior proporção de partículas de menor tamanho do que os solos de textura média. Como os espaços entre os grãos (os poros) são menores, eles retêm mais água. Por isto o teor de água nas avaliações do solo argiloso variou de 17,1% a 24,5%. Para o solo de textura média, o teor de água nas avaliações variou de 10% a 17,8%. Valores estes próximo a CC e PMP.

O solo argiloso demonstrou ser mais sensível em relação ao efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo. Para o solo argiloso, a maior variação entre a amostragem realizada com teor de água próximo a CC e PMP foi de 4,8 MPa (T5; 0,10-0,20m) e a menor foi de 0,3 MPa (T0; 0-0,10 e 0,30-0,40m) (Tabela 9 e 12). O solo de textura média apresentou variação máxima de 1,9 MPa (T5; 0-0,10m) e a menor variação foi de 0,2 MPa (T3; 0,30-0,40m) (Tabela 26 e 29).

Com o aumento do tráfego, maior foi a compactação. Porém a compactação para o solo argiloso, a partir do T2 demonstrou ser mais intensa, com maiores valores de IC do que o solo de textura média.

O comportamento da compactação também se mostrou distinto devido à classe textural do solo. Para o solo de textura média a compactação seguiu o perfil do solo solto (tratamento sem tráfego) cuja compactação aumentou gradativamente conforme o aumento da profundidade. No solo argiloso, a compactação não seguiu o perfil do solo solto, pois houve incremento de resistência à penetração do solo nas camadas mais superficiais, sendo a faixa de profundidade 0,10-0,20m a mais atingida.

Para os dois solos, os maiores valores de área e profundidade de recalque foram observados no tratamento cujo tráfego foi mais intenso (T5), com valores de 914 cm² e 12 cm para o solo argiloso e 1172,4 cm² e 26,8 cm para o solo de textura média.

Os maiores valores de densidade foram observados no tratamento cujo tráfego foi mais intenso (T5) para os dois solos. Para o solo de textura média, o maior valor de densidade foi observado na camada de 0,2-0,4m, com valor de 1,91 g cm⁻³. Para o solo argiloso, a camada mais superficial (0-0,2m) obteve maior valor com 1,76 g cm⁻³.

Para os tratamentos que houve tráfego, foi observado no solo argiloso a redução da macroporosidade ($< 0,030 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) do solo e não interferência na microporosidade. Para o solo de textura média, também foi observado redução da macroporosidade e não interferência na microporosidade do solo.

Nos tratamentos que houve tráfego, para o solo argiloso, a VIB foi considerada baixa com redução na velocidade de infiltração de nove vezes para o tratamento com uma passada e trinta e cinco vezes para o tratamento com dez passadas consecutivas do rodado em relação ao tratamento sem tráfego (39,3 mm⁻¹). Para o solo de textura média, não houve diferença estatística entre os tratamentos que houve tráfego, sendo todos considerados de VIB baixa com redução de infiltração de água de dezessete vezes para o tratamento com cinco passadas consecutivas do rodado em relação ao tratamento sem tráfego (23,6 mm⁻¹).

5. CONCLUSÕES

Valores maiores de IC foram detectados quando próximos ao limite de contração do solo; quando próximo ao limite de liquidez do solo, houve redução do IC não apresentando diferença na compactação e intensidade do tráfego, sendo que o ajuste polinomial de segunda ordem foi o mais adequado para explicar o comportamento de teor de água na avaliação de IC.

A classe de solo mostrou-se influente nos resultados de IC. O solo argiloso apresentou valores mais elevados para este índice (visivelmente acentuados na camada 0,10-0,20 m). Não foi observado diferença significativa no IC do solo a partir do T2 para o solo argiloso e do T3 para o solo de textura média.

Para as duas classes de solo estudadas, ocorreu o aumento da área e profundidade de recalque e densidade do solo, e a redução da macroporosidade e velocidade de infiltração de água no solo, confirmando a necessidade de controlar o tráfego de máquinas agrícola em função do teor de água no solo, para assim reduzir a compactação excessiva e degradação da estrutura e qualidade física dos solos.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J. J. B. **Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de quatro solos da Fazenda Lageado, Botucatu/SP: correlações e mapas de isocompactação**. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.
- AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K. K.; SINGH, A. K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p.353-363, 2006.
- ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. Total porosity and roughness of the interrow zone as influenced by tillage, **Conservation Research Report**, Washington: USDA, v.7, 22 p., 1966.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer**. St. Joseph, 2009. (ASABE standard: EP542).
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. St. Joseph, 2012. (ASABE standard: S313.3).
- AMURI, N.; BRYE, K.R. Residue management practice effects on soil penetration resistance in a wheat-soybean double-crop production system. **Soil Science**, v.173, p.779-791, 2008.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.123-141

ASHBURNER, J.E Y SIMS, B.G. 1984. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. IICA. San José, 474 p

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009.

BARATA, F.E. **Propriedades mecânicas dos solos**: uma introdução ao projeto de fundações. Rio de Janeiro: LTC, 1984. 152p

BELLINASSO, I. F.; MORAES, E. E.; DONZELLI, J.L.; SILVA, P. C.; STRINI JUNIOR, A. E. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: Seminário de tecnologia Agrônoma, 6. **Boletim Copersucar**, p. 57-66, 1994.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6º ed. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1995. 657p.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; MENGATTO, L.H.; ALVES, J.B.; WAGNER, G.P.C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.2, p.359-364, 2009

BEUTLER, A. N.; SILVA, N. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. N.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência a penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1 p.167-177, 2001.

BLANCO-CANQUI, H.; CLAASSEN, M. M.; STONE, L. R. Controlled traffic impacts on physical and hydraulic properties in na intensively cropped no-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, n.6, p.2142-2150, 2010.

BOUWER, H., 1978, **Groundwater hydrology**. McGraw-Hill, New York, cap.8.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São carlos: EESC-USP, 1998. 131p.

CALONEGO, J.C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. 2007. 125 f. Tese – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

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

CAMPBELL, D. J. Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK. C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, p. 113-139, 1994.

CANARACHE, A. Penetrometer - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1, p.51-70, 1990.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155f. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CAVALIERI, K. M. V., SILVA, A. P., ARVIDSSON J., TORMENA C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.477-485, 2009.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.161-174, 2003.

CIENTEC. Infiltração da água no solo. Disponível em: http://www.cientec.net/cientec/InformacoesTecnicas_Irriga/Solo_Infiltracao.asp> Acesso em: 9/10/2014.

COLETI, J.T.; DEMATTÊ, J.L.I. Compactação artificial em solos experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v.2, n.6, p.34-39, 1982.

COUTO, R. F.; REIS, E. F.; VIANA, P. M. F.; HOLTZ, V. OLIVEIRA, L. A.; ALVES S. M. F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1239-1245, 2013.

CUNHA, A. R. da; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009

CUNHA, J.P.A.R. da; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v.57, p.203-212, 2001.

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

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

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, 1999.

DURUOHA, C. **Desenvolvimento do sistema radicular da Cana-De-Açúcar (*Saccharum Spp*) em função da compactação, do teor de água e do tipo de solo**. 2000. 115 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6ª Ed. Rio de Janeiro, 412 p. 2013.

FENNER, P.T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 f. Tese (Tese de Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

FERNANDES, H.C. **Máquinas de exploração florestal: compactação das trilhas e dias potencialmente úteis para o trabalho**. 1996. 145 f. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

FERREIRA, M.C.D. **Compactação do solo por tráfego de máquinas de colheita em um plantio florestal de *Eucalyptus saligna***. 1998. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de concentração: Máquinas Agrícolas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**: manual de laboratório. San José: IICA, 1975. 212p.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics of unsaturated soils**. New York: Wiley & Sons. 1993, 517p.

GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H. Avaliação da condição do solo após a operação de preparo. In: SILVEIRA, G.M. **IV Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola**. Jundiaí: Fundação Cargill, 1990. p.12-21.

GONÇALVES, F.C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos**. 2011. 97 f. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**. v. 32, p. 180-186, 1968.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; MAZETTO, F. R. Utilização do DGPS e do penetrômetro hidráulico-eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do

solo. In: **VII Reunião Científica em Ciências Agrárias do Lageado**, 2000, Botucatu. VII Reunião Científica em Ciências Agrárias do Lageado, 2000. v. 1. p. 85-85.

GYSI M., OTT A., FLÜHLER H. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, v.52, p.141-151, 1999.

HAISE, H.R.; HASS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3 atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15-and 26- atmosphere percentage. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.34, p. 20-25, 1955.

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

HAMZA, M. A.; Anderson, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.40, n.3, p.497-508, 1989.

HORN, R. Compaction Soil deformation as a threat to soil functioning-how intense can soil functions be influenced and what are the possibilities to define critical values. Vienna: Eurosoil, 2008. Disponível em:
<<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/events/Conferences/Eurosoil2008/WS4%209.20%20Horn.pdf>> . Acesso em: 30 set.2014

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

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

HORN, R. & ROSTEK, J. **Subsoil compactation processes – State of knowledge**. In: HORN, R.; van den AKKER, J. J. H. & ARVIDSSON, J., eds. Subsoil compaction – Distribution, processes and consequences. Reiskirchen, Catena Verlag, 2000. p.44-54.

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.101-106, 2003.

IAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 523–530, 2006.

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

JAKOBSEN, B.F.; GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.5, n.1, p.55-70, 1985.

JOSÉ, V.J.; REZENDE, R.; MARQUES, P. A. A.; FREITAS, P. S. L.; ALVES D. S. Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do paraná. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v.6, n.1, p.155-170, 2013.

KLEIN, V. A. Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciência Agroveterin ria**, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. Passo Fundo-RS, Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânica de um latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia- Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de tres Latossolos em funcao da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:211-218, 1999.

K PPEN, W. Climatologia: com um est dio de los climas de la tierra. Publications In: **Laboratory of Climatology**, New Gersey. 1948. 104p.

LANCAS, K. P. **A compactação do solo Agrícola**. Monografia, Botucatu-SP, 1996, 22 p.

LANÇAS, K. P.; SANTOS FILHO, C.A. **Penetr metro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo**. La Plata: Editorial de la U.N.L.P. p. 570-576. 1998.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e velocidade de deslocamento**. 1987. 112 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1987.

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

LEITE, F.; FROHILICH, W. F.; DOIMO, L. S.; ALEIXO, E. V.; VOLK, L. B. S. Influência de diferentes teores de água e níveis de pressão no pneu sobre área de solo mobilizada e recalque no arenito Caiuá. **Cultivando o Saber**. Cascavel, v.3, n.1, p.82-98, 2010.

LI, Y. X.; TULBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Traffic and residue cover effects on infiltration. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.39, n. 2, p.239-247, 2001.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335p.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 60 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

MANTOVANI, E. C. Compactação do Solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.17, p. 52-55, 1987.

MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R.; ALSON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant Soil**, 135:31-41, 1991.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v.23, p.197-202, 1999.

MIALHE, L. G. O estado da arte e perspectivas da utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: **Encontro sobre Pneus de Alta Flutuação e Baixa Pressão nas Áreas Agrícola e Florestal**, 1993, Piracicaba. Anais...Piracicaba: ESALQ, 1993. p.1-17.

MINITAB. Statistical Software [computer program], version 16. State College: Minitab, 2010.

MIRANDA, E. E. V. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, v.54, n. 2, p. 393-403, 1995.

NAGAOKA, A. K.; LANÇAS, K. P.; CASTRO NETO, P.; LOPES, A.; GUERRA, S. P. S. Resistência do solo à penetração após o tráfego com dois tipos de pneus utilizando-se um equipamento para ensaio dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.387-393, 2003.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.183-186, 1987.

OLIVEIRA, G.C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado**. 2002. 78 f. Tese - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

OTTONI, M. V. **Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo in situ a partir de testes de infiltração**. 2005. 141 f. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PAULA, C. A. **Desenvolvimento de um perfilômetro laser para determinação da área e volume de contato entre o pneu e o solo**. 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2008.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: Como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, v.9, p.50-52, 1996.

PETTER, R.L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

PEREIRA, J.O.; SIQUEIRA, J.A.C.; URIBE-OPAZO, M.A. & SILVA, S.L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 171-174, 2002.

RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E.; CHASSÉ, M.; MÉRINEAU, F. Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.56, n.3, p.505-509, 1976

RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; STERMSHORN, E. Vehicle compaction pattern in clay soil. **Transaction of the ASAE**, v. 20, n.2, p. 218-220, 1977.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.29-48, 2003

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Editora Manole, 2004. 478p.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.96, n.1-2, p.316-330, 2007.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **Eur. J. Soil Sci.**, Oxford, v. 52, p. 49-58, 2001.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., ENSMINGER, L.E., CLARK, F.E., (Ed). **Methods of soil analysis - Physical**

and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSSA, 1965. p.128-152.

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; BARROS, C. A. P.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A. Cultivo mínimo: efeitos da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.11, p.1199-1205, 2011.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.821-828, 1999.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade de atributos do solo e de *crotalaria juncea* em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.1, p. 115-122, 1998.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsoidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1419-1427, 2008.

SHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.J. & STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil and Tillage Research**, v.75, p.75-86, 2004.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 884-888, 1997.

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v.184, n.2, p.323-329, 1996.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, 2002. p. 1-18.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. S.; PALHA LEITE, F. P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, v.35, p.547-554, 2011.

SILVA, C. M., CATANEO, A. & CARDOSO, L.G. Sistema de Planimetria digitalizada. In: Jornada Científica da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, 18, Botucatu, 1993. **Anais...Botucatu**. Associação dos docentes de Botucatu, 1993, p. 109.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; CARDOSO, V. M. F.; MIRANDA, E. E. V. Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo como indicadores do impacto do cultivo e do tráfego em perímetros irrigados. **Revista Irriga**, Botucatu, v.11, n.3, p.384-401, 2006.

SILVA, V.R. *et al.* Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 795-801, 2000.

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

SOEHNE, W. Fundamental of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, Michigan, v.39, n.5, p.276-281, 1958.

STARTSEV, A.D., MCNABB, D.H., 2001. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and Van Genuchten parameters of boreal forest soils. . **Soil Science Society of America Journal**. 65 (1), 224–231

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

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149f. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.

TAMARI, S. Relations between pore-space and hydraulic properties in compacted beds o silty-loam aggregates. **Soil Technol.**, Amsterdam, v. 7, p. 57-73, 1994.

TARAWALLY, M.A. et al. Field compaction at different soilwater status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Wetern Cuba. **Soil Tillage Rese.**, Amsterdam, v. 76, p. 95-103, 2004.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico do solo em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.393-399, 1999.

TAYLOR, H.M., ROBERTSON, G.M., PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, New York, v.102, p.18-22, 1966.

TOMASINI, B.A.; VITORINO, A.C.T.; GARBIATE, M.V.; SOUZA, C.M.A.; SOBRINHO, T.A. Infiltração de água no solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de colheita e modelos de ajustes de equações de infiltração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1060-1070, 2010.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v. 52, p. 223-232, 1999.

TORRES, E. & SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (Circular técnica, 23)

VANDEN BERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.5, n.2, p.105-107, 1962

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Science**, Madison, v. 68, p. 75-94, 1949.

VEPRASKAS, M.J. 1994. Plant response mechanisms to soil compaction. Chap. 9. In: R.E. Wilkinson (ed.). **Plant Response Mechanisms to the Environment**. Marcel Dekker Publ. Co., New York.

VOORHEES, W.B.; SENST, G.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 344-349, 1987.

YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D. & AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: Impacts of tillage method and soil water content. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.200-215, 2005.