

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONTROLE DE TRÁFEGO AGRÍCOLA E SEUS EFEITOS
NOS ATRIBUTOS DO SOLO E NA CULTURA DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

GUSTAVO SOARES DE SOUZA

CAMPINAS
JULHO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONTROLE DE TRÁFEGO AGRÍCOLA E SEUS EFEITOS
NOS ATRIBUTOS DO SOLO E NA CULTURA DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
doutor em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Engenharia de Água e
Solo.

GUSTAVO SOARES DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

CAMPINAS
JULHO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

So89c Souza, Gustavo Soares de
Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos
atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar /
Gustavo Soares de Souza. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza
Coorientador: Reginaldo Barboza da Silva.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Física do solo. 2. Solos - Compactação. 3.
Estrutura do solo. 4. Mecanização agrícola. I. Souza,
Zigomar Menezes de. II. Silva, Reginaldo Barboza. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Controlled traffic farming and its effects on soil attributes
and culture of sugarcane

Palavras-chave em Inglês: Soil physics, Soil compaction, Soil structure,
Mechanized farming

Área de concentração: Engenharia de Água e Solo

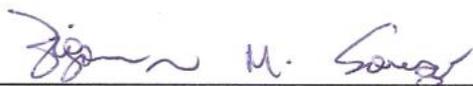
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Marlene Cristina Alves, Cássio Antônio Tormena,
Miguel Cooper, Edson Eiji Matsura

Data da defesa: 12-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

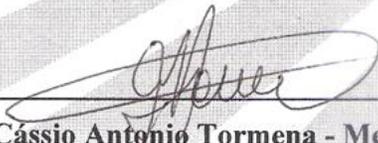
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Gustavo Soares de Souza**, aprovada pela Comissão Julgadora em 12 de julho de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Profa. Dra. Marlene Cristina Alyes - Membro Titular
FEIS/Unesp



Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena - Membro Titular
UEM



Prof. Dr. Miguel Cooper - Membro Titular
Esalq/USP



Prof. Dr. Edson Eiji Matsura - Membro Titular
Feagri/Unicamp

*À Deus, por tudo que Ele tem feito,
Aos meus pais, Elson e Elisia, pela educação, esforço e exemplo de vida,
À minha irmã Mayara, pela alegria e incentivo,
À minha namorada Patrícia, pela força e carinho,
A toda minha família e amigos,*

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, saúde, disposição para o trabalho e todas as bênçãos que tenho recebido ao longo dos anos.

Aos meus pais, Elson e Elisia, pelo amor, dedicação, incentivo e apoio nas decisões. À minha irmã Mayara, pela amizade, apoio e carinho sempre. À minha namorada Patrícia, pelo amor, ânimo, força e companheirismo, mesmo nos momentos difíceis. À toda minha família, pela motivação, ajuda e torcida pela conclusão do doutorado.

Ao professor Zigomar, pela oportunidade de trabalho, pela orientação do doutorado, pela confiança, pelos ensinamentos, pela compreensão nos momentos difíceis e pela amizade. Ao professor Reginaldo, pela co-orientação, pelas ideias e pelas sugestões valiosas para conclusão deste trabalho.

A todos os professores da FEAGRI, em especial os professores Roberto, Edson, Paulo Magalhães e David, que participaram direta ou indiretamente da minha formação e puderam contribuir significativamente para o meu trabalho. Aos professores Miguel Cooper (ESALQ), Cássio Antônio Tormena (UEM), Gener Tadeu Pereira (UNESP) e Rubismar Stolf (UFSCar) e ao pesquisador Lúcio André de Castro Jorge (EMBRAPA) pela ajuda na análise dos dados, atenção e pelos ensinamentos.

Aos amigos de Laboratório de Solos Fernando, Ronny, Antonniane, Gilka, Lorena, Rose, Guilherme, Laércio, Janaína e Allan, pelo ambiente fraterno, ideias, apoio, brincadeiras e troca de conhecimento durante a caminhada.

Aos amigos da Pós-Graduação, em especial Francelino, Thayla, Ivo, Laura, Eduardo, Natália, Maycon, Franciana, Gabriela, Marcelo, Fábio, Haroldo e Glenda pelo convívio, discussões, troca de conhecimento e momentos alegres. Aos amigos da graduação, em especial Matheus, Mariana, Gustavo, Garrido, André, Stephan e Raíssa, pela ajuda, companhia e brincadeiras.

Aos funcionários do Laboratório de Solos, Célia, Júnior e Lucarelli, pelo convívio, ajuda nas análises e ensinamentos práticos. Aos funcionários das Secretarias de Graduação, Pós-Graduação, Seção de Suporte e dos demais Laboratórios da FEAGRI, em especial Sidney,

Marta e Célia, pelo trabalho prestado, amizade e dedicação no serviço público. Aos funcionários do Laboratório de Mecânica do Solo da FEC e Laboratório de Micromorfologia da ESALQ pela ajuda proporcionada nas análises.

Aos amigos da república Marlus, Leonardo, Daniel e Luís Fernando pela amizade, convívio, ajuda diária, paciência e alegrias compartilhadas.

Aos irmãos da IPBG pelo convívio, amizade, orações, ensinamentos e momentos de alegria na presença de Deus.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida e à FAPESP pelo suporte financeiro destinado à realização do projeto de pesquisa.

Muito Obrigado!

*“Trabalha como se tudo dependesse de ti e confia
como se tudo dependesse de Deus”.*
(Santo Inácio de Loyola).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. O problema e sua importância.....	1
1.2. Hipóteses	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Panorama da cultura canavieira.....	4
2.1.1. Qualidade da cana-de-açúcar.....	6
2.2. Tráfego de máquinas agrícolas e compactação do solo.....	9
2.2.1. Efeitos da compactação do solo.....	11
2.3. Controle de tráfego agrícola	15
2.4. Piloto automático.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1. Localização e descrição da área de estudo	22
3.2. Sistemas de manejo do canavial	24
3.3. Análise dos atributos físicos do solo	25
3.3.1. Coleta das amostras de solo.....	25
3.3.2. Caracterização física do solo	26
3.3.3. Arranjo experimental e análise estatística	28
3.4. Análise do intervalo hídrico ótimo do solo	29
3.4.1. Coleta das amostras de solo.....	29
3.4.2. Caracterização do intervalo hídrico ótimo.....	29
3.4.3. Análise estatística	31
3.5. Avaliação da estrutura do solo por análise de imagens	32
3.5.1. Coleta das amostras de solo.....	32
3.5.2. Quantificação de poros por análise de imagens.....	32
3.5.3. Experimentação e estatística.....	33
3.6. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo.....	34
3.6.1. Coleta das amostras de solo.....	34
3.6.2. Caracterização da análise da capacidade de suporte do solo.....	35
3.6.3. Análise estatística	36
3.7. Análise de atributos da cana-de-açúcar	36
3.7.1. Produtividade e rendimento de açúcar.....	36
3.7.2. Qualidade do caldo – Variáveis tecnológicas.....	36
3.7.3. Sistema radicular	38
3.7.4. Análise estatística	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1. Atributos Físicos do Solo	40
4.2. Intervalo Hídrico Ótimo	50
4.3. Avaliação estrutural do solo por análise de imagens.....	58

4.4. Compressibilidade e Capacidade de Suporte de Carga do Solo	65
4.5. Atributos da Planta	72
4.5.1. Produtividade e rendimento de açúcar.....	72
4.5.2. Variáveis tecnológicas.....	73
4.5.3. Sistema radicular	74
5. CONCLUSÕES	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7. ANEXOS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área experimental localizada na Usina São Martinho, Pradópolis – SP.	22
Figura 2. Precipitação média mensal do município de Pradópolis – SP. Série histórica mensal de 1966 a 2010 (Fonte: ANA, 2012).	22
Figura 3. Ajuste da bitola do trator: (A) trator com bitola de 2,0 m e (B) trator com bitola de 3,0 m. (Adaptado: John Deere).	25
Figura 4. Locais de amostragem do solo e identificação das mini-trincheiras.	26
Figura 5. Croqui da área experimental com os sistemas de manejo testemunha (T), controle de tráfego com ajuste da bitola (CT1) e ajuste da bitola e piloto automático (CT2) para análise dos atributos do solo.	29
Figura 6. Pontos de amostragem das amostras indeformadas e representação do bloco polido com os locais imageados para determinação da porosidade do solo.	34
Figura 7. Ponto de amostragem dos monólitos para análise do sistema radicular nas trincheiras.	38
Figura 8. Curvas de retenção de água do Latossolo Vermelho determinadas nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).	49
Figura 9. Intervalo hídrico ótimo do solo representando a variação no conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC, $\psi = 10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP, $\psi = 1.500$ kPa), porosidade de aeração ($PA = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e resistência à penetração (RP = 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa).	52
Figura 10. Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo e resistência do solo à penetração.	55
Figura 11. Densidade do solo das amostras coletadas nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) nos locais de amostragem e camadas do Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar, considerando a $D_{sc} = 1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ (RP=2,5 MPa).	56
Figura 12. Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C).	57
Figura 13. Porosidade total do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.	58
Figura 14. Classificação dos tipos de poros do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.	60
Figura 15. Microfotografias 2-D de blocos polidos e orientados do Latossolo Vermelho na camada de 0,00-0,12 m nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem	

controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C). Poros em branco.....	61
Figura 16. Classificação do tamanho de poros do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.....	64
Figura 17. Deformação e índice de compressão do solo relacionados com o conteúdo de água e densidade inicial do solo para todos os sistemas de manejo, locais de amostragem e camadas de solo. ** Significativo a 1% de probabilidade.	65
Figura 18. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo (n=20) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.....	67
Figura 19. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego (CT1+CT2, n=40) e sem controle de tráfego (T, n=20) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química ⁽¹⁾ e granulométrica ⁽²⁾ do Latossolo Vermelho das camadas 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	23
Tabela 2. Critérios para distinção entre grupos de forma de poros.	33
Tabela 3. Limites de consistência determinados na camada superficial (0,00-0,10 m) do Latossolo Vermelho: limites de contração (LC), liquidez (LL) e plasticidade (LP)	35
Tabela 4. Densidade e porosidade do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).....	41
Tabela 5. Resistência do solo à penetração e conteúdo de água do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).	44
Tabela 6. Estabilidade de agregados do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).....	47
Tabela 7. Parâmetros do ajuste do modelo de van Genuchten para o Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).....	48
Tabela 8. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para resistência à penetração (RP = MPa) em função do conteúdo de água no solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($Ds = Mg m^{-3}$): $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$ ($R^2 = 0,80$)	50
Tabela 9. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para conteúdo de água do solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) em função da densidade do solo ($Ds = Mg m^{-3}$) e do potencial matricial do solo ($\psi = kPa$): $\ln \theta = d + e Ds + f \ln \psi$ ($R^2 = 0,82$).....	51
Tabela 10. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR), nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m	66
Tabela 11. Teste de significância comparando os modelos de capacidade de suporte de carga do solo nos manejos com controle de tráfego com ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T), nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) e nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.	68
Tabela 12. Produtividade da cana e rendimento de açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).....	72
Tabela 13. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T)	73

Tabela 14. Sistema radicular da cana-de-açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP) e do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....	75
Tabela 15. Correlação de Spearman entre o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo (n=108)	79

RESUMO

O sistema de produção da cana crua, sem queima da palha e com frequente uso da mecanização agrícola promove o tráfego intenso sobre o solo, resultando na sua compactação. O sistema de manejo com controle de tráfego agrícola representa uma alternativa viável para o setor agrícola, pois separa as zonas de tráfego e não tráfego, concentrando a passagem de pneus em linhas permanentes, diminuindo a influência da compactação sobre a cultura. O objetivo deste trabalho foi comparar os sistemas de manejo com e sem controle de tráfego agrícola em relação à qualidade física de um Latossolo Vermelho, indicada por meio da análise de atributos físicos e mecânicos do solo, e seu efeito na cana-de-açúcar colhida mecanicamente e sem queima. A pesquisa foi desenvolvida em lavoura comercial com os manejos: ausência de controle de tráfego (T); controle de tráfego com ajuste da bitola do trator e transbordos para 3,0 m (CT1); e controle de tráfego com ajuste da bitola e piloto automático. Os atributos do solo avaliados foram: densidade, porosidade, resistência à penetração, conteúdo de água, estabilidade de agregados, teor de carbono e curva de retenção de água do solo. O solo foi amostrado nas linhas de plantio e do rodado e no canteiro, nas camadas 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. A qualidade física do solo foi avaliada por meio do intervalo hídrico ótimo. A estrutura do solo foi avaliada por meio de análise de imagens digitalizadas de monólitos de solo, quantificando a forma e tamanho dos poros. Foram coletadas amostras indeformadas para análise da capacidade de suporte de carga do solo. A cana foi colhida mecanicamente e a produtividade medida por meio de balança específica para transbordo. Amostras de colmo foram coletadas em cada parcela para determinação das variáveis tecnológicas. As raízes foram coletadas em monólitos, separadas do solo por peneiramento. Densidade, porosidade e resistência do solo a penetração demonstraram diferenças entre os sistemas de manejo, com melhores condições físicas nos manejos com controle de tráfego na linha da soqueira e no canteiro. Os índices de agregação e o teor de carbono do solo não diferiram entre os manejos. Foram observadas alterações na retenção de água do solo entre tratamentos. O intervalo hídrico ótimo foi maior no canteiro e linha de plantio nos manejos com controle de tráfego. Predomínio de poros arredondados e complexos indicaram maior porosidade e menor compactação no manejo com controle de tráfego na linha de plantio. A testemunha apresentou maior pressão de preconsolidação na linha de plantio, enquanto o manejo com controle de tráfego apresentou maior capacidade de suporte de carga na linha do rodado. Os manejos com controle de tráfego apresentaram maior produtividade e rendimento de açúcar. As variáveis tecnológicas não diferiram entre os manejos. O manejo com controle de tráfego apresentou maior massa seca, superfície e volume radicular. Os manejos com controle de tráfego proporcionaram compactação na linha do rodado e preservaram a qualidade física do solo na região da soqueira, resultando no maior desenvolvimento do sistema radicular, com aumento de 18% na produtividade e 20% no rendimento de açúcar.

Palavras-chave: física do solo; compactação do solo; estrutura do solo; mecanização agrícola.

ABSTRACT

The sugarcane production system without straw burning and with frequent use of agricultural mechanization promotes the excessive traffic on the soil, resulting in their compaction. The management with controlled traffic farming is a viable alternative for the agricultural sector, because it separates the areas of traffic and no-traffic, focusing on the passage of tires in permanent lines, reducing the influence of compaction on the crop. The objective this work was to compare the management systems with and without controlled traffic farming in relation to soil physical quality, indicated by the analysis of attributes physical and mechanical soil and its effects on sugarcane harvested mechanically and without burning. The research was developed in a commercial farm with the managements: non-controlled traffic (T); controlled traffic with adjustment of the tractor and trailer gauge to 3.0 m (CT1), and controlled traffic with adjustment of the gauges and autopilot (CT2). The soil attributes evaluated were: bulk density, porosity, penetration resistance, water content, aggregate stability, carbon content and soil water retention curve. Soil samples were collected in plant and wheel rows and in the seedbed, in the layers 0.00 to 0.10; 0.10 to 0.20 and 0.20 to 0.30 m. The soil physical quality was evaluated using the least limiting water range. The soil structure was evaluated by digitized images analysis of soil monoliths, quantifying shape and size of the pores. Undisturbed samples were collected for analysis of soil load carrying capacity. The sugarcane was mechanically harvested and the productivity was measured by weighing the sugarcane trailer. Sugarcane stalks were collected from each plot to determine the technological variables. The roots were collected in monoliths, separated from the soil by sieving. Bulk density, porosity and penetration resistance showed differences among management systems, with better physical conditions in the managements with controlled traffic in the plant row and seedbed. The aggregation indices and carbon content didn't differ between managements. There were changes in soil water retention curve between treatments. The least limiting water range was higher in the seedbed and plant row in the controlled traffic. Predominance of rounded and complexes pores showed higher porosity and lower compaction in the controlled traffic in the plant row. The management with non-controlled traffic had a higher soil preconsolidation pressure in the plant row, while the management of controlled traffic had a higher load carrying capacity in the wheel row. The management of controlled traffic had a higher cane productivity and sugar yield. The technological variables didn't differ between managements. The handling with controlled traffic had higher dry mass, surface and volume of roots. The management with controlled traffic promoted soil compaction in wheel row and preserved the soil physical quality in the plant row, resulting in greater root development, with 18% increase in productivity and 20% on yield of sugar.

Keywords: soil physics; soil compaction; soil structure; agricultural mechanization.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O problema e sua importância

A cultura da cana-de-açúcar encontra-se em destaque no atual cenário agrícola brasileiro, sendo uma das culturas de maior importância econômica, com perspectivas de expansão da safra nos próximos anos, em função do maior consumo de seus derivados, entre eles destaca-se o etanol, popularmente conhecido como álcool combustível. Uma possibilidade para viabilizar esse fato é o emprego da colheita mecanizada sem uso do fogo como forma de implementar o sistema de produção da cana-de-açúcar, pois se trata de uma técnica racional de manejo, uma vez que desencadeia uma série de benefícios ambientais e econômicos, sendo considerada como tecnologia de ponta com reconhecimento mundial.

O sistema de produção da cana-de-açúcar colhida crua sem o uso de fogo emprega maquinário agrícola em todas as atividades relacionadas com o preparo do solo, tratos culturais e colheita, ocorrendo o tráfego intenso sobre o solo com baixo rendimento das máquinas, elevado custo operacional e principalmente a compactação de solos. Isso ocorre porque o atual sistema de manejo utiliza linhas de cultivo de 1,4 a 1,5 m e máquinas com bitola inferior a 2,0 m, promovendo o tráfego dos rodados na região da soqueira, o que influencia no desenvolvimento radicular, na produtividade e longevidade do canavial.

Existe uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação, o que, em grande parte, deve-se às operações mecanizadas realizadas em condições inadequadas, principalmente pelo fato de não considerar o conteúdo de água no solo e sua capacidade de suporte de carga, já que em condições de excesso de água, o solo torna-se mais propenso a sofrer compactação. Assim a compactação altera a qualidade física do solo, com modificações em sua estrutura, criando um ambiente menos propício para o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, o que interfere na sua produtividade.

Uma alternativa visando diminuir o efeito da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas no desenvolvimento da cana-de-açúcar é a adoção do sistema de tráfego controlado ou controle de tráfego agrícola, que basicamente realiza alterações no espaçamento da cultura e na bitola das máquinas agrícolas. Neste sistema são mescladas nas áreas de cultivo zonas destinadas ao tráfego e zonas destinadas somente ao crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas. Com essa estratégia uma área menor será atingida, embora mais intensamente.

Outra técnica que tem ganhado destaque no setor sucroalcooleiro e pode ser utilizada em complemento ao controle de tráfego agrícola é o uso do sistema de direção assistido, popularmente conhecido como piloto automático. Esse equipamento é acoplado junto ao trator agrícola e utilizado para guiá-lo durante operações de campo, de tal forma que o deslocamento ocorra sempre paralelo a uma determinada linha de referência, permitindo um melhor aproveitamento do terreno, uniformização no espaçamento das linhas de cultivo e evita o tráfego dos rodados sobre a soqueira, o que prejudica a parte aérea com a quebra de colmos e o sistema radicular da cultura devido à compactação do solo.

O próprio ciclo de produção da cana-de-açúcar, hoje com cerca de 5 cortes, concebido para maximizar os ganhos de sacarose, pode ser revisto nesse novo paradigma, visando maximizar a produção de biomassa e também minimizar os impactos ambientais. Uma redução do impacto das operações agrícolas sobre o solo, associada com o controle de tráfego poderia diminuir substancialmente a compactação do solo prolongando o ciclo da cultura. Dessa forma, a avaliação da compactação do solo e dos fatores que influenciam e controlam esse processo torna-se importante, juntamente com os sistemas de manejo e práticas conservacionistas do solo, com destaque para o controle de tráfego agrícola, como medida preventiva da compactação das regiões destinadas ao desenvolvimento do sistema radicular, almejando a sustentabilidade do processo produtivo.

1.2. Hipóteses

O controle de tráfego agrícola, realizado com ajuste da bitola do trator e do transbordo para 3,0 m e uso de piloto automático, aplicado no manejo da cana-de-açúcar, reduz a compactação de um Latossolo Vermelho na região da soqueira, preservando sua qualidade física e estrutural.

A preservação na qualidade física e estrutural do Latossolo Vermelho na região da soqueira no sistema de manejo com controle de tráfego agrícola aumenta o desenvolvimento do sistema radicular, a produtividade e melhora a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar colhida mecanicamente e sem queima.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de comparar os sistemas de manejo com e sem controle de tráfego agrícola em relação à qualidade física de um Latossolo Vermelho, indicada por meio da análise de atributos físicos e mecânicos do solo, e seu efeito na cana-de-açúcar colhida mecanicamente e sem queima, em condição de sequeiro no Estado de São Paulo.

1.3.2. Específicos

- Avaliar a resistência do solo à penetração, o conteúdo de água do solo, a porosidade do solo, a densidade do solo, a estabilidade de agregados e o teor de carbono orgânico nas áreas com e sem controle de tráfego agrícola;

- Identificar, nos tratamentos em estudo, os limites críticos de densidade do solo onde à resistência à penetração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e/ou porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas, utilizando o conceito do intervalo hídrico ótimo;

- Quantificar as modificações estruturais do solo, a partir da análise da forma e tamanho dos poros do solo por meio de imagens digitalizadas nos manejos com e sem controle de tráfego agrícola;

- Determinar a capacidade de suporte de carga do solo, obtendo medições da pressão de preconsolidação por meio de ensaios uniaxiais em diferentes conteúdos de água do solo nos tratamentos em estudo; e

- Avaliar o sistema radicular, a produtividade e a qualidade do caldo da cana-de-açúcar em área com e sem controle de tráfego agrícola.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Panorama da cultura canavieira

A cana-de-açúcar, introduzida no período colonial, transformou-se em uma das principais culturas da economia brasileira, com destaque no atual cenário agrícola brasileiro, com perspectivas de expansão da safra nos próximos anos. Na safra brasileira de 2010/2011 foram moídas 714 milhões de toneladas de cana, com produtividade média de 79 Mg ha⁻¹, que resultou na produção de 38,7 milhões de toneladas de açúcar e 27,7 bilhões de litros de etanol (BRASIL, 2011a; IBGE, 2012). Projeções apontam que a produção brasileira deve aumentar para 934,6 milhões de toneladas de cana na safra de 2020/21 (BRASIL, 2011b).

O desenvolvimento do setor sucroalcooleiro também é reflexo do aumento da área plantada no Brasil. Em 1975, a área plantada era de 1,9 milhões de hectares e se estendem por mais de 9,94 milhões de hectares em 2011, sendo previsto ainda uma taxa média de crescimento de 2% até 2020 (BRASIL, 2009; 2011a; IBGE, 2012). Em 2010, o valor atual correspondia por 3,5% da área agricultável no país (JORNALCANA, 2010). No Estado de São Paulo esse crescimento também ocorre, ou seja, 82% dos municípios aumentaram a área plantada com cana no período de 1996 a 2008, sendo que 16% deles aumentaram a área plantada em mais 1.000% (OLIVETTE *et al.*, 2010).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China, Tailândia e México. No entanto, somente o Brasil e a Índia apresentaram crescimento da produção nos últimos anos, resultado do aumento de área plantada e produtividade da cultura, enquanto os demais países permanecem estagnados nos mesmos patamares de produção e área cultivada (BRASIL, 2009; IBGE, 2012).

O agronegócio sucroalcooleiro fatura direta e indiretamente cerca de R\$ 51 bilhões por ano, o que corresponde a 1,76% do PIB nacional, ajudando o país a aumentar as exportações e reduzir sua dependência do petróleo (JORNALCANA, 2010). É também um dos setores que mais empregam no país, com mais de 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos e reúne mais de 72.000 agricultores (DIEESE, 2007).

O parque sucroalcooleiro nacional conta com 426 indústrias cadastradas e em plena atividade, sendo 4 na região Norte, 77 no Nordeste, 32 no Sul, 250 no Sudeste e 77 no Centro-Oeste, que impulsionam a atividade econômica em diversos municípios brasileiros (BRASIL, 2010). A região Sudeste conta com o maior número de usinas, presentes principalmente no

Estado de São Paulo que corresponde por mais de 50% da produção de cana-de-açúcar do Brasil (BRASIL, 2011a; IBGE, 2012). São Paulo apresenta ainda o parque sucroalcooleiro mais tecnificado e onde se desenvolvem as principais pesquisas para o setor (OLIVETTE *et al.*, 2010; BRASIL, 2011a).

Atualmente, o Brasil se defronta com a perspectiva de um aumento significativo da demanda de etanol, matéria-prima derivada da cana. Esta previsão sustenta-se em três realidades de mercado: (i) aumento interno do consumo de etanol pelo sucesso da introdução da alternativa *flex-fuel* no mercado de veículos automotivos leves; (ii) expansão das exportações brasileiras de etanol em função do crescente interesse mundial pela mistura do etanol à gasolina; e (iii) opção brasileira pela produção do biodiesel utilizando etanol na transesterificação dos óleos vegetais (BRASIL, 2009; OLIVETTE *et al.*, 2010).

O aumento horizontal da produção de cana (área plantada) é importante, abrindo novas fronteiras agrícolas, contudo essa tendência vem sendo criticada, devido a provável insustentabilidade do processo produtivo, trazendo preocupação com a escassez e elevação dos preços de alimentos básicos (GOLDEMBERG *et al.*, 2008). Assim uma maior importância é dada ao aumento da produtividade das áreas com a cultura implantada, evitando a expansão da cultura para áreas destinadas a outras atividades agrícolas. Este aumento pode ser atingido por meio de melhoramento genético, emprego da agricultura de precisão, melhoria no setor industrial e adoção de sistema de manejo da cana-de-açúcar que minimize a degradação do solo.

Uma alternativa viável para a expansão do setor é o emprego da colheita mecanizada, pois se trata de uma técnica racional de manejo das lavouras, sendo considerada como tecnologia de ponta em nível mundial, com reconhecidos benefícios ambientais e econômicos. No entanto, a colheita de cana sem queima deve receber especial atenção pelos custos envolvidos, necessidade de desenvolvimento tecnológico e risco de compactação do solo (SOUZA *et al.*, 2005).

Atualmente, parte da colheita de cana no Brasil ainda é feita de forma manual e com queima da palha antes do corte. Contudo, esse quadro vem mudando, devido a preocupação de pesquisadores e da sociedade com as consequências produzidas pela queima dos canaviais, principalmente com relação à poluição do ar, eliminação da matéria seca e redução na matéria

orgânica do solo (SOUZA *et al.*, 2005), criando a cada ano condições menos favoráveis para o desenvolvimento da cultura.

O bagaço da cana-de-açúcar, bem como todos os resíduos vegetais que são queimados possibilitam a produção de energia limpa e muitas usinas já desenvolvem projetos para certificação de emissões de créditos de carbono pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (UNICA, 2010). Assim, o bagaço usado na cogeração de energia pode contribuir para tornar a matriz energética mais eficiente e menos poluidora, sendo esta mais uma possibilidade de riqueza originada do ramo sucroalcooleiro.

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar é atualmente a única forma viável de corte da cana sem queima. Nesse sistema as folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidade variável de pedaços de colmo são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal denominada palha ou palhada (SOUZA *et al.*, 2005). A palha sobre o solo proporciona maior proteção contra erosão, redução do uso de herbicidas, maior incorporação de matéria orgânica ao solo e maior atividade microbiana do solo.

No Estado de São Paulo a adoção da colheita mecanizada é inevitável. O decreto de Lei Estadual 47.700 publicado em 11 de março de 2003, que regulamenta a Lei Estadual 11.241 de 19 de setembro de 2002, dispõe sobre a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar, sendo de interesse agrícola, ecológico e social, estabelece prazos, procedimentos, regras e proibições que visam regulamentar a queima dos canaviais. Portanto, a colheita de cana sem queima é uma realidade e esse fato está se espalhando para os outros estados.

Dessa forma, é inevitável pensar na não utilização da colheita mecanizada de cana sem queima em áreas agrícolas que busquem uma maior produtividade associada à sustentabilidade do sistema agrícola, com vistas à redução do impacto ao meio ambiente, sendo que esta realidade já existe no Estado de São Paulo e esta sendo extrapolada para outras regiões do país.

2.1.1. Qualidade da cana-de-açúcar

A qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar, medida por meio das variáveis tecnológicas, é de suma importância para o setor sucroalcooleiro, relacionada com diversas características intrínsecas da planta, manipulada pelo manejo agrícola e industrial, resultando

na produção de açúcar, etanol e energia. Além disso, a remuneração da cana é feita com base na sua qualidade. Os sistemas de pagamento da cana-de-açúcar são planejados para criar incentivos para melhorar o desempenho de moagem, a produção e a qualidade da matéria-prima, visando sempre maximizar os lucros.

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima empregada pela indústria mundial para a produção de açúcar e etanol por via fermentativa. A beterraba, menos competitiva na produção de açúcar, restringe-se ao mercado doméstico dos países de clima temperado, menos favorável ao cultivo da gramínea, enquanto o milho ocupa a segunda posição na produção de etanol (COSTA *et al.*, 2009). Atualmente, é necessário considerar ainda o teor de fibra da cana-de-açúcar, uma vez que este está relacionada à cogeração de energia, utilizada para movimentar a própria unidade industrial e, ou ser vendida para companhias energéticas (LAVANHOLI, 2008).

De acordo com CONSECANA (2006), os resultados obtidos no laboratório de massa do bagaço úmido, teores de sólidos totais dissolvidos e sacarose aparente do caldo, servem de base para a apuração da qualidade da cana. No Brasil, o valor pago pelas usinas aos fornecedores relaciona-se ao teor de açúcares totais recuperáveis, determinado a partir das variáveis citadas anteriormente. Dessa forma, melhorar a qualidade da matéria-prima da cultura da cana-de-açúcar nas fases do processo agrícola e industrial melhora a competitividade da empresa nos mercados doméstico e internacional (LARRAHONDO *et al.*, 2009).

Vários trabalhos mostram o efeito do manejo agrícola sobre a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar (WIEDENFELD, 2008; LARRAHONDO *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.* 2011; SANTOS *et al.*, 2011). Oliveira *et al.* (2011), estudando 5 variedades de cana-de-açúcar em Pernambuco, observaram em geral redução significativa nos teores de sólidos solúveis totais (6%), sacarose aparente do caldo (4%) e fibras (19%) com o uso da irrigação da lavoura, contudo acompanhado de aumentos na produtividade de colmos (145%) e no teor açúcar (150%). Esse comportamento das variáveis tecnológicas ocorreu porque a irrigação promove maior vigor e desenvolvimento das plantas, reduzindo a concentração de sólidos solúveis totais no caldo da cana (DEON *et al.*, 2010). Larrahondo *et al.* (2009) observaram melhorias nas variáveis tecnológicas com o uso do corte manual em relação a colheita mecânica na Colômbia, ambos sem uso de fogo (cana colhida crua), devido a adição de

impurezas (11%) no processo de colheita mecânica, assim a colheita manual apresentou maior pureza do caldo (2%), sacarose do caldo (8%) e teor de açúcar recuperável (10%) e menor teor de fibras (13%).

As melhorias nos atributos do solo também podem contribuir para melhorar a quantidade e qualidade da cana-de-açúcar. Lingle e Wiegand (1997) constataram que o aumento da salinidade do solo no Texas, medida por meio da condutividade elétrica, diminuiu o teor de sólidos solúveis, sacarose aparente do caldo, pureza e açúcar recuperável e aumentou o teor de fibras. Souza *et al.* (2005) constataram efeito do manejo do solo e palha sobre a qualidade do caldo da cana-de-açúcar, com aumento da produção de cana (9%) e sacarose aparente por hectare (4%) e redução do teor de açúcares totais recuperáveis (3%) e sacarose aparente do caldo (3%) com a escarificação da entrelinha, independente da palha na superfície do solo ser ou não triturada. Santos *et al.* (2011) constataram que a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de fósforo combinado com 2,7 Mg ha⁻¹ de torta de filtro no sulco de plantio melhorou a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar na região de Presidente Prudente – SP, por meio do aumento nos teores de sólidos solúveis, açúcares redutores totais e sacarose, seguido de aumentos na produtividade.

De acordo com Ripoli e Ripoli (2004) os valores recomendados para as variáveis tecnológicas são: sacarose aparente do caldo (>14%), pureza do caldo (>85%), açúcar totais recuperáveis (>15%), açúcares redutores (glicose e frutose) (<0,8%), fibra (11 – 13%), terra na cana (<5 kg Mg⁻¹). Segundo Marques *et al.* (2001), valores inferiores a 18, 15 e 85% para teor de sólidos solúveis totais, sacarose aparente do caldo e pureza, respectivamente, indicam que a cultura está imatura para colheita.

Informações sobre os processos que controlam o acúmulo de sacarose e a qualidade da matéria-prima ao longo do tempo podem ser usadas para avaliar a base fisiológica de variação de rendimento e, conseqüentemente, as possibilidades de melhoria da produtividade da cana-de-açúcar. Assim, compreender os fatores que interferem na dinâmica da matéria seca e qualidade da cana ao longo do ciclo auxiliam na tomada de decisão relacionada as práticas de manejo, a fim de otimizar o retorno econômico da produção comercial.

2.2. Tráfego de máquinas agrícolas e compactação do solo

A mecanização agrícola contribuiu, juntamente com outras práticas agrícolas, para um aumento significativo na produtividade das culturas e redução nos custos de produção durante o último século. Rendimentos médios do trigo no Reino Unido quase triplicaram no período de 1947 a 1991, sendo que uma proporção significativa desse aumento esta relacionada com a mecanização (SEWELL; YULE, 1996).

No Brasil, a mecanização agrícola tem sido um dos alicerces do sistema produtivo de diversas culturas agrícolas que atingem extensas áreas. O crescimento do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo tem sido sustentado com a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA *et al.*, 2005). Contudo, o trânsito de máquinas sobre o solo é uma das principais causas da compactação excessiva observada em muitas lavouras e que resulta em danos à produção das culturas.

O progresso na mecanização agrícola resultou em tratores cada vez mais pesados e maiores ao longo dos anos. Nos últimos 50 anos a potência do trator agrícola aumentou de duas rodas motrizes com 100 kW de tração para quatro rodas com várias centenas de quilowatts de energia (WILSON, 2000). Nos Estados Unidos da América, o trator agrícola apresentava uma potência média de 20 kW em 1950, sendo que esta potência aumentou para 83 kW em 1980 e 100 kW em 1990 (GOERING, 1992). Contudo esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, aumentando as pressões exercidas sobre o solo (LAGUË *et al.*, 2003), o que pode levar a compactação do solo.

A compactação do solo caracteriza a compressão do solo não saturado provocando alteração na organização das partículas, aumento da densidade e redução da porosidade do solo, com a expulsão de ar dos poros (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; DIAS JÚNIOR, 2000). Essas alterações degradam a estrutura do solo, resultado do rearranjo de partículas e pelas modificações na distribuição dos poros. A extensão do problema da compactação do solo é uma função da massa do veículo, tipo de solo e teor de água, velocidade da máquina, pressão de contato pneu/solo, número de passadas e as interações desses fatores com as práticas agrícolas (CHAMEN *et al.*, 2003).

A compactação é causada pela carga estática aplicada sobre o solo e forças dinâmicas resultado da vibração do trator e implemento, patinagem dos rodados, mudanças de direção

bruscas e alterações na aceleração/frenagem (HORN *et al.*, 1995; ALAKUKKU *et al.*, 2003). A aplicação de forças dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na zona de contato solo-pneu e solo-implemento que se propagam em profundidade. Quando a força dinâmica excede a resistência interna do solo, compactação adicional ocorre com mudanças nos atributos do solo atingindo camadas mais profundas (HORN *et al.*, 1995).

A pressão aplicada sobre o solo pode ser descrita pela relação entre o peso da máquina/equipamento e a superfície de contato dos rodados e órgãos ativos. Na maioria dos trabalhos são discutidas as cargas estáticas por eixo/rodado, no entanto, durante operações de campo, a distribuição de peso pode variar entre os eixos e as rodas do mesmo eixo, dependendo do grau de carregamento da máquina ou da transferência de peso durante as operações de campo (ALAKUKKU *et al.*, 2003). A área de contato do pneu é aquela apoiada na superfície do terreno. Em uma superfície deformável (solo), a área de contato dos pneus é sempre maior do que sobre uma superfície rígida (ALAKUKKU *et al.*, 2003), reduzindo a pressão aplicada.

Maiores deformações ocorrem no solo após a primeira passagem da máquina, sendo reduzidos os efeitos das passagens subsequentes (FENNER, 1999). Pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas, reboques e caminhões situam-se entre 50 e 600 kPa (SILVA *et al.*, 2000). A capacidade do solo em resistir a uma carga varia com suas características intrínsecas, mas principalmente com o conteúdo de água no solo. Assim, a aplicação de uma pressão acima do limite suportado pelo solo resulta em alteração interna e degradação do solo.

O processo de compactação do solo ocorre principalmente em decorrência do excesso de pressão exercida pelo tráfego de máquinas e equipamentos sobre o solo em condições de excesso de água e do seu não revolvimento. Solos mais secos, com potencial matricial de 30 kPa, podem sofrer compactação superficial até 0,30 m, enquanto solo mais úmidos, com potencial matricial de 6,0 kPa, o processo compressivo pode ocorrer em maiores profundidades (HORN *et al.*, 1995). Algumas atividades como a aplicação de agroquímicos para o combate de pragas e doenças ou a colheita não permitem que o agricultor possa utilizar máquinas apenas quando o solo está em condições adequadas, principalmente em relação ao conteúdo de água do solo, uma vez que este é um dos principais fatores controladores do

processo compressivo do solo (DIAS JÚNIOR, 2000), o que irá comprometer a qualidade física do solo.

O aumento do peso dos tratores e implementos aliada a intensificação do uso do solo apresenta potencialmente maior capacidade de compactar os solos agrícolas, característica da modernização do setor. Isso contribui para ampliar as áreas com problemas de compactação, devido à ausência de estudos práticos que determinem a capacidade de suporte de cargas do solo, orientando o gestor agrícola na definição dos cronogramas de trabalho (SOUZA *et al.*, 2006).

Assim, existe a necessidade de utilização boas práticas agrícolas, a fim de evitar, retardar ou impedir a compactação do solo. Hamza e Anderson (2005) citam como técnicas práticas: (a) redução da pressão sobre do solo, quer por meio da diminuição de carga por eixo e/ou aumento da área de contato das rodas com o solo, (b) trabalhar o solo em condições de conteúdo de água no solo adequado, (c) redução do número de passadas por máquinas agrícolas; (d) controle de tráfego agrícola; (e) aumento da matéria orgânica por meio da retenção de resíduos de culturas e pastagens; (f) remover a compactação do solo em profundidade; (g) rotação de culturas que incluem plantas com sistema radicular profundo; (h) manutenção de uma relação adequada de saturação por bases e correção nutricional para atender às exigências das culturas para ajudar o sistema solo-planta a resistir os estresses externos.

O desenvolvimento e a expansão de diversas culturas que ocupam extensas áreas como café, cana-de-açúcar, milho, soja, algodão, estão diretamente relacionados com o uso de máquinas agrícolas que podem causar compactação do solo, com consequências ao sistema radicular devido às alterações no solo. Portanto, o tráfego de máquinas com conteúdo de água favoráveis a compactação do solo em áreas agrícolas tem-se tornado preocupante em decorrência da compactação excessiva, que pode levar à redução da produtividade.

2.2.1. Efeitos da compactação do solo

A eficiência na mecanização é um dos principais fatores relacionados ao retorno econômico e baixo custo operacional em sistemas de produção agrícola. Essa eficiência está associada a maiores taxas de trabalho, alcançadas com o uso de equipamentos de maior potência e peso (TULLBERG *et al.*, 2007), contudo contribuindo para alteração nos atributos

do solo, degradando a sua estrutura, com efeitos diretos no desenvolvimento das culturas. A estrutura do solo é um dos atributos mais importantes que afetam a produção agrícola, porque ela interfere na profundidade que as raízes podem penetrar, na quantidade de água que pode ser armazenado no solo e no movimento da fauna, água e aeração no solo (PAGLIAI *et al.*, 2004).

Pesquisadores têm demonstrado o efeito da compactação nos atributos do solo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2006; CHAN *et al.*, 2006; TORMENA *et al.*, 2008; MATERECHERA, 2009). A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (TORMENA *et al.*, 2002; HAMZA; ANDERSON, 2005; MATERECHERA, 2009) e diminui o volume de poros (SOUZA *et al.*, 2006). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos, enquanto que os microporos são menos afetados (KLEIN; LIBARDI, 2002; STRECK *et al.*, 2004).

De acordo com Ball *et al.* (1997) e Alakukku *et al.* (2003), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Way *et al.* (1995) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de carregamentos. Wood *et al.* (1993) observaram redução de 50% da porosidade e permeabilidade do solo na profundidade de 0,20-0,40 m, devido ao tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira em relação a uma única passada. Em um estudo desenvolvido por Oliveira *et al.* (1995), avaliando o efeito do cultivo contínuo de cana-de-açúcar em atributos físicos de Latossolo Vermelho, observaram modificações na porosidade do solo promovidas pela compactação, o maior efeito foi na área de 16 anos de plantio, com manejo mecanizado intensivo.

Ainda com relação à porosidade do solo, a compactação além de diminuir o volume total de poros, interfere no tamanho, continuidade e nas classes de poros (HORN *et al.*, 1995; LIMA *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2006). Devido às operações de carga dinâmica sobre o solo, a distribuição, tamanho e continuidade de poros, são afetados negativamente, o que implica diminuições na permeabilidade ao ar e água (HORN *et al.*, 1995). O impacto da compactação no espaço poroso pode ser analisado com o estudo micromorfológico, que utiliza análise de imagens digitalizadas e, a partir destas, gera índices quantitativos quanto à forma e a complexidade dos poros (COOPER, 1999; SOUZA *et al.*, 2006).

Os poros do solo podem ser estruturais (empacotamento e fissuras), por apresentarem definição da unidade estrutural e não estruturais (cavidades, canais, câmaras e vesículas), ocorrendo dentro, entre ou através das unidades estruturais do solo (LIMA *et al.*, 2005). Os poros estruturais são considerados bons indicadores da compactação do solo em sistemas de manejo sob intenso tráfego de máquinas (RICHARD *et al.*, 2001). De acordo com Lima *et al.* (2005), o aumento na diversidade de classes de poros está diretamente relacionado com os processos de degradação do solo e que o estudo da ocorrência das classes de poros mostrou-se mais eficiente na identificação da compactação do solo em estádios iniciais que dados de densidade do solo. A avaliação da estrutura do solo utilizando análise de imagens de monólitos do solo é uma técnica útil na avaliação e no monitoramento de práticas agrícolas e da sustentabilidade do solo (LIMA *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2006).

A compactação do solo interfere na sua estrutura, diminuindo a estabilidade de agregados e modificando o arranjo das partículas (SILVA; MIELNICZUK, 1997). Sistemas que promovem revolvimento do solo e apresentam tráfego de máquinas pesadas, como na cultura da cana-de-açúcar, podem promover compactação do solo até 0,40 m de profundidade, resultando em alterações estruturais do solo (HAKANSSON; VOORHEES, 1997). Wendling *et al.* (2005), observaram redução nos índices de agregação do solo com a intensificação do uso. Contudo, Severiano *et al.* (2008) observaram aumento no diâmetro médio geométrico em Latossolo Vermelho-Amarelo em área cultivada com cana sob colheita mecanizada. Os autores comentaram que o tráfego de máquinas causou a compressão dos agregados, levando ao seu rompimento e à formação de uma estrutura maciça do solo, que dificulta o crescimento do sistema radicular. Dessa forma, outras variáveis devem ser consideradas no estudo da compactação do solo para evitar equívocos na análise dos resultados.

A diminuição da fertilidade por impedimento físico do solo ao desenvolvimento do sistema radicular também ocorre em solos compactados, devido ao menor volume explorado pelas raízes, à redução do armazenamento e do fornecimento de água e nutrientes, o que leva a exigência adicional de fertilizantes com custo de produção cada vez maior (HAMZA; ANDERSON, 2005). A compactação também ocasiona redução na absorção de nutrientes pelas plantas (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; DIAS JÚNIOR, 2000). Devido a essas alterações, o solo apresentará comportamento diferenciado na resistência ao crescimento das

raízes, nas trocas gasosas e na retenção e disponibilidade de água para as plantas (KAISER *et al.*, 2009).

Uma das medidas mais efetivas na prevenção da compactação do solo é a aplicação de pressões inferiores à sua capacidade de suporte de carga do solo (DEBIASI *et al.*, 2008). A capacidade de suporte de carga do solo é definida como a capacidade de uma estrutura de solo resistir a tensões induzidas pelo tráfego de campo sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas que constituem o solo (ALAKUKKU *et al.*, 2003), relacionando matematicamente a pressão de preconsolidação e conteúdo de água no solo.

A pressão de preconsolidação é um indicador da máxima carga à qual o solo foi submetido no passado (DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996) e pode ser obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona a densidade do solo ou o índice de vazios do solo com o logaritmo da pressão aplicada. A aplicação de pressões sobre o solo menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas e recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas e não recuperáveis, resultando na degradação da estrutura do solo (DIAS JÚNIOR, 2000). Solos com valores elevados de pressão de preconsolidação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes (LIMA *et al.*, 2006a), contudo apresentam menor chance de sofrer alteração na sua estrutura com o tráfego.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) também é uma variável do solo sensível aos efeitos da compactação, sendo sugerida como indicador de qualidade física do solo que influencia diretamente a produção das culturas (SILVA; KAY, 1996; TORMENA *et al.*, 1998; BLAINSKI *et al.*, 2008; KAISER *et al.*, 2009). O IHO do solo engloba informações sobre resistência do solo à penetração, disponibilidade de água e aeração do solo (SILVA *et al.*, 1994), indicando assim o conteúdo de água onde as limitações são mínimas ao desenvolvimento das culturas.

As condições de conteúdo de água do solo para o desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente crescimento das plantas ocorrem entre o limite superior e inferior do IHO. O solo apresenta condições limitantes quando o seu conteúdo de água fica acima ou abaixo dos limites do IHO e críticas ao crescimento das plantas quando a densidade do solo estiver acima da densidade onde o IHO é nulo (SILVA; KAY, 1996). Reduções na amplitude do IHO são ocasionadas pela degradação estrutural do solo (TORMENA *et al.*,

2007; SEVERIANO *et al.*, 2008), produzindo condições que limitam o desenvolvimento da cultura refletindo na produtividade (KAISER *et al.*, 2009).

Vários são os efeitos que a compactação do solo pode causar às plantas, como demora na emergência, tamanho reduzido da planta e dos grãos, coloração não característica das folhas, sistema radicular superficial e má formação das raízes (DIAS JÚNIOR, 2000; BENGOUGH *et al.*, 2006). As plantas necessitam de um sistema radicular para ancorá-las no solo e que forneça água e nutrientes em níveis adequados para o crescimento da parte aérea. O sistema radicular tende a crescer, preferencialmente, em solo solto, mas esta resposta depende do genótipo e o arranjo espacial do solo, considerando sua estrutura e grau de compactação (BENGOUGH *et al.*, 2006).

O aumento da compactação do solo tende a reduzir o desenvolvimento do sistema radicular. Gemtos *et al.* (2000) mostraram que a beterraba sacarina é sensível à compactação do solo, ocorrendo redução no desenvolvimento do sistema radicular e queda de produtividade com o aumento da compactação. Baquero *et al.* (2012) observaram redução no desenvolvimento radicular de cana-de-açúcar abaixo de 0,10 m causado por condições físicas do solo impeditivas, associadas com a compactação do solo. De acordo com Vasconcelos *et al.* (2003) a cana-de-açúcar apresenta 70% da massa seca de raízes até 0,40 m de profundidade, sendo a região mais impactado pelo tráfego das máquinas. É fundamental para o desenvolvimento de culturas agrícolas que o solo apresente condições favoráveis ao crescimento das raízes, o que as permite explorar um maior volume de solo e atingir uma maior profundidade, aumentando o acesso à água e reduzindo os riscos de deficiência hídrica (KAISER *et al.*, 2009), permitindo a cultura expressar seu maior potencial produtivo.

Considerando o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro, é importante quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar a sua compactação, bem como a identificação e a quantificação dos efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo, de tal forma que seja possível adaptar as atividades agrícolas, visando à sustentabilidade do setor.

2.3. Controle de tráfego agrícola

O uso de máquinas agrícolas é uma necessidade na agricultura moderna competitiva e tecnificada, já que representa a melhor opção para desenvolver atividades de campo que

compõe as etapas de produção, principalmente de culturas que atingem extensas áreas. Todavia, como consequência, ocorre uma intensificação do tráfego promovendo maior compactação do solo.

O atual conceito de agricultura empregando a mecanização agrícola baseia-se no uso de tratores com bitola menor que 2,0 m, geralmente entre 1,83 e 1,92 m (BRAUNACK *et al.*, 2006; BENEDINI; DONZELLI, 2007), com tráfego constante sobre o solo nas operações de preparo, plantio, tratos culturais e colheita. O resultado na cultura da cana-de-açúcar é que o tráfego passa muito próximo da linha de plantio, o que pode quebrar/derrubar os colmos, além disso, o tráfego pode ocorrer diretamente sobre a soqueira, resultando em degradação da qualidade física do solo, devido sua compactação, acarretando em perda de produtividade.

Dentro do contexto de sistemas economicamente viáveis, adequações nas máquinas agrícolas têm resultado no maior peso e potência, a fim de viabilizar a utilização de áreas maiores e a redução no tempo de trabalho. Contudo, a produtividade das culturas depende de um equilíbrio entre as condições do solo necessárias para o crescimento das culturas e as necessárias para as operações mecanizadas. As plantas necessitam de condições de solo relativamente solto, friável para o crescimento das raízes, com boa aeração e suprimento adequado de água, enquanto as operações mecanizadas requerem condições de solo compactado para a tração e para suportar as cargas impostas (TULLBERG *et al.*, 2007). Essas características têm sido obtidas com o uso do controle de tráfego agrícola (BRAUNACK *et al.*, 2006).

O controle de tráfego representa uma alternativa para o cultivo agrícola, já que separam zonas de tráfego de zonas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas permanentes, distinguindo fisicamente essas áreas, assim uma área menor é atingida, embora mais intensamente (BRAUNACK; McGARRY, 2006; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011). É uma prática recente que tem como objetivo uma resposta direta aos problemas da compactação do solo, preservando as condições de solo ideais para o crescimento das culturas na região do canteiro (VERMEULEN; MOSQUERA, 2009; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011).

Um componente fundamental para que se tenha sucesso com a adoção do controle de tráfego é o uso dos implementos com as mesmas larguras ou larguras múltiplas (LAGUË *et al.*, 2003). Portanto, deve-se tentar diminuir as áreas trafegadas pelo ajuste das bitolas de todas

as máquinas empregadas na produção da cultura. Em diversas culturas, como no caso da cana-de-açúcar, o ajuste da bitola das máquinas e equipamentos é viável e este fato já é realidade na agricultura brasileira (BENEDINI; DONZELLI, 2007).

O uso de espaçamentos coincidentes ou múltiplos entre todos os maquinários agrícolas melhora as condições de tráfego sob maior conteúdo de água no solo e aumenta a eficiência de tração devido às melhorias no deslocamento dos pneus (McPHEE *et al.*, 1995; VERMEULEN; MOSQUERA, 2009; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011). E este tipo de manejo é adequado para sistemas de produção com cultivo em linha (TREIN *et al.*, 2005). As zonas de tráfego podem permanecer no local por um ciclo da cultura ou ser mantido ao longo de vários ciclos, como ocorre na cultura da cana-de-açúcar na Austrália (BRAUNACK; McGARRY, 2006).

Outros benefícios obtidos com a adoção do controle de tráfego agrícola passam pela melhor interação máquina-solo que diminui a resistência do solo ao avanço do pneu durante o deslocamento do trator em solo mais compactado, resultando na menor demanda de combustível (LAGUË *et al.*, 2003). Além disso, ocorre redução no consumo de energia necessária no preparo do solo, uma vez que os órgãos ativos (sulcadores) trabalham em área não submetida ao tráfego (TAYLOR, 1994).

O controle de tráfego elimina a sobreposição da aplicação de sementes, fertilizantes e produtos químicos, reduzindo o custo e o impacto ambiental (KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011). Nas áreas não trafegadas, as condições do solo são ideais para o crescimento das plantas, já que não apresentam impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular, influenciando na produtividade da cultura e na qualidade do produto (TREIN *et al.*, 2005).

O controle de tráfego agrícola também proporciona melhorias aos atributos do solo, como densidade, porosidade, estrutura e capacidade de água disponível, infiltração de água no solo e atividade biológica (HAMZA; ANDERSON, 2005; McHUGH *et al.*, 2009; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011), minimizando o efeito da compactação do solo na linha da cultura. De acordo com McHugh *et al.* (2009), o controle de tráfego aumentou a capacidade de água disponível de 10,2 para 15,4 mm em 0,10 m de profundidade e reduziu a densidade do solo em 50% até 0,10 m e 27% até 0,30 m de profundidade. Isso facilita a enraizamento e aumenta a produtividade, enquanto diminui potencialmente o escoamento

superficial de partículas do solo, água nutrientes e produtos químicos agrícolas (HAMZA; ANDERSON, 2005; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011).

Controlar o tráfego de máquinas agrícolas pode promover um aumento significativo da produtividade das culturas (DICKSON; CAMPBELL, 1990; CHAMEN; AUDSLEY, 1997; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011). Vários anos de pesquisa de tráfego controlado na Holanda utilizando modificações nos tratores convencionais com um ajuste na bitola para 3,0 m mostraram aumentos de produtividade de até 10% em várias culturas (VERMEULEN; KLOOSTER, 1992). Isso ocorre porque o tráfego controlado melhora as condições do solo na linha de plantio comparado com tráfego aleatório, sendo que esses benefícios desenvolvem-se em longo prazo, não sendo evidente em curto prazo (BRAUNACK *et al.*, 2006).

Outros trabalhos reafirmam os ganhos de produtividade alcançados com a adoção do controle de tráfego em relação ao tráfego aleatório. Chamen *et al.* (1992) constataram aumentos de 4 a 14% nos rendimentos de beterraba, batata, cebola e azevém no sistema de controle de tráfego em comparação ao convencional. Braunack *et al.* (2006) estudando o efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, verificaram redução da compactação e aumento da produtividade da cultura em áreas com preparo direcionado. Vermeulen e Mosquera (2009) notaram aumento significativo na produtividade em 31%, 15% e 10% para ervilha verde, espinafre e cebola, respectivamente.

Uma redução da área trafegada é outra vantagem da aplicação do controle de tráfego. Trabalhos realizados na Austrália e Estados Unidos mostram que culturas implantadas em preparo convencional têm até 86% da área trafegada, em semeadura direta 46% é atingida, entretanto, usando o controle do tráfego, apenas 17% da área entra em contato com os pneus (LAGUË *et al.*, 2003). Esses resultados foram acompanhados por incrementos de 9 a 16% na produtividade.

A criação de tráfego controlado reduz a degradação do solo e as necessidades de energia de cultivo. É também mais produtivo e sua praticidade e viabilidade econômica tem sido claramente demonstrado na adoção pelo agricultor (TULLBERG *et al.*, 2007). De acordo com Kingwell e Fuchsbichler (2011) todos esses benefícios relacionados ao controle de tráfego agrícola permitem o aumento nos lucros de 50%, caracterizando uma inovação tecnológica rentável para os sistemas de produção.

Concentrar o movimento dos pneus em zonas de tráfego permanente é uma alternativa para reduzir as atividades que mobilizam a camada superficial do solo, reduzindo os custos operacionais com incremento no lucro. O sistema de manejo focado no controle de tráfego tem potencial de aplicação no cultivo da cana-de-açúcar colhida mecanicamente e que apresenta problemas com a compactação, ou ainda em área com a cultura recém instalada visando a preservação do solo contra a degradação física e estrutural, promovendo uma redução nos investimentos para descompactar o solo em anos futuros.

2.4. Piloto automático

Visando o aprimoramento das atividades relacionadas ao manejo, uma nova tecnologia desponta no cenário agrícola brasileiro conhecida como sistema automático de direcionamento, ou simplesmente piloto automático, onde o próprio sistema de direcionamento via satélite corrige a rota do veículo quando há necessidade, diminuindo o esforço do operador e aumentando a precisão da operação. Assim, a atenção do operador volta-se para as manobras e realização de atividades de campo (MOLIN; CARREIRA, 2006).

Aliviar os esforços do operador é uma necessidade atual, devido à evolução das máquinas agrícolas e maior número de atividades relacionadas com o ciclo das culturas. Os equipamentos agrícolas aumentaram nos últimos 50 anos de alguns metros chegando a ter 50 m e estão cada vez mais sofisticados, realizando múltiplas operações (WILSON, 2000).

O sistema automático de direcionamento utiliza a tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) que engloba satélites e receptores de sinais para determinação da localização geográfica (latitude, longitude e altitude) de um objeto. O sistema GNSS mais usado é GPS (*Global Positioning System*) desenvolvido pelos Estados Unidos. Com a exigência de maior precisão no posicionamento foi desenvolvido o RTK (*Real Time Kinematic*) que permite uma correção geográfica em tempo real. O direcionamento automático com RTK-GPS fornece uma pilotagem precisa do trator, principalmente em área plana (GANMOR *et al.*, 2007).

O funcionamento do piloto automático baseia-se na correção do alinhamento lateral do trator, permitindo o deslocamento do trator ao longo de um percurso reto ou curvo com mínimos erros. Inicialmente, o operador do trator precisa gerar uma passada de referência (linha A-B), automaticamente um *software* acoplado ao equipamento replicará infinitas linhas

virtuais em ambos os lados da linha de referência. A partir deste ponto o piloto automático corrige o posicionamento da máquina, quando preciso, mantendo sempre passadas paralelas a referência (MOLIN *et al.*, 2008), de acordo com o espaçamento da cultura pré-determinado.

Entre as diversas vantagens observadas com a aplicação do piloto automático destaca-se o aumento no tempo de trabalho da máquina por dia, velocidade de trabalho maior e mais constante, redução da sobreposição das passadas e a maior regularidade e uniformidade no espaçamento. Gan-Mor *et al.* (2007) observaram desvio lateral do eixo traseiro do trator durante os testes de campo de um sistema de piloto automático com RTK-GPS em solos planos de 2,21 cm na Geórgia, 2,09 cm na Califórnia e 2,35 cm em Israel. Campos *et al.* (2008) consideraram o espaçamento irregular das linhas a variável crítica de maior impacto no sistema produtivo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Sistemas com piloto automático são atualmente utilizados por empresas agrícolas para a orientação automática de tratores nas operações de culturas instaladas em linha (GAN-MOR *et al.*, 2007). O paralelismo entre as fileiras é importante para o manejo de culturas que ocupam extensas áreas, principalmente em relação a eficiência na aplicação de insumos, já que os implementos apresentam largura constante, evitando áreas com sobreposição e falhas (BAIO, 2005). Sobreposições das passadas do trator/implemento resultam em aumento dos custos operacionais e dos danos à cultura e ao ambiente, enquanto falhas promovem a redução da área plantada e da eficiência na distribuição correta do insumo e no controle fitossanitário.

Entre as principais desvantagens relacionadas ao desalinhamento das fileiras destaca-se a diminuição da eficiência de aplicação de fertilizantes, corretivos e do controle fitossanitário, bem como o tráfego sobre a linha de plantio, prejudicando a cultura devido à compactação do solo. Vermeulen e Mosquera (2009) relataram que o interesse no controle de tráfego agrícola na Holanda foi renovado quando a orientação precisa de máquinas tornou-se disponível com os sistemas de posicionamento global, visando minimizar o tráfego do rodado sobre a linha da cultura.

Por ser uma cultura semiperene, a qualidade do plantio da cana-de-açúcar é fundamental, pois erros durante a demarcação das fileiras e na manutenção do paralelismo entre as fileiras podem causar discrepância no espaçamento desejado, criando dificuldades no trato da cultura em todos os ciclos e cortes posteriores, mas acima de tudo, resultando no tráfego dos rodados das máquinas agrícolas sobre a soqueira (MOLIN *et al.*, 2008).

O espaçamento inadequado e a falta de paralelismo entre as fileiras em áreas com culturas dispostas em linhas são obtidos na operação de sulcação/plantio e geram dificuldades para todas as operações subsequentes, afetando as etapas seguintes do manejo, além de influenciar na produtividade, por causa da provável redução do número de metros de sulco por área plantada, menor qualidade nas práticas agrícolas e tráfego dos rodados sobre a linha de cultivo. As máquinas e implementos trabalham com espaçamento fixo, no caso das fileiras apresentarem desalinhamento fora dos limites de tolerância, as dificuldades nas operações são evidentes (CAMPOS *et al.*, 2008).

Diversos fatores influenciam na precisão do tráfego entre eles cita-se velocidade de deslocamento da máquina, declividade do terreno e rugosidade da superfície do terreno. Gan-Mor *et al.* (2007) constataram desvio laterais no posicionamento de 3,64 cm numa velocidade de 4,0 km h⁻¹, contudo o aumento da velocidade para 7,0 km h⁻¹ promoveu o aumento do desvio para 4,05 cm. Van Zuydam (1999) observou erro médio de posicionamento lateral de 2,0 cm com o trator deslocando-se a velocidade de 5,2 km h⁻¹, utilizando um sistema RTK-DGPS. Gan-Mor *et al.* (2007) observaram ainda que superfícies ásperas (cascahadas) produzem maiores desvios laterais no posicionamento em comparação as superfícies pavimentadas.

O estudo do direcionamento do tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático é uma alternativa viável, buscando o desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro, os quais poderão permitir redução da compactação e preservação da qualidade física do solo, bem como a identificação e a quantificação dos efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo. Em cultivos altamente tecnificados, como no caso da cana-de-açúcar, é fundamental o conhecimento destas ferramentas para implementação do manejo agrícola, o qual poderá contribuir na redução de custos no sistema de produção e ganhos de produtividade da cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi realizado em lavoura comercial de cana-de-açúcar pertencente à Usina São Martinho, localizada no Município de Pradópolis – SP (21°18'67" de latitude Sul e 48°11'38" de longitude Oeste, 630 m de altitude) (Figura 1).

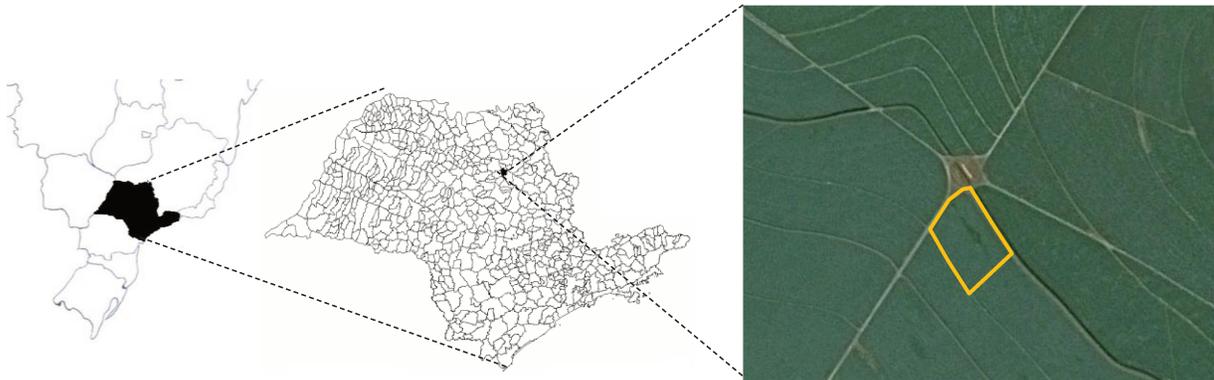


Figura 1. Área experimental localizada na Usina São Martinho, Pradópolis – SP.

O clima da região é o mesotérmico de inverno seco (Cwa), pelo critério de classificação de Köppen, com precipitação anual de 1.408 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a março (Figura 2).

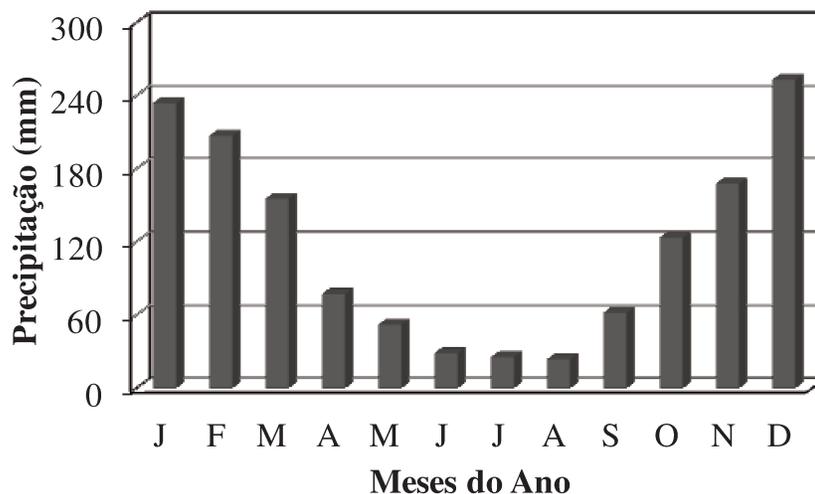


Figura 2. Precipitação média mensal do município de Pradópolis – SP. Série histórica mensal de 1966 a 2010 (Fonte: ANA, 2012).

O experimento foi conduzido em um talhão de 16,20 ha de topografia plana e predomínio do relevo suave ondulado (3 a 8%). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico álico (LVd), textura argilosa com horizonte A moderado (EMBRAPA, 2006). A caracterização química e granulométrica do solo é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1. Caracterização química⁽¹⁾ e granulométrica⁽²⁾ do Latossolo Vermelho das camadas 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	pH	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V	MO %	Argila g kg ⁻¹	Silte	Areia
0,00-0,10	5,4	163	12	64	30	42	106	149	72	5,4	534	310	154
0,10-0,20	4,8	45	8	24	14	47	46	93	49	3,8	555	298	146
0,20-0,30	4,9	71	9	32	18	52	59	111	53	3,6	581	288	129

⁽¹⁾Métodos de análise química (van Raij *et al.*, 2001); ⁽²⁾ Método da pipeta com baixa rotação (Camargo *et al.*, 1986).

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), variedade RB855453, foi instalada no dia 29 de agosto de 2007, apresentando em 2010 uma produtividade referente à terceira colheita (segunda soca). A área apresenta histórico de cultivo intensivo de cana por mais de 30 anos consecutivos, sendo os últimos 12 anos com colheita mecanizada e sem queima.

A variedade RB855453 foi lançada pela Universidade Federal de São Carlos que detém os direitos intelectuais. Apresenta como características morfológicas e agrônômicas: colmos eretos, de difícil tombamento, colmos medianamente empalhados, de diâmetro médio a grosso, com cor verde amarelado, mas levemente arroxeadada quando exposta ao sol, com elevada produtividade e teor de sacarose, alta exigência em ambientes de produção, brotação ótima, perfilhamento médio, bom fechamento, teor de fibra médio, época recomendada para colheita de maio a julho (HOFFMANN *et al.*, 2008).

O preparo da área, realizado no dia 15 de julho de 2007, foi composto inicialmente pela eliminação mecânica da soqueira da lavoura anteriormente instalada e subsolagem na profundidade de 0,45 m apenas nos sulcos de plantio. Foram aplicados 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico antes do revolvimento do solo com grade aradora e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro no plantio. Em julho de 2009 e 2010, após cada colheita, foram aplicados na área 280 e 260 kg ha⁻¹, respectivamente, do formulado 32-00-02 e 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça.

As operações mecanizadas foram realizadas com trator marca Case IH modelo Magnum MX-270, tração 4x4, potência máxima do motor de 270 cv (198 kW), massa de 11,7 Mg (4,7 Mg sobre o eixo dianteiro e 7 Mg sobre o traseiro) e pneus marca Trelleborg TM900, sendo os traseiros do tipo 650/85 R38 e os dianteiros o 600/70 R30, com pressão de inflação de 20 e 23 libras (110 e 150 kPa), respectivamente, para tracionar os implementos. A colheita foi realizada no dia 10 de junho de 2010, usando a colhedora de esteira marca Case IH modelo A-7700, bitola de 1,88 m, rodado tipo esteira, potência máxima do motor de 335 cv (246 kW) e massa de 18,5 Mg com esteiras de 2,96 x 0,46 m e trator Case MX-270, tracionando um transbordo de três compartimentos, massa total de 40 Mg e pneus Trelleborg Twin404 600/50 R22,5 com pressão de inflação de 20 libras (110 kPa).

3.2. Sistemas de manejo do canavial

Os sistemas de manejo instalados na lavoura comercial de cana-de-açúcar com colheita mecanizada e sem queima da palha foram:

- 1- Testemunha (T): ausência de controle de tráfego na lavoura com espaçamento de 1,5 m e bitola do trator e transbordo de 2,0 m (Figura 3A);
- 2- Controle de tráfego (CT1): espaçamento de 1,5 m e ajuste da bitola do trator e transbordos para 3,0 m (Figura 3B); e
- 3- Controle de tráfego (CT2): espaçamento de 1,5 m, ajuste da bitola do trator e transbordos para 3,0 m e uso de piloto automático no plantio e nas colheitas subsequentes (Figura 3B).

O ajuste da bitola do trator e transbordos interferiu na área diretamente em contato com os pneus agrícolas, devido à sobreposição do tráfego, apresentando o sistema de manejo sem controle de tráfego em 73% da área trafegada e os sistemas de manejo com controle de tráfego em 47%. Os três sistemas de manejo apresentaram uma área impactada pelas esteiras das colhedoras de 56%. A adoção do sistema de controle de tráfego resultou na adoção do conceito de “canteiro da cana”, dessa forma uma área de pelo menos 0,40 m de cada lado da linha da cultura não recebe tráfego dos pneus do conjunto trator-transbordo, sendo este concentrado no centro das entrelinhas da cultura.

O sistema de piloto automático apresenta sinal GPS com correção RTK (*real time kinematic*), sendo um sinal livre de tributação e que apresenta erro médio de 2,5 cm em

campo, de acordo com o fabricante. O RTK é um sinal corrigido por uma base que envia sinais através de ondas de rádio para a máquina. O piloto automático atua através de sensores instalados no sistema hidráulico da máquina, corrigindo seu posicionamento durante o percurso.



(A)



(B)

Figura 3. Ajuste da bitola do trator: (A) trator com bitola de 2,0 m e (B) trator com bitola de 3,0 m. (Adaptado: John Deere).

3.3. Análise dos atributos físicos do solo

3.3.1. Coleta das amostras de solo

Foram coletadas, após a colheita mecanizada da cana, amostras de solo deformadas e indeformadas na linha da cultura, na entrelinhas da cultura (linha do rodado) e na região do canteiro (região entre a linha da cultura e a linha do rodado) distante 0,30 m da linha da cultura e no centro das camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para determinação de atributos do solo (Figura 4). As amostras deformadas com estrutura preservada foram coletadas em recipientes plásticos, enquanto as indeformadas em cilindros volumétricos de 0,05 m de diâmetro por 0,05 m de altura.

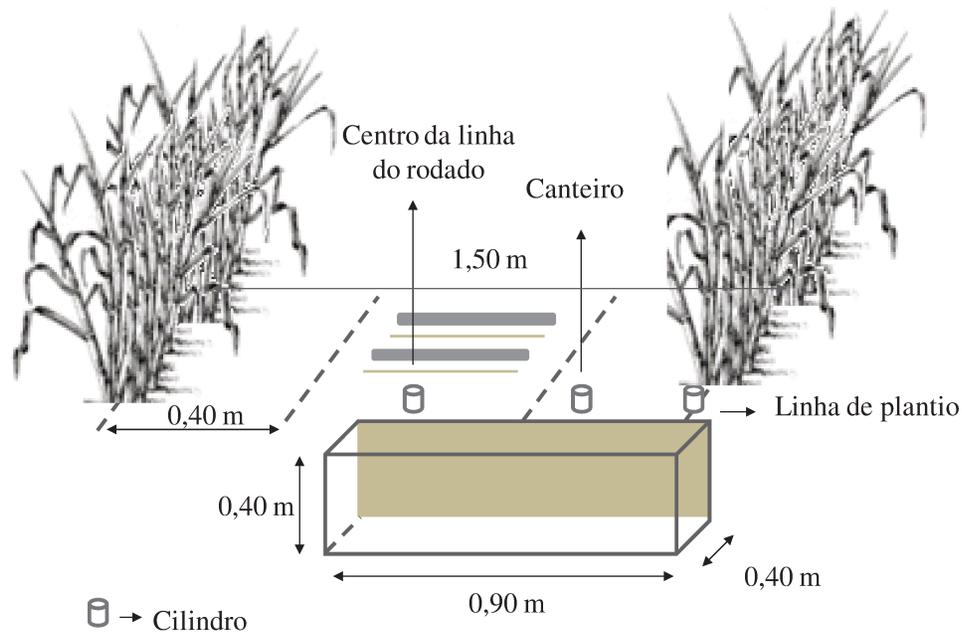


Figura 4. Locais de amostragem do solo e identificação das mini-trincheiras.

3.3.2. Caracterização física do solo

a) Densidade e porosidade do solo: amostras indeformadas foram coletadas para determinação da microporosidade em mesa de tensão e correspondeu ao conteúdo volumétrica de água da amostra submetida a uma tensão de 6,0 kPa após saturação (EMBRAPA, 1997). A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas mensurando a massa de água que ocupou todo espaço poroso e a massa de solo seco, respectivamente, ambos em relação ao volume do cilindro, enquanto a macroporosidade por diferença entre o conteúdo de água da amostra saturada (porosidade total) e na microporosidade (EMBRAPA, 1997).

b) Conteúdo de água do solo: o conteúdo de água foi obtido em laboratório pelo método gravimétrico, que relaciona a massa de água e a de solo seco de uma amostra deformada (EMBRAPA, 1997).

c) Resistência do solo à penetração: foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto⁻¹) em resistência à penetração foi obtida conforme Stolf (1991):

$$RP = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M + m} * \frac{Mg * h}{x} \right)}{A} * 0,098 \quad \text{Equação 1}$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração (MPa); M é a massa do êmbolo (4 kg); m é a massa do aparelho sem o êmbolo (3,2 kg); Mg e mg são os pesos de M e m (kgf), respectivamente; h é a altura de queda do êmbolo (0,4 m); x é a penetração do aparelho (cm impacto⁻¹); e A é a área do cone (1,29 cm²).

d) Estabilidade de agregados: amostras do solo contendo estrutura preservada foram coletadas para análise de agregados. A estabilidade de agregados foi medida pelo método de agitação via úmida (KEMPER; CHEPIL, 1965). Os agregados foram obtidos mediante manipulação com as mãos, aplicando força de tração, sendo usados os agregados com diâmetro entre 2,00 e 6,35 mm no peneiramento em água, usando um conjunto de peneiras de 2,00; 1,00; 0,50 e 0,125 mm de malha. Foi calculada a massa de agregados nas diferentes classes de peneira. Os índices de agregação usados foram o diâmetro médio ponderado, agregados estáveis e índice de estabilidade de agregados, obtidos pelas equações:

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{M_i * D_i}{M_T} \quad \text{Equação 2}$$

$$AGRI = \frac{M_{>2,00}}{M_T} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

$$IEA = \frac{M_T - M_{<0,125}}{M_T} \quad \text{Equação 4}$$

em que: M_i é a massa de agregados da classe i (g); D_i é o diâmetro médio da classe i (mm); M_T é a massa total de agregados descontado o conteúdo de água do solo (g); $M_{>2,00}$ é a massa de agregados maior que 2,00 mm e $M_{<0,125}$ é a massa de agregados menor que 0,125 mm. Não foi

descontada a areia nos cálculos do DMP, AGRI e IEA, uma vez que essas partículas participam dos agregados do solo (CASTRO FILHO *et al.*, 1998; WENDLING *et al.*, 2005).

e) Teor de carbono orgânico: amostras de terra fina seca ao ar (< 2,0 mm), obtidas da análise de estabilidade de agregados, foram trituradas em almofariz, passadas em peneira de malha de 0,2 mm. A oxidação da matéria orgânica do solo ocorreu com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico e aquecimento. Após o processo de digestão ácida, o dicromato foi determinado por titulação com sulfato ferroso amoniacal (WALKLEY; BLACK, 1934).

f) Curva de retenção de água no solo: a curva de retenção de água no solo, que considera o conteúdo volumétrico de água no solo em função das tensões aplicadas, foi obtida em câmaras de pressão de Richards com placas porosas (KLUTE, 1986). As amostras foram submetidas às tensões de 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), utilizando o *software* Soil Water Retention Curve (DOURADO-NETO *et al.*, 2001):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n]^m \quad \text{Equação 5}$$

em que: θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r é o conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s é o conteúdo de água na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ é o potencial matricial (kPa); α , m e n são os coeficientes do modelo.

3.3.3. Arranjo experimental e análise estatística

O experimento foi instalado no delineamento em blocos ao acaso ($n=4$), com arranjo em parcela subdividida [sistema de manejo ($n=3$), local de amostragem ($n=3$) e camada de solo ($n=3$)] para análise dos atributos do solo. Em cada parcela foram abertas 3 trincheiras, totalizando 324 amostras. Cada parcela foi composta de 14 linhas de cultivo de cana de 50 m de comprimento (Figura 5).

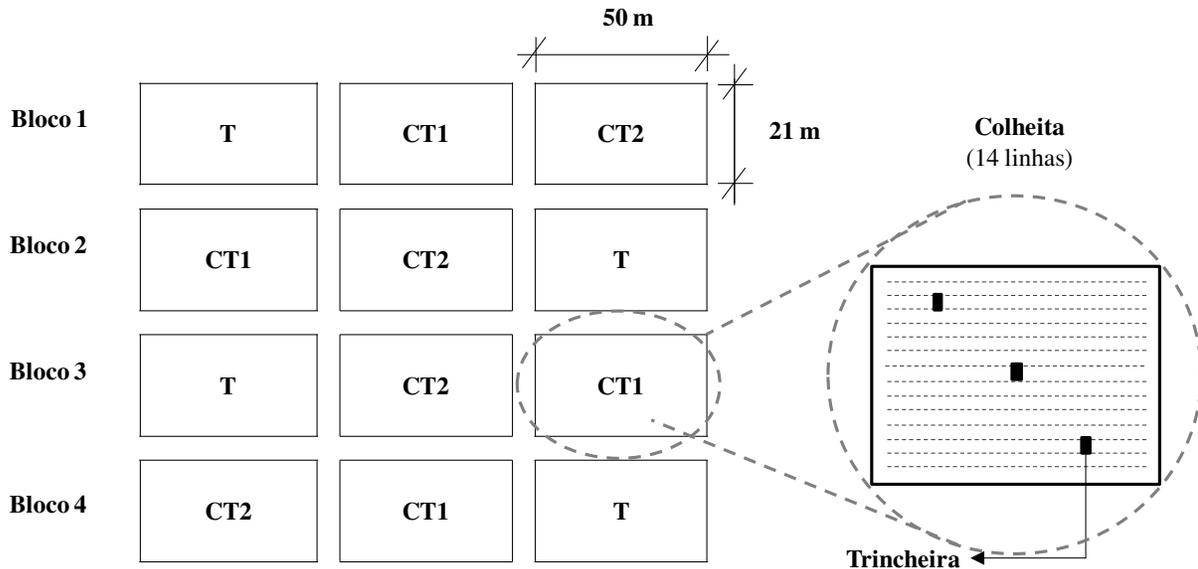


Figura 5. Croqui da área experimental com os sistemas de manejo testemunha (T), controle de tráfego com ajuste da bitola (CT1) e ajuste da bitola e piloto automático (CT2) para análise dos atributos do solo.

A análise estatística foi realizada no *software* SAS®, por meio da análise de variância ao nível de 5% de probabilidade e apresentando significância para as interações ou entre os níveis dos fatores isolados foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.4. Análise do intervalo hídrico ótimo do solo

3.4.1. Coleta das amostras de solo

Amostras indeformadas de solo foram coletadas em cilindros volumétricos de 0,05 m de diâmetro por 0,05 m de altura no centro das camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO).

3.4.2. Caracterização do intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador da qualidade física do solo que considera valores críticos de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (D_s), porosidade de aeração (PA) e conteúdo volumétrico de água do solo (θ).

No laboratório, as amostras foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 3/4 da altura dos anéis. Em seguida, foram submetidas a diferentes tensões 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, em

câmaras de Richards com placas porosas (SILVA *et al.*, 1994). Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração.

A resistência do solo à penetração foi realizada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade constante de 1,0 cm min⁻¹, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento. Para cada amostra foram obtidos 750 valores (250 pontos em 3 repetições por cilindro).

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constate. O conteúdo de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação entre a massa de solo seco e o volume do cilindro (EMBRAPA, 1997).

Os dados de resistência do solo à penetração foram ajustados em função da densidade do solo e do conteúdo volumétrica de água do solo, usando o modelo não linear utilizado por Busscher (1990) e Leão *et al.* (2006):

$$RP = a * D_S^b * \theta^c \quad \text{Equação 6}$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração (MPa); D_S é a densidade do solo (Mg m⁻³); θ é o conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³); e a, b e c são os coeficientes do modelo. Foi determinado o conteúdo de água no solo para cada densidade na qual se atingiu a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (SILVA *et al.*, 1994; CAMARGO; ALLEONI, 1997; LAPEN *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2011; OTTO *et al.*, 2011).

A curva de retenção de água no solo, que relacionou potencial matricial, conteúdo volumétrico de água e densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006):

$$\theta = \exp(a + b * D_S) * \psi^c \quad \text{Equação 7}$$

em que: θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ψ é o potencial matricial (kPa); D_S é a densidade do solo (Mg m^{-3}); e a , b , c são coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) na tensão de 10 kPa (HAISE *et al.*, 1955) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na tensão de 1.500 kPa (SAVAGE *et al.*, 1996), em função da densidade do solo.

A porosidade de aeração mínima foi de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerada o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (GRABLE; SIEMER, 1968; DEXTER, 1988). O conteúdo de água no solo considerando a porosidade de aeração (θ_{PA}) foi calculado pela equação:

$$\theta_{PA} = \left[1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad \text{Equação 8}$$

em que: θ_{PA} é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), considerando uma porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; D_P e D_S são a densidade de partículas (Mg m^{-3}) e do solo (Mg m^{-3}), respectivamente. A densidade de partícula foi medida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997), sendo de $2,80 \pm 0,08 \text{ Mg m}^{-3}$ ($n=5$).

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998). Os valores de resistência do solo a penetração, tensões de água do solo e densidade do solo foram linearizados, utilizando a transformação logarítmica. Os limites superiores do IHO foram θ_{CC} e/ou θ_{PA} , enquanto os limites inferiores foram θ_{PMP} e/ou θ_{RP} . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas (D_{SC}) foi considerada como o valor de densidade do solo em que o IHO foi igual à zero.

3.4.3. Análise estatística

Na amostragem dos dados do IHO foi usado o mesmo arranjo das parcelas em campo para análise dos atributos físicos do solo (Figura 5). O IHO foi determinado para a área, sendo os cilindros amostrados nos tratamentos em estudo (manejo x ponto de amostragem x camada de solo) em pontos aleatorizados, buscando obter uma variação da densidade do solo.

A quantificação do IHO foi feita em 162 cilindros volumétricos com estrutura preservada de solo (54 anéis x 3 sistemas de manejo). Foi utilizado um algoritmo

desenvolvido no *software* SAS®, ajustando modelos lineares aos dados. Foi realizada análise de variância pelo teste F para a regressão e os coeficientes foram analisados pelo teste t-Student, ambos ao nível de 5% de significância.

3.5. Avaliação da estrutura do solo por análise de imagens

3.5.1. Coleta das amostras de solo

Amostras indeformadas de solo foram coletadas nos 3 sistemas de manejo, nos 3 locais de amostragem e nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m para avaliação estrutural do solo. Os 18 monólitos de solo de estrutura preservada e orientados quanto a superfície, foram armazenados em caixas de papelão de dimensões de 0,06 x 0,07 x 0,12 m (LIMA *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2006b) e posteriormente transportados para o laboratório.

3.5.2. Quantificação de poros por análise de imagens

Para manter a estrutura e a porosidade funcional do solo as amostras passaram por um processo de desidratação lenta (MURPHY, 1986), sendo seca ao ar por um período de 10 dias e 4 dias em estufa a 35°C. A desidratação insuficiente das amostras pode resultar em falta de nitidez da imagens, já que a resina não é miscível com água (COOPER, 1999).

Em seguida, as amostras foram impregnadas por capilaridade com resina poliéster saturada, diluída com monômero de estireno e misturada com pigmento fluorescente que permite a distinção dos poros quando iluminados com luz ultravioleta (JONGERIUS; HEINTZBERGER, 1975; MURPHY, 1986). Após endurecimento do material foram iniciados o corte e o desbaste dos blocos (0,07 x 0,12 m).

Imagens 2-D foram adquiridas por meio de fotografias digitais dos blocos polidos utilizando uma câmera CCD com uma resolução espacial de 1024 x 768 pixels e espectral de 256 níveis de cinza e área por pixel de 156,25 μm^2 (12,5 x 12,5 μm), acoplada a um microscópio petrográfico com uma lente óptica com aumento de 10 vezes. As imagens foram binarizadas, permitindo a distinção de partículas sólidas e espaço poroso, no *software* Visilog-Noesis 5.4®.

A porosidade do solo foi calculada como a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total do campo, expressa em porcentagem. Os poros foram divididos em três grupos em função da sua forma: arredondados, alongados e complexos e três grupos quanto ao

tamanho: pequenos ($0,000156 - 0,0156 \text{ mm}^2$), médios ($0,0156 - 0,156 \text{ mm}^2$) e grandes ($>0,156 \text{ mm}^2$) (Tabela 2). Dois índices (I1 e I2) foram utilizados para determinar a forma dos poros (LIMA *et al.*, 2006b; PIRES *et al.*, 2008):

$$I_1 = \frac{P^2}{(4\pi A)} \quad \text{Equação 9}$$

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_I)_i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F)_j} \quad \text{Equação 10}$$

em que: P é o perímetro do poro, A é a área do poro, N_I é o número de interceptos de um objeto na direção i ($i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135°), D_F é o diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0^\circ$ e 90°), m e n são o número de i e j direções, respectivamente.

O I1 é igual a 1 para uma forma perfeitamente circular e é maior a medida que a forma desvia-se do círculo (Tabela 2) (COOPER, 1999; SOUZA *et al.*, 2006; LIMA *et al.*, 2006b). O I2 complementa o índice I1 para obter uma precisão mais alta na separação entre os grupos de forma.

Tabela 2. Critérios para distinção entre grupos de forma de poros.

Poros	Índices de forma	
	I ₁	I ₂
Arredondados	$I_1 \leq 5$	-
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$5 < I_1 \leq 25$ ou > 25	$> 2,2$

3.5.3. Experimentação e estatística

Na amostragem dos dados para avaliação estrutural do solo por meio de análise de imagens foi usado o mesmo arranjo das parcelas em campo para análise dos atributos físicos do solo (Figura 6). Foram coletadas 18 amostras (3 manejos, 3 locais de amostragem e 2 camada de solos). Em cada amostra (blocos polidos) foram realizadas 24 repetições, referente às microfotografias por bloco.

A análise estatística foi realizada no *software* SAS®, por meio da análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e apresentando significância para as interações ou entre os níveis dos fatores isolados foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

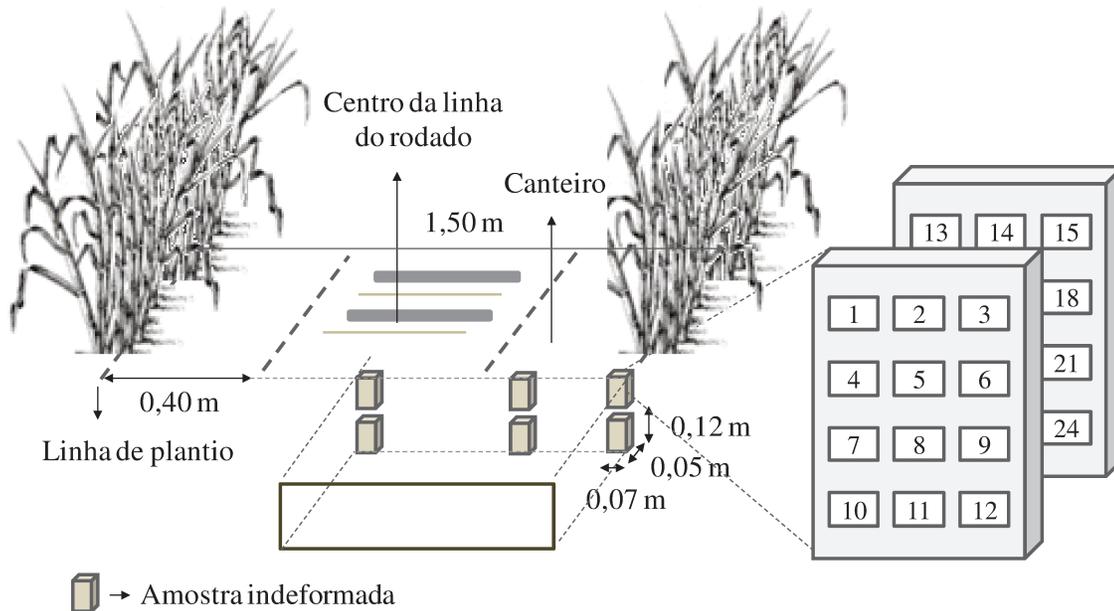


Figura 6. Pontos de amostragem das amostras indeformadas e representação do bloco polido com os locais imageados para determinação da porosidade do solo.

3.6. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo

3.6.1. Coleta das amostras de solo

Foram coletadas amostras indeformadas de solo nos tratamentos em estudo em cilindros volumétricos de 0,0635 m de diâmetro por 0,0254 m de altura no centro das camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m para determinação de atributos relacionados à compressibilidade do solo.

Amostras deformadas foram usadas na caracterização da consistência do solo, definida pelos limites de contração (BOWLES, 1986), plasticidade e liquidez (SOWERS, 1965). Esses limites definem as faixas de consistência do solo (Tabela 3).

Tabela 3. Limites de consistência determinados na camada superficial (0,00-0,10 m) do Latossolo Vermelho: limites de contração (LC), liquidez (LL) e plasticidade (LP)

Limites (kg kg ⁻¹)	LC	LP	LL
	0,20	0,34	0,42
Faixas de Consistência	Tenacidade	Friabilidade	Plasticidade
	< 0,20	0,20 – 0,34	0,34 – 0,42

(n = 4 repetições).

3.6.2. Caracterização da análise da capacidade de suporte do solo

A capacidade de suporte de carga do solo representou uma função que relacionou a pressão de preconsolidação do solo com o conteúdo de água no solo. As amostras de estrutura preservada foram saturadas e/ou secas ao ar no laboratório para obter amostras com conteúdo de água variando de solo seco a saturado, simulando condições do solo no campo (DIAS JÚNIOR, 1994; SILVA *et al.*, 2009).

A pressão de preconsolidação foi quantificada por meio do ensaio de compressão uniaxial, aplicando cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa nas amostras indeformadas (DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995). Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima para, em seguida, aumentar a pressão (TAYLOR, 1971). Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em consolidômetro automático com interação homem-máquina modelo CNTA-IHM/BR-001/07 acoplado ao *software* Linker® (SILVA *et al.*, 2007). As medidas de deformação da amostra para cada pressão aplicada durante o ensaio foram realizadas por meio de um transdutor de deslocamento vertical e registradas por meio de um sensor com aquisição automatizada de dados (SILVA *et al.*, 2007).

Após o ensaio de compressão, as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constatare para determinação da densidade do solo (EMBRAPA, 1997). A partir da curva de compressão (densidade do solo x pressão), foi estimada a pressão de preconsolidação, observando a sugestão dos métodos M1 e M3, conforme Dias Júnior (1994) e Dias Júnior e Pierce (1995). Curvas de compressão do solo foram obtidas para as amostras em diferentes conteúdos de água no solo, permitindo construir o modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo proposto por Dias Júnior (1994):

$$\sigma_p = 10^{(a+b*U)} \quad \text{Equação 11}$$

em que: σ_p é a pressão preconsolidação do solo (kPa), a e b são coeficientes da equação e U é o conteúdo de água no solo (kg kg^{-1}).

3.6.3. Análise estatística

A capacidade de suporte de carga do solo foi determinada nos 3 manejos, 2 locais de amostragem (linhas do rodado e de plantio) e 2 camadas de solo (0,00-0,10 e 0,20-0,30 m). Foram amostrados 20 cilindros para caracterizar o modelo de capacidade de suporte de carga do solo para cada tratamento, totalizando 240 amostras. As equações ajustadas para cada tratamento foram linearizadas e comparadas de acordo com o procedimento de Snedecor e Cochran (1989).

3.7. Análise de atributos da cana-de-açúcar

3.7.1. Produtividade e rendimento de açúcar

A cana foi colhida mecanicamente e sem queima no dia 10 de junho de 2010, por meio de uma colhedora autopropelida e os colmos foram picados e depositados num transbordo tracionado por um trator que acompanha paralelamente o tráfego da colhedora na linha anteriormente colhida.

O transbordo foi pesado vazio e logo após a colheita para determinação da massa de colmos de cana-de-açúcar colhidos em cada uma das 12 parcelas, utilizando balança específica para pesagem de trator e transbordo (ver item ANEXOS). A produtividade da cana foi obtida pela relação entre a massa colhida e a área de cada parcela. O rendimento de açúcar foi obtido pela multiplicação da produtividade pelo açúcar total recuperável, medido junto com as variáveis tecnológicas (ver item seguinte).

3.7.2. Qualidade do caldo – Variáveis tecnológicas

No momento da colheita, foram coletados dez colmos de cana em sequência na linha central de cada parcela, desconsiderando três metros no início e no final da linha, para determinação das variáveis tecnológicas, segundo métodos da CONSECANA (2006). Após a amostragem, foram retiradas as folhas verdes e secas e realizado o desponde da gema apical.

As amostras de cana foram preparadas em aparelhos desintegradores, formando um material homogêneo e preservando as características originais. Uma amostra de 500 g foi usada na determinação das variáveis tecnológicas. O caldo para análise foi extraído em prensa hidráulica, com pressão constante de 250 kgf cm⁻² durante 1 minuto.

A determinação do brix (sólidos solúveis totais) foi realizada em refratômetro digital, de leitura automática, com correção automática de temperatura, resolução máxima de 0,1° brix. O valor final foi corrigido para a temperatura de 20° C.

A sacarose aparente do caldo foi determinada em sacarímetro digital automático, com massa normal igual a 26 g, resolução de 0,01°Z (um centésimo de grau de açúcar) e aferido à 20° C, provido de tubo polarimétrico de fluxo contínuo, após clarificação do caldo com mistura clarificante à base de alumínio (0,06 g mL⁻¹). O teor de sacarose aparente do caldo foi calculado pela equação:

$$S = (1,00621 * LAI + 0,05117) * (0,2605 - 0,0009882 * B) \quad \text{Equação 12}$$

em que: S é o teor de sacarose aparente do caldo (%), LAI é a leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio; B é o brix do caldo (°brix).

A pureza aparente do caldo, fibra da cana, sacarose aparente da cana e o açúcar total recuperável foram calculados a partir das equações:

$$Q = \frac{100 * S}{B} \quad \text{Equação 13}$$

$$F = 0,08 * PBU + 0,876 \quad \text{Equação 14}$$

$$PC = S * (1 - 0,01 * F) * (1,0313 - 0,00575 * F) \quad \text{Equação 15}$$

$$ARC = (3,641 - 0,0343 * Q) * (1 - 0,01 * F) * (1,0313 - 0,00575 * F) \quad \text{Equação 16}$$

$$ATR = 9,5263 * PC + 9,05 * ARC \quad \text{Equação 17}$$

em que: Q é a pureza aparente do caldo (%); S é o teor de sacarose aparente do caldo (%); F é fibra da cana (g); PBU é o peso do bagaço úmido da prensa (g); PC é o teor de sacarose aparente da cana (%), ARC é o teor de açúcar redutores da cana (%) e ATR é o teor de açúcar total recuperável da cana (kg Mg^{-1}).

3.7.3. Sistema radicular

Após a colheita, foram retiradas amostras nas parcelas (sistemas de manejo) para análise do sistema radicular. Na amostragem foi usado o método do monólito (BÖHM, 1976; VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI; TRIVELIN, 2006, OTTO *et al.*, 2009) sendo as dimensões de 0,25 x 0,10 x 0,10 m para a largura, altura e comprimento, respectivamente, resultando num volume de amostra de $0,0025 \text{ m}^3$ (Figura 7).

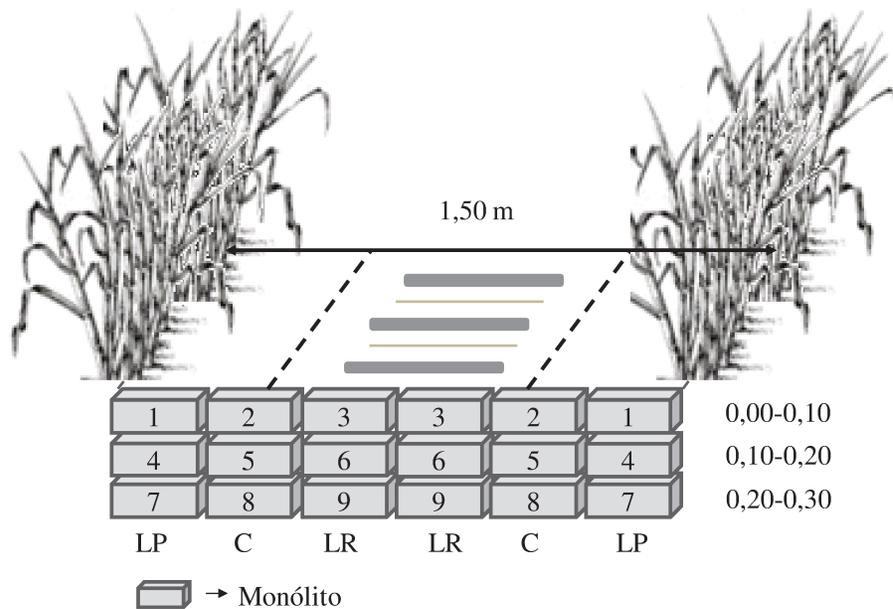


Figura 7. Ponto de amostragem dos monólitos para análise do sistema radicular nas trincheiras.

As dimensões dos monólitos foram definidas com base no espaçamento da cultura, camada de amostragem e sistema de manejo adotado (FARONI; TRIVELIN, 2006). Os monólitos foram coletados na parede das trincheiras, perpendicular a linha da cultura, na linha de plantio, na entrelinha da cultura (linha do rodado) e na região do canteiro, nas camadas de

0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, obedecendo ao mesmo sistema de amostragem dos atributos do solo.

As raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando peneira de abertura de malha de 2,0 mm (VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI; TRIVELIN, 2006). As imagens das raízes foram digitalizadas em um scanner de leitura ótica com resolução de 400 dpi para análise da densidade, superfície, volume e diâmetro radicular pelo *software* SAFIRA®. As raízes foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C até massa constante (BEUTLER; CENTURION, 2004; FARONI; TRIVELIN, 2006; FREDDI *et al.*, 2007) para determinação da matéria seca.

3.7.4. Análise estatística

O delineamento em blocos casualizados (n=4) foi utilizado para análise da produtividade da cana e das variáveis tecnológicas associadas à qualidade do caldo, adotando como tratamentos as parcelas usadas na coleta dos atributos físicos do solo, a fim de comparar os sistemas de manejo (n=3).

Para análise do sistema radicular foi usado o mesmo delineamento em blocos casualizados (n=4), com arranjo de parcelas subdivididas, sendo as parcelas os tipos de manejo (n=3), as subparcelas os locais de amostragem (n=3) e as subsubparcelas as camadas de amostragem (n=3), com 2 subamostras por trincheira, totalizando em 216 amostras.

A análise estatística foi realizada no *software* SAS®, por meio da análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e apresentando significância para as interações ou entre os níveis dos fatores isolados, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos Físicos do Solo

A análise de variância não foi significativa para os atributos do solo ao nível de 5% de probabilidade para as interações triplas (manejo x local de amostragem x camada de solo), porém as interações duplas apresentaram significância (manejo x local de amostragem, manejo x camada de solo e/ou local de amostragem x camada de solo). Quando as interações duplas não apresentaram significância no teste F, os fatores foram analisados isoladamente.

A densidade do solo não diferiu significativamente entre os sistemas de manejo na linha do rodado e na região do canteiro, contudo o manejo CT2 apresentou menor valor de densidade na linha da planta (Tabela 4) em relação à testemunha. Isso ocorreu devido ausência do tráfego de pneus do conjunto trator-transbordo sobre ou próximo à linha da soqueira no manejo com controle de tráfego, devido ao ajuste da bitola e uso do piloto automático. Estes resultados estão de acordo com Qingjie *et al.* (2009), que indicaram que o sistema de manejo com controle de tráfego agrícola foi eficiente na melhoria das condições físicas do solo na China. McHugh *et al.* (2009) também observaram melhoria da densidade do solo na linha de cultivo com 22 meses de implantação do sistema de controle de tráfego agrícola após 30 anos de cultivo convencional.

A densidade do solo variou de 1,10 a 1,17 Mg m⁻³ na linha de plantio e de 1,30 a 1,35 Mg m⁻³ na linha do rodado. Esses valores de densidade concordaram com Neves *et al.* (2003), que observaram densidade do solo de 1,42 Mg m⁻³ em áreas compactadas e 1,18 Mg m⁻³ em áreas não compactadas em um Latossolos Vermelhos distroféricos com teores de argila de aproximadamente 700 g kg⁻¹. Maiores valores de densidade ocorreram na linha do rodado devido a elevada carga por eixo presente nas máquinas, variando de 5,8 a 7,0 Mg, dependendo da máquina e da carga transportada pelo transbordo. Esse resultado concordaram com Alakukku e Elonen (1994), que observaram, em um solo com 48% de argila com mais de 16 Mg de carga por eixo, que a compactação atingiu 0,60 m de profundidade. Hammel (1994) também observaram compactação do subsolo, com densidade de 1,67 Mg m⁻³ no solo a 0,75 m de profundidade em um solo argiloso devido o tráfego com máquinas com carga por eixo superior de 10 Mg.

Tabela 4. Densidade e porosidade do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).

Sistema de Manejo	Local de Amostragem			Camada de Solo			Média
	LR	C	LP	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Densidade do Solo (Mg m^{-3})							
CT2	1,35 Aa	1,23 Ab	1,10 Bc	1,24	1,21	1,22	1,23 A
CT1	1,32 Aa	1,27 Aa	1,16 Ab	1,27	1,25	1,23	1,24 A
T	1,30 Aa	1,29 Aa	1,17 Ab	1,26	1,25	1,26	1,25 A
Média	1,32	1,26	1,14	1,26 a	1,24 a	1,24 a	
CV (%)	2,41						
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
CT2	0,520 Bc	0,557 Ab	0,584 Aa	0,548	0,557	0,557	0,554 A
CT1	0,547 Ab	0,549 Ab	0,576 Aa	0,556	0,558	0,558	0,557 A
T	0,540 Aa	0,542 Aa	0,556 Ba	0,539	0,553	0,546	0,546 A
Média	0,535	0,550	0,572	0,548 a	0,556 a	0,554 a	
CV (%)	2,92						
Macroporosidade do Solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
CT2	0,167 Ab	0,176 Ab	0,196 Aa	0,177	0,185	0,177	0,179 A
CT1	0,180 Ab	0,193 Aab	0,206 Aa	0,191	0,192	0,196	0,193 A
T	0,184 Aa	0,178 Aa	0,174 Ba	0,173	0,183	0,181	0,179 A
Média	0,177	0,182	0,193	0,180 a	0,186 a	0,184 a	
CV (%)	8,79						
Microporosidade do Solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)							
CT2	0,355 Ab	0,387 Aa	0,401 Aa	0,397	0,377	0,368	0,381 A
CT1	0,352 Aa	0,357 Aa	0,367 Aa	0,362	0,363	0,352	0,359 A
T	0,357 Ab	0,361 Ab	0,398 Aa	0,388	0,368	0,360	0,372 A
Média	0,355	0,369	0,389	0,383 a	0,370 b	0,360 b	
CV (%)	5,58						

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

No manejo CT2 verificou-se alteração na densidade do solo em função do local de amostragem, cuja sequência de impacto para este atributo foi LR>C>LP, resultando num aumento de 23% na linha do rodado em relação à linha de plantio (Tabela 4). Tal comportamento não foi verificado para os sistemas de manejo CT1 e T, ou seja, os valores não diferem significativamente entre a linha do rodado e a região do canteiro, indicando efeito do tráfego dos pneus do conjunto trator-transbordo próximo a soqueira da cultura. O uso de piloto automático provavelmente reduziu erros no paralelismo das passadas das máquinas agrícolas, evitando o tráfego dos rodados sobre a soqueira, possibilitando melhorias à qualidade física do solo na região da soqueira em relação aos sistemas de manejo sem o uso do piloto automático.

Os sistemas de manejo diferiram para a porosidade total e macroporosidade com maiores valores na linha da planta nos manejos com controle de tráfego (CT2 e CT1), ocorrendo o inverso para a porosidade total na linha do rodado (Tabela 4). O tráfego controlado reduz a compactação e preserva a qualidade física do solo na linha da planta comparado com o manejo sem controle de tráfego (BRAUNACK; McGARRY, 2006; TULLBERG *et al.*, 2007). McHugh *et al.* (2009) observaram aumento na macroporosidade e porosidade de aeração na linha de cultivo com a implantação do sistema de controle de tráfego agrícola em substituição ao manejo sem controle de tráfego. Nas áreas não trafegadas, as condições do solo são ideais para o crescimento da cana, já que não apresentam impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular, influenciando positivamente na produtividade da cultura (ver item 4.5) e longevidade do canalial (BRAUNACK; McGARRY, 2006; MATERECHERA, 2009).

A porosidade total apresentou média 0,535 e 0,572 m³ m⁻³ nas linhas do rodado e de plantio, respectivamente. Esse resultados concondaram com Neves *et al.* (2003), que observaram porosidade total de 0,48 m³ m⁻³ em áreas compactadas e 0,60 m³ m⁻³ em áreas não compactadas em um Latossolos Vermelhos distroféricos com aproximadamente 70% de argila. Otto *et al.* (2011) observaram valores de porosidade total de 0,39 e 0,49 m³ m⁻³ nas linhas do rodado e de plantio em um Latossolo Vermelho com aproximadamente 300 g kg⁻¹ de argila.

A porosidade total e macroporosidade do solo aumentaram no sentido LR<C<LP para os sistemas de manejo com controle de tráfego (CT1 e CT2), fato que não ocorreu para o manejo sem controle de tráfego (Tabela 4). Isso evidencia o efeito do controle de tráfego

agrícola no solo, concentrando o tráfego em linhas permanentes, reduzindo a área impactada e preservando as condições favoráveis para o desenvolvimento de raízes na linha da planta. Resultados similares também foram observados por Laguë *et al.* (2003) e Braunack e McGarry (2006).

A macroporosidade do solo foi superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em todos os sistemas de manejo, locais de amostragem e camada de solo em estudo (Tabela 4), considerado aquele o valor mínimo de macroporos para prover as trocas gasosas necessárias ao desenvolvimento do sistema radicular. Estes resultados indicaram uma provável ausência de limitações ao arejamento do solo, mesmo nas épocas de maior precipitação (COLLARES *et al.*, 2008).

A microporosidade não apresentou diferença entre os sistemas de manejo para os distintos locais de amostragem (Tabela 4). Streck *et al.* (2004) também observaram redução da porosidade total e da macroporosidade do solo, devido o aumento na intensidade de tráfego, no entanto o microporos permaneceram praticamente inalterados, indicando que a compactação não exerce influência estatisticamente significativa sobre a microporosidade do solo.

Não ocorreu diferença para a densidade, porosidade total e macroporosidade do solo nas camadas de solo estudadas, com exceção para a microporosidade (Tabela 4). Os resultados indicaram que o tráfego agrícola relacionado ao sistema de produção da cana-de-açúcar com colheita mecanizada teve efeito sobre a qualidade física do solo até 0,30 m de profundidade. Isso é resultado do tráfego de máquinas agrícolas, com efeito acumulativo ao longo do tempo, o que resultou nessas alterações em profundidade. Esses resultados concordaram com Otto *et al.* (2011), que observaram redução na porosidade total do solo até 0,40 m de profundidade. Braunack e McGarry (2006) e Braunack *et al.* (2006) também observaram alterações no solo causado pelo tráfego de máquinas em canaviais até 0,30 m de profundidade. Alakukku e Elonen (1994) comentaram que o tráfego de trator com uma carga por eixo de 3 Mg já é suficiente para causar compactação até 0,25 m profundidade.

A resistência do solo à penetração não apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo nos distintos locais de amostragem (Tabela 5). Contudo, a resistência do solo à penetração apresentou decréscimo no sentido LR>C>LP para o manejo CT2, fato que não ocorreu para CT1 e T, que apresentaram valores similares na linha do rodado e na região do canteiro, os quais diferem da linha de plantio. Estes resultados indicam o efeito do ajuste da

bitola do conjunto trator-transbordo e uso do piloto automático sobre a qualidade física do solo. Os resultados obtidos em CT2 demonstraram a importância de se prevenir o tráfego dos pneus sobre o canteiro, uma vez que a compactação do solo pode se desenvolver lateralmente em subsuperfície em direção à soqueira, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular, como destacaram Braunack *et al.* (2006). A compactação em subsuperfície é considerada um problema grave, porque os processos de melhoria natural da estrutura do solo ocorrem mais lentamente em profundidade e a retificação mecânica com máquinas agrícolas torna-se mais oneroso (TULLBERG *et al.*, 2007) e nem sempre eficiente.

Tabela 5. Resistência do solo à penetração e conteúdo de água do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).

Sistema de Manejo	Local de Amostragem			Camada de Solo			Média
	LR	C	LP	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Resistência do Solo à Penetração (MPa)							
CT2	8,31 Aa	4,75 Ab	1,69 Ac	5,34	5,09	4,32	4,92 A
CT1	7,19 Aa	5,11 Aa	1,62 Ab	5,12	4,88	3,91	4,64 A
T	6,49 Aa	7,01 Aa	2,54 Ab	6,25	5,32	4,47	5,34 A
Média	7,33	5,62	1,95	5,57 a	5,10 b	4,24 c	
CV (%)	16,42						
Conteúdo de Água do Solo (kg kg⁻¹)							
CT2	0,168	0,162	0,177	0,162	0,168	0,177	0,169 A
CT1	0,165	0,177	0,187	0,169	0,185	0,174	0,176 A
T	0,182	0,180	0,184	0,174	0,177	0,194	0,182 A
Média	0,172 a	0,173 a	0,183 a	0,168 a	0,177 a	0,182 a	
CV (%)	12,05						

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

O maior valor de resistência do solo à penetração na linha do rodado no sistema de controle de tráfego com uso do piloto automático (CT2) está relacionado com o deslocamento dos pneus numa mesma região – linhas permanentes de tráfego (Tabela 5). Otto *et al.* (2011) também observaram maior resistência do solo a penetração na entrelinha da cana (linha do

rodado), com valores superiores a 1,9 MPa na tensão de água no solo de 10 kPa. Esse resultado está de acordo com a maior densidade do solo e a menor porosidade total e macroporosidade na linha do rodado em CT2 (Tabela 4). Essa maior resistência foi resultado da distribuição de tensão no solo em função do histórico de tráfego ocorrido durante os três ciclos de cultivo da cana com controle de tráfego. Contudo, deve ser ressaltado que a maior compactação do solo na linha do rodado aumenta a trafegabilidade e a eficiência de tração (LAGUË *et al.*, 2003; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011). Este cenário favorece a entrada de máquinas sob condições mais úmidas, ampliando as opções de colheita e tratos culturais em períodos prolongados de chuva.

Na linha da soqueira os valores de resistência do solo à penetração variaram de 1,69 a 2,54 MPa (Tabela 5). Valores similares foram observados por Souza *et al.* (2006) e Roque *et al.* (2010) em solos cultivados com cana-de-açúcar. Valor de resistência do solo à penetração, considerado impeditivo ao crescimento radicular (OTTO *et al.*, 2011), ocorreu na linha da planta apenas no manejo sem controle de tráfego, indicando a degradação física do solo. Considerando a tendência de preparo reduzido na implantação do canavial, a menor resistência do solo à penetração na linha da soqueira poderá reduzir o consumo de energia e o desgaste de implementos e aumentar a eficiência das máquinas agrícolas no preparo do solo, uma vez que os órgãos ativos (sulcadores) trabalharão em área não submetida ao tráfego.

Os sistemas de manejo não diferiram significativamente para o conteúdo de água do solo (Tabela 5). Há uma relação inversa entre o conteúdo de água do solo e a resistência do solo à penetração, de modo que o aumento do conteúdo de água do solo diminui a resistência do solo à penetração e vice-versa (LIMA *et al.*, 2006a). Dessa forma, com a uniformidade horizontal e vertical do conteúdo de água do solo, o efeito apresentado sobre a resistência do solo à penetração está associado às diferenças provocadas pelos sistemas de manejo. O conteúdo de água não só pode governar a condição física do solo, mas também pode afetar processos químicos e condições biológicas, tais como absorção de nutrientes pelas plantas e atividade dos organismos do solo.

Os maiores valores de resistência do solo à penetração foram observados na camada superficial, reduzindo em subsuperfície nos três sistemas de manejo estudados (Tabela 5). No cultivo da cana-de-açúcar o revolvimento do solo ocorre na reforma da lavoura, em geral a cada 5 anos, eliminando camadas impeditivas em subsuperfície ao desenvolvimento do

sistema radicular, dessa forma o efeito do tráfego intenso, é acumulado principalmente na superfície (CAVALIERI *et al.*, 2011). Vale salientar que no manejo com controle de tráfego, o solo continua sendo compactado, porém concentrado nas entrelinhas da soqueira (linha do rodado), onde desenvolvimento do sistema radicular é reduzido (ver item 4.5.3), podendo aumentar a longevidade do canavial. Isto pode atenuar os efeitos da compactação sobre a longevidade dos canaviais.

O diâmetro médio ponderado, agregados estáveis e índice de estabilidade de agregados não diferiram entre os sistemas de manejo (Tabela 6). Esses resultados concordaram com Roque *et al.* (2010). No entanto, em estudo similar, Braunack e McGarry (2006) encontraram diferenças na estabilidade de agregados do solo na região do canteiro da cana-de-açúcar com diferentes preparos do solo. O tráfego de máquinas agrícolas pode causar a compressão dos agregados do solo, levando ao seu rompimento e à formação de uma estrutura maciça de solo. Porém, o processo de tamisamento via úmido, utilizado neste trabalho, pode não distinguir os agregados estáveis de estruturas maciças de solo, o que pode explicar a ausência de diferença significativa entre os resultados obtidos para os respectivos sistemas de manejo, a exemplo do observado por Severiano *et al.* (2008). Assim, os índices de agregação do solo mostraram-se menos sensíveis as alterações dos sistemas de manejo, quando comparados à densidade e porosidade do solo.

Os sistemas de manejo em estudo apresentaram em geral maior agregação na linha da planta em relação à região do canteiro e a linha do rodado, o que pode ser explicado pelos maiores valores de teor de carbono orgânico (Tabela 6) e pelo maior desenvolvimento do sistema radicular (ver item 4.5.3). Os resultados indicaram a preservação da qualidade estrutural na linha de plantio, o que é benéfico para o crescimento das raízes da cultura.

O maior teor de carbono orgânico na soqueira está relacionado ao maior desenvolvimento do sistema radicular e aplicação de torta de filtro de forma localizada apenas no plantio. Esses resultados concordaram com os maiores índices de agregação na linha de plantio, uma vez que a matéria orgânica é um dos principais agentes cimentantes, responsável pela formação e estabilização dos agregados (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). O sistema radicular da cana-de-açúcar também contribui para a agregação do solo, mediante a ação mecânica das raízes e excreção de substâncias com ação cimentante (WENDLING *et al.*, 2005; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Tabela 6. Estabilidade de agregados do Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T)

Sistema de Manejo	Local de Amostragem			Camadas de Solo			Média
	LR	C	LP	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Diâmetro Médio Ponderado (mm)							
CT2	2,53	2,60	2,95	3,07	2,67	2,34	2,69 A
CT1	2,62	2,72	3,12	3,01	2,95	2,51	2,82 A
T	2,32	2,56	3,07	3,07	2,68	2,21	2,65 A
Média	2,49 b	2,63 b	3,05 a	3,05 a	2,77 b	2,35 c	
CV (%)	9,48						
Agregados Estáveis (%)							
CT2	51,07	52,95	62,83	66,50 Aa	54,81 Ab	45,53 Ab	55,61
CT1	53,34	56,15	68,12	64,66 Aa	62,83 Aa	50,12 Ab	59,20
T	44,84	51,57	66,61	66,40 Aa	55,09 Ab	41,54 Ac	54,34
Média	49,75 b	53,56 b	65,85 a	65,85	57,58	45,73	
CV (%)	13,41						
Índice de Estabilidade dos Agregados (%)							
CT2	87,71	89,93	95,49	94,57	90,98	87,58	91,04 A
CT1	87,53	89,71	94,05	94,31	91,40	85,57	90,43 A
T	86,56	89,40	91,43	94,17	89,60	83,61	89,13 A
Média	87,26 c	89,68 b	93,65 a	94,35 a	90,66 b	85,59 c	
CV (%)	3,43						
Teor de Carbono Orgânico (g kg⁻¹)							
CT2	2,15	2,52	2,61	2,85	2,42	2,00	2,43 A
CT1	2,10	2,20	2,35	2,87	2,10	1,69	2,22 A
T	2,06	2,25	2,71	2,84	2,21	1,97	2,34 A
Média	2,10 b	2,32 ab	2,56 a	2,85 a	2,25 b	1,89 c	
CV (%)	13,23						

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Os índices de agregação do solo apresentaram diferença em profundidade, com os maiores valores na superfície e com decréscimo em profundidade (Tabela 6). O teor de carbono orgânico do solo também reduziu em profundidade, o que novamente justifica a redução dos índices de agregação do solo em profundidade. Esses resultados concordaram com Wendling *et al.* (2005) e Roque *et al.* (2010).

As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas aos dados experimentais utilizando o modelo de van Genuchten (1980), permitindo estimar valores para locais não medidos (Tabela 7). As curvas de retenção de água no solo apresentaram comportamento diferente para o Latossolo Vermelho nos sistemas de manejo e locais de amostragem, contudo sem alterações na capacidade de água disponível ($CAD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) (Figura 8). Esses resultados estão relacionados com microporosidade semelhante entre os sistemas de manejo e locais de amostragem (Tabela 4), sendo estes os principais responsáveis pela retenção de água no solo. Pacheco e Cantalice (2011) também observaram alteração na curva de retenção de água em solos sob canavial em diferentes tempos de uso e tipos de cultivo; as alterações foram associadas principalmente ao processo compressivo imposto pelo tráfego de máquinas, instrumentos de preparo do solo e longo tempo de cultivo das áreas.

Tabela 7. Parâmetros do ajuste do modelo de van Genuchten para o Latossolo Vermelho determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).

Tratamento	Parâmetros						
	θ_s	θ_r	α	n	m	<i>p</i> -valor	
CT2	LR	0,56	0,26	0,9711	1,2658	0,2100	0,0048
	C	0,56	0,26	0,5468	1,3303	0,2483	0,0028
	LP	0,59	0,20	1,5041	1,2573	0,2046	0,0005
CT1	LR	0,55	0,28	0,5961	1,3584	0,2638	0,0002
	C	0,56	0,26	0,4012	1,3787	0,2747	0,0009
	LP	0,59	0,22	1,9922	1,2696	0,2123	0,0069
T	LR	0,54	0,28	0,3621	1,3989	0,2852	<0,0001
	C	0,55	0,27	0,9961	1,2969	0,2289	0,0189
	LP	0,57	0,21	0,9472	1,2791	0,2182	0,0027

θ_s : conteúdo de água na saturação; θ_r : conteúdo de água residual; α , m, n: coeficientes do modelo.

As diferenças apresentadas nas curvas de retenção ocorrem basicamente nas menores tensões entre a θ_s e θ_{cc} (Figura 8), estando relacionado aos macroporos (Tabela 4), mais facilmente alterados pelos processos antropogênicos. Maiores alterações ocorreram em geral na linha do rodado e na região do canteiro, indicando melhores condições estruturais na linha de plantio e ausência ou menor frequência de tráfego sobre ou próximo à soqueira. Silva *et al.* (2011) também observaram diferenças no comportamento da curva de retenção de água no solo em diferentes condições de manejo do solo na região semi-árida do Ceará.

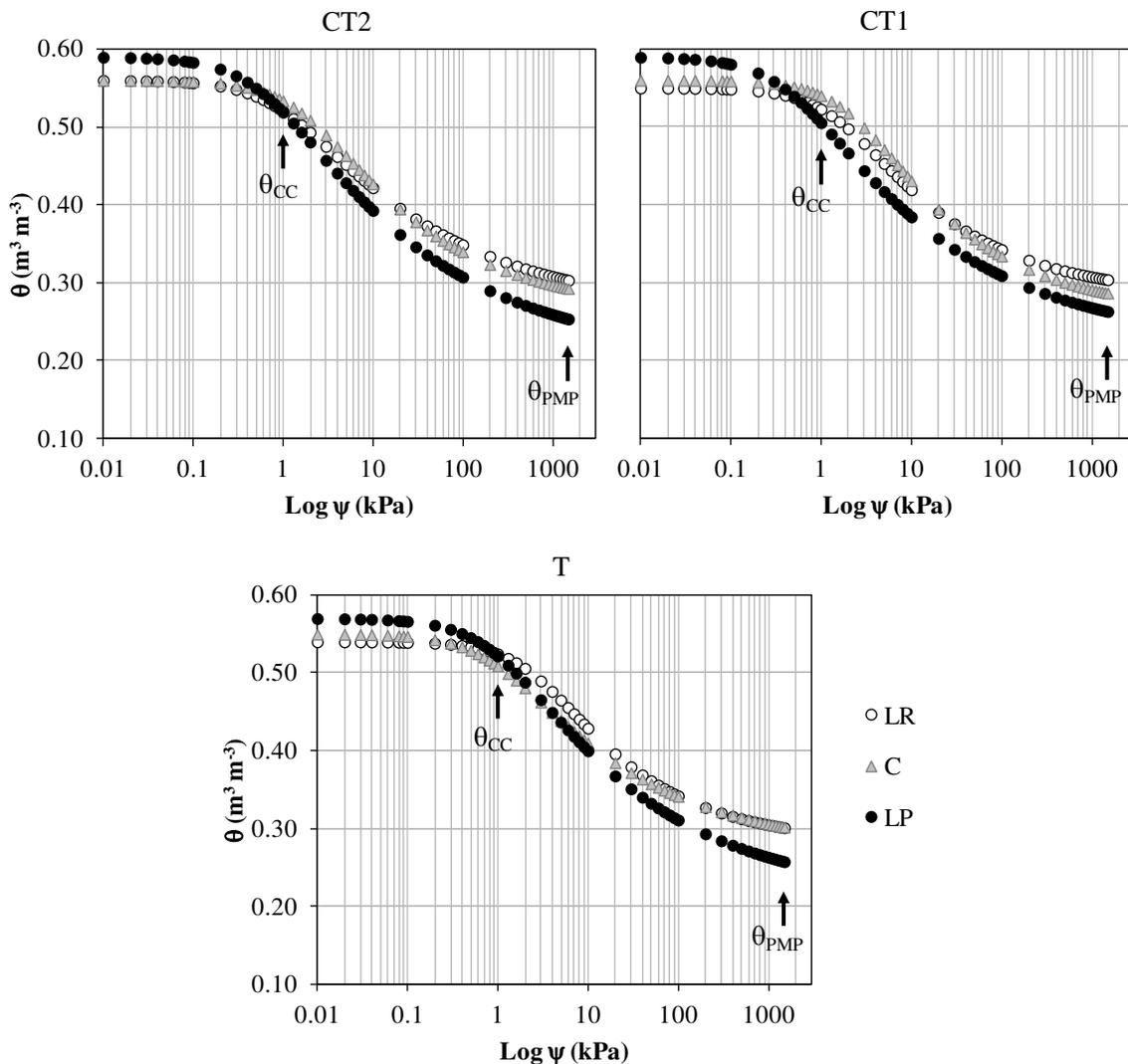


Figura 8. Curvas de retenção de água do Latossolo Vermelho determinadas nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T).

As linhas de plantio nos sistemas de manejo com controle de tráfego apresentaram maiores conteúdos de água do solo, principalmente nas menores tensões, indicando o efeito do ajuste da bitola do conjunto trator-transbordo e uso do piloto automático, prevenindo o tráfego sobre a soqueira (Figura 8). McHugh *et al.* (2009) observaram aumento significativo de 44,5% na capacidade disponível de água no solo na linha de cultivo com 22 meses de implantação do sistema de controle de tráfego agrícola após 30 anos de cultivo convencional. Qingjie *et al.* (2009) observaram incremento significativo de 9,6% no armazenamento de água no solo na camada de 0,0-1,5 m no manejo com controle de tráfego em relação ao tráfego aleatório em período de estiagem no semi-árido chinês.

4.2. Intervalo Hídrico Ótimo

Não foi observado efeito significativo, a 5% de probabilidade, de sistemas de manejo, locais de amostragem e camadas de solo sobre as curvas de retenção de água no solo. Isso ocorreu porque a maior parte da variabilidade das curvas de retenção de água foi expressa por meio da densidade do solo, assim um único modelo foi ajustado para explicar a curva de retenção de água no solo. O mesmo se repetiu para a curva de resistência do solo à penetração.

O modelo de resistência do solo à penetração em função da densidade e conteúdo de água do solo explicou 80% da variabilidade dos dados (Tabela 8). Os coeficientes demonstraram que a resistência variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com o conteúdo de água do solo, concordando com Tormena *et al.* (1998), Leão *et al.* (2004); Freddi *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011).

Tabela 8. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para resistência à penetração ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo de água no solo ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($Ds = \text{Mg m}^{-3}$): $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$ ($R^2 = 0,80$)

	Parâmetros	Erro padrão	t	Probabilidade
<i>a</i>	-2,6177	0,1666	-15,71	<0,0001
<i>b</i>	-2,3741	0,1342	-17,69	<0,0001
<i>c</i>	7,3509	0,3335	22,05	<0,0001

A estimativa dos coeficientes do modelo (Tabela 8) permitiu a construção da equação 17. O conteúdo de água do solo foi obtido pela equação 18, a partir da densidade do solo e considerando a resistência do solo à penetração limitante para a cultura:

$$RP = 0,073 * \theta^{-2,3741} * D_S^{7,3509} \quad \text{Equação 18}$$

$$\theta = \left[\frac{RP}{(0,073 * D_S^{7,3509})} \right]^{\left(\frac{1}{-2,3741} \right)} \quad \text{Equação 19}$$

em que: RP é a resistência à penetração (MPa); D_s é a densidade do solo (Mg m⁻³) e θ é a conteúdo volumétrico de água do solo (m³ m⁻³).

A curva de retenção de água no solo explicou 82% da variabilidade do conteúdo de água no solo em função do potencial matricial e a densidade do solo (Tabela 9). Os coeficientes demonstraram que o conteúdo de água do solo variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com o potencial matricial, concordando com Tormena *et al.* (1998), Leão *et al.* (2004), Freddi *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011).

Tabela 9. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para conteúdo de água do solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) em função da densidade do solo ($D_s = Mg m^{-3}$) e do potencial matricial do solo ($\psi = kPa$): $\ln \theta = d + e D_s + f \ln \psi$ ($R^2 = 0,82$)

	Parâmetros	Erro padrão	T	Probabilidade
<i>d</i>	-1,3889	0,0865	-16,06	<0,0001
<i>e</i>	0,5822	0,0698	8,34	<0,0001
<i>f</i>	-0,0868	0,0034	-25,71	<0,0001

As equações 19 e 20 foram utilizadas para estimar o conteúdo de água do solo na capacidade de campo ($\psi = 10$ kPa) e no ponto de murchamento permanente ($\psi = 1.500$ kPa), a partir da densidade do solo:

$$\theta = \exp^{(-1,3889+0,5822*D_s)} * 10^{-0,0868} \quad \text{Equação 20}$$

$$\theta = \exp^{(-1,3889+0,5822*D_s)} * 1500^{-0,0868}$$

Equação 21

em que: θ é o conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e ψ é o potencial matricial (kPa).

O conteúdo de água do solo, representadas pela área hachurada (Figura 9), indicaram o intervalo de água no solo em que são mínimas as limitações ao crescimento do sistema radicular da cana, isto é, θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} e θ_{PA} , expressos em função da densidade do solo, caracterizando o intervalo hídrico ótimo.

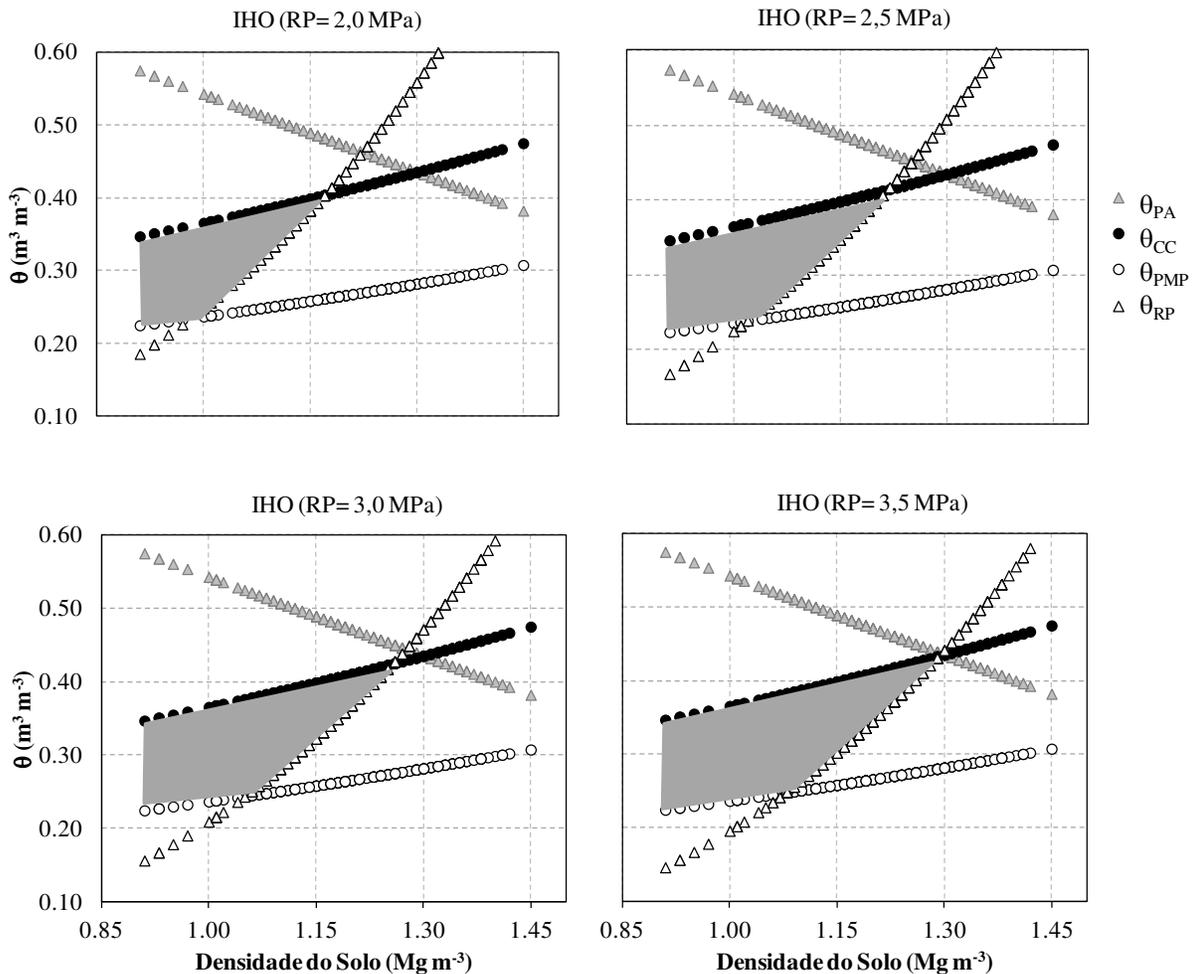


Figura 9. Intervalo hídrico ótimo do solo representando a variação no conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC, $\psi = 10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP, $\psi = 1.500$ kPa), porosidade de aeração ($PA = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e resistência à penetração ($RP = 2,0; 2,5; 3,0$ e $3,5$ MPa).

A densidade do solo apresentou efeito positivo sobre a retenção de água nos potenciais de 10 e 1.500 kPa, ou seja, na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (Figura 9). Isso ocorreu devido à redução da porosidade total e macroporosidade e redistribuição dos tamanhos dos poros, aumentando a contribuição dos microporos na porosidade de solo, devido à indução de estresse via processos antropogênicos, o que resultou na adsorção da água no solo a maiores pressões (TORMENA *et al.*, 1998; REICHERT *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011). Freddi *et al.* (2009) encontraram capacidade de água disponível variando de 0,109 a 0,123 m³ m⁻³ com o aumento da densidade de um Latossolo Vermelho textura média. Efeito positivo da densidade do solo sob a retenção de água nos potenciais de 10 e 1.500 kPa também foram observados por Tormena *et al.* (1998), Calonego e Rosolem (2011) e Severiano *et al.* (2011).

O aumento da densidade reduziu a porosidade de aeração do solo (Figura 9). Essa redução na porosidade de aeração também foi observada por Tormena *et al.* (1998), Leão *et al.* (2004), Freddi *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011). A porosidade de aeração do solo deve ser de no mínimo 0,10 m³ m⁻³ para permitir um adequado movimento de gases no espaço poroso (GRABLE; SIEMER, 1968; SILVA *et al.*, 1994), contudo as atividades agrícolas podem reduzir a porosidade do solo, interferindo significativamente na aeração do solo (LAPEN *et al.*, 2004).

O ponto onde a θ_{PA} torna-se mais limitante ao desenvolvimento do sistema radicular da cana que a θ_{CC} é a partir da densidade do solo de 1,30 Mg m⁻³ (Figura 9), assim um aumento no conteúdo de água no solo, reduz a difusão de oxigênio dentro do espaço poroso do solo e nas trocas gasosas com a atmosfera (SILVA *et al.*, 1994), para renovação dos teores de oxigênio e eliminação do excesso de gás carbônico entre outros, provenientes principalmente da respiração celular do sistema radicular e de microrganismos.

O aumento da densidade do solo aumentou a resistência do solo à penetração (Figura 9). Foi criado o intervalo hídrico ótimo para o solo em estudo, considerando uma resistência à penetração de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa. O valor de 2,0 MPa é considerado como impeditivo para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas em geral, contudo a cana-de-açúcar tem se desenvolvido de forma aceitável para os padrões econômicos em solo com RP superiores a esse limite. Camargo e Alleoni (1997) citaram que RP superior a 2,5 MPa promove limitações ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. Valores de 3,0 e 3,5 MPa já tem

sido considerados como limitantes para o sistema radicular em algumas condições agrícolas (LAPEN *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2011).

Observou-se aumento do IHO com o aumento da RP limitante (Figura 9). A θ_{RP} foi considerada o limite inferior do IHO em 97, 94, 92 e 88% das amostras, considerando a RP de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa, respectivamente. A θ_{RP} substituiu θ_{PMP} nos valores de densidade do solo igual ou superior a 0,98; 1,02; 1,05 e 1,08 Mg m⁻³. A RP é o fator que mais reduziu o IHO, concordando com Tormena *et al.* (1998), Leão *et al.* (2004), Freddi *et al.* (2009), Asgarzadeh *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2011). Em área cultivada com cana-de-açúcar o intenso tráfego de máquinas nas operações agrícolas resulta em compactação do solo, com aumento da RP, criando condições impeditivas ao desenvolvimento do sistema radicular (CALONEGO; ROSOLEM, 2011).

O IHO apresentou relação positiva com a densidade do solo até 0,97; 1,01; 1,05 e 1,08 para a RP de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa, respectivamente, e negativa para maiores valores, apresentando IHO igual a zero para densidade de 1,17; 1,22 ; 1,26 e 1,29 Mg m⁻³ (Figura 9 e Figura 10). Um aumento na densidade do solo pode ser benéfico para o desenvolvimento de culturas agrícolas, contribuindo para a germinação, fixação e nutrição da planta, devido ao maior contato solo-planta (DIAS JÚNIOR, 2000; ALAMEDA *et al.*, 2012). Quando o IHO é igual a zero, a densidade do solo é considerada crítica (Dsc), ou seja, valor de densidade igual ou superior a Dsc resultará em limitações severas ao desenvolvimento das plantas (SILVA *et al.*, 1994; REICHERT *et al.*, 2009). Leão *et al.* (2004) observaram Dsc de 1,46 Mg m⁻³, considerando uma RP 3,0 MPa para um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa. Freddi *et al.* (2009) observaram Dsc de 1,46 Mg m⁻³, considerando uma RP crítica de 2,15 MPa, para Latossolo Vermelho distrófico típico textura média sob cultivo de milho irrigado por pivô central.

A faixa do conteúdo de água não limitante ao desenvolvimento da cana-de-açúcar variou de 0,00-0,126; 0,00-0,130; 0,00-0,132 e 0,00-0,134 m³ m⁻³, para RP igual a 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5, respectivamente (Figura 10). Neste caso, à medida que a cultura agrícola suporta uma RP maior, maior será a faixa onde o conteúdo de água do solo não apresenta impedimento físico e maior será a densidade do solo suportada pela cultura para o seu desenvolvimento. Freddi *et al.* (2009) encontraram IHO variando de 0 a 0,123 m³ m⁻³ para o desenvolvimento do milho para uma RP de 2,15 MPa.

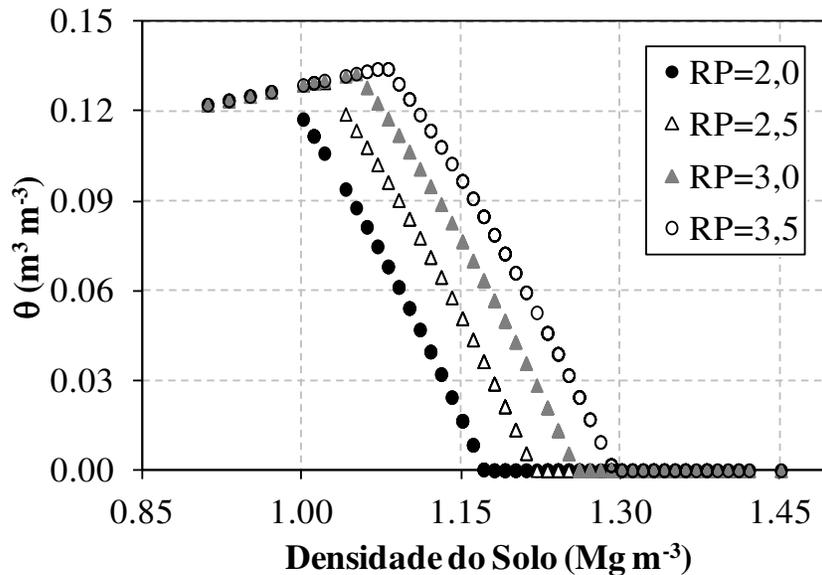


Figura 10. Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo e resistência do solo à penetração.

Considerando uma densidade de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$, ocorrida na linha da planta no sistema de manejo com controle de tráfego, o conteúdo de água do solo deve estar entre $0,30$ e $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para uma RP de $2,5 \text{ MPa}$ (Tabela 4). Conteúdo de água no solo inferiores a $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ indicou limitação ao crescimento do sistema radicular associada com uma resistência a penetração maior que $2,5 \text{ MPa}$, enquanto valores superiores a $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ não ocorrem, porque excede a máxima capacidade do solo em reter água e porque o terreno não apresenta condições de alagamento. Contudo, considerando a densidade do solo igual a $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$, ocorrida na região do canteiro no sistema de manejo sem controle de tráfego, o IHO é igual a zero, assim, independente do conteúdo de água, o solo apresentará condições impeditivas para o crescimento da cana-de-açúcar.

Os dados amostrados apresentaram maior proporção da densidade do solo nos sistemas de manejo CT2 (51%) e testemunha (65%), acima da densidade crítica ($1,22 \text{ Mg m}^{-3}$), encontrada no intervalo hídrico ótimo, enquanto no manejo CT1 ocorreu menor proporção (45%) (Figura 11). O predomínio da densidade do solo acima da Dsc enfatizou condições físicas adversas do solo para o crescimento do sistema radicular da cana. Solos sob sistemas agrícolas intensivos, como no caso da cultura canavieira, têm normalmente densidade do solo

maior que a densidade crítica, obtida no intervalo hídrico ótimo (LEÃO *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2011).

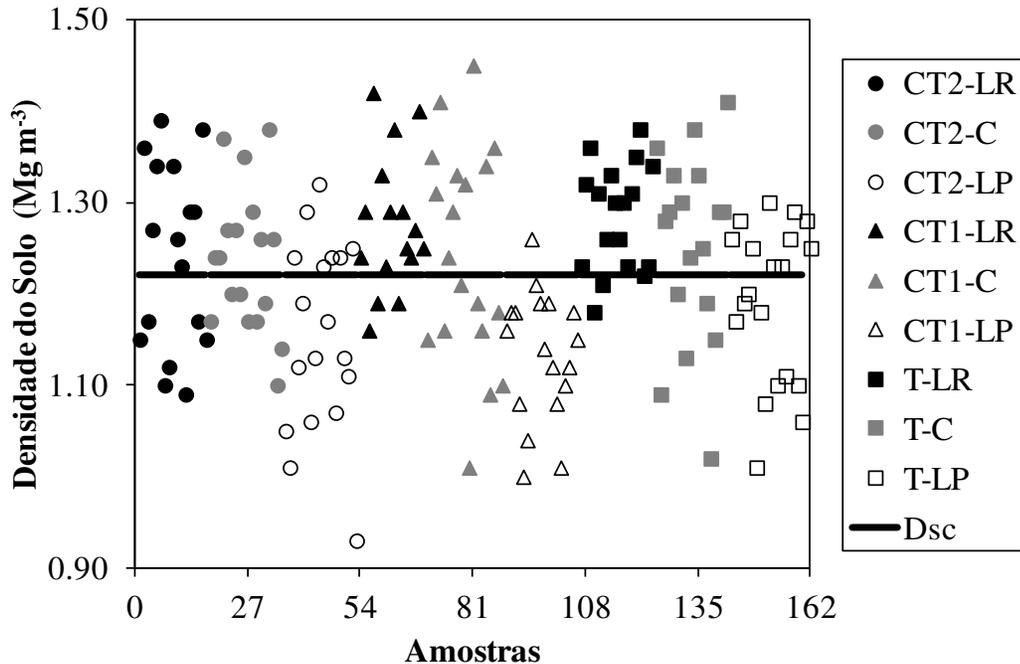


Figura 11. Densidade do solo das amostras coletadas nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) nos locais de amostragem e camadas do Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar, considerando a $D_{sc} = 1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ ($RP=2,5 \text{ MPa}$).

Os sistemas de manejo não diferiram quanto à capacidade de água disponível, contudo os sistemas de manejo com controle de tráfego apresentaram maior IHO na linha da planta em relação ao manejo sem controle de tráfego, o que reflete na melhoria da qualidade física do solo, devido à ausência do tráfego dos pneus nesta região (Figura 12). Esses resultados concordaram com Chan *et al.* (2006), que observaram mudanças no intervalo hídrico ótimo de um solo argiloso sob manejo com tráfego controlado. Para Lapen *et al.* (2004), o IHO foi eficaz na identificação de restrições potenciais da qualidade do solo para o crescimento de plantas de milho, empregando mudanças dinâmicas da densidade e resistência mecânica do solo ao longo do ciclo da cultura, como resultado de diferentes sistemas de manejo.

A redução da compactação do solo é a medida a ser tomada em curto prazo, a fim de reduzir a densidade e a resistência do solo à penetração. O controle de tráfego é uma alternativa que viabiliza essa necessidade, já que concentra o tráfego dos pneus no centro da entrelinha da cultura, conservando a qualidade física do solo na linha de plantio (TULLBERG *et al.*, 2007; McHUGH *et al.*, 2009; QINGJIE *et al.*, 2009).

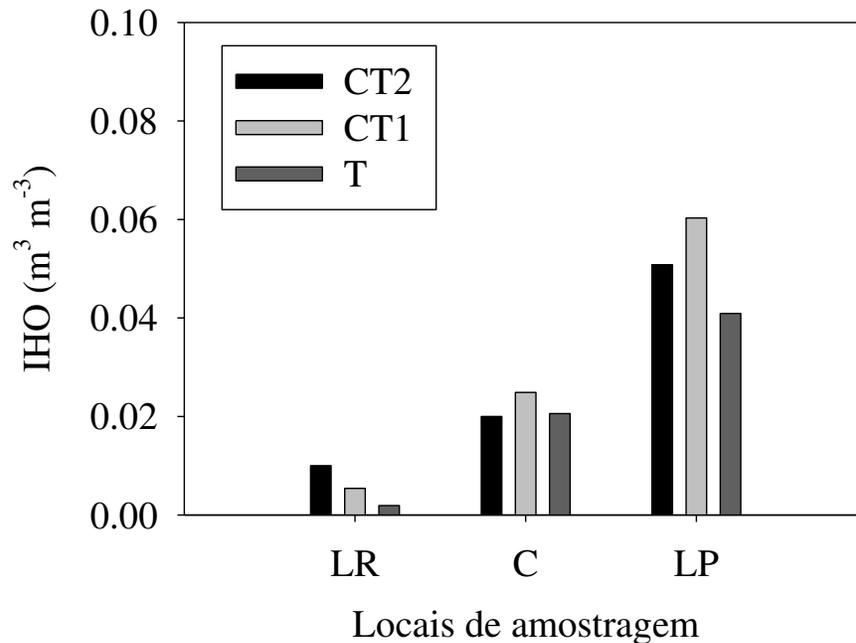


Figura 12. Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C).

Em geral, observou-se redução no IHO no sentido $\text{LR} < \text{C} < \text{LP}$ (Figura 12). Esses resultados concordaram com Chan *et al.* (2006), que notaram IHO igual a zero na linha do rodado em um solo argiloso, criando condições desfavoráveis às raízes das plantas, contrastando com a linha de plantio, onde a qualidade do solo foi mantida, resultando no maior crescimento do sistema radicular das culturas canola e trigo. O desenvolvimento radicular ocorre sem restrições dentro dos limites do IHO, dessa forma a amplitude do conteúdo de água do solo pode ser utilizada na avaliação da estrutura do solo e da faixa de água entre os níveis críticos para o desenvolvimento das plantas.

Menor IHO ocorrido na linha do rodado é devido o tráfego dos pneus do conjunto trator-transbordo nessa região e elevada carga por eixo, resultando no maior grau de compactação do solo (Figura 12). Vale destacar que essa região é pouco explorada pelas raízes, não influenciando na produtividade da cana (ver item 4.5).

4.3. Avaliação estrutural do solo por análise de imagens

A avaliação estrutural do solo por meio da análise de imagens 2-D digitalizadas indicou uma porosidade total similar entre os sistemas de manejo na linha do rodado nas duas camadas em estudo, contudo maiores valores foram observados na região do canteiro e linha de plantio, ambos na camada 0,00-0,12 m nos manejos com CT1 (Figura 13). Esses resultados concordaram com os anteriormente apresentados (ver item 4.1) e com Tullberg *et al.* (2007), que observaram efeito da compactação em sistema de tráfego controlado por meio de imagens binarizadas, indicando na área não trafegada um sistema de poros interligados, enquanto a região de tráfego apresentou uma estrutura maciça de solo a partir de 0,10 m de profundidade. A análise de imagens 2-D têm se mostrado uma técnica eficiente na quantificação de alterações na estrutura do solo, permitindo essa distinção entre sistemas de manejos do solo (LAMANDÉ *et al.*, 2003; PAGLIAI *et al.*, 2004).

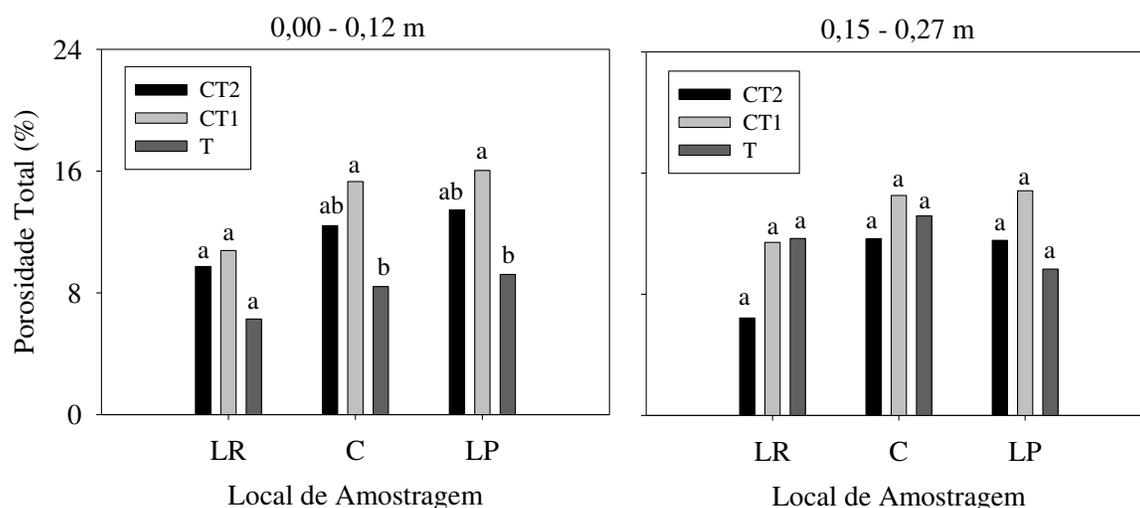


Figura 13. Porosidade total do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.

Maiores valores de poros arredondados foram observados na linha do rodado na camada 0,00-0,12 m nos manejos com controle de tráfego (Figura 14). Isso ocorreu porque existe uma tendência de parte dos poros, em destaque os macroporos, transformaram-se em poros arredondados e/ou alongados e de menor tamanho, uma vez que a pressão exercida pelas rodas das máquinas agrícolas supera a resistência interna do solo (HORN *et al.*, 1995), principalmente nesta região onde o tráfego é concentrado. Lamandé *et al.* (2003) também observaram alterações nestes macroporos, devido a compactação do solo.

Na região do canteiro, maior valor de poros alongados foi observado em CT1 na camada superficial (Figura 14). Os poros alongados apresentam maior conectividade em relação aos arredondados, sendo que a sua redução acarreta em diminuição da aeração, infiltração e redistribuição de água no solo (LAMANDÉ *et al.*, 2003; LIMA *et al.*, 2005; CONSTATINI *et al.*, 2006). Esses resultados concordaram com Pagliai *et al.* (2004), que observaram redução nos poros de transmissão (alongados), causado pelo manejo, consequência da compactação do solo. Contudo Piron *et al.* (2012) observaram, por meio da imagens digitalizadas 2-D, predominância de poros alongados tubulares (60%) em um Cambissolo compactado, fato que não ocorreu neste trabalho.

A linha de plantio também apresentou predomínio de poros arredondados na camada superficial e de poros complexos nos manejos com controle de tráfego. Isso foi consequência da conservação das condições estruturais do solo na linha de plantio pelo controle de tráfego, resultando numa boa estruturação do solo nessa região, o que favorece o desenvolvimento do sistema radicular (ver item 4.5.3). Isso ocorreu porque o manejo agrícola promove alterações nos tipos de poros, o que interfere na qualidade do solo (LAMANDÉ *et al.*, 2003; LIMA *et al.*, 2005). Esses poros complexos, compostos por poros de empilhamento e cavidades interconectados por inúmeros canais, estão relacionados a processos biológicos, neste caso, destaca-se o efeito do sistema radicular fasciculado da cana, contribuindo para sua formação, juntamente com a estrutura e agregação das partículas do solo (Figura 15).

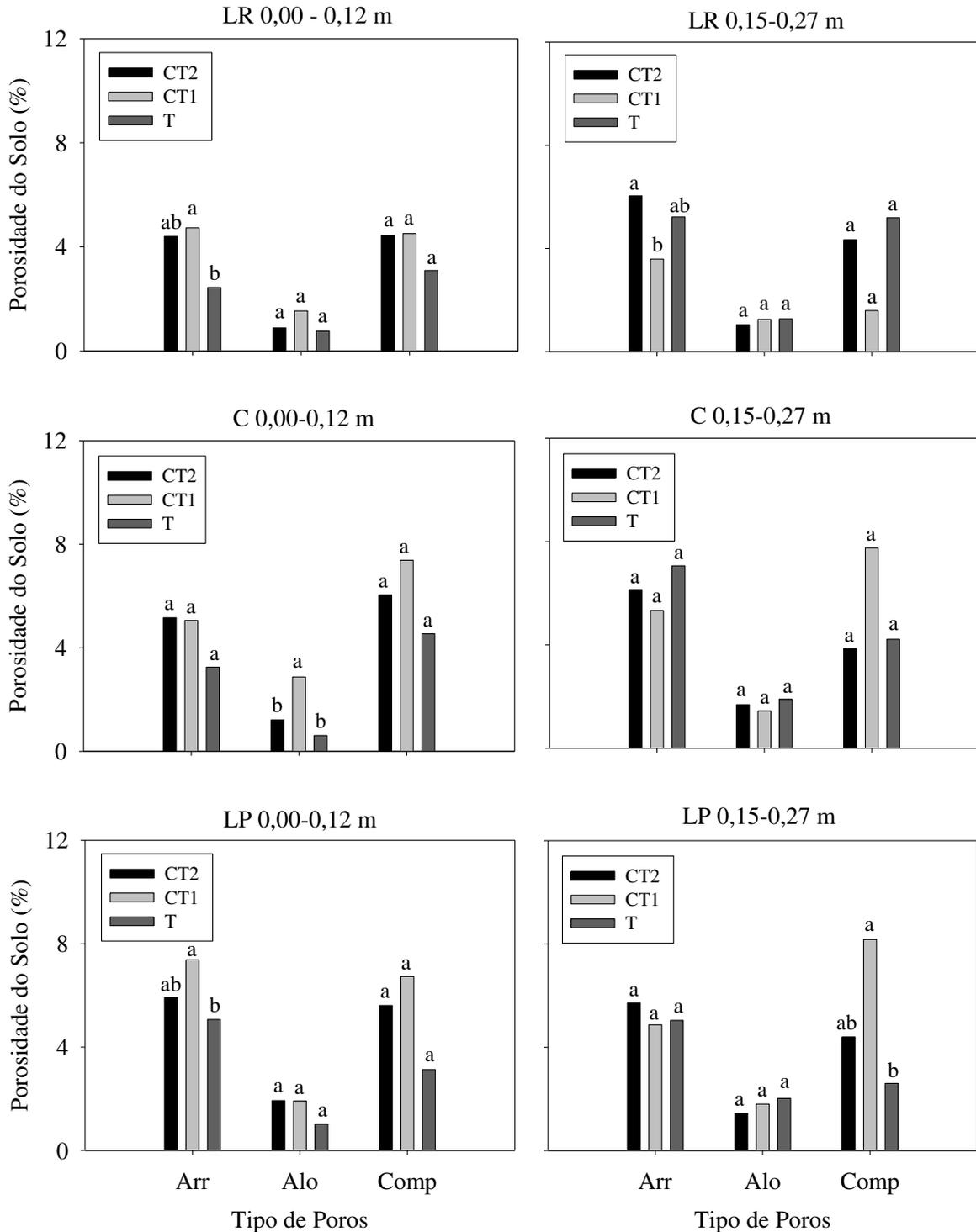


Figura 14. Classificação dos tipos de poros do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.

A microestrutura presente neste solo foi constituída basicamente por microagregados intergranulares, semelhante ao observado por Cooper *et al.* (2005) e Lima *et al.* (2005). Os Latossolos apresentam, em geral, predomínio da estrutura granular em geral muito estáveis (Cooper *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2005), com poros arredondados inter e intragregados, influenciados pelo manejo das máquinas e desenvolvimento de raízes da cana, conforme observado neste trabalho (Figura 15).

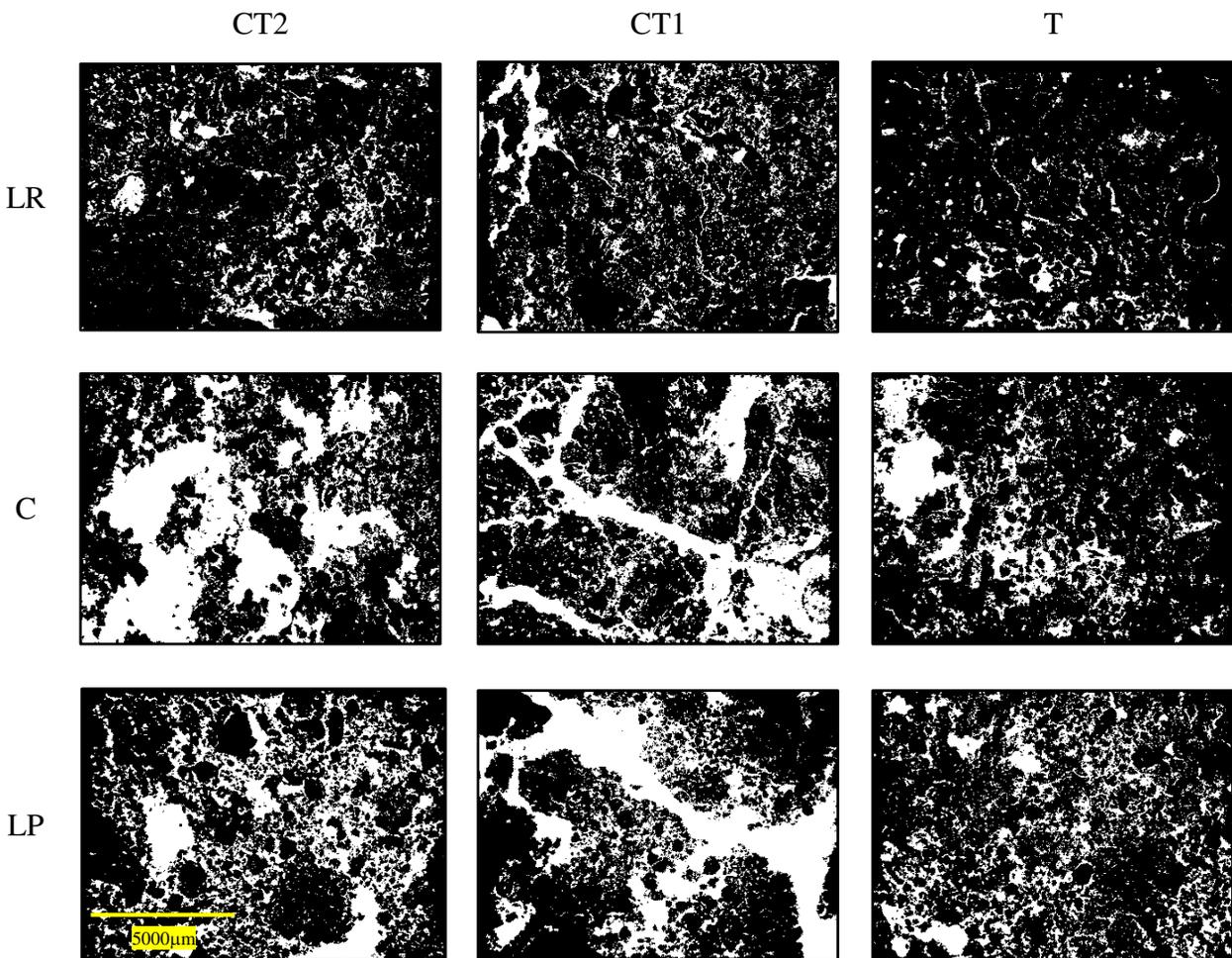


Figura 15. Microfotografias 2-D de blocos polidos e orientados do Latossolo Vermelho na camada de 0,00-0,12 m nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP), no rodado (LR) e no canteiro (C). Poros em branco.

A linha de plantio nos manejos com controle de tráfego apresenta estrutura do solo semelhante à estrutura de camadas aráveis não compactadas, compostas por fragmentos de

agregados e elevada porosidade (Figura 15), conforme observado por Horn *et al.* (1995). Contudo, a atuação dos sistemas motomecanizados resulta na compressão desses poros, compondo uma estrutura maciça, conforme observado na linha do rodado, sendo agravada pela condição textural deste solo (HORN *et al.*, 1995). Isso é resultado das forças estáticas e dinâmicas exercidas pelas máquinas agrícolas sobre o solo e pela sua elevada carga por eixo. De acordo com Piron *et al.* (2012), essas estrutura maciças composta por poros interagregados, poros de empacotamento e fissuras, apresentam baixa conectividade, dificultando a infiltração e o movimento de água no solo, o que favorece os processos erosivos.

Os resultados deste trabalho concordaram com Constatini *et al.* (2006), que notaram, em análises de imagens digitalizadas 2-D, predomínio de estrutura densa (5-10%) e muito densa (<5%) em 12 perfis de solo na região central da Itália, devido ao frequente trânsito de máquinas agrícolas. Os resultados também concordaram com Taina *et al.* (2010), que observaram, por meio da análise de imagens de lâminas delgadas, a formação de uma estrutura maciça no solo sob cultivo contínuo de milho, resultando na redução da porosidade do solo nos horizontes A e B em relação a uma área de pousio.

Os poros alongados apresentaram valores médios semelhantes nos três locais de amostragem nas duas camadas de solo, fato que não ocorreu para os poros arredondados, aumentando no sentido LR<C<LP nas duas camadas (Figura 14). Os poros arredondados estão relacionados aos microagregados que são características pedogenéticas dos Latossolos (COOPER *et al.*, 2005), sendo que parte desses poros reduziram com a compactação, ocorrida principalmente na linha do rodado. Contudo, poros arredondados e fissuras também podem ser provenientes do preparo do solo seguido de tráfego de máquinas e, dessa forma, indicarem novamente efeito de processos antropogênicos na estrutura do solo (LIMA *et al.*, 2005).

Os poros complexos aumentaram em geral no sentido LR<C<LP (Figura 15). Isso ocorreu devido à ausência ou menor frequência de movimento de pneus e rodados das máquinas principalmente sobre a região do canteiro e na linha de plantio e ao maior desenvolvimento do sistema radicular nessas regiões (ver Item 4.5.3). Os poros complexos foram sensíveis a alterações provocadas pelo manejo agrícola, o que os caracterizou como indicadores de alterações na qualidade física do solo. De acordo com Lima *et al.* (2005), o monitoramento das classes de poros pode ser usado na identificação da deterioração da

qualidade estrutural do solo, principalmente em estádios iniciais, onde outros métodos não são capazes de identificar.

Quanto ao tamanho dos poros na linha do rodado, os poros pequenos e médios foram maiores em CT1 na camada 0,00-0,12 m (Figura 16). Isso é resultado do tráfego concentrado dos pneus do conjunto trator-transbordo na entrelinha da cultura (linha do rodado) associado à elevada carga por eixo (>5 Mg), levando a compactação dos macroporos do solo, aumentando a quantidade de poros pequenos. Esses resultados concordaram com Pagliai *et al.* (2004) que encontraram, por meio de análise de imagens digitalizadas, alterações na porosidade do solo, principalmente nos poros maiores que 50 μm , causada pelos diferentes sistemas de manejo agrícola e compactação do solo.

Na região do canteiro, maior porcentagem de poros grandes foi observada na camada superficial e de poros pequenos em subsuperfície nos manejos com controle de tráfego (Figura 16). Já na linha de plantio, foram observados maiores valores de poros pequenos e médios na camada superficial e de poros pequenos em subsuperfície. Isso indicou os benefícios do controle de tráfego, preservando a estrutura do solo, fato que não ocorreu no manejo sem controle de tráfego, devido à compactação, promovido pelo tráfego sobre o canteiro e linha de plantio. Os resultados concordaram com Braunack *et al.* (2006), que observaram maior porosidade do solo na linha da soqueira de cana no manejo com controle de tráfego. Horn *et al.* (1995) também observaram, por meio de análise de imagens, que o longo tempo de atividades mecanização deteriora a estrutura do solo, expressa por agregados mais fracos e menor espaço poroso.

Em geral, os poros grandes, médios e pequenos aumentaram no sentido LR<C<LP nas duas camadas em estudo (Figura 16). Alterações são mais frequentemente observadas nos poros grandes, já que são mais suscetíveis a sofrer deformação quando submetidos a uma pressão, contudo a pressão imposta pelo tráfego de máquinas foi suficiente para alterar também os poros pequenos e médios do solo. De acordo com Horn *et al.* (1995), as zonas mais compactadas são observadas principalmente sob as rodas do trator traseiros entre 0,03 e 0,08 m abaixo da superfície do solo, com ausência de poros com diâmetro maior que 20 μm (macroporos). Esses resultados concordam com Piron *et al.* (2012), que observaram, por meio da imagens digitalizadas 2-D de lâminas delgadas, uma redução de 90% da macroporosidade do solo devido a sua compactação.

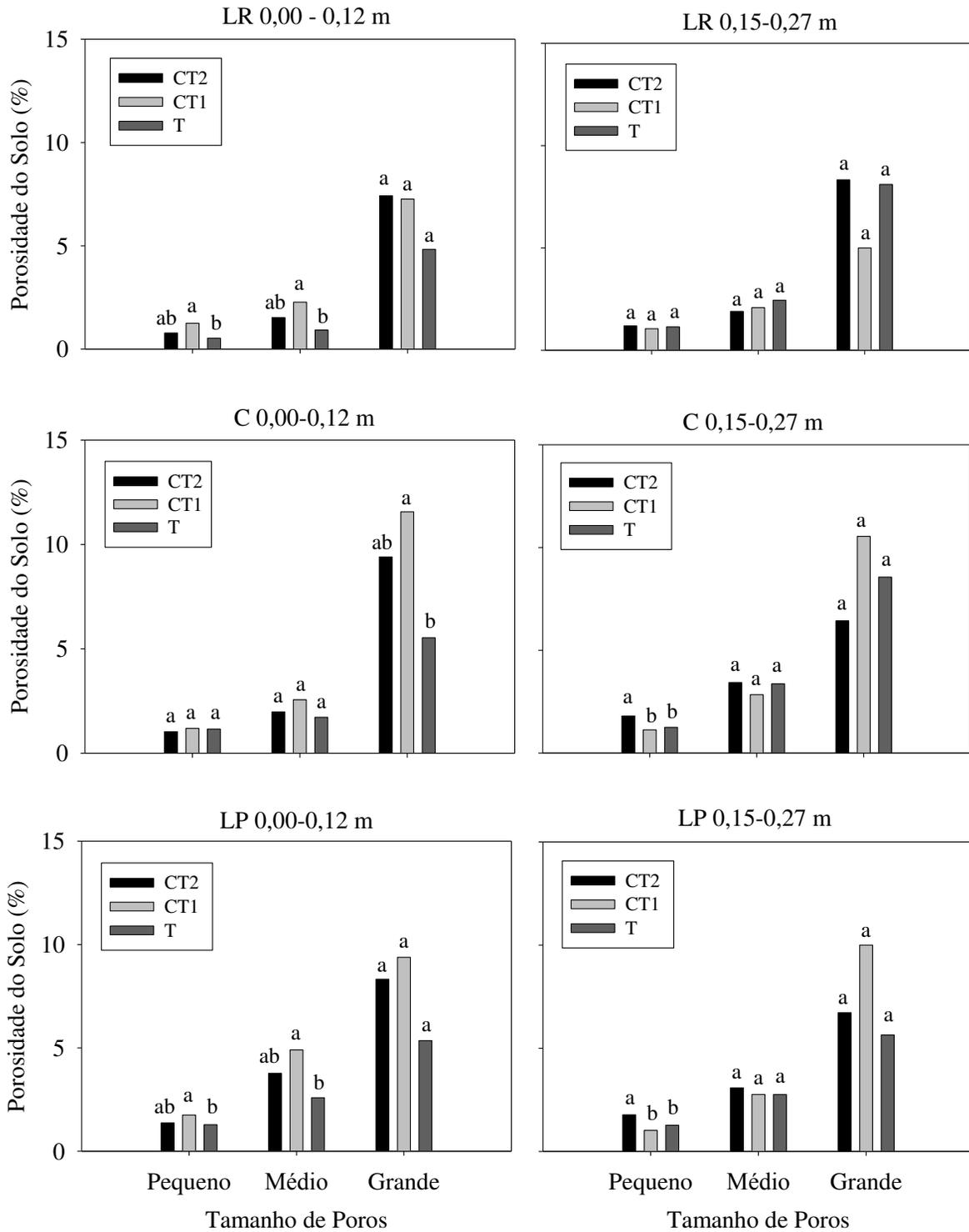


Figura 16. Classificação do tamanho de poros do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP), do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,12 e 0,15-0,27 m por análise de imagens digitalizadas.

4.4. Compressibilidade e Capacidade de Suporte de Carga do Solo

O índice de compressão e a deformação do solo medidos nos corpos-de-prova durante os ensaios uniaxiais de compressibilidade apresentaram relação direta com a densidade e o conteúdo de água no solo (Figura 17). Incrementos no conteúdo de água do solo aumentaram a deformação e o índice de compressão do solo ($r = 0,74^{**}$ e $0,70^{**}$). Imhoff *et al.* (2004) e Saffih-Hdadi *et al.* (2009) também observaram redução do índice de compressão com o aumento do conteúdo de água do solo. Isso ocorreu porque a água atua como lubrificante no solo, reduzindo o atrito interno entre as partículas e a resistência dos agregados à ruptura, permitindo a maior acomodação das partículas do solo no processo de compressibilidade (LIMA *et al.*, 2006a; SILVA *et al.*, 2009).

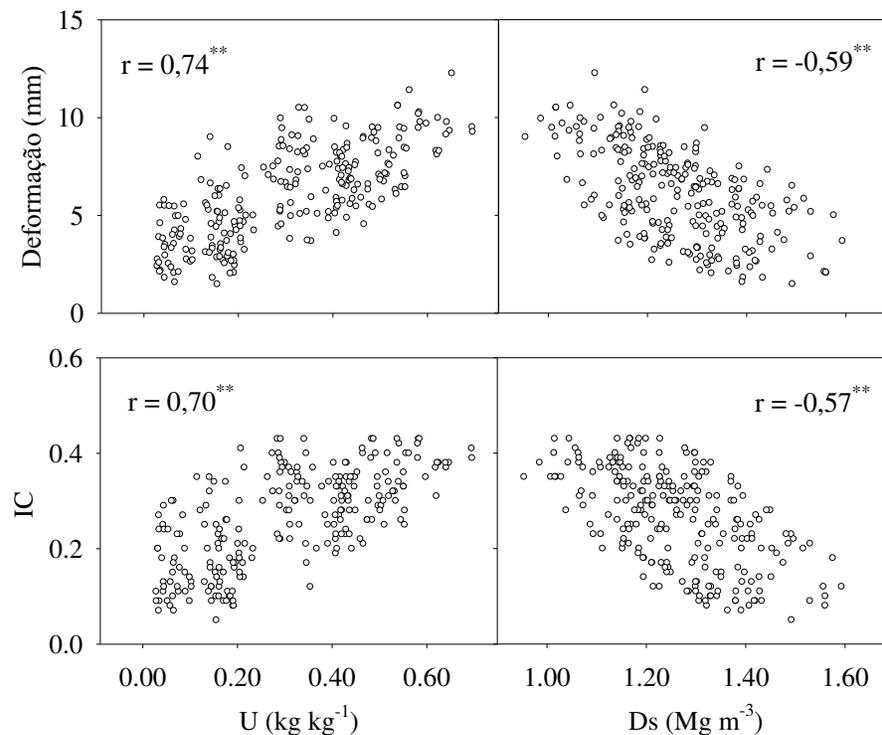


Figura 17. Deformação e índice de compressão do solo relacionados com o conteúdo de água e densidade inicial do solo para todos os sistemas de manejo, locais de amostragem e camadas de solo. ** Significativo a 1% de probabilidade.

O aumento da densidade do solo reduziu a deformação e o índice de compressão ($r = -0,59^{**}$ e $-0,57^{**}$). Esses resultados concordaram com Imhoff *et al.* (2004) e Suzuki *et al.* (2008). O aumento da densidade do solo aumenta o atrito interno entre partículas sólidas e/ou agregados, devido ao maior número de pontos de contato entre partículas, reduzindo sua

compressibilidade (PACHECO; CANTALICE, 2011). O aumento da densidade reduziu os vazios do solo, aumentando o grau de compactação do solo, devido à aproximação da densidade do solo à densidade máxima, o que contribui para reduzir a deformação e o índice de compressão (SUZUKI *et al.*, 2008). Isso diminui a suscetibilidade do solo a compactação, aumentando a capacidade de suporte de carga e favorecendo o tráfego de máquinas, contudo podendo limitar o crescimento das plantas (LIMA *et al.*, 2006a; SUZUKI *et al.*, 2008).

O aumento do conteúdo de água do solo reduziu a pressão de preconsolidação do solo, representado nos modelos de capacidade de suporte de carga (Figura 18; Tabela 10). O aumento do conteúdo de água no solo diminui sua resistência interna, devido à redução da coesão entre as partículas sólidas e formando uma película sobre as partículas sólidas e microagregados, reduzindo o atrito entre elas (PACHECO; CANTALICE, 2011). Se os fatores do solo se mantêm constantes, logo o conteúdo de água do solo governa a magnitude da deformação (LIMA *et al.*, 2006a; SAFFIH-HDADI *et al.*, 2009).

Tabela 10. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR), nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m

Tratamento		Modelo	R ²	
CT2 ⁽¹⁾	LP	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,66^{**} - 0,57^{**}.U)}$	72,12**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,83^{**} - 1,57^{**}.U)}$	90,08**
	LR	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,77^{**} - 0,72^{**}.U)}$	83,63**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,79^{**} - 1,06^{**}.U)}$	81,39**
CT1 ⁽¹⁾	LP	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,74^{**} - 0,93^{**}.U)}$	87,20**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,70^{**} - 0,98^{**}.U)}$	82,10**
	LR	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,71^{**} - 0,63^{**}.U)}$	65,82**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,76^{**} - 0,89^{**}.U)}$	75,39**
T ⁽¹⁾	LP	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,73^{**} - 0,68^{**}.U)}$	75,37**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,81^{**} - 1,17^{**}.U)}$	77,09**
	LR	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,66^{**} - 0,54^{**}.U)}$	84,56**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,77^{**} - 1,24^{**}.U)}$	87,51**
CT2+CT1 ⁽²⁾	LP	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,69^{**} - 0,71^{**}.U)}$	77,39**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,75^{**} - 1,18^{**}.U)}$	82,83**
	LR	0,00-0,10	$\sigma_p=10^{(2,74^{**} - 0,68^{**}.U)}$	73,14**
		0,20-0,30	$\sigma_p=10^{(2,77^{**} - 0,95^{**}.U)}$	78,35**

⁽¹⁾ n=20; ⁽²⁾ n=40.

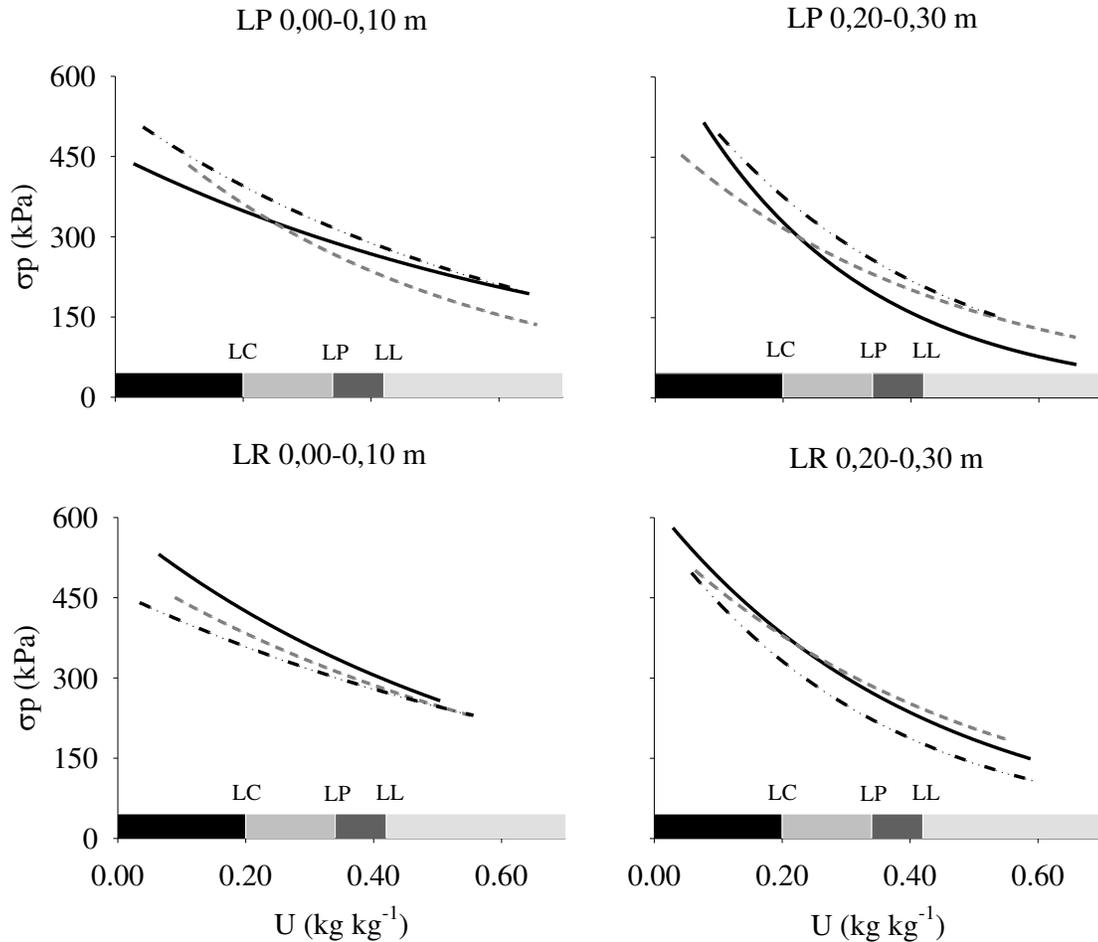


Figura 18. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo ($n=20$) para os sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.

Os sistemas de manejo com controle de tráfego diferiram significativamente do manejo sem controle de tráfego, com exceção para a linha de plantio na camada 0,00-0,10 m, com base no teste F de homogeneidade de dados (SNEDECOR; COCHARAN, 1989) (Tabela 11). Pacheco e Cantalice (2011) também observaram que diferentes tipos de cultivo e histórico de uso da cana-de-açúcar alteraram a compressibilidade do solo.

Optou-se por fazer um ajuste único para os pares de dados (pressão de preconsolidação e conteúdo de água do solo) dos sistemas de manejo com controle de tráfego e compará-lo com o manejo sem controle de tráfego, já que os modelos não diferiram estatisticamente. Diferenças significativas ocorreram entre os sistemas de manejo com e sem controle de tráfego nos locais de amostragem e camadas em estudo (Tabela 11, Figura 19).

Assis e Lanças (2005) também observaram diferenças significativas nos modelos de capacidade de suporte de carga do solo entre diferentes sistemas de manejo do solo.

Tabela 11. Teste de significância comparando os modelos de capacidade de suporte de carga do solo nos manejos com controle de tráfego com ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T), nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) e nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.

Tratamento ⁽¹⁾	Estatísticas			
	F	b	a	
Comparando Sistemas de Manejo				
CT2 vs T	LP 0,00-0,10	ns	ns	ns
	LP 0,20-0,30	ns	ns	*
	LR 0,00-0,10	ns	*	**
	LR 0,20-0,30	ns	ns	**
CT1 vs T	LP 0,00-0,10	ns	ns	ns
	LP 0,20-0,30	*	ns	*
	LR 0,00-0,10	**	ns	ns
	LR 0,20-0,30	ns	ns	**
CT1+CT2 vs T	LP 0,00-0,10	ns	ns	*
	LP 0,20-0,30	ns	ns	*
	LR 0,00-0,10	ns	**	**
	LR 0,20-0,30	ns	ns	**
Comparando Locais de Amostragem				
LR vs LP	CT2 0,00-0,10	**	ns	**
	CT2 0,20-0,30	ns	ns	**
LR vs LP	CT1 0,00-0,10	ns	ns	*
	CT1 0,20-0,30	ns	ns	*
LR vs LP	T 0,00-0,10	ns	ns	ns
	T 0,20-0,30	ns	ns	*

F: Teste F de Snedecor e Cochran (1989); a: coeficiente linear; b: coeficiente angular; ** e * Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ns Não significativo. ⁽¹⁾ Dados transformados: $x' = \log x$

Para qualquer conteúdo de água do solo, o manejo sem controle de tráfego apresentou maior pressão de preconsolidação na linha de plantio nas duas camadas de solo (Figura 19). Considerando que o tráfego de máquinas deve ser realizado no conteúdo de água do solo inferior ao limite de plasticidade (SILVA *et al.*, 2009; MUNKHOLM *et al.*, 2011), que neste estudo foi menor que $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$, ou seja, na região de friabilidade ou tenacidade, observou-se maior capacidade de suporte de carga do solo para o manejo sem controle de tráfego nas duas camadas de solo (315 e 258 kPa) em relação ao manejo com controle de tráfego (281 e 223 kPa). Isso é caracterizado pelo efeito do tráfego de pneus do conjunto trator-transbordo próximo à soqueira da cultura da cana-de-açúcar ao longo dos subsequentes ciclos da cultura, tornando o solo mais compactado e mais resistente a deformações (HORN *et al.*, 1995).

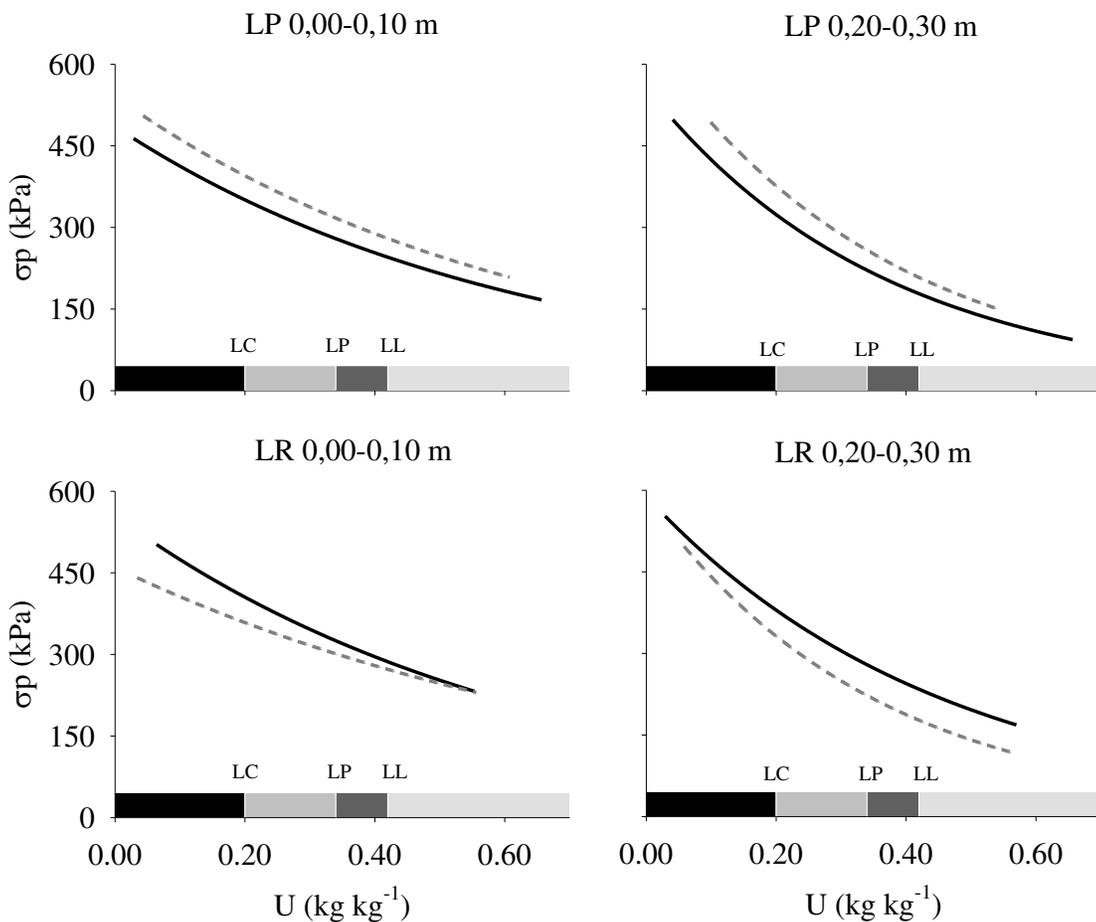


Figura 19. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo para os sistemas de manejo com controle de tráfego (CT1+CT2, $n=40$) e sem controle de tráfego (T, $n=20$) determinados nas linhas do plantio (LP) e do rodado (LR) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m.

No manejo com controle de tráfego em cana-de-açúcar não ocorre o tráfego de pneus do conjunto trator-transbordo sobre ou próximo à linha da soqueira, evitando maiores danos ao volume total de poros e, por conseguinte, à estrutura do solo, resultado da menor relação massa-volume dos constituintes do solo (Figura 19). Braunack e McGarry (2006) também observaram melhorias na qualidade física do solo na região da soqueira no sistema de manejo com controle de tráfego agrícola em área cultivada com cana-de-açúcar na Austrália quando comparado ao manejo sem controle de tráfego.

O solo sob o manejo com controle de tráfego apresentou maior pressão de preconsolidação para qualquer conteúdo de água do solo, na linha do rodado nas duas camadas em estudo (Figura 19). Considerando o conteúdo de água do solo referente ao limite de plasticidade, a capacidade de suporte de carga para o manejo com controle de tráfego foi nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m de 323 e 280 kPa, respectivamente, enquanto no manejo sem controle de tráfego foi de 300 e 223 kPa. Os resultados refletem o efeito da maior compactação do solo na linha do rodado (região central da entrelinha da cultura) no manejo com controle de tráfego, causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, principalmente durante a colheita da cana, que é intensificado pela sobreposição das passadas dos pneus do conjunto trator-transbordo (BRAUNACK *et al.*, 2006). Contudo, deve-se observar até que ponto o solo pode suportar tal pressão sem prejuízo à sua estrutura e, principalmente, ao desenvolvimento das plantas (SUZUKI *et al.*, 2008).

Um possível problema ao uso do controle de tráfego agrícola nos canaviais brasileiros e presente neste trabalho é a bitola da colhedora de cana de 1,88 m, o que promoveu o tráfego da esteira próximo da soqueira. A colhedora de cana-de-açúcar confere uma pressão de contato estática (PCe) sobre a superfície do solo de 132 kPa, considerando uma distribuição homogênea da carga ao longo da esteira. Essa PCe é inferior a pressão de preconsolidação do solo na camada superficial para qualquer conteúdo de água do solo na região da soqueira, indicando adequação da máquina, preservando a estrutura do solo (Figura 19). Isso é resultado da elevada resistência interna entre partículas e agregados, o que imprimiu maior estabilidade estrutural deste solo. Em solos com menor capacidade de suporte e mais suscetíveis a compactação, esse fator pode ser limitante ao uso do controle de tráfego. Isso demonstrou a importância de caracterizar a capacidade de suporte de carga do solo nos ambientes de produção agrícola. Vale destacar que durante operações de campo, devido às vibrações e

forças dinâmicas existentes, pressões de contato solo-rodado podem exceder esse valor, o que indica a necessidade de mensurar essas pressões.

Um dos principais responsáveis pela compactação nos canaviais tem sido o tráfego do conjunto trator-transbordo na colheita e de máquinas autopropelidas na aplicação de insumos, já que apresentam pequena área de contato pneu-solo, exercendo pressões na superfície do solo que podem ultrapassar 450 kPa (SILVA *et al.*, 2006). Na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão suportada pelo solo deve ser evitada, para que não ocorra a compactação do solo. Contudo, o tráfego de máquinas exerce pressões superiores à suportada pelo solo, resultando em degradação estrutural do solo (SILVA *et al.*, 2006).

Do ponto de vista prático e sustentável da estrutura do solo em sistemas de produção, o aumento na área de contato do rodado com o solo é eficiente para reduzir as pressões aplicadas sobre o solo e reduzir o risco de compactação do solo causado pelo tráfego de máquinas (KELLER; ARVIDSSON, 2004; SILVA *et al.*, 2009). Outra medida preventiva tem sido o monitoramento do conteúdo de água do solo, realizando o tráfego com o conteúdo de água do solo inferior a limitante, indicada no modelo de capacidade de suporte de carga. Por exemplo, um trator utilizado em operações agrícolas exerce uma pressão estática na superfície do solo de 363 kPa (SILVA *et al.*, 2006), assim essa máquina deve trafegar no solo numa condição de conteúdo de água do solo inferior a 0,26 kg kg⁻¹ no manejo com controle de tráfego (Figura 19). Já no manejo sem controle de tráfego a mesma pressão deve ser exercida numa condição de conteúdo de água do solo inferior a 0,19 kg kg⁻¹ (Figura 19). Isso ocorreu devido a menor capacidade de suporte do solo no manejo sem controle de tráfego. Assim, o manejo com ajuste da bitola e uso de piloto automático favorece os cronogramas de trabalho em empresas agrícolas, devido à menor dependência do conteúdo de água do solo, que por sua vez é influenciada pelas condições climáticas, permitindo o trabalho das máquinas agrícolas em solo mais úmido.

Os locais de amostragem apresentaram diferença entre os sistemas de manejo com controle de tráfego nas duas camadas, contudo isso não ocorreu para o manejo sem controle de tráfego na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 11). No manejo com controle de tráfego ocorreu maior capacidade de suporte de carga do solo na linha do rodado em relação à linha de plantio nas duas camadas de solo, indicado pelos maiores coeficientes linear e angular. Esses resultados reforçam a ideia de que o manejo do canavial com ajuste da bitola das máquinas e

uso do piloto automático preserva a qualidade física do solo na região da soqueira (BRAUNACK; McGARRY, 2006; KINGWELL; FUCHSBICHLER, 2011).

4.5. Atributos da Planta

4.5.1. Produtividade e rendimento de açúcar

Os sistemas com controle de tráfego agrícola apresentaram maior produtividade de cana-de-açúcar em relação ao manejo sem controle de tráfego (Tabela 12). Esse aumento foi de 18,09 e 19,34% para os sistemas de manejo CT1 e CT2, respectivamente. O mesmo ocorreu para o rendimento de açúcar por hectare, apresentando um incremento de 20,22 e 20,36 Mg ha⁻¹ para CT1 e CT2, respectivamente. O aumento da produtividade da cana e do rendimento de açúcar ocorreu devido à preservação da qualidade física do solo na região da soqueira nos sistemas de manejo com controle de tráfego, permitindo ao sistema radicular um maior desenvolvimento (ver item 4.5.3), refletindo no crescimento da parte aérea. Esses resultados concordaram com Braunack e McGarry (2006), que observaram diferença na produtividade e no rendimento de açúcar nos sistemas de manejo na Austrália, com maiores valores no manejo com controle de tráfego. Chan *et al.* (2006) também observaram compactação do solo na região destinada ao tráfego dos rodados no sistema de controle de tráfego agrícola, resultando na redução da produtividade de trigo em 66%.

Tabela 12. Produtividade da cana e rendimento de açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T)

Sistema de Manejo	Produtividade		Rendimento de Açúcar	
	(Mg ha ⁻¹)	(%)	(Mg ha ⁻¹)	(%)
CT2	126,45 A	119,34	17,62 A	120,36
CT1	124,96 A	118,09	17,60 A	120,22
T	105,82 B	100,00	14,64 B	100,00
CV (%)	11,38		7,72	

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

A compactação do solo interfere na produtividade da cana-de-açúcar, contudo o manejo da lavoura com o sistema de controle de tráfego possibilitou a redução do efeito da compactação do solo sobre a cultura com aumento da produção das culturas agrícolas

(BRAUNACK; McGARRY, 2006). Qingjie *et al.* (2009) também observaram melhorias nas condições físicas do solo no manejo com controle de tráfego, aumentando a produtividade do trigo em 6,9 % em média num ensaio de 7 anos em relação ao tráfego aleatório. Collares *et al.* (2006, 2008) e Vermeulen e Mosquera (2009) também observaram redução da produtividade de culturas agrícolas devido ao efeito da compactação do solo, concordando com os resultados deste trabalho.

4.5.2. Variáveis tecnológicas

As variáveis tecnológicas não diferiram entre os sistemas de manejo em estudo, apresentando teores similares de fibra da cana, sólidos solúveis totais no caldo, sacarose aparente da cana, pureza do caldo e açúcares totais recuperáveis da cana entre os sistemas de manejo com e sem controle de tráfego (Tabela 13). A maior compactação do solo na região da soqueira no manejo sem controle de tráfego poderia reduzir a absorção de nutrientes do solo, afetada pelo menor crescimento radicular (ver item 4.5.3), podendo influenciar a qualidade tecnológica da cana (MEYER; WOOD, 2001). Contudo, a fertilidade adequada do solo, com teores de nutrientes de acordo com o recomendado para a região (VAN RAIJ *et al.*, 1996), foi suficiente para suprir as exigências da cultura, mesmo no manejo sem controle de tráfego que apresentou menor desenvolvimento radicular, não interferindo na qualidade tecnológica da cana (MEYER; WOOD, 2001).

Tabela 13. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T)

Sistema de Manejo	Fibra (%)	Brix (°brix)	PC (%)	Pureza (%)	ATR (kg Mg⁻¹)
CT2	11,66 A	18,45 A	14,46 A	89,74 A	142,24 A
CT1	11,72 A	18,70 A	14,48 A	89,02 A	142,19 A
T	11,42 A	18,51 A	14,57 A	89,58 A	143,19 A
Média	11,60	18,55	14,50	89,45	142,54
CV (%)	3,39	1,22	1,38	0,85	1,32

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade. Fibra: fibra da cana; Brix: sólidos solúveis totais no caldo; PC: sacarose aparente da cana; Pureza: pureza do caldo; ATR: açúcares totais recuperáveis da cana.

Com base nos resultados é possível perceber que o maior rendimento de açúcar por hectare no manejo com controle de tráfego está associado ao aumento da produtividade e não a melhoria na qualidade da matéria-prima (Tabela 12). Esses resultados concordaram com Braunack e McGarry (2006), que notaram que o rendimento de açúcar comercial por quantidade de cana produzida (139 kg Mg^{-1}) não foi afetado pelo regime de trânsito nos sistemas de manejo com e sem controle de tráfego na Austrália. Wiedenfeld (2008) também observou que alterações na qualidade do solo não afetaram a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar no Texas.

Os valores de fibra, sacarose aparente da cana e pureza do caldo estavam acima dos valores mínimos preconizados como padrão de qualidade, sendo 11-13%, >14% e >85%, respectivamente (RIPOLI; RIPOLI, 2004). Larrahondo *et al.* (2009) encontraram valores de fibra da cana, sacarose aparente da cana, pureza do caldo e sólidos solúveis totais de 18%; 14,2%; 84,9% e 16,7° brix, respectivamente, para cana-de-açúcar colhida mecanicamente na Colômbia. Souza *et al.* (2005), analisando 18 variedades de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, encontraram valores médios de fibra, pureza e sacarose aparente do caldo de 91%, 11% e 18%, respectivamente, para condições de manejo da palha sem triturar e mantida na superfície do solo, similar as condições deste trabalho.

O valor médio de açúcares totais recuperáveis (ATR) no final da safra brasileira 2010/2011 foi de $140,86 \text{ kg Mg}^{-1}$ (BRASIL, 2011a), indicando que os dados apresentados neste trabalho estavam de acordo com os padrões nacionais de produção comercial. Contudo esse valor foi inferior ($<168 \text{ kg Mg}^{-1}$) ao observado por Souza *et al.* (2005), analisando 18 variedades no interior do Estado de São Paulo.

4.5.3. Sistema radicular

A análise de variância não foi significativa para os atributos relacionados ao desenvolvimento do sistema radicular ao nível de 5% de probabilidade para as interações triplas (sistema de manejo x local de amostragem x camada de solo), porém as interações duplas apresentaram significância na análise estatística (manejo x local de amostragem, manejo x camada de solo e local de amostragem x camada de solo). Quando as interações duplas não apresentaram significância no teste F, as médias dos fatores foram comparadas isoladamente.

Os sistemas de manejo apresentaram diferença para superfície e volume radicular nas diferentes posições de amostragem, apresentando CT2 maiores valores na região do canteiro e linha de plantio (Tabela 14). Isso ocorreu devido menor densidade e maior porosidade do solo na região do canteiro e linha da soqueira no manejo com controle de tráfego, promovidos pelo ajuste da bitola e uso do piloto automático. Paulino *et al.* (2004) notaram aumento da superfície e densidade radicular da cana-de-açúcar com o aumento da macroporosidade e redução da densidade do solo. Esses atributos relacionados ao sistema radicular interferem no desenvolvimento da parte aérea da cultura, porque permite que a planta explore um maior volume de solo e, a partir da maior área de contato solo-raiz, absorva maior quantidade de água e nutrientes. Essa maior exploração do solo é importante, principalmente, para nutrientes com baixa mobilidade no solo, como o fósforo (SMITH *et al.*, 2005). Chan *et al.* (2006) observaram melhorias na qualidade física de um solo argiloso na área não trafegada sob sistema de tráfego controlado, resultando num redução de 67 e 35% do desenvolvimento do sistema radicular de canola e trigo, respectivamente.

Tabela 14. Sistema radicular da cana-de-açúcar nos sistemas de manejo com controle de tráfego por meio do ajuste da bitola e uso de piloto automático (CT2) e apenas com ajuste da bitola (CT1) e testemunha sem controle de tráfego (T) determinados nas linhas de plantio (LP) e do rodado (LR) e no canteiro (C) nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Sistema de Manejo	Ponto de amostragem			Camadas de Solo			Média
	LR	C	LP	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Massa seca (g dm⁻³)							
CT2	0,158 Ab	0,378 Aab	0,664 Aa	0,510 Aa	0,395 Ab	0,295 Ac	0,400
CT1	0,134 Aa	0,313 Aa	0,357 Aa	0,316 Ba	0,271 Bab	0,217 ABb	0,268
T	0,063 Aa	0,182 Aa	0,332 Aa	0,256 Ba	0,185 Bab	0,135 Bb	0,192
Média	0,119	0,291	0,451	0,361	0,284	0,216	
CV (%)	24,36			24,36			
Diâmetro radicular (mm)							
CT2	1,062	1,197	1,223	1,159	1,097	1,227	1,161 A
CT1	1,028	1,149	1,181	1,068	1,110	1,179	1,119 A
T	0,967	1,137	1,214	1,046	1,204	1,067	1,106 A
Média	1,019 b	1,160 a	1,206 a	1,091 a	1,137 a	1,158 a	
CV (%)	12,70			12,70			

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 14. Continuação

		Densidade radicular (cm dm ⁻³)					
CT2	47,06 Ab	83,04 Aab	99,17 Aa	81,77	74,62	72,88	76,42 A
CT1	46,33 Aa	71,20 Aa	68,14 Aa	63,88	58,44	63,36	61,89 A
T	25,27 Aa	46,93 Aa	62,64 Aa	48,12	40,30	46,42	44,95 A
Média	39,55	67,05	76,65	64,58 a	57,79 a	60,89 a	
CV (%)	15,68			15,68			
		Superfície radicular (cm ² dm ⁻³)					
CT2	16,49 Ab	29,91 Aa	35,02 Aa	29,99	26,36	25,24	27,20 A
CT1	14,49 Aa	25,81 ABa	23,70 Aba	22,07	21,94	20,00	21,33 A
T	6,15 Ab	16,96 Bab	21,97 Ba	18,08	13,98	13,02	15,02 A
Média	12,37	24,23	26,96	23,38 a	20,76 ab	19,42 b	
CV (%)	25,12			25,12			
		Volume radicular (cm ³ dm ⁻³)					
CT2	0,565 Ab	1,420 Aa	1,600 Aa	1,375	1,110	1,100	1,195 A
CT1	0,459 Ab	1,095 ABa	1,039 Aba	1,016	0,803	0,775	0,864 AB
T	0,200 Ab	0,677 Bab	0,995 Ba	0,592	0,622	0,658	0,624 B
Média	0,408	1,064	1,211	0,994 a	0,845 a	0,844 a	
CV (%)	30,73			30,73			

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Os sistemas de manejo apresentaram diferença para massa seca radicular nas diferentes camadas de solo, com maiores valores de massa seca radicular no CT2 nas três camadas de solo. Novamente, isso está associado às melhorias na qualidade física do solo e menor compactação no manejo com controle de tráfego (ver item 4.1), devido à ausência de tráfego sobre a soqueira e na região do canteiro, obtidos com o ajuste da bitola do conjunto trator-transbordo e uso do piloto automático. Chan *et al.* (2006) e Collares *et al.* (2006, 2008) também observaram redução do crescimento radicular de culturas agrícolas, devido ao efeito da compactação do solo.

Foi observada massa seca radicular de 0,192 a 0,400 g dm⁻³ entre os sistemas de manejo (Tabela 14). Vasconcelos *et al.* (2003) encontraram massa seca de 1,33 g dm⁻³ em área de cana com colheita mecanizada, coletado 8 meses após plantio na camada de 0,00-0,20 m, no quinto ciclo produtivo. Otto *et al.* (2009) observaram valores médios de massa seca de cana

de 1,71 e 0,18 g dm⁻³ nas linhas de plantio e do rodado, respectivamente, na camada de 0,00-0,20 m colhidos 15 meses após plantio. Esses valores foram superiores aos encontrados nesse trabalho. Além do efeito de variedade, fertilidade do solo, condições de manejo e clima, a época de amostragem pode ter influenciado nos resultados, uma vez que as raízes foram amostradas logo após a colheita da cana, num período de senescência da cultura (SMITH *et al.*, 2005).

A massa seca e densidade radicular apresentaram aumento no sentido LR<C<LP para CT2, fato que não ocorreu para os sistemas de manejo CT1 e T, ou seja, os valores não diferiram entre as posições de amostragem, causados pelo tráfego de pneus do conjunto trator-transbordo sobre e/ou próximo à soqueira da cana no manejo sem controle de tráfego (Tabela 14). Otto *et al.* (2009) também notaram redução do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar a medida que se afastava da linha da soqueira e aproxima-se da entrelinha, causado pela maior compactação do solo e menores teores de nutrientes. Respostas das plantas à compactação do solo são mediadas por mudanças nas características e funcionamento das raízes (ALAMEDA *et al.*, 2012).

A densidade de raízes é um atributo importante para canaviais em condições de sequeiro, já que essa condição contribui para a alongação do sistema radicular principalmente em profundidade, contribuindo para reduzir a vulnerabilidade da cultura ao déficit hídrico (SMITH *et al.*, 2005). O tamanho e a distribuição do sistema radicular são fortemente afetados pela distribuição e disponibilidade de água no solo e pela presença de camadas impeditivas, interferindo na capacidade da cultura explorar o solo em camadas mais profundas (HAMZA; ANDERSON, 2005), o que pode diminuir a longevidade dos canaviais.

Nos três sistemas de manejo, a massa seca e a superfície radicular reduziram em profundidade. Isso ocorreu devido à menor estruturação do solo e disponibilidade de nutrientes em profundidade (Tabela 14). De acordo com Smith *et al.* (2005), a maior concentração da biomassa das raízes e da densidade radicular de cana ocorre na superfície, apresentando declínio exponencial com a profundidade. O sistema radicular da cana-de-açúcar no manejo com colheita mecanizada apresenta de 70-85% das raízes até 0,00-0,40 m de profundidade (ALVAREZ *et al.*, 2000; VASCONCELOS *et al.*, 2003; OTTO *et al.*, 2009). Evidências apontam atividade do sistema radicular da cana até 2,0 m de profundidade, contudo o crescimento pode continuar e atingir camadas mais profundas (SMITH *et al.*, 2005).

Além do menor desenvolvimento do sistema radicular promovido pela compactação do solo, podem ocorrer ainda modificações anatômicas e morfológicas (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 1998; BENGOUGH *et al.*, 2006; BERGAMIN *et al.*, 2010). O diâmetro radicular apresentou diferença entre os locais de amostragem para os três sistemas de manejo, com menores valores na linha do rodado (Tabela 14). Isso ocorreu devido a menor macroporosidade do solo e maior resistência interna na linha do rodado, o que limita o aumento em espessura do sistema radicular. Isto é coerente com considerações teóricas sobre condutividade hidráulica, que assume que raízes com largura menor de córtex têm menor resistência para o transporte de água do solo pelos vasos do xilema, evitando assim o déficit do suprimento de água e nutrientes na parte aérea (ALAMEDA *et al.*, 2012). Queiroz-Voltan *et al.* (1998) observaram efeito da compactação sobre a anatomia radicular da cana-de-açúcar, já que o aumento da compactação do solo alterou a espessura do córtex e do cilindro vascular, o que pode levar a diminuição do diâmetro radicular. Gemtos *et al.* (2000) notaram diminuição do comprimento e diâmetro radicular e do crescimento de plantas de beterraba afetadas pela compactação do solo relacionada a aplicação de pressão no solo de 200 kPa em condições experimentais.

Os resultados desse trabalho indicaram relação inversa entre o desenvolvimento do sistema radicular e a qualidade física do solo, assim à medida que reduziu a densidade e resistência do solo à penetração aumentou a massa seca, diâmetro, densidade, superfície e volume radicular (Tabela 15). Freddi *et al.* (2009) observaram redução da matéria seca e superfície radicular do milho com o aumento da resistência do solo à penetração, a partir de 1,5 MPa. Alameda *et al.* (2012) notaram decréscimo no comprimento, densidade e diâmetro radicular de tabaco com o aumento da densidade do solo.

A macroporosidade do solo não teve efeito sobre o desenvolvimento do sistema radicular, enquanto a microporosidade apresentou relação positiva com a massa seca, superfície e volume radicular e a porosidade total apresentou relação com todos as variáveis (Tabela 15). Isso está associado à boa estruturação que esse tipo de solo apresenta, assim os resultados expressaram a maior capacidade de retenção de água nos microporos e a ausência de limitações relacionadas a aeração, já que a macroporosidade foi superior a limitante ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em todas as situações (GRABLE; SIEMER, 1968; SILVA *et al.*, 1994). Ausência de

problemas no solo, associada à porosidade de aeração, indica uma boa qualidade física dos solos (ASGARZADEH *et al.*, 2010).

Tabela 15. Correlação de Spearman entre o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo (n=108)

Atributos	Sistema Radicular				
	Físicos	Massa Seca	Diâmetro	Densidade	Superfície
RP	-0,558**	-0,255**	-0,419**	-0,378**	-0,473**
Ds	-0,577**	-0,335**	-0,451**	-0,414**	-0,535**
Ma	0,108 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,050 ^{ns}	0,018 ^{ns}	0,082 ^{ns}
Mi	0,515**	0,166*	0,380**	0,440**	0,428**
PT	0,436**	0,337**	0,424**	0,429**	0,494**
DMP	0,526**	0,107 ^{ns}	0,296**	0,328**	0,340**
AGRI	0,524**	0,109 ^{ns}	0,306**	0,335**	0,344**
IEA	0,504**	0,100 ^{ns}	0,235*	0,294**	0,300**
TC	0,398**	0,035 ^{ns}	0,084 ^{ns}	0,218*	0,230*
IHO ⁽¹⁾	0,074 ^{ns}	0,194*	0,060 ^{ns}	0,022 ^{ns}	0,048 ^{ns}
IHO ⁽²⁾	0,061 ^{ns}	0,310**	0,022 ^{ns}	0,022 ^{ns}	0,058 ^{ns}
IHO ⁽³⁾	0,073 ^{ns}	0,334**	0,019 ^{ns}	0,043 ^{ns}	0,072 ^{ns}
IHO ⁽⁴⁾	0,078 ^{ns}	0,344**	0,033 ^{ns}	0,039 ^{ns}	0,073 ^{ns}

RP: resistência a penetração; Ds: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; PT: porosidade total; DMP: diâmetro médio ponderado; AGRI: agregados estáveis; IEA: índice de estabilidade de agregados; TC: teor de carbono orgânico; IHO: intervalo hídrico ótimo; ^{(1), (2), (3), (4)}: resistência a penetração limitante igual a 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa, respectivamente. * e **: Significativo a 1e 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo.

A estrutura e sua estabilidade influenciaram o desenvolvimento do sistema radicular, apresentando relação positiva com o diâmetro médio ponderado, agregados estáveis e índice de estabilidade de agregados (Tabela 15). Mesmo esses atributos não apresentando efeito significativo entre os tratamentos, o que demonstrou que pequenas alterações na estabilidade e estrutura do solo refletem no desenvolvimento do sistema radicular da cana na condição de sequeiro. O teor de carbono do solo apresentou relação positiva com a massa seca, superfície e volume radicular, devido sua importância na estruturação do solo e melhorando as características físicas e químicas do solo.

O IHO apresentou relação positiva apenas para o diâmetro radicular (Tabela 15). Em geral, à medida que aumentou a resistência à penetração limitante, aumentou o IHO e a

correlação com as variáveis relacionadas com o desenvolvimento radicular. Nas áreas de produção agrícola, restrições no solo ao desenvolvimento radicular são preocupantes, já que afetam o desenvolvimento da cultura e a produção comercial dos canaviais (SMITH *et al.*, 2005).

5. CONCLUSÕES

O sistema de manejo com controle de tráfego agrícola, baseado no ajuste da bitola do conjunto trator-transbordo para 3 m e uso do piloto automático, proporcionou a compactação na linha do rodado e preservou a qualidade física do solo na região da soqueira, local destinado ao crescimento do sistema radicular.

O intervalo hídrico ótimo e a avaliação estrutural do solo por análise de imagens foram sensíveis às alterações promovidas pelos sistemas de manejo agrícola, indicando maior limitação física na linha da planta e na região do canteiro no manejo sem controle de tráfego agrícola.

Os sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola propiciaram maior capacidade de suporte de carga na linha do rodado, além do tráfego de máquinas agrícolas nos solos com maior conteúdo de água do solo e uma menor resistência ao desenvolvimento radicular na linha de plantio, devido a menor pressão de preconsolidação.

Os sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola permitiram aumento na produtividade da cana em 18% e no rendimento de açúcar em 20%, contudo sem melhorias na qualidade tecnológica em relação ao manejo sem controle de tráfego.

O ajuste da bitola do conjunto trator-transbordo para 3,0 m e o uso de piloto automático promoveram o maior desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, em condição de sequeiro, em relação ao manejo sem controle de tráfego.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L.; ELONEN, P. Finnish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n.2-3, p.195-203, 1994.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part I - Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.73, n.2, p.145-160, 2003.

ALAMEDA, D.; ANTEN, N.P.R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.120, n.2, p.121-129, 2012.

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.K.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.4, p.653-659, 2000.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Hidroweb**: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 5 jan. 2012.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.335, n.1-2, p.229-244, 2010.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.507-514, 2005.

BAIO, F.H.R. **Metodologia para ensaio de sistemas de direcionamento via satélite em percursos retos e curvos**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2005.

BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K.; O’SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, London, v.48, n.4, p.593-601, 1997.

BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.63-70, 2012.

BENEDINI, M.S.; DONZELLI, J.L. Desmistificando a colheita mecanizada da cana crua. **Revista Coplana**, Guariba, v.7, n.42, p.26-28, 2007.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.57, n.2, p.437-447, 2006.

- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.3, p.299-305, 2010.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.975-983, 2008.
- BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.87, n.2, p.365-368, 1976.
- BOWLES, J.E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986. 218p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico da Agroenergia**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 160p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cana-de-açúcar: Terceiro levantamento – Janeiro/2011**. Brasília: MAPA/CONAB, 2011a. 19p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil 2010/2011 a 2020/2021**. Brasília: MAPA/AGE, 2011b. 48p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/SERVICOS/USINAS_DESTILARIAS/USINAS_CADASTRADAS/UPS_01-04-2010_0.PDF>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n.1-2, p.103-121, 2006.
- BRAUNACK, M.V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n.1, p.86-102, 2006.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, n.4, p.519-524, 1990.
- CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.3, p.759-771, 2011.

- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132p.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p.
- CAMPOS, C.M.; MILAN, M.; SIQUEIRA, L.F.F. Identificação e avaliação de variáveis críticas no processo de produção da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.554-564, 2008.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.527-538, 1998.
- CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; TORMENA, C.A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, p.1541-1549, 2011.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, 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**, Amsterdam, v.73, n.2, p.161-174, 2003.
- CHAMEN, W.C.T.; VERMEULEN, G.D.; CAMPBELL, D.J.; SOMMER, C. Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.4, p.303-318, 1992.
- CHAMEN, W.C.T.; AUDSLEY, E. The economics of traffic control in combinable crops. **Landwards**, Bedford, v.52, n.3, p.24-27, 1997.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S.; PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n.1, p.13-21, 2006.
- COLLARES, J.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, 2008.
- COLLARES, J.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.
- CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. 5.ed. Piracicaba: CONSECANA, 2006. 112p.

- COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 132 p. Tese (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1999.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferralic horizons. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.256-263, 2005.
- COSTA, J.A.B.; PONCIANO, N.J.; SOUZA, P.M. Avaliação da sistemática de cálculos para efeito de pagamento de cana pelos açúcares totais recuperáveis (ATR) nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo. **Inter Science Place**, Belo Horizonte, v.2, n.7, p.1-21, 2009.
- COSTANTINI, E.A.C.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N.; BARBETTI, R. Micromorphological characterization and monitoring of internal drainage in soils of vineyards and olive groves in central Italy. **Geoderma**, Amsterdam, v.131, n.3-4, p.388-403, 2006.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.especial, p.2629-2637, 2008.
- DEON, M.D.; GOMES, T.M.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R.; SILVA, E. Produtividade e qualidade da cana-de-açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.10, p.1149-1156, 2010.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.
- DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Tese de Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J.A. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curve. **Soil Technology**, Cremligen, v.8, n.2, p.139-151, 1995.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J.A. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-182, 1996.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000. v.1, p.55-95.
- DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Soil and crop response to zero- and conventional-traffic systems for winter barley in Scotland, 1982-1986. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.18, n.1-2, p.1-26, 1990.

- DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. **Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores**. São Paulo: DIEESE, 2007. 34p.
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil Water Retention Curve (SWRC)** software. versão 3.00 beta. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 2006. 306p.
- FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.1007-1013, 2006.
- FENNER, P.T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 p. Tese (Tese de Livre Docência) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1999.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.627-636, 2007.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II – Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.805-818, 2009.
- GAN-MOR, S.; CLARK, R.L.; UPCHURCH, B.L. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.59, n.1, p.31-38, 2007.
- GEMTOS, T.A.; GOULAS, C.; LELLIS, T. Sugar beet genotype response to soil compaction stress. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v.12, n.3-4, p.201-209, 2000.
- GOERING, C.F. **Engine and Tractor Power**. St. Joseph, MI, USA: ASAE. 1992.
- GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Amsterdam, v.36, n.6, p.2086-2097, 2008.
- 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**, Madison, v.32, n.2, p.180-186, 1968.
- HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15–26-atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.19, n.1, p.20-25, 1955.

- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. (Eds.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.
- HAMMEL, J.E. Effect of high-axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest USA. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.29, n.2-3, p.195-203, 1994.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.
- HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A.S. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Araras: CCA/UFSCar, 2008. 30p.
- HORN, R.; DOMZZAI, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1-2, p.23-36, 1995.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, Rio de Janeiro, v.24, n.12, p.1-82, 2012.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.1, p.17-24, 2004.
- JONGERIUS, A.; HEINTZBERGER, G. **Methods in soil micromorphology**: a technique for the preparation of large thin sections. Wageningen: Soil Survey Institute, 1975. 48p. (Soil Survey Papers, 10).
- JORNALCANA. **Os impressionantes números do setor sucroenergético - Safra 2008/09**. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/Conheca%20o%20Setor.asp>>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, J.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855, 2009.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.2, p.191-205, 2004.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

- KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. **Agricultural Systems**, Oxford, v.104, n.7, p.513-521, 2011.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-662.
- LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. **Theoretical Evaluation on the Feasibility of Controlled-Traffic Farming (CTF). Using Wide-Span Implement Carriers (WSIC) for Canadian Agriculture**. CSAE - Paper N° 03-233. Montréal, Québec, Canada: CSAE/SCGR. 2003.
- LAMANDÉ, M.; HALLAIRE, V.; CURMIA, P.; PÉRÈS, G.; CLUZEAU, D. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. **Catena**, Amsterdam, v.54, n.3, p.637-649, 2003.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNO, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.
- LARRAHONDO, J.E.; CASTILLO, E.F.; PERALTA, Y.; JARAMILLO, A.; PALMA, A.; BRICEÑO, C.; GIRALDO, F. Impact of extraneous matter on post-harvest sucrose losses and quality parameters in sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v.11, n.2, p.171-175, 2009.
- LAVANHOLI, M.G.D.P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico & Fundação IAC, 2008. p. 697-722.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.
- LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.S. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.677-684, 2005.

- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.217-223, 2006a.
- LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; SANTOS, M.C.; COOPER, M.; ROMERO, R.E. Micromorphology and image analysis of a hardsetting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.132, n.3-4, p.416- 426, 2006b.
- LINGLE, S.E., WIEGAND, C.L. Soil salinity and sugarcane juice quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.54, n.2-3, p.259-268, 1997.
- MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JÚNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar: Produção e industrialização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 166p.
- MATERECHERA, S.A. Tillage and tractor traffic effects on soil compaction in horticultural fields used for peri-urban agriculture in a semi-arid environment of the North West Province, South Africa. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.1, p.11-15, 2009.
- McHUGH, A.D.; TULLBERG, J.N.; FREEBAIRN, D.M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, n.1, p.164-172, 2009.
- McPHEE, J.E.; BRAUNACK, M.V.; GARSIDE, A.L.; REID, D.J.; HILTON, D.J. Controlled traffic for irrigated double cropping in semi-arid tropical environment: Part 2, tillage operations and energy use. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.60, n.1, p.183-189, 1995.
- MEYER, J.H.; WOOD, R.A. The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: A review. **Proceedings South African Sugar Technologists' Association**, Mt Edgecombe, v.75, n.1, p.242-247, 2001.
- MOLIN, J.P.; CARREIRA, P.T. Metodologia para ensaios cinemáticos de receptores de GNSS utilizando um GPS RTK como referência. **Revista Brasileira de Agroinformática**, Lavras, v.8, n.1, p.53-62, 2006.
- MOLIN, J.P.; OLIVEIRA, T.C.A.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. No piloto automático. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.8, n.80, p.6-9, 2008.
- MUNKHOLM, L.J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, Amsterdam, v.167-168, n.1, p.236-246, 2011.
- MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publishers, 1986. 149p.
- NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M.. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.71, n.2, 109-119, 2003.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A.T.; CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

OLIVEIRA, J.C.M.; VAZ, C.M.P.; REICHARDT, K. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, n.1, p.50-55, 1995.

OLIVETTE, M.P.A.; NACHILUK, K.; FRANCISCO, V.L.F.S. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas, 1996-2008. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.40, n.2, p.42-59, 2010.

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.3, p.601-611, 2009.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.1, p.201-210, 2011.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.403-415, 2011.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.2, p.131-143, 2004.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, M.C.B.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A.; MURATA, I.M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.911-917, 2004.

PIRES, L.F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F.A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; DIAS, N.M.P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, Amsterdam, v.72, n.2, p.297-304, 2008.

PIRON, D.; PÉRÈS, G.; HALLAIRE, V.; CLUZEAU, D. Morphological description of soil structure patterns produced by earthworm bioturbation at the profile scale. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v.50, n.2, p.83-90, 2012.

QINGJIE, W.; HAO, C.; HONGWEN, L.; WENYING, L.; XIAOYAN, W.; McHUGH, A.D.; JIN, H.; HUANWEN, G. Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, n.1, p.192-197, 2009.

- QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PRADO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.1, p.49-55, 1998.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.102, n.2, p.242-254, 2009.
- RICHARD, G.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J.; BOIFFIN, J.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silt soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, London, v.52, n.1, p.49-58, 2001.
- RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302p.
- ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.
- SAFFIH-HDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, n.1, p.96-103, 2009.
- SANTOS, D.H.; SILVA, M.A.; TIRITAN, C.S.; FOLONI, J.S.S.; ECHER, F.R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.5, p.443-449, 2011.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.844-851, 1996.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, F.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.3, p.783-791, 2011.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação 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, n.4, p.1419-1427, 2008.
- SEWELL, A.J.; YULE, I.J. **Multirole power units: farm equipment of the future?** St. Joseph: ASAE. 1996. (ASAE Paper No. 96-1052).
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, 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**, Dordrecht, v.184, n.2, p.323-329, 1996.

SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M.; GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, Amsterdam, v.167-168, n.1, p.61-70, 2011.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.2, p.313-319, 1997.

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. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.3, p.384-401, 2006.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MASQUETTO, B.J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.617-615, 2007.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAILO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.2, p.265-270, 2009.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, n.2, p.239-249, 2000.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, n.2-3, p.169-183, 2005.

SNEDECOR, G.W.; COCHARAN, W.G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.391-399.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

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

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

TAINA, I.A.; HECK, R.J.; ELLIOT, T.R.; SCAIFF, N. Micromorphological and X-ray μ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v.158, n.3-4, p.110-119, 2010.

TAYLOR, H.M. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; van den BERG, G.E. (Eds.). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE, 1971. p.292-305.

TAYLOR, J.H. Development and benefits of vehicle gantries and controlled-traffic systems. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Eds.). **Soil Compaction in Crop Production**. cap.22. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1994, p.521-537.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.573-581, 1998.

TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L.F.C. Tráfego controlado: Pneus e Compactação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.41, n.1, p.22-25, 2005.

TULLBERG, J.N., YULE, D.F., MCGARRY, D. Controlled traffic farming - from research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.97, n.2, p.272-281, 2007.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Entraves limitam avanço de usinas no mercado de carbono**. Publicado em: 26 jul. 2010. Disponível em:

<<http://www.unica.com.br/clipping/show.asp?cppCode=D9681148-B4FE-46D6-861B-C3E4DA18E74B>>. Acesso em: 20 abril 2012.

VAN GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. 285p.

VAN ZUYDAM, R.P. A driver's steering aid for an agricultural implement, based on an electronic map and Real Time Kinematic DGPS. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v.24, n.3, p.153-163, 1999.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.849-858, 2003.

VERMEULEN, G.D., KLOOSTER, J.J. The potential of a low ground pressure traffic system to reduce soil compaction on a clayey loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.4, p.337-358, 1992.

VERMEULEN, G.D.; MOSQUERA, J. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.102, n.1, p.126-134, 2009.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.213-223, 2011.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v.37, n.1, p.29-38, 1934.

WAY, T.R.; BAILEY, A.C.; RAPER, R.L.; BURT, E.C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **Transactions of the American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, n.3, p.669-674, 1995.

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

WIEDENFELD, B. Effects of irrigation water salinity and electrostatic water treatment for sugarcane production. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, n.1, p.85-88, 2008.

WILSON, J.N. Guidance of agricultural vehicles - a historical perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.25, n.1, p.3-9, 2000.

WOOD, R.K.; REEDER, R.C.; MORGAN, M.T.; HOLMES, R.G. Soil physical properties as affected grain cart traffic. **Transactions of the American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.36, n.1, p.11-14, 1993.

7. ANEXOS



Área do experimento.



Colheita mecanizada.



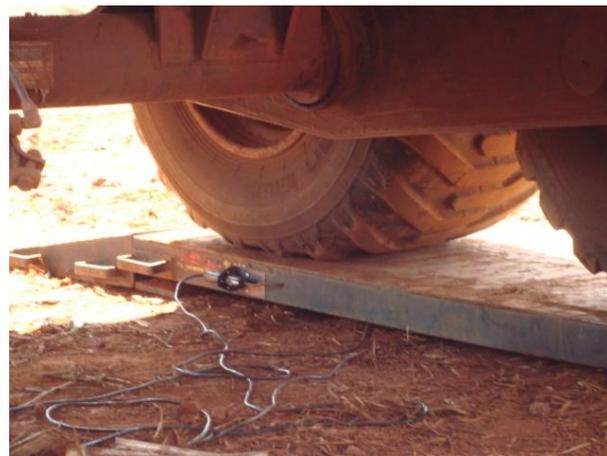
Trator com bitola de 2 m.



Trator e transbordo com bitola de 3 m.



Pesagem do transbordo.



Detalhe na pesagem do transbordo.



Piloto automático.



Área experimental após colheita.



Trincheira para coleta de amostras de solo.



Amostragem de solo.



Preparo do local para amostragem.



Amostra indeformada.



Coleta de raízes por meio de monólitos.



Monólitos para análise estrutural por imagens .



Final de mais um dia de trabalho.