



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

DIEGO ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN

**ATRIBUTOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO
RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR COM DIFERENTES
ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO E CONTROLE DE
TRÁFEGO**

CAMPINAS

2018

DIEGO ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN

**ATRIBUTOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO
RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR COM DIFERENTES
ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO E CONTROLE DE
TRÁFEGO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de água e solo.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Co-orientador: Denizart Bolonhezi

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO DIEGO
ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN, E
ORIENTADO PELO PROF. DR. ZIGOMAR
MENEZES DE SOUZA.

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2016/14751-6

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-505>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Ag93a Aguilera Esteban, Diego Alexander, 1986-
Atributos do solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar com diferentes espaçamentos de plantio e controle de tráfego / Diego Alexander Aguilera Esteban. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Física do solo. 2. Compactação do solo. 3. Cana-de-açúcar - Mecanização. 4. Cana-de-açúcar - Colheita. 5. Sistema radicular. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Soil attributes and root growth of sugar cane with different row spacings and controlled traffic

Palavras-chave em inglês:

Soil physics

Soil compaction

Cane sugar - Mechanization

Cane sugar - Harvest

Root system

Área de concentração: Água e Solo

Títuloção: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Isabella Clerici de Maria

Cássio Antonio Tormena

Data de defesa: 23-02-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Diego Alexander Aguilera Esteban**, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de fevereiro de 2018, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador
FEAGRI/UNICAMP

Dra. Isabella Clerici de Maria – Membro Titular
IAC/Campinas

Dr. Cássio Antonio Tormena – Membro Titular
UEM/Maringá

Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do discente.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Carlos Júlio e a minha mãe Luz Edilma pela lição de vida, dedicação, sacrifícios, incentivo e sabedoria, de quem herdei o amor pelo campo.

A meus irmãos Gloria Patrícia, Ana Maria, Fernando, Juan David e Carlos Andrés pelo apoio, auxílio e compreensão, que me fortalecem a cada dia.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, força, entendimento e oportunidades dadas na minha vida que me guiaram para concluir esse sonho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza pelo estímulo, ensinamentos transmitidos, confiança e exemplo de profissionalismo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de mestrado por meio do processo 2016/14751-6.

A “*Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*” (CORPOICA) pela concessão da licença de estudo, pela experiência adquirida nos anos de trabalho ao lado de excelentes pesquisadores e dos agricultores colombianos, por encaminhar meu interesse na área de solos e permitir-me continuar minha formação acadêmica na procura de ser um pesquisador integral.

A Usina Santa Fé localizada no município de Nova Europa pela parceria feita para a realização da pesquisa, pela disponibilização da área, de equipamentos, logística e capital humano.

Aos professores Edson Eiji Matsura (UNICAMP) e Reginaldo Barbosa da Silva (UNESP) pelas contribuições dadas na minha formação profissional.

Ao professor Cristiano Alberto de Andrade (EMBRAPA) pela orientação e apoio nas análises estatísticas.

Aos meus amigos e companheiros da FEAGRI Lenon Lovera, Elizeu de Souza Lima, Ingrid Nehmi de Oliveira, Fabio Henrique Barbosa, Camila Viana Vieira Farhate, Maria Fernanda Magioni e Renato Lopes, pela amizade, ajuda, ensino, jornadas de trabalho e, sobretudo por me fazer sentir em família.

A meu amigo Gustavo Perdomo e sua esposa Kelly por abrir-me as portas para iniciar esse caminho, pelos conselhos e amizade.

Aos técnicos do laboratório de solos da FEAGRI Célia Panzarin Gonçalves e Antônio Javarez Junior pela ajuda dada na realização das análises dessa pesquisa.

Às alunas de iniciação científica Náíade de Paula Ribeiro e Camila Sousa pela colaboração nas análises de raiz e resistência tênsil de agregados.

Aos estagiários, alunos de bolsa trabalho e de ensino médio que passaram pela equipe do professor Zigomar: Felipe, Gabriel, Natiele, Marcos, Daniel, Leonardo e Michael.

A Kátia pela ajuda, apoio, incentivo e fortaleza para materializar esse sonho.

Aos meus amigos de Corpoica, Gilberto Múrcia, Júlio Ramirez, Iván Chacón, Javier Torres, Edwin Villagran, Óscar Mendieta, Adriana Carolina Peña e Margareth Santander, pelo apoio e respaldo dado para cumprir essa etapa da minha vida.

A todos aqueles que com sua contribuição fizeram possível a realização deste trabalho, agradeço de coração.

Muito obrigado!

RESUMO

O sistema de produção mecanizado da cana-de-açúcar, com ênfase na colheita de cana crua, promove o tráfego intenso sobre o solo, resultando na sua compactação e consequente alteração nos atributos físicos, com reflexos no desenvolvimento radicular e na produtividade da cultura. Com a necessidade de minimizar os efeitos gerados pela compactação, surge o sistema de manejo com controle de tráfego agrícola assistido com piloto automático, onde as cargas dos pneus das máquinas são confinadas em linhas de tráfego permanentes a favor de evitar tráfego na maior parte do campo. O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações dos atributos físico e mecânicos do solo e seus efeitos no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar, com diferentes espaçamentos de plantio e em sistema de manejo com controle de tráfego, após terceira e quarta colheita mecanizada. A pesquisa foi realizada na Usina Santa Fé, no Município de Nova Europa-SP, num Latossolo Vermelho. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com quatro repetições e três tratamentos: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m entre as linhas e colhida sem controle de tráfego; T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m e colhida em sistema de controle de tráfego; T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colhida com controle de tráfego. As amostragens de solo foram realizadas na linha de plantio, no canteiro e na linha do rodado, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m. Os atributos físicos: densidade do solo, resistência do solo à penetração, porosidade, estabilidade e resistência tênsil de agregados, assim como a produtividade da cultura, foram avaliados nos dois anos de estudo. A retenção de água no solo, o carbono orgânico total, a capacidade de suporte de carga e o sistema radicular foram avaliados somente após a terceira colheita. A capacidade de suporte de carga do solo foi avaliada na linha do rodado e no canteiro, na camada superficial de 0,00-0,10 m e na camada de máxima resistência do solo à penetração, identificada na camada de 0,20-0,30 m. Os sistemas de manejo com controle de tráfego preservaram a qualidade física do solo na região do canteiro e da linha de plantio (menor densidade do solo e maior macroporosidade), e proporcionaram maior compactação na linha do rodado. A pressão de preconsolidação nos manejos T2 e T3 foi maior na linha do rodado, enquanto no manejo T1, foi maior no canteiro. O uso do controle de tráfego promoveu maior desenvolvimento do sistema radicular, com incremento da biomassa seca de 17,9% no T2 e de 18,5% no T3 em relação ao manejo sem controle de tráfego. Os manejos com controle de tráfego apresentaram ganhos na produtividade de 9 e 12% no T2 e, de 21 e 18% no T3 na terceira e quarta colheita, respectivamente, em relação ao manejo sem controle de tráfego.

Palavras-chave: Compactação do solo; estrutura do solo; capacidade de suporte de carga; piloto automático; friabilidade.

ABSTRACT

Mechanized sugar cane production system, especially green cane harvesting, generates intense traffic over the soil, leads to soil compaction and consequent alteration of its physical attributes, reflecting on the root growth and crop productivity. With the need to minimize compaction effects, a management system with controlled traffic assisted with automatic steering emerges, in which machine wheel loads are confined into permanent traffic lines in order to avoid traffic at most part of the field. This study aimed to evaluate changes in the soil physical and mechanical attributes, and their effects on root system growth and sugar cane productivity, planted with different row spacings and controlled traffic management systems, after the third and fourth mechanical harvest. The research was carried out on an Oxisol at the Santa Fé Sugar Mill [Usina Santa Fé], in the city of Nova Europa, state of São Paulo. The experiment was implemented with a randomized block design, with four replications and three treatments: T1 - sugar cane planted with single row spacing (1.5 m) and harvested without controlled traffic; T2 - sugar cane planted with single row spacing (1.5 m) and harvested with controlled traffic; and T3 - sugar cane planted with double combined row spacing (1.50 x 0.90 m) and harvested with controlled traffic. Soil samples were collected at the plant row, seedbed and inter-row center, at the layers 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, 0.30-0.40, 0.40-0.50, 0.50-0.70 and 0.70-1.00 m. The physical attributes of bulk density, soil penetration resistance, soil porosity, aggregate stability and tensile strength of aggregates, as well as the crop yield, were evaluated in the two years of the study. Soil water retention, total organic carbon, load-bearing capacity and root system were evaluated only after the third harvest. The load-bearing capacity was assessed at the inter-row center and seedbed, at the superficial layer of 0.00-0.10 m and at the maximum penetration resistance layer of 0.20-0.30 m. The management systems with controlled traffic preserved the soil physical quality at the seedbed and plant row (lower bulk density and higher macroporosity), and increased soil compaction at the inter-row center. Preconsolidation pressure in the T2 and T3 conditions was higher at the inter-row center, while in T1, it was higher at the seedbed. Controlled traffic promoted higher root system growth, with 17.9% increase of dry matter in T2 and 18.5% in T3 in relation to the management system without controlled traffic. The adoption of controlled traffic resulted in crop yield increases of 9 and 12% in T2, and 21 and 18% in T3 at the third and fourth harvest, respectively, in relation to management without controlled traffic.

Keywords: Soil compaction; soil structure; load-bearing capacity; automatic steering; friability.

RESUMEN

El sistema de producción mecanizado de la caña de azúcar, con énfasis en la cosecha de caña cruda, promueve el tráfico intenso sobre el suelo generando compactación y efectos perjudiciales en sus atributos físicos, con repercusiones en el desarrollo radicular y en la productividad del cultivo. Con el propósito de minimizar esos efectos, surge el sistema de manejo con tráfico controlado y piloto automático, en donde las presiones generadas en el suelo por el tráfico de las máquinas se concentran en líneas permanentes en una pequeña área, con el fin de no tener tráfico en la mayoría del campo. Este estudio tuvo como objetivo evaluar alteraciones en los atributos físicos y mecánicos del suelo y su efecto en el desarrollo del sistema radicular y en la productividad de la caña de azúcar, sembrada en diferentes espaciamientos entre surcos y en sistema de manejo con tráfico controlado, durante la tercera y cuarta cosecha mecanizada. La investigación se realizó en un Oxisol en el ingenio Santa Fé, en el municipio de Nueva Europa, SP-Brasil. El diseño experimental fue de bloques al azar, con cuatro repeticiones y tres tratamientos: T1 = caña de azúcar sembrada en surcos simples (1,5 m) y cosechada sin tráfico controlado; T2 = caña de azúcar sembrada en surcos simples (1,5 m) y cosechada con tráfico controlado; T3 = caña de azúcar sembrada con surcos dobles (1,5 x 0,9 m) y cosechada con tráfico controlado. El muestreo del suelo fue realizado en la línea de siembra, en el cantero y en la línea de tráfico de las máquinas; en las profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m. En los dos años de estudio fue evaluada la productividad del cultivo y las propiedades físicas del suelo: densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad, estabilidad y resistencia tensil de los agregados. La retención de agua del suelo, carbono orgánico total, la capacidad de soporte de carga y el sistema radicular, fueron evaluados solamente en la tercera cosecha. La capacidad de soporte de carga del suelo fue modelada en la línea de tráfico y en el cantero, en la profundidad superficial de 0,00-0,10 m y en la profundidad de máxima resistencia del suelo a la penetración, identificada en la profundidad de 0,20-0,30 m. Los sistemas de manejo con tráfico controlado preservaron la calidad física del suelo en la región del cantero y de la línea de siembra (menor densidad aparente y mayor macroporosidad), y concentraron la compactación del suelo en la línea de tráfico. La presión de preconsolidación en los tratamientos T2 y T3 fue mayor en la línea de tráfico, mientras que en T1 fue mayor en el cantero. El uso de tráfico controlado promovió mayor desarrollo del sistema radicular, con incremento de la biomasa seca de raíces de 17,9% en T2 y de 18,5% en T3, en relación al manejo sin tráfico controlado. La adopción del tráfico controlado generó aumento de la productividad de 9 y 12% en T2 y de 21 y 18% en T3, para la tercera y cuarta cosecha, respectivamente, en relación al manejo sin tráfico controlado.

Palabras clave: Compactación del suelo; estructura del suelo; capacidad de soporte de carga; piloto automático; friabilidad.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da área experimental na Usina Santa Fé, no município de Nova Europa, estado de São Paulo, Brasil.....	22
Figura 2. Temperatura média, precipitação e balanço hídrico, nos períodos da terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar, obtidos em estação meteorológica localizada no município de Ibitinga, estado de São Paulo, Brasil.	23
Figura 3. Esquema da área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. A = croqui do experimento. B = espaçamento das linhas de plantio no tratamento com espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2). C = espaçamento das linhas de plantio no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3).	27
Figura 4. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar na área experimental. A = conjunto colhedora, trator e transbordo. B = controle do sistema de piloto automático.....	28
Figura 5. Avaliações biométricas da cana-de-açúcar na área experimental. A = corte e limpeza da cana para a pesagem e medição de comprimento. B = medição do diâmetro de colmo.....	29
Figura 6. Avaliação da resistência do solo à penetração na área experimental. A = manipulação do penetrômetro de impacto de Stolf. B = amostragem de solo para determinação da umidade.	30
Figura 7. Amostragem do solo deformada e indeformada na área experimental. A = trincheira de amostragem. B = coleta das amostras indeformadas em anéis volumétricos e deformadas para determinação dos atributos físicos do solo.	31
Figura 8. Local de amostragem de solo nos tratamentos com espaçamentos simples (T1 e T2). LR = linha do rodado, C = canteiro, LP = linha de plantio.	32
Figura 9. Local de amostragem de solo no tratamento com espaçamento duplo combinado (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla.	32
Figura 10. Ensaio de resistência tênsil de agregados. A = dinamômetro IMPAC. B = detalhe da fratura do agregado.....	34
Figura 11. Coleta de monólitos de solo para a avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar até 1,0 m de profundidade na área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil.....	35
Figura 12. Esquema de amostragem do solo e dos monólitos para avaliação do sistema radicular. A) nos tratamentos de espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2); B) no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. M1, M2 e M3 = dimensões dos monólitos para as profundidades de 0,00-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, respectivamente. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem dos monólitos.	36

- Figura 13. Coleta de amostras de solo indeformadas para avaliação da capacidade de suporte de carga no solo localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. LR = linha do rodado; C = canteiro. 38
- Figura 14. Esquema de amostragem do solo e dos monólitos para avaliação do sistema radicular. A) nos tratamentos de espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2); B) no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. M1, M2 e M3 = dimensões dos monólitos para as profundidades de 0,00-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, respectivamente. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem dos monólitos. 63
- Figura 15. Valores médios da resistência do solo à penetração após a terceira colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016). Letras maiúsculas comparam as camadas e letras minúsculas comparam os locais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). CV = coeficiente de variação. 68
- Figura 16. Valores médios da resistência do solo à penetração após a quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2016/2017). Letras maiúsculas comparam as camadas e letras minúsculas comparam os locais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). CV = coeficiente de variação. 69
- Figura 17. Distribuição da biomassa seca radicular (BSR) da cana-de-açúcar, variedade RB867515, após terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem. Dados em porcentagem representam a porcentagem acumulada para cada local. 72
- Figura 18. Variação dos atributos do sistema radicular: densidade radicular (DR), volume radicular (VR), área radicular (AR) e comprimento radicular total (CRT) da cana-de-açúcar, variedade RB867515, após terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio. As barras representam o erro padrão da média. 73
- Figura 19. Variação dos atributos densidade radicular (DR), volume radicular (VR), área radicular (AR) e comprimento radicular total (CRT) da cana-de-açúcar, variedade RB867515 após a terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego em camadas de solo até 1,0 m de profundidade. A barras representam o erro padrão da média. 74
- Figura 20. Comprimento radicular (CR) por classes por diâmetro (DiR) após terceira colheita nos diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego nas camadas de solo até 1,0 m de profundidade. A barras representam o erro padrão da média. 75
- Figura 21. Esquema de coleta de amostras de solo indeformadas para avaliação da capacidade de suporte de carga no solo de um Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio. 88

Figura 22. Limites e regiões de consistência do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m, na área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. LL = limite de liquidez; LPL = limite de plasticidade; LC = limite de contração.....91

Figura 23. Deformação do solo (ϵ) e índice de compressão (m) em função da densidade do solo (D_s) para todos os tratamentos, locais e camadas avaliadas, para um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar após terceira colheita sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. ** Modelo estatisticamente significativo a $p < 0,01$; $n = 240$91

Figura 24. Deformação do solo (ϵ) e índice de compressão (m) em função do teor de água no solo (U), para todos os tratamentos, locais e camadas avaliadas, para um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar após terceira colheita sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. ** Modelo estatisticamente significativo a $p < 0,01$; $n = 240$92

Figura 25. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo em função do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distrófico para os tratamentos sem e com controle de tráfego após terceira colheita da cana-de-açúcar. A) na linha de rodado (LR) e na camada de 0,00-0,10 m. B) na linha de rodado e na camada de 0,20-0,30 m. C) no canteiro (C) e na camada de 0,00-0,10 m. D) no canteiro (C) e na camada de 0,20-0,30 m. LPL = limite de plasticidade; LC = limite de contração.....95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização física e granulométrica de um Latossolo Vermelho distrófico antes da implantação da área experimental no município de Nova Europa-SP, Brasil.....	24
Tabela 2. Distribuição da produção e área coletada de cana-de-açúcar no Brasil, safra 2016/2017.....	41
Tabela 3. Caracterização física e granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....	62
Tabela 4. Resistência do solo à penetração e teor de água no solo após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos, locais e camadas de amostragem.....	67
Tabela 5. Densidade do solo e macroporosidade após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos, locais e camadas de amostragem.....	70
Tabela 6. Atributos biométricos e produtividade na terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar, variedade RB867515, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.....	76
Tabela 7. Caracterização física do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na área experimental no município de Nova Europa-SP, Brasil.....	86
Tabela 8. Atributos físicos e índice de compressão de um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.....	90
Tabela 9. Coeficientes a e b, dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p=10^{(a+bU)}$] em função da umidade gravimétrica U (kg kg ⁻¹) para um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.....	93
Tabela 10. Teste de significância da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, em função da umidade gravimétrica para um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS

- AR: Área radicular
- BSR: Biomassa seca de raízes
- C: Canteiro
- CAD: Capacidade de água disponível
- CL: Canteiro da linha dupla
- COT: Carbono orgânico total
- CR: Comprimento radicular
- CSCS: Capacidade de suporte de carga do solo
- DR: Densidade radicular
- DiR: Diâmetro radicular
- Ds: Densidade do solo
- DMP: Diâmetro médio ponderado
- IEA: Índice de estabilidade de agregados
- LP: Linha de plantio
- LR: Linha do rodado
- MaP: Macroporosidade
- MiP: Microporosidade
- PM: Ponto médio da linha dupla
- PT: Porosidade total do solo
- RSP: Resistência do solo à penetração
- RTA: Resistência tênsil do agregado
- VR: Volume radicular

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 HIPÓTESE DO ESTUDO	21
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Geral	21
1.3.2 Específicos.....	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS GERAIS	22
1.5.1 Localização do experimento, caracterização e histórico da área.....	22
1.5.2 Variedade da cana-de-açúcar.....	25
1.5.3 Delineamento experimental e tratamentos	26
1.5.4 Colheita das parcelas experimentais.....	27
1.5.5 Análises realizadas	28
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
2.1 PANORAMA DA CULTURA CANAVIEIRA	40
2.2 MECANIZAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	42
2.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	45
2.4 CONTROLE DE TRÁFEGO E SISTEMA DE PILOTO AUTOMÁTICO.....	49
2.5 ESPAÇAMENTOS EM CANA-DE-AÇÚCAR.....	52
2.6 SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR	53
CAPÍTULO III – COMPACTAÇÃO DO SOLO, SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS E CONTROLE DE TRÁFEGO	57
RESUMO.....	57
3.1 INTRODUÇÃO	59
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	61
3.2.1 Caracterização da área e delineamento experimental.....	61
3.2.2 Avaliações realizadas	62
3.2.2.1 Amostragem do solo.....	62
3.2.2.2 Atributos do solo	64
3.2.2.3 Avaliação do sistema radicular.....	65

3.2.2.4	Avaliações biométricas e produtividade.....	66
3.2.3	Análises dos resultados	66
3.3	RESULTADOS.....	66
3.3.1	Atributos físicos do solo.....	66
3.3.2	Desenvolvimento do sistema radicular.....	71
3.3.3	Produtividade e variáveis biométricas da cana-de-açúcar.....	75
3.4	DISCUSSÃO	76
3.5	CONCLUSÕES	81
CAPÍTULO IV - CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB CONTROLE DE TRÁFEGO.....		82
RESUMO.....		82
4.1	INTRODUÇÃO	84
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	86
4.3	RESULTADOS	90
4.4	DISCUSSÃO	96
4.5	CONCLUSÕES	99
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICES		112

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das principais culturas da economia brasileira, com uma área de 9,05 milhões de hectares na safra 2016/2017, produção de 657,18 milhões de toneladas e com rendimento médio de 72,62 Mg ha⁻¹. O estado de São Paulo concentra a maior produção de cana-de-açúcar com 369,9 milhões de toneladas (56,3%) na mesma safra (CONAB, 2017). Em termos de ocupação de área, a cana-de-açúcar é a terceira lavoura mais cultivada no país depois da soja e do milho (IBGE, 2016).

Entretanto a produção de cana-de-açúcar tem gerado problemas ambientais e socioeconômicos. Desses, destaca-se a queima antecessora à colheita quando realizada manualmente. Com isso, em setembro de 2002, no estado de São Paulo foi aprovada a Lei Estadual nº 11.241, que estipula a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar, com o prazo máximo para o fim desta atividade até 2021 nas áreas mecanizáveis e em 2031 para áreas não mecanizáveis. No entanto, com o intuito de acelerar o processo de eliminação dessa queima, foi assinado o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista, em agosto de 2007, no qual a prática da queima da palha da cana devia ser gradativamente reduzida até 2014 em áreas mecanizáveis, e até 2017 em áreas não mecanizáveis (RONQUIM, 2010; FARESP, 2015). Desse modo, a eliminação das queimadas promoveu a modernização da colheita mecanizada de cana crua.

As fases de produção do cultivo da cana-de-açúcar envolvem um grande número de operações desde o preparo para o plantio até a colheita prevista uma vez por ano. O emprego de máquinas facilita as operações em campo, aumenta os rendimentos e a longo prazo reduz os custos de produção. No entanto, o tráfego afeta o solo gerando problemas de compactação. Por exemplo, as plantadoras que distribuem as mudas nos sulcos têm a capacidade de plantar, no máximo duas linhas de cada vez; enquanto na colheita a máquina empregada tem capacidade de colher apenas uma linha de cana-de-açúcar. Esses fatos implicam, que para concluir o plantio e a colheita, deva ser trafegada uma grande área podendo ainda ocorrer algum tráfego próximo à linha de cultivo ou ocasionalmente diretamente sobre a linha (GARSIDE *et al.*, 2009; NYKO *et al.*, 2013).

A produtividade da cultura depende de um equilíbrio entre as condições do solo necessárias para o crescimento das plantas e para a operação das máquinas. As condições do solo apresentam influência direta nas reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta. As plantas precisam de condições friáveis, de boa aeração e abastecimento de água,

ao mesmo tempo as operações de máquinas requerem condições compactadas para tração e para suportar as cargas impostas (BRAUNACK e McGARRY, 2006).

Assim, um dos principais efeitos negativos da mecanização agrícola é a degradação dos atributos físicos do solo, principalmente com a geração de compactação no solo, resultando em condições desfavoráveis na estrutura do solo, com redução da porosidade, incremento da densidade e da resistência à penetração de raízes e, redução na capacidade de retenção de água, provocando efeitos adversos na produção agrícola e no meio ambiente (BANGITA e RAO, 2012; CHAMEN *et al.*, 2015).

O uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas nos sistemas de manejo intensivo dos canaviais promovem a compactação do solo, reduzindo cerca de 50% do seu potencial de produção na quarta e quinta cana soca (CHERUBIN *et al.*, 2016a). Os problemas devidos à compactação no solo são amplamente estendidos em muitas partes do mundo, sendo mais graves em lugares onde a agricultura é altamente mecanizada com o emprego de equipamentos pesados, em condições de umidade inadequada, sendo mais vulneráveis quando a umidade está perto da capacidade de campo (MITCHELL e BERRY, 2001; SIVARAJAN *et al.*, 2018).

Diante disso, é fundamental a busca e adoção de metodologias que reduzem os riscos de compactação, visto que a diminuição do espaço poroso resultado da alteração da estrutura do solo oferece um aumento da resistência ao desenvolvimento do sistema radicular, comprometendo a absorção de água, gases e nutrientes, resultando em decréscimos da produção (SOUZA *et al.*, 2014). Assim, uma alternativa que busca minimizar os efeitos negativos da compactação nas operações mecanizadas é o controle de tráfego agrícola, sendo uma prática de manejo na qual se empregam as mesmas linhas de tráfego ano após ano, sacrificando uma pequena área de cultura a favor de não ter nenhum tráfego dos rodados na região da soqueira, concentrando a compactação permanente do solo numa pequena área e fornecendo uma superfície do solo firme para uma operação mais eficiente do trator (BRAUNACK *et al.*, 2006; TULLBERG *et al.*, 2007).

Associado ao controle de tráfego agrícola, outra técnica que pode ser utilizada em complemento é o uso do sistema de direção assistido conhecido como piloto automático (SOUZA *et al.*, 2015). 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 (SOUZA *et al.*, 2014).

Outra alternativa que pode auxiliar na redução do processo de compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar associado ao controle de tráfego, é o plantio alternado com espaçamento duplo combinado, possibilitando que numa mesma área seja plantada uma maior densidade de plantas por hectare (GALVANI *et al.*, 1997). Assim, ocorre maiores espaçamentos entre as linhas de tráfego, o que promove uma redução no número de passagens de máquinas por área e acréscimos na produtividade (ERNANDES, 2005).

Desta forma, para que seja possível o correto estabelecimento de uma metodologia capaz de aperfeiçoar o processo da colheita e que reduza minimamente a qualidade física do solo, o uso de indicadores sensíveis às alterações de manejo torna-se necessário para o monitoramento do processo de compactação (CHERUBIN *et al.*, 2016b). O efeito do tráfego nos atributos físicos do solo é acumulativo e conforme aumenta o número de colheitas afeta-se a resposta das culturas ano após ano (BRAUNACK *et al.*, 2006).

Uma das variáveis mais adequadas para apoiar ao monitoramento da degradação física do solo é a análise de compressibilidade do solo (VISCHI FILHO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016b), que reflete a máxima carga que o solo suporta sem que exista uma compactação adicional, auxiliando assim no planejamento das atividades mecanizadas visando a diminuição da compactação do solo.

Portanto, a redução do impacto das operações agrícolas sobre o solo, associada ao controle de tráfego e espaçamento duplo na cultura de cana-de-açúcar, permitirá diminuir a compactação do solo na região da soqueira, resultando na preservação da sua qualidade física e estrutural e favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular, a absorção de nutrientes, a troca de gases e a movimentação de água no solo, o que reflete no incremento da produção de cana-de-açúcar. Assim o uso desses sistemas de manejo e sua expansão na cultura, se apresenta como uma alternativa de produção de forma conservacionista que minimiza o impacto da mecanização no solo.

1.2 HIPÓTESE DO ESTUDO

O controle de tráfego na colheita mecanizada de cana-de-açúcar com espaçamento simples e duplo combinado, resulta em menor impacto nos atributos físicos e mecânicos do solo na região da soqueira, e permite maior desenvolvimento do sistema radicular e maior produtividade da cultura, frente a um sistema de manejo sem controle de tráfego e com espaçamentos simples.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Avaliar alterações dos atributos físicos e mecânicos do solo e seu efeito no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar, com diferentes espaçamentos de plantio e em sistema de manejo com controle de tráfego agrícola, após terceira e quarta colheita da cultura.

1.3.2 Específicos

- i) Avaliar a resistência do solo à penetração, a densidade do solo, a porosidade e retenção de água no solo, a estabilidade e a resistência tênsil de agregados e, o carbono orgânico total nas áreas de cana-de-açúcar manejadas com e sem controle de tráfego agrícola nos sistemas de plantio com espaçamento simples e espaçamento duplo combinado.
- ii) Avaliar o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da cana-de-açúcar cultivada em áreas com e sem controle de tráfego nos sistemas de plantio com espaçamento simples e espaçamento duplo combinado.
- iii) Modelar a capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de plantio de cana-de-açúcar com espaçamento simples e espaçamento duplo combinado com colheita mecanizada, com e sem controle de tráfego.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo foi desenvolvido com o propósito de realizar uma contextualização ao tema de interesse, por meio da introdução e justificativa, definição da hipótese, do objetivo geral, dos objetivos específicos e dos procedimentos metodológicos gerais. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica iniciando com o panorama da cultura canavieira, seguida da mecanização da cultura da cana-de-açúcar, dos atributos físicos do solo, do sistema de manejo com controle de tráfego e sistema de piloto automático, dos espaçamentos usados na cultura e por fim do sistema radicular.

Os resultados do trabalho são apresentados no terceiro e quarto capítulo, em estrutura de artigos científicos, sendo que o terceiro capítulo corresponde à compactação do solo, desenvolvimento radicular, variáveis biométricas e produtividade da cana-de-açúcar, no qual foram abordados os atributos do solo que apresentaram diferenças estatísticas entre os sistemas de manejo e, o quarto capítulo corresponde à modelagem da capacidade de suporte de carga no solo. Finalmente, as considerações gerais e recomendações geradas durante o desenvolvimento desta pesquisa são apresentadas no quinto capítulo. No apêndice apresentam-se os atributos do solo não apresentados no terceiro capítulo.

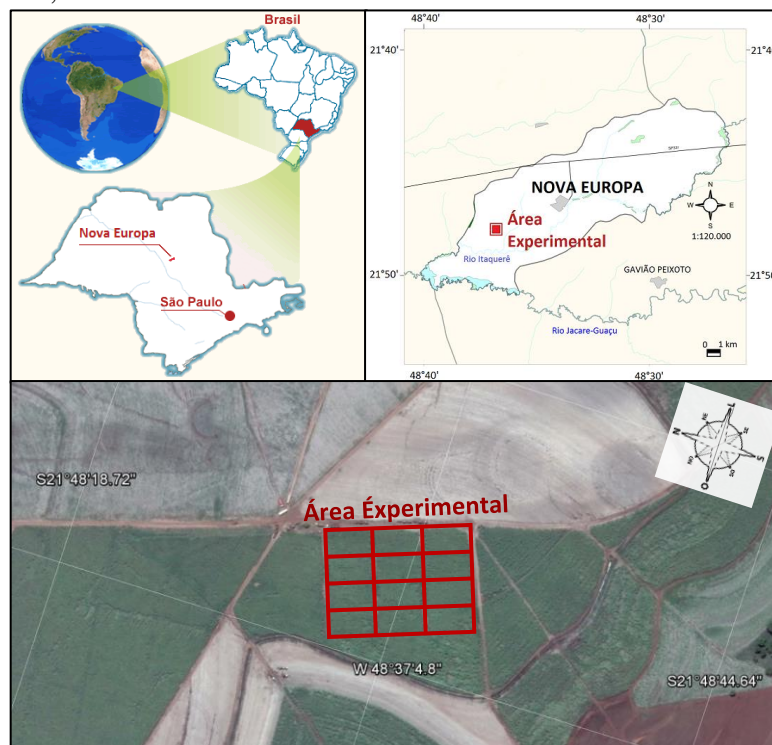
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS GERAIS

Este trabalho deu continuidade ao estudo iniciado em 2012-2015 coletando e analisando informação para a terceira e quarta colheita (safras 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente), tendo assim a observação do período crítico ainda quando o efeito do tráfego nos atributos físicos do solo é acumulativo conforme acrescenta o número de colheitas.

1.5.1 Localização do experimento, caracterização e histórico da área

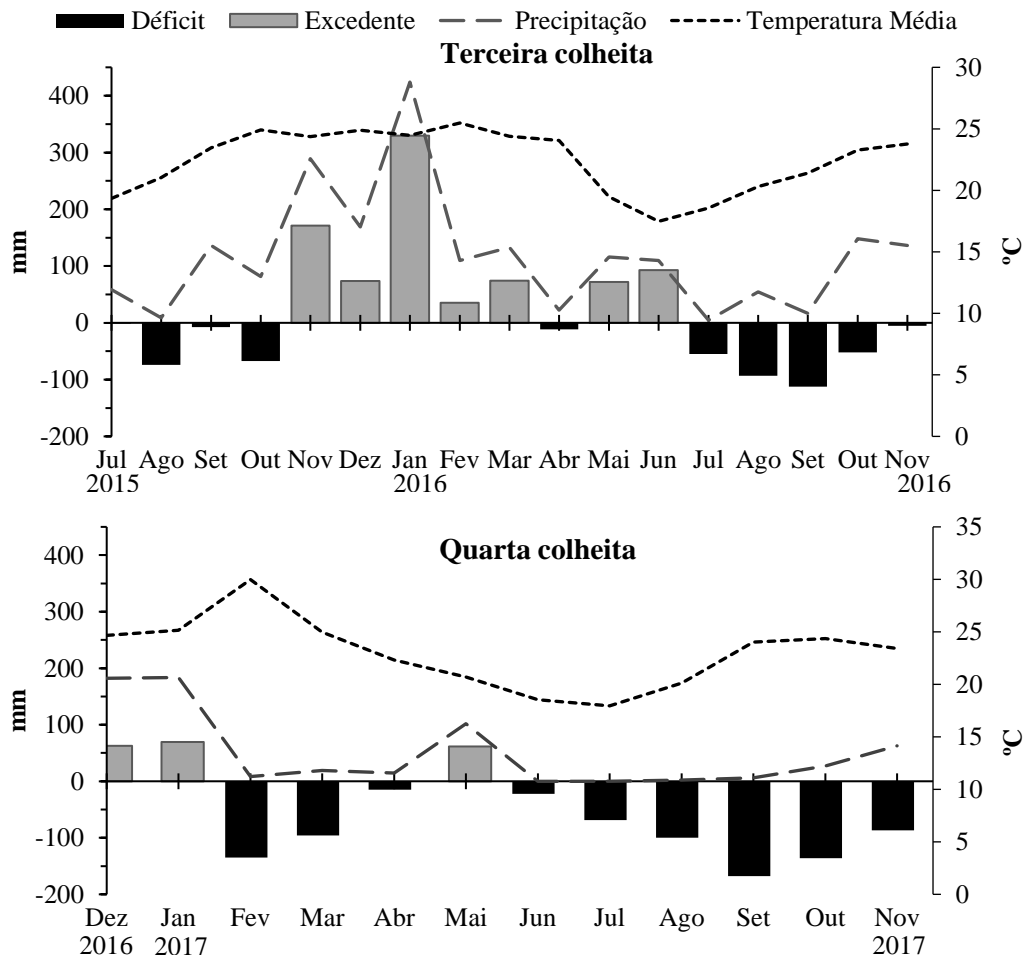
O experimento foi desenvolvido numa área cultivada com cana-de-açúcar nas dependências da Usina Santa Fé no município de Nova Europa-SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 21°48'42" de latitude sul e 48°36'33" de longitude oeste, altitude média de 500 m, e num relevo variando de plano a suave ondulado, com declive de 4% (Figura 1).

Figura 1. Localização da área experimental na Usina Santa Fé, no município de Nova Europa, estado de São Paulo, Brasil.



O clima da região é o subtropical úmido do tipo Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperaturas mínima e máxima de 16 e 29 °C, respectivamente, e precipitação anual em torno de 1.340 mm. Na Figura 2 apresentam-se os valores de temperatura média, precipitação, déficit e excedente hídrico para os dois períodos avaliados. Os dados foram obtidos com estação meteorológica automática localizada nas coordenadas 21°33'20" latitude sul e 48°47'58" longitude oeste, a 19 km da área experimental. O período correspondente à terceira colheita (safra 2015/2016) apresentou déficit hídrico nos meses de agosto a outubro de 2015 e julho a novembro de 2016. Para o período da quarta colheita (safra 2016/2017) o déficit hídrico ocorreu de fevereiro a abril e de junho a novembro de 2017.

Figura 2. Temperatura média, precipitação e balanço hídrico, nos períodos da terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar, obtidos em estação meteorológica localizada no município de Ibitinga, estado de São Paulo, Brasil.



Fonte: INMET, 2017.

Antes da instalação do experimento, a área encontrava-se cultivada com cana-de-açúcar no seu sexto corte com colheita mecanizada. Após o sexto corte e antes do preparo do solo para a implantação do experimento no ano de 2012, foi feita a caracterização física do solo.

Foram determinadas as frações granulométricas (método da pipeta, empregando a solução de Hidróxido de Sódio 0,1 (NaOH) como agente dispersante), a densidade de partículas (Dp) (método do picnômetro), a densidade do solo (Ds) (método do anel volumétrico) e a distribuição da porosidade (método da mesa de tensão) conforme Embrapa (2011).

O solo foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico de textura média nos primeiros 0,40 m de profundidade e textura argilosa na profundidade de 0,40 a 1,00 m (Tabela 1). Os dados das frações granulométricas entre os tratamentos não apresentaram diferença estatística, porém, com diferença entre as camadas para areia (Apêndice 1). A não diferença da granulometria entre os tratamentos possibilita uma maior confiabilidade nos resultados, uma vez que os atributos físicos do solo são fortemente influenciados pela granulometria.

Tabela 1. Caracterização física e granulométrica de um Latossolo Vermelho distrófico antes da implantação da área experimental no município de Nova Europa-SP, Brasil.

Distribuição granulométrica							
Camada (m)	AG	AF	AT	Silte	Argila	Classe textural	
	g kg⁻¹					EMBRAPA¹	USDA
0,00-0,10	183,5	430,2	613,7	171,9	214,4	Média	Franco Argilo Arenoso
0,10-0,20	179,6	443,9	623,5	158,4	218,1	Média	Franco Argilo Arenoso
0,20-0,30	152,9	422,3	575,2	161,0	263,8	Média	Franco Argilo Arenoso
0,30-0,40	126,6	382,3	509,0	168,3	322,8	Média	Franco Argilo Arenoso
0,40-0,50	119,7	347,4	467,1	177,8	355,1	Argilosa	Franco Argilo Arenoso
0,50-0,70	105,2	315,4	420,6	165,0	414,4	Argilosa	Argiloso
0,70-1,00	99,6	320,9	420,5	161,6	417,9	Argilosa	Argiloso

Atributos físicos					
Camadas (m)	MaP	MiP	PT	Dp	Ds
	m³ m⁻³			kg dm⁻³	
0,00-0,10	0,17	0,33	0,50	2,67	1,32
0,10-0,20	0,15	0,34	0,49	2,65	1,34
0,20-0,30	0,15	0,36	0,51	2,75	1,36

AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total; Dp = densidade da partícula; Ds = densidade do solo. ¹Classificação conforme Embrapa (2013).

O preparo da área foi composto inicialmente pela eliminação de soqueira, utilizando para isso um eliminador de soqueira DMB na profundidade de 0,15 m. Os restos culturais remanescentes foram dessecados aplicando 5,76 L ha⁻¹ de Tensor Plus e 5,76 kg ha⁻¹ de Roundup WG. Posteriormente, foi realizada uma gradagem por meio de uma grade aradora da marca CIVEMASA, modelo SGIC de 28 discos, tracionada por um trator BH 185 intercooler

da marca Valtra. Em seguida, utilizou-se um subsolador Stara, modelo asa laser, com 7 hastes espaçadas a 0,40 m e ponteiros de aço fundido e endurecido do tipo “botinha”, com tração procedida por um trator Magnum 340 da marca Case. Por fim, realizou-se uma gradagem leve com uma grade aradora GNCR D.R.L 40 x 22 CIVEMASA, também tracionada por um Valtra BH 185 intercooler.

O plantio foi realizado em novembro de 2012, a 0,30 m de profundidade, com densidade de 18 gemas m^{-1} , da variedade RB867515. A operação de plantio foi procedida por uma plantadora de cana picada da DMB, modelo PCP 6000, com tração realizada por um trator Valtra BH 185 intercooler, com bitola traseira e dianteira de 2,10 m e 1,80 m, respectivamente. A plantadora possui volume de 24 m^3 , massa de 9.320 kg, altura de 4,3 m, comprimento de 7,60 m e largura de 3,65 m em operação e possui dois sulcadores de asas revestidas com polietileno e espaçamento regulável para 0,90, 1,40 e 1,50 m. A regulagem da profundidade de plantio foi realizada por meio de rodas estabilizadoras com pneus superflotation 10,5/80 x 18-10 lonas. Conta ainda com um reservatório de aço inoxidável provido de um sensor de nível, com capacidade para receber 1.250 kg de adubo e um sistema de distribuição do tipo “rosca sem fim” acionado por um motor hidráulico com válvula de regulagem de fluxo e óleo, no qual permite aplicar 0,50 $Mg\ ha^{-1}$ do formulado 05-25-23 + 1,5% de zinco + 0,4% de boro.

Durante o plantio foram aplicados 0,25 $kg\ ha^{-1}$ de Regente 800 WG e 0,5 $L\ ha^{-1}$ de Comente para controle de formigas. Ressalta-se que a área já se encontrava com o pH corrigido, tendo sido realizada a aplicação de 1,4 $Mg\ ha^{-1}$ de calcário dolomítico em 24/04/2012 e que não houve aplicação de torta e vinhaça na área experimental.

As colheitas antecedentes ao período de avaliação foram realizadas em maio de 2014, após 18 meses do plantio, correspondente à primeira colheita (safra 2013/2014), e em maio de 2015, correspondente à segunda colheita (safra 2014/2015).

1.5.2 Variedade da cana-de-açúcar

No experimento utilizou-se a variedade RB867515, caracterizada por apresentar hábito de crescimento ereto e fácil despalhamento, alto teor de sacarose e alta produtividade agrícola (180 toneladas por hectare), assim como perfilhamento médio, colmos de diâmetro médio e alta uniformidade (RIDESA, 2010). A zona radicular é de largura média, sem enraizamento aéreo. Esta variedade tem melhor desempenho em solos de textura leve e fertilidade média.

A variedade RB867515 apresenta boa capacidade de brotação mesmo em plantio tardio sob baixas temperaturas. Em cana planta no plantio de ano e meio pode ocorrer tombamento ao final do ciclo devido ao crescimento vigoroso. É apta ao plantio e colheita

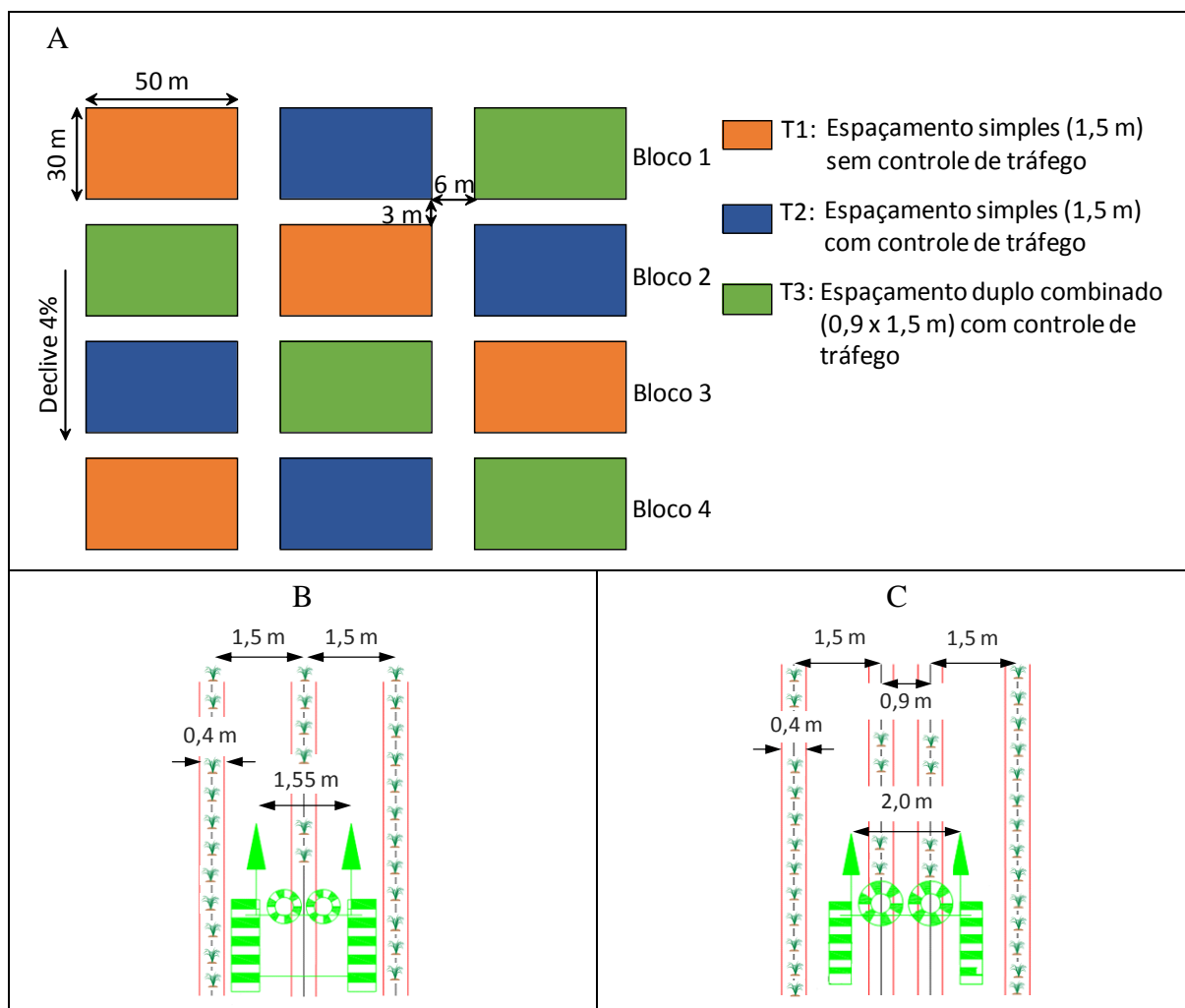
mecanizada, sendo esta, em geral, realizada entre julho e outubro. De acordo com o censo varietal de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil na safra 2016/2017 realizado pelo IAC (2017), a variedade mais cultivada foi a RB867515, com 27,1% da área plantada. No estado de São Paulo a variedade RB867515 também ocupou a primeira posição, com 14,7% da área total de cana-de-açúcar plantada (59.689 hectares).

1.5.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento obedece a um desenho de blocos ao acaso ($n = 4$) no esquema de sub-sub parcelas (parcela = tratamento ($n = 3$); sub = local de amostragem ($n = 3$ para os tratamentos 1 e 2, $n = 5$ para o tratamento 3); sub-sub = camada de solo ($n = 7$)), com doze parcelas experimentais, cada uma com dimensões de 50 m de comprimento por 30 m de largura, para uma área de 1.500 m² por parcela, totalizando 18.000 m² da área experimental.

As linhas de plantio foram estabelecidas em sentido paralelo à maior dimensão da parcela, no comprimento de 50 m (Figura 3). Os três tratamentos avaliados foram: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m entre as linhas e colhida sem controle de tráfego (20 linhas de cana por parcela); T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m e colhida com sistema de controle de tráfego (20 linhas de cana por parcela); T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colhida com controle de tráfego (12 linhas de cana por parcela).

Figura 3. Esquema da área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. A = croqui do experimento. B = espaçamento das linhas de plantio no tratamento com espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2). C = espaçamento das linhas de plantio no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3).



1.5.4 Colheita das parcelas experimentais

Em novembro de 2016 e outubro de 2017 foi realizada a terceira e quarta colheita mecanizada, respectivamente. A colheita da cana-de-açúcar foi realizada por uma colhedora da marca CASE, modelo B8800, com potência nominal/máxima de 358 cv (260 kW), bitola de 1,90 m, rodados de esteira de 0,47 m de largura e peso aproximado de 20,6 toneladas. A colhedora conta com um sistema de corte formado por cortadores de pontas, cortadores de base, disco de corte lateral e um conjunto picador. Possui esteira com corrente engraxada, sapatas com design agrícola e guias Heavy Duty. Conta ainda, com rolo de tombamento, rolo alimentador, rolo transportador e levantador.

O transporte da cana-de-açúcar colhida foi realizado em transbordos marca ANTONIOSI, modelo ATA-8000, com peso aproximado de 6,5 toneladas, com bitola de 3,00 m e com capacidade para transportar 8,5 toneladas de cana num volume de 20 m³. O

implemento possui largura máxima de 3,3 m, altura mínima de 3,5 m e, altura de basculamento de 4,7 m, com pneus 600/50-22,5 de baixa pressão. Os transbordos foram operados em tandem e rebocados por tratores VALTRA modelo BH180, com potência nominal/máxima de 189 cv (139 kW), bitola de 2,10 e, peso aproximado de 10,5 toneladas (Figura 4A).

Figura 4. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar na área experimental. A = conjunto colhedora, trator e transbordo. B = controle do sistema de piloto automático.

A



B



Nas parcelas correspondentes aos tratamentos 2 e 3, a colheita foi auxiliada com o uso do piloto automático marca Topcon, modelo System 150, usando-se os mapas da área experimental conforme aos tratamentos, com uma série de padrões de orientação automática, incluindo fronteiras e reconhecimento que auxiliam na conclusão de voltas e na captação das informações de faixas posteriores (Figura 4B). O piloto conta ainda com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, facilmente atualizável, com 0,02 m de precisão em tempo real e, permite a captação de redes de referência existentes por meio da conexão via telefone celular, dependendo da disponibilidade do local.

1.5.5 Análises realizadas

A descrição da metodologia usada nas análises e avaliações são apresentadas na sequência cronológica em que foram realizadas nos períodos correspondentes à terceira e quarta colheita (safra 2015/2016 e 2016/2017), respectivamente. A determinação da curva de retenção de água no solo e do carbono orgânico total, assim como a avaliação do sistema radicular foram realizadas somente para o período correspondente à terceira colheita da cana-de-açúcar.

1.5.5.1 Avaliações biométricas e produtividade

Em novembro de 2016 e outubro de 2017, um dia antes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, realizou-se a avaliação biométrica e a produtividade para o período da terceira

e quarta colheita. As avaliações foram realizadas para cada parcela, em 3 faixas de 5 metros de comprimento da linha de plantio, aleatoriamente distribuídas. As variáveis avaliadas foram:

População de plantas: em cada parcela foi realizada a contagem de colmos nas faixas de avaliação de 5 metros de comprimento.

Produtividade: a produtividade da cana-de-açúcar foi determinada mediante o corte manual da cana-de-açúcar de cada faixa de avaliação, a qual foi pesada numa balança digital com precisão de 0,1 kg. A produtividade da cana nas faixas de avaliação foi convertida posteriormente a toneladas por hectare.

Diâmetro e altura do colmo: das plantas de cana colhidas para a avaliação da produtividade em cada faixa de avaliação, foram selecionados aleatoriamente 10 colmos para a avaliação dos atributos de diâmetro e altura (Figura 5). O diâmetro do colmo foi medido com o auxílio de um paquímetro digital e a altura por meio do uso de uma fita métrica, medindo-se o comprimento entre a base da planta e a folha "+1".

Figura 5. Avaliações biométricas da cana-de-açúcar na área experimental. A = corte e limpeza da cana para a pesagem e medição de comprimento. B = medição do diâmetro de colmo.



1.5.5.2 Atributos físicos do solo

Resistência do solo à penetração (RSP)

A RSP foi determinada imediatamente após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar, um dia antes da coleta das amostras do solo e foi quantificada pelo índice de cone (IC), obtida por meio de um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°, área do cone de 1,29 cm² e haste de 0,7 m de comprimento (Figura 6). A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto⁻¹) em resistência à penetração foi obtida conforme a equação 1, descrita por Stolf *et al.* (2014):

$$RSP = 0,56 + 0,689 \times (N/P) \times 10 \quad (1)$$

em que, RSP = resistência do solo à penetração (MPa); N = número de impactos; P = penetração do cone no solo (cm).

Para os tratamentos 1 e 2, as avaliações foram realizadas nos mesmos locais de amostragem do solo, isto é, na LP, LR e C. Para o tratamento 3 acrescentaram-se, ainda, no espaçamento entre a linha dupla (0,9 m) o canteiro da linha dupla (CL) e o ponto médio da linha dupla (PM) (Figura 9). As leituras em todas as parcelas foram realizadas no mesmo dia, para eliminar o efeito da variação da umidade do solo, determinada pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 2011), utilizando um trado tipo rosca para coleta da amostra de solo em profundidades a cada 0,10 m desde a superfície até 0,70 m. Cada amostra de solo foi acondicionada em latas de alumínio para impedir a perda de água até seu processamento no laboratório.

Figura 6. Avaliação da resistência do solo à penetração na área experimental. A = manipulação do penetrômetro de impacto de Stolf. B = amostragem de solo para determinação da umidade.



Amostragem do solo

Após avaliação da resistência do solo à penetração, foi realizada a coleta de amostras deformadas de solo para a determinação da estabilidade de agregados em água, resistência tênsil de agregados, granulometria, carbono orgânico total e a coleta de amostras indeformadas para a determinação da curva de retenção, densidade e porosidade do solo.

As amostras deformadas e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m, 0,40-0,50 m, 0,50-0,70 m e 0,70-1,00 m (Figura 7), nos seguintes locais de amostragem, comuns aos três tratamentos: Linha de plantio (LP) - local correspondente à região da touceira; Canteiro (C) - ponto médio entre a linha de plantio e a linha do rodado, localizado a 0,375 m da linha de plantio; Linha do rodado (LR) - local correspondente à entrelinha, localizado no centro das duas linhas de plantio e, distanciado a 0,75 m da linha de plantio. Na LR ocorre o tráfego dos rodados das máquinas para os

tratamentos com controle de tráfego (T2 e T3); para o tratamento sem controle de tráfego (T1), este é o local teórico onde deveria ocorrer o tráfego, porém, este ocorre também na região do canteiro. As coletas na linha do rodado e no canteiro foram realizadas a cada lado da linha de plantio em todos os tratamentos.

Figura 7. Amostragem do solo deformada e indeformada na área experimental. A = trincheira de amostragem. B = coleta das amostras indeformadas em anéis volumétricos e deformadas para determinação dos atributos físicos do solo.

A



B



Nos tratamentos de espaçamentos simples (T1 e T2), os locais de amostragem foram a LP, C e LR (Figura 8). Para cada parcela destes tratamentos foram coletadas 35 amostras, resultante do cruzamento dos locais de amostragem (5) com as profundidades de amostragem (7); assim para cada tratamento totalizaram 140 amostras (35 amostras por parcela x 4 parcelas ou repetições por tratamento).

Para o tratamento de espaçamento duplo (T3), no local de maior espaçamento (1,50 m) as coletas de solo foram realizadas com o mesmo procedimento adotado nas parcelas dos T1 e T2. Com relação ao menor espaçamento, local entre linhas duplas (0,90 m), os pontos da amostragem foram situados a 0,225 m, local chamado “canteiro de linha dupla” (CL) e a 0,450 m de distância da linha de plantio, local chamado “ponto médio da linha dupla” (PM) (Figura 9). Para este tratamento totalizaram 252 amostras (63 amostras por parcela x 4 parcelas ou repetições por tratamento).

Figura 8. Local de amostragem de solo nos tratamentos com espaçamentos simples (T1 e T2). LR = linha do rodado, C = canteiro, LP = linha de plantio.

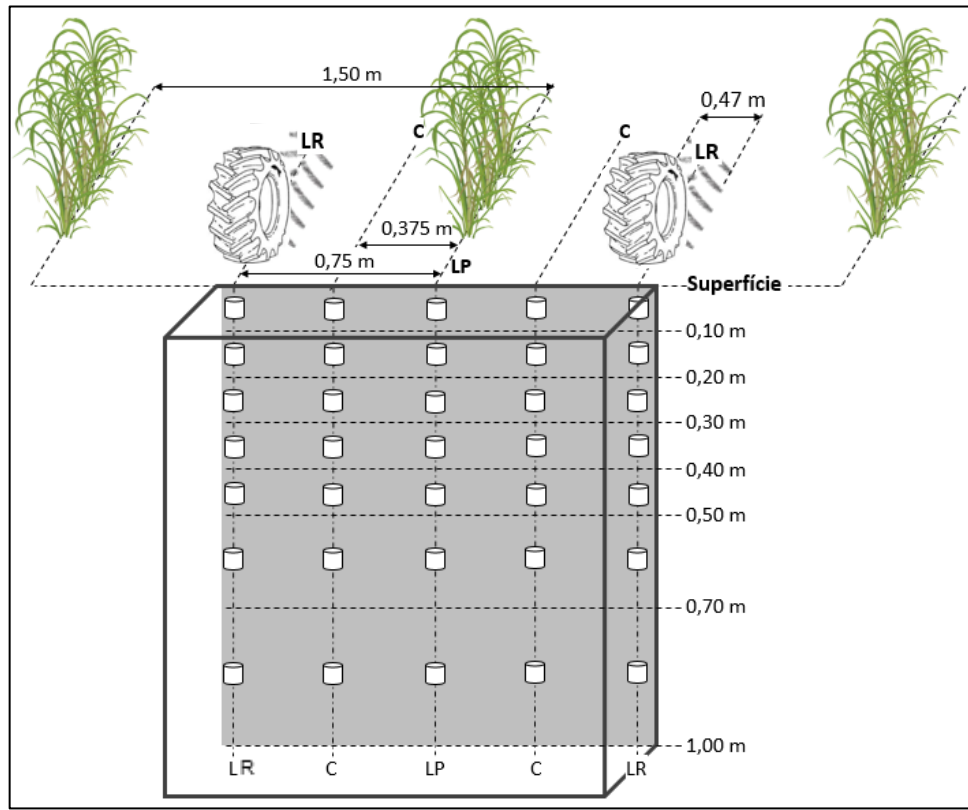
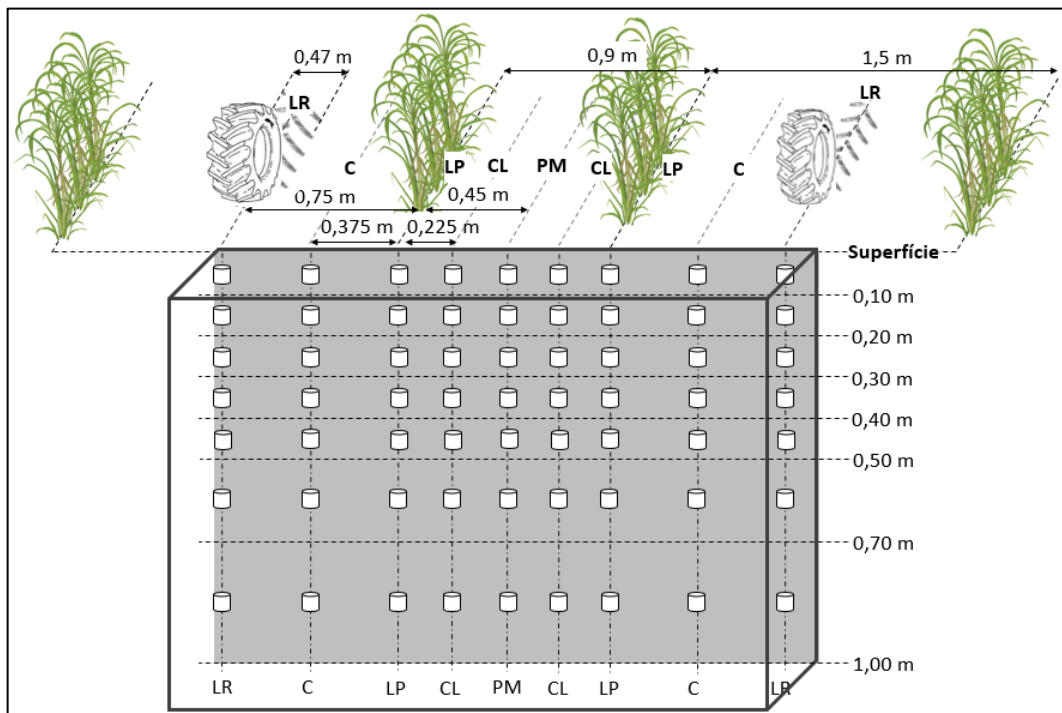


Figura 9. Local de amostragem de solo no tratamento com espaçamento duplo combinado (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla.



Densidade do solo (Ds)

A Ds foi determinada pelo método do anel volumétrico, por meio da razão entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e o volume da amostra (EMBRAPA, 2011).

Porosidade do solo

A distribuição da porosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, onde a microporosidade (MiP) corresponde ao conteúdo de água na amostra após aplicar uma coluna de água com altura de 0,60 m (6,0 kPa) nas amostras saturadas, após essa etapa, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C e, em seguida, pesadas. A porosidade total (PT) corresponde à massa de água que ocupou todo espaço poroso (saturação) e, a macroporosidade (MaP) é obtida por diferença entre a PT e a MiP (EMBRAPA, 2011).

Curva de retenção de água no solo e capacidade de água disponível (CAD)

As curvas de retenção de água no solo foram obtidas em câmaras de pressão de Richards com placas porosas, submetendo as amostras de solo indeformadas às tensões de 2, 6, 10, 33, 100, 300, 500 e 1.500 kPa. As curvas foram ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980) (Equação 2), utilizando o software Soil Water Retention Curve (DOURADO-NETO *et al.*, 2001).

$$\theta = \theta_R + \frac{(\theta_S - \theta_R)}{[1 + (\alpha * \psi)^n]^m} \quad (2)$$

em que, θ = conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_R = conteúdo volumétrico de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_S = conteúdo volumétrico de água na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ = potencial matricial (kPa); α , n e m = coeficientes do modelo.

A partir das curvas de retenção de água no solo foi determinada a capacidade de água disponível (CAD) obtida como a diferença do teor de água retido na capacidade de campo (CC) a -10 kPa e no ponto de murcha permanente (PMP) a -1.500 kPa.

Estabilidade de agregados em água

Foi determinada de acordo com o método estabelecido por Kemper e Chepil (1965) mediante agitação por via úmida dos agregados de solo seco ao ar. Os agregados foram obtidos a partir das amostras do solo deformados por meio do peneiramento em vibrador Prooutest, utilizando os agregados que passam pela peneira de 9,52 mm e que ficam retidos na peneira de 4,76 mm.

Os agregados foram saturados por dez minutos e posteriormente levados ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água com duração de 15 minutos. Foram utilizadas cinco peneiras com os diâmetros de 4,76; 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄

(1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm). Com as proporções de solo de cada classe foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA em %, Equação 3) e o diâmetro médio ponderado (DMP em mm, Equação 4).

$$IEA = ((ws - wp_{0,25})/ws) * 100 \quad (3)$$

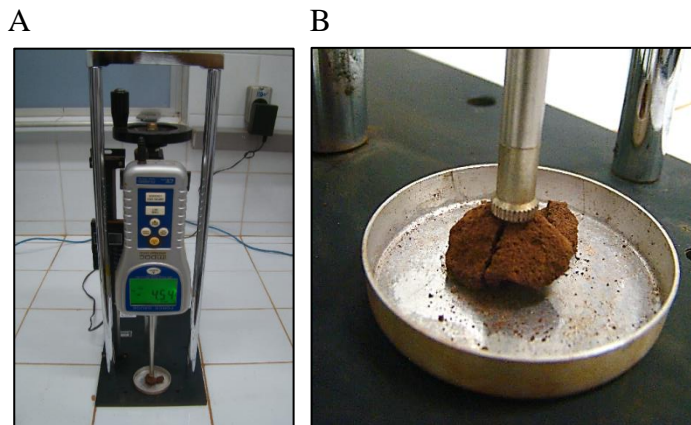
$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi * wi) \quad (4)$$

em que, ws = peso seco da amostra (g); wp_{0,25} = peso dos agregados da classe <0,25 mm (g); xi = diâmetro médio das classes (mm); wi = proporção de cada classe em relação ao total.

Resistência tênsil de agregados (RTA) e friabilidade do solo (F)

Após secagem das amostras deformadas ao ar, os agregados foram classificados com auxílio de peneiras metálicas de 19,0 e 12,5 mm de abertura (diâmetro médio de 15,75 mm). Posteriormente a umidade residual foi homogeneizada mediante secagem em estufa a temperatura de 60 °C por 24 h conforme Tormena *et al.* (2008). Para cada amostra foi determinada a força necessária para a quebra tênsil do agregado com o auxílio de um dinamômetro-IMPAC (marca Lutron, modelo FG-20 kg), com avaliação realizada para seis agregados em cada amostra (Figura 10).

Figura 10. Ensaio de resistência tênsil de agregados. A = dinamômetro IMPAC. B = detalhe da fratura do agregado.



A resistência tênsil do agregado foi calculada conforme a Equação 5, descrita por Dexter e Kroesbergen (1985).

$$RTA = 0,576 * (P/D^2) \quad (5)$$

em que, RTA = resistência tênsil (kPa); 0,576 = coeficiente de proporcionalidade resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P = força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); D = diâmetro efetivo (mm) obtido conforme Watts e Dexter (1998), (Equação 6).

$$D = Dm (M/Mo)^{1/3} \quad (6)$$

sendo que, M = massa do agregado individual (g); M_0 = massa média dos agregados na população (g); D_m = diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras [(12,5 + 19,0) / 2 = 15,75 mm].

A friabilidade do solo foi determinada pelo método do coeficiente de variação conforme Watts e Dexter (1998), (Equação 7).

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} \pm \left(\frac{\sigma_Y}{Y\sqrt{2n}} \right) \quad (7)$$

em que, F = friabilidade do solo; σ_Y = desvio padrão dos valores de RTA medidos; Y = média dos valores de RTA medidos; n = número de repetições realizadas.

Carbono orgânico total (COT)

O carbono orgânico total foi determinado pela perda de massa por ignição (PMI) segundo Ben-Dor e Banin (1989) mediante a determinação gravimétrica do carbono transformado em CO_2 , o qual é estimado pela massa volatilizada de uma amostra de solo seco submetido à ignição em alta temperatura.

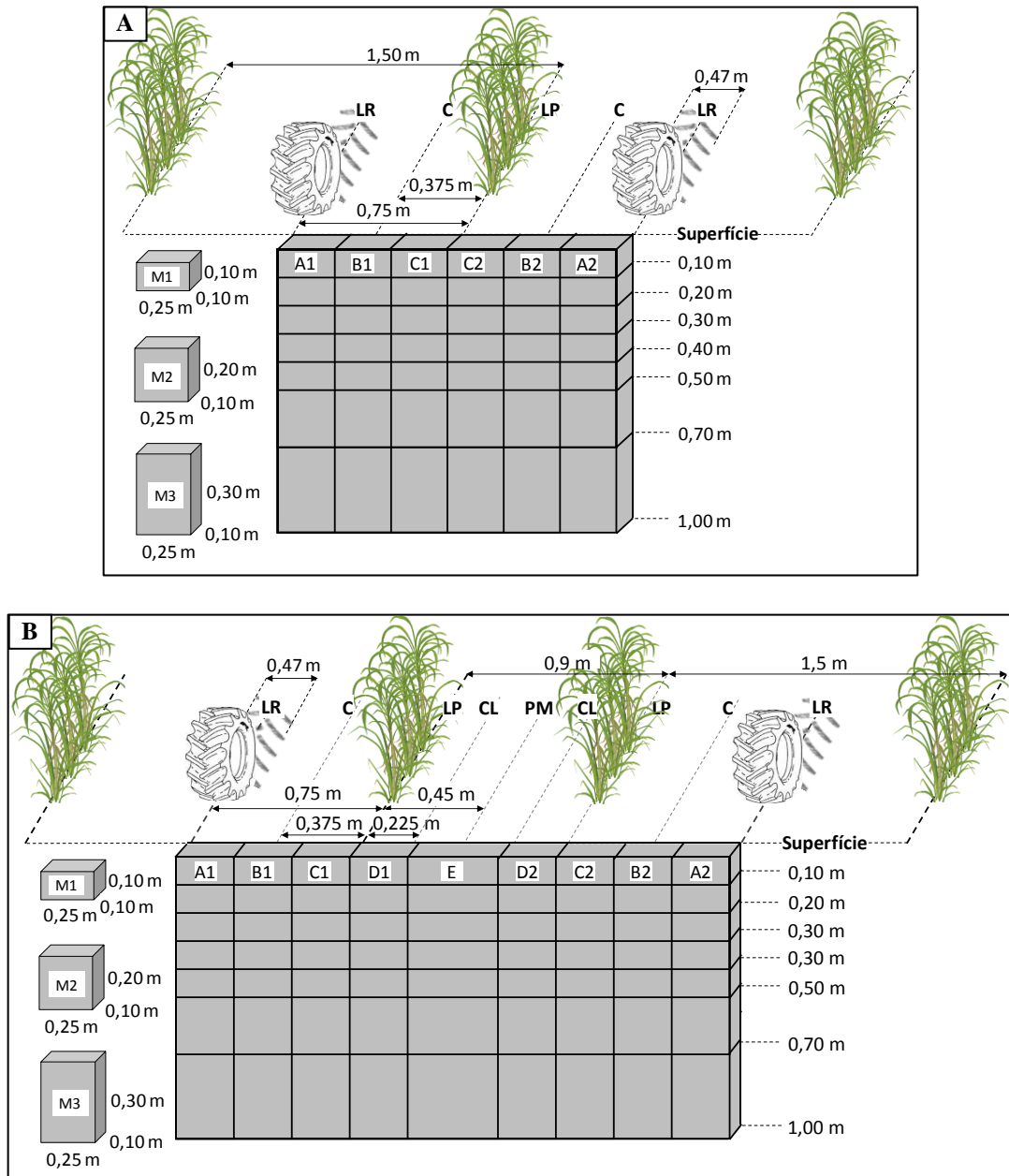
1.5.5.3 Avaliação do sistema radicular

O sistema radicular foi avaliado após a colheita da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar, pela metodologia do monólito (BÖHM, 1976; KÖPKE, 1981). Nas mesmas trincheiras usadas para a coleta das amostras de solo, foram coletados os monólitos de solo para a avaliação do sistema radicular. Usaram-se caixas metálicas de dimensão de 0,25 x 0,10 x 0,10 m para a largura, altura e comprimento, respectivamente, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. Na camada 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, a dimensão do monólito foi de 0,25 x 0,20 x 0,10 m e 0,25 x 0,30 x 0,10 m, respectivamente (Figuras 11 e 12).

Figura 11. Coleta de monólitos de solo para a avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar até 1,0 m de profundidade na área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil.



Figura 12. Esquema de amostragem do solo e dos monólitos para avaliação do sistema radicular. A) nos tratamentos de espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2); B) no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. M1, M2 e M3 = dimensões dos monólitos para as profundidades de 0,00-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, respectivamente. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem dos monólitos.



Após coleta das amostras, foi efetuada a separação das raízes do solo por lavagem em água corrente e peneiramento com malha de 2,0 mm (VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI e TRIVELIN, 2006) e, dispostas em recipientes plásticos e posteriormente congeladas para sua conservação evitando sua decomposição. Posteriormente, as raízes foram escaneadas após descongelamento, com o auxílio de um escâner modelo HP Scanjet G2410. As imagens

geradas foram processadas no software SAFIRA®, para determinar o comprimento, a área superficial, o volume e o diâmetro das amostras de raízes.

Depois da obtenção das imagens em escâner, as raízes foram secas em estufa com circulação de ar a 65 °C por 72 horas para obtenção da massa seca (Ms) (BEUTLER e CENTURION, 2004), para finalmente obter a biomassa seca radicular (BSR) (Equação 8).

$$BSR = (DR * Vs) \quad (8)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (kg ha⁻¹); DR = densidade radicular (g dm⁻³) obtida pela equação (9); Vs = volume do solo representado em cada ponto amostrado (m³ ha⁻¹) obtida pelas equações (10) e (11), conforme Otto *et al.* (2011).

$$DR = Ms / Vm \quad (9)$$

sendo que, Ms = massa seca de raízes (g) e Vm = volume do monólito (Vm = 2,5 dm³ para as camadas de 0,0-0,5 m, Vm = 5,0 dm³ para as camadas de 0,5-0,7 m, Vm = 7,5 dm³ para a camada de 0,7-1,0 m).

$$Vs = (0,25 \text{ m} * 0,1 \text{ m} * 10000/1,5) \text{ para os tratamentos T1 e T2} \quad (10)$$

$$Vs = (0,25 \text{ m} * 0,1 \text{ m} * 10000/2,4) \text{ para o tratamento T3} \quad (11)$$

1.5.5.4 Capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)

Para cada tratamento foram obtidos quatro modelos de CSCS, um para cada local de amostragem (C e LR) por profundidade, camada de 0,00-0,10 m e camada de máxima resistência do solo à penetração (0,20-0,30 m) definida imediatamente após terceira colheita da cana-de-açúcar, totalizando assim 12 modelos.

Foram coletadas amostras de solo indeformadas em anéis de aço inoxidável com dimensões de 0,060 m de diâmetro por 0,025 m de altura, com o auxílio do amostrador tipo uhland, nas camadas de 0,00-0,10 m e na profundidade de máxima resistência do solo à penetração (0,20-0,30 m), identificada imediatamente após terceira colheita mecanizada da cana-de-açúcar conforme procedimento descrito no item 1.5.5.2. Os locais de amostragem foram a LR e o C, nas mesmas trincheiras usadas para a coleta das amostras de solo deformadas e indeformadas (Figura 13). Em cada local de amostragem foram coletadas cinco amostras por profundidade, totalizando 20 amostras por parcela e 80 amostras por tratamento, totalizando 240 amostras indeformadas para avaliação da CSCS.

Figura 13. Coleta de amostras de solo indeformadas para avaliação da capacidade de suporte de carga no solo localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. LR = linha do rodado; C = canteiro.



Para a determinação da pressão de preconsolidação (σ_p) os corpos de prova (amostras de solo indeformadas) foram equilibrados a cinco teores de água definidos em função dos limites e estados de consistência conforme sugestão de Silva *et al.* (2010). O primeiro teor de água corresponde a $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$, o segundo corresponde a um teor de água na região de tenacidade do solo (teores médios de água de $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$, abaixo do limite de contração), o terceiro a um teor de água na região de friabilidade (valores acima do limite de contração e abaixo do limite de plasticidade), o quarto a um teor de água na região de plasticidade (valores acima do limite plástico e abaixo do limite de liquidez) e, o quinto e último teor de água corresponde ao valor de saturação do solo. O limite de plasticidade, o limite de liquidez e o limite de contração foram obtidos em amostras deformadas de solo, conforme metodologia descrita pela Embrapa (2011).

Depois de equilibradas, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial num consolidômetro automatizado com interação homem máquina (IHM), modelo CNTA-IHM/BR-001/07 fabricado por Masquetto Automação & Equipamentos (SILVA *et al.*, 2015a), no qual o corpo de prova confinado lateralmente em anel de aço, com drenagem livre nas superfícies superior e inferior, é submetido a incrementos sucessivos de pressão vertical. Os níveis de pressão aplicados foram 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, observando-se a pressuposição de Taylor (1971), que define a deformação máxima de até 90% do corpo de prova, para cada nível de pressão. Esta operação foi feita automaticamente mediante rotinas embarcadas no equipamento, previamente configurado com programação do tempo, níveis de pressão e a deformação máxima a ser alcançada pelo corpo de prova.

Por meio do software CA LINKER (SILVA *et al.*, 2015a), que permite a interface entre o PC e o consolidômetro e processa os dados de força e deformação e, por meio de rotinas

e pressuposições da mecânica de solo os valores de pressão e deformação foram devidamente tratados e plotados num gráfico, obtendo-se, assim, a curva de compressão do solo (densidade do solo em função do logaritmo das pressões aplicadas). A partir da curva de compressão, foi obtido o índice de compressão (IC) e a σ_p , por dois métodos propostos por Dias Júnior e Pierce (1995): método M1, quando o potencial matricial for menor ou igual a 100 kPa e, método M3, quando o potencial matricial for maior que 100 kPa.

Para a elaboração dos modelos de CSCS, os valores de σ_p foram plotados em função da umidade u a que cada amostra foi submetida e, posteriormente, ajustou-se ao modelo proposto por Dias Júnior (2003) (Equação 12).

$$\sigma_p = 10^{(a + bU)} \quad (12)$$

em que, σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); U = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); e os parâmetros de ajuste são: a = coeficiente linear, b = coeficiente angular.

A realização das análises de regressão conforme o modelo da equação (13) e obtenção dos parâmetros "a" e "b" de ajuste para se obter as pressões de preconsolidação (σ_p) e que apresentam a capacidade de suporte de carga do solo em estudo, foram determinadas por meio do *software* Sigma Plot 11.0 (Systat Software Inc®). As comparações dos modelos foram realizadas pelo teste de homogeneidade de modelos lineares, conforme os procedimentos descritos por Snedecor e Cochran (1989), utilizando-se um algoritmo elaborado no *software* Microsoft Excel® o qual compara os parâmetros dos modelos "a" e "b" e a homogeneidade dos dados (F).

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PANORAMA DA CULTURA CANAVIEIRA

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é cultivada em mais de 101 países no mundo. No entanto, os sete maiores produtores representam 85% da produção mundial, sendo o Brasil o maior produtor com 737 milhões de toneladas no ano de 2014, o que representa 43% da produção, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão, México e Colômbia (FAO, 2015).

No Brasil a área colhida na safra 2016/2017 foi de 9,05 milhões de hectares com uma produção de 657,18 milhões de toneladas de cana e um rendimento médio de 72,62 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2017). Em termos de ocupação de área, a cana-de-açúcar é a terceira cultura mais expandida no país com 14,11% da área agrícola cultivada, sendo superada pelo plantio de soja e do milho, com uma ocupação de 44,07 e 21,35%, respectivamente (IBGE, 2016).

Desde 1532, quando a cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil, sua importância foi destacada na economia nacional. O setor sucroenergético no Brasil compreende todas as atividades agrícolas e industriais relacionadas à produção de açúcar (bioetanol e bioeletricidade) e estes produtos derivam de forma quase exclusiva do processamento da cana-de-açúcar (NASTARI, 2012). O etanol produzido na safra 2016/2017 foi de 27,81 milhões de metros cúbicos e a produção de açúcar no mesmo período foi de 38,69 milhões de toneladas (CONAB, 2017). A bioeletricidade gerada da cana em 2015 corresponde a 7,5% da potência outorgada no Brasil, equivalente a 78,6% da fonte biomassa, produzindo 10.961,941 kW e sendo a terceira fonte de geração mais importante da matriz elétrica, superado apenas pelas fontes hídrica e fóssil (ÚNICA, 2016).

A importância da cana-de-açúcar no Brasil tem sua origem a partir da expansão canavieira iniciada na década de 1970, quando o governo brasileiro implementou o programa Proálcool, na crise do petróleo, com o propósito de produzir o etanol. Esta medida trouxe consigo a produção de veículos movidos a álcool e a expansão da cultura de cana-de-açúcar (ARBEX *et al.*, 2004). Aliás, o ciclo de crescimento da produção desta cultura, experimentou-se na década passada, a aceleração dos investimentos em novas usinas, principalmente a partir de 2003, motivada pelo crescimento da demanda de açúcar no mercado internacional, após a reforma da política europeia para o produto e o uso crescente do etanol a partir do desenvolvimento dos veículos com motores Flex Fuel (FIESP, 2013).

A importância do setor sucroenergético no Brasil sustenta-se, também, em ser o único setor agroindustrial em que o Brasil tem domínio pleno de tecnologia no campo agrícola

e industrial, com vasto estoque de inovações ainda possíveis de implementação e, grande potencial para um novo salto de produtividade (NASTARI, 2012).

Atualmente, a região sudeste representa cerca de 63% da área cultivada com cana-de-açúcar, seguida pelas regiões centro-oeste, nordeste, sul e norte, com 20,0; 9,6; 6,8 e 0,6%, respectivamente (CONAB, 2017). No estado de São Paulo concentra a maior produção de cana-de-açúcar do país, com 369,9 milhões de toneladas (56,3%) na safra 2016/2017, numa área de 4,77 milhões de hectares (52,7%), seguido por Goiás e Minas Gerais, como os três principais produtores do país (Tabela 2).

Tabela 2. Distribuição da produção e área coletada de cana-de-açúcar no Brasil, safra 2016/2017.

Estado	Produção		Área Coletada	
	Milhões de toneladas	%	Milhões de hectares	%
São Paulo	469,9	56,3	4,8	52,7
Goiás	67,6	10,3	1,0	10,6
Minas Gerais	63,7	9,7	0,9	9,4
Mato Grosso do Sul	50,3	7,7	0,6	6,8
Paraná	42,2	6,4	0,6	6,8
Mato Grosso	16,3	2,5	0,2	2,5
Alagoas	16,0	2,4	0,3	3,6
Pernambuco	11,8	1,8	0,2	2,7
Outros estados	19,3	2,9	0,4	4,7

Fonte: CONAB (2017).

O estado de São Paulo também é o maior produtor potencial de etanol com 13,70 milhões de metros cúbicos e de açúcar com 24,06 milhões de toneladas, respondendo, respectivamente, por 49,27 e 62,18% da produção nacional na safra 2016/2017 (CONAB, 2017). No que se refere a bioeletricidade, a biomassa de cana-de-açúcar no estado na safra 2013/2014 produziu 8.340 milhões de kWh, o que equivale a 22% do consumo residencial anual do estado de 37.690 milhões de kWh (ÚNICA, 2016). Desta forma, a cana-de-açúcar se constitui como o principal produto da agropecuária paulista, sendo que sua participação no valor da produção agropecuária e florestal total do estado em 2015 foi de 37,38%, representando 23,89 bilhões de reais (SILVA *et al.*, 2016a).

O grande número de variedades de cana-de-açúcar permite melhor aproveitamento do potencial produtivo da planta, para alcançar maiores produtividades e garantir a rentabilidade da cultura. De acordo com o censo varietal de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil na safra 2016/2017 realizado pelo IAC (2017), a variedade mais cultivada foi a RB867515, com 27,1% da área plantada, seguida pelas variedades RB966928 (9,1%) e SP81-3250 (7,5%). No estado de São Paulo a variedade RB867515 também ocupou a primeira

posição, com 14,7% da área total de cana-de-açúcar plantada (59.689 hectares), e 23,5% da área colhida (771.866 hectares).

A cada dia, a cultura da cana-de-açúcar se torna indispensável para os países produtores por modificar indiretamente e diretamente os fatores sociais, econômicos e ambientais e pela necessidade de produção de energia limpa e sustentabilidade ambiental. No cenário brasileiro, apesar das grandes áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar, há ainda necessidade de investimentos e pesquisas nos sistemas de manejo que irão melhorar ainda mais o setor sucroenergético e o potencial produtivo da cultura da cana-de-açúcar, assim como a sustentabilidade econômica, social e ambiental e permitirão suprir o aumento da demanda do setor.

2.2 MECANIZAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Se comparado com outras culturas, o ciclo de produção da cana-de-açúcar abrange operações que demandam níveis elevados de energia mecânica. Destacam-se o preparo do solo e o transporte de insumos tanto para o plantio como para os tratos culturais, a colheita e transporte da produção dos canaviais até as usinas e, do palhiço toda vez que seu aproveitamento esteja implantado (CGEE, 2009; BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2010).

A mecanização da cana-de-açúcar se fundamenta no uso do trator agrícola cuja bitola é menor que 2,0 m e, que trafega no terreno nas sucessivas operações de subsolagem, gradagem, plantio, tratos culturais, transbordo e recuperação do palhiço (ROQUE *et al.*, 2011), e a colhedora de cana picada. Estes equipamentos determinam ou influenciam fortemente o desenho geométrico das glebas, padrão de tráfego no campo, assim como o tamanho e a concepção da maioria dos outros equipamentos utilizados no processo produtivo (SOUZA, *et al.*, 2014).

A utilização de máquinas e equipamentos agrícolas visam a otimização de desempenhos operacionais e redução de custos. Contudo, seu emprego de forma imprópria pode gerar impactos negativos ao ambiente e aos recursos naturais sendo a compactação do solo um deles. De acordo com Wolkowski e Lowery (2008) a compactação é a compressão do solo por uma pressão externa que destrói a estrutura, reduz a porosidade e a livre circulação de água e ar, bem como acrescenta resistência para penetração das raízes, reduzindo a produtividade.

A colheita de cana-de-açúcar evoluiu do sistema tradicional de colheita manual da cana inteira com queima prévia do canavial para o sistema de colheita mecanizada de cana picada sem queima (CGEE, 2009). Esta mecanização teve sua implantação efetivamente na década de 1980, apresentando um crescimento ao longo dos anos para responder as

necessidades das usinas em atenderem seus cronogramas de produção em épocas em que a mão de obra tornou-se escassa e, motivada pela redução de custo, a evolução tecnológica em equipamentos e pela exigência ambiental para a eliminação das queimas (DIAS, 2005; CERVI *et al.*, 2015), fundamentada nas leis Federal e Estadual que estabelecem os cronogramas para a eliminação gradativa das queimadas nos canaviais (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2010).

A Lei Estadual Paulista nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, dispõe a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar com diferenciação dos prazos em áreas mecanizáveis com declividade até 12%. Tendo início em 2002, com 20% de eliminação da queima, com término previsto para 2021 com a eliminação total da queima; e em áreas não mecanizáveis, com declividade superior a 12%, tendo início em 2011 com 20% de eliminação da queima, até 2031 com a eliminação total (ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2002).

Além da Lei Estadual, outra medida que acelera a mecanização e a eliminação da queima do canavial é o Protocolo Agroambiental de Cooperação que tem como medida principal a antecipação dos prazos que regulamentam o final das queimadas no estado para 2017. Assinado em 4 de julho de 2007 pelo Governo do estado de São Paulo, pela Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento, pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e pela União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA), teve a adesão, em 2008, da Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro Sul do Brasil – ORPLANA (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2007).

Assim, com a adoção dessas medidas, de acordo com relatório da safra 2015/2016 do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, 91,3% da área de cana-de-açúcar colhidas pelas usinas e fornecedores de cana signatários (responsáveis por 92% da produção paulista), número que corresponde a uma área de 3,46 milhões de hectares, foi realizada sem queima do canavial por meio da colheita mecanizada (SISTEMA AMBIENTAL PAULISTA, 2016). Esta evolução da colheita mecanizada permitiu multiplicar o número de colhedoras de cana na última década passando de 753 máquinas na safra 2006/2007, para 3.272 máquinas na safra 2015/2016.

No sistema de colheita mecanizada são empregadas colhedoras autopropelidas que realizam corte, limpeza e transferência dos colmos de cana-de-açúcar para os veículos de transbordo ou diretamente para os caminhões de transporte (CERVI *et al.*, 2015). Sendo que este sistema de colheita é admitido em zonas com relevos até 17% de declividade, sempre quando for feita a sistematização do talhão e a regulagem das máquinas. As colhedoras podem ter um peso de até 20 toneladas, conjuntamente, com transbordos que totalmente carregados

podem chegar a 30 toneladas (BRAUNACK e McGARRY, 2006) sendo sua capacidade de coletar até 70 toneladas de cana crua por hora (NYKO *et al.*, 2013).

Entre algumas vantagens, a colheita mecanizada de cana crua proporciona a redução dos custos industriais referentes a redução dos gastos com o fim das queimadas, lavagem da cana, maior volume de bagaço na palha na moagem e de resíduos para fins energéticos, aumento da produtividade agrícola e a longevidade das soqueiras e ainda possibilidade de empregar tratores com menor potência (GONÇALVES, 2002). Rodrigues e Abi Saab (2007) reportam redução no custo de operação da colheita mecanizada de 32,74% sem queima em relação à colheita manual com queima do canavial.

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar, propicia a manutenção da cobertura de resíduo vegetal ou palhada deixada sobre o solo, funcionando como proteção contra os fatores climáticos como chuva, sol e vento, atuando assim como um mecanismo de defesa contra a erosão (SILVA *et al.*, 2006); redução da amplitude térmica do solo, gerando acréscimos do teor de água e de matéria orgânica no solo, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da planta (VASCONCELOS *et al.*, 2003). A incorporação da palha no solo gera maior produção de colmos, maiores teores de matéria orgânica, maior estabilidade de agregados, macroporosidade e teor de água no solo (SOUZA *et al.*, 2005).

Num Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico, Luca *et al.* (2008), observaram que o aporte da palhada com colheita mecanizada sem queima do canavial, aumentou o teor e o estoque de matéria orgânica, que passou a funcionar como dreno de carbono e nitrogênio atmosféricos. Assim, favorecendo o incremento da estabilidade de agregados dos solos expresso pelo maior volume de macroagregados e menor microagregados estáveis em água.

No entanto, o tráfego da máquinas (colhedora, trator e transbordo) pelos canaviais promove o aumento da compactação do solo, considerando que essas máquinas colhem apenas uma linha de cana-de-açúcar, o que acarreta no aumento do pisoteamento (VISCHI FILHO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016b), pois cada entrelinha é trafegada pelo menos quatro vezes, dois pela colhedora e dois pelo trator com transbordo, podendo ainda ocorrer algum tráfego perto da linha de cultivo ou ocasionalmente diretamente sobre a linha gerando danos à soqueira (BRAUNACK e McGARRY, 2006).

Na atualidade, no Brasil, não há outra forma de colheita de cana-de-açúcar que não seja a colheita mecanizada de cana crua, mas o problema relacionado à compactação do solo resultado dessa operação deve ser foco de atenção, sendo necessário a realização de pesquisas

que reportem sobre a mecanização dos canaviais e que visem minimizar sua influência sobre a degradação física do solo.

2.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene, cuja manutenção da produtividade está dividida em dois momentos: nos primeiros dois anos de cultivo sua produtividade está mais relacionada às características químicas e físicas dos horizontes superficiais do solo e do manejo agrícola (calagem e adubações); após a terceira colheita, a produção e produtividade da cultura (maior exploração do solo e maior disponibilidade hídrica) está mais influenciada pelas características dos horizontes sub-superficiais (EMBRAPA, 2009).

A produtividade das áreas agrícolas é função, também, de atributos do solo que influenciam no crescimento das plantas e que podem ser classificados quanto a sua natureza em físicos, químicos e biológicos. Estes atributos são afetados pelo tráfego de máquinas agrícolas promovendo excessiva pressão sobre o solo (MITCHELL e BERRY, 2001; BANGITA e RAO, 2012; VISCHI FILHO *et al.*, 2015). Os atributos físicos encontram-se relacionados a propriedades e processos do solo que promovem o crescimento de raízes, infiltração e movimento da água no perfil do solo, trocas gasosas, atividade biológica e mineralização de carbono (CARVALHO *et al.*, 2008; USDA, 2008).

Durante a colheita mecanizada, o tráfego pode afetar os atributos físicos compactando o solo, que ocorre quando as cargas impostas pelas máquinas agrícolas causam danos aos poros (CHAMEN *et al.*, 2015). A compactação se refere ao rearranjo da matriz do solo provocado pela ação de forças, levando à redução do volume de poros e aumento da densidade do solo (OTTO *et al.*, 2011). Quando ocorre a compactação, a penetração das raízes e a drenagem são restritas e a condutividade hidráulica e a permeabilidade são reduzidas (MITCHELL e BERRY, 2001), principalmente na zona de exploração do sistema radicular da planta.

Alguns solos têm maior capacidade para suportar as cargas impostas e após períodos de chuva têm maior facilidade para ser manejados e não apresentam limitações ao crescimento vegetal (SILVA *et al.*, 2002). O comportamento e resposta do solo à aplicação dessas cargas na superfície, depende das características do rodado e dos atributos físicos do solo (SOUZA *et al.*, 2015), tipo de solo, teor de água no solo, velocidade e intensidade de tráfego, das interações com a frequência de cultivo e das práticas agrícolas (CHAMEN *et al.*, 2003), da magnitude, tipo e duração das cargas impostas (LI *et al.*, 2009), dos diferentes estados de

agregação, textura, matéria orgânica e tensões que o solo recebeu no passado (SILVA *et al.*, 2002).

Uma vez que as colhedoras podem pesar até 20 toneladas e os transbordos totalmente carregados até 30 toneladas e que o tráfego de colheita, muitas vezes, é realizado em condições de solo úmido, existe um grande potencial para a compactação do solo (BRAUNACK e McGARRY, 2006). Com isso, a redução no volume de macroporos do solo pode ser superior a 50% (LIMA *et al.*, 2013), em consequência da compactação do solo, a produção das culturas é afetada.

Alguns autores, dentre eles Chamen *et al.* (2015), destacam que a produção pode diminuir em solos compactados devido ao incremento da resistência mecânica para as raízes, redução da aeração e da água armazenada no solo. A diminuição da exploração das raízes pode resultar em menor acesso a nutrientes; assim, se a redução na aeração provocada pela compactação é significativa, a disponibilidade de nitrogênio pode diminuir devido a desnitrificação, enquanto a absorção de potássio pode se restringir se a respiração dentro da raiz é reduzida (RICHART *et al.*, 2005).

A compactação do solo pode ser identificada, por meio de seus atributos físicos, como densidade do solo, distribuição de poros, tamanho e estabilidade de agregados em água, ou por meio da resistência do solo à penetração (SOUZA *et al.*, 2015; VISCHI FILHO *et al.*, 2015). Conforme Richart *et al.* (2005), na maioria dos solos cultivados intensivamente são frequentes a presença de uma estrutura maciça e adensada nas camadas superficial e sub-superficial, com valores de densidade do solo mais elevados prejudicando a aeração, penetração e a proliferação de raízes, afirmam também que não existe consenso entre os autores sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. No entanto, a alta densidade é indicador de baixa porosidade no solo e presença de compactação (SILVA *et al.*, 2016b).

Várias pesquisas em diferentes regiões apontam alterações significativas no decréscimo da porosidade, da continuidade do número e tamanho dos poros e da difusão de gases, com reduções significativas principalmente no volume dos macroporos devido a compactação do solo (SILVA *et al.*, 2015b; SOUZA *et al.*, 2015; VISCHI FILHO *et al.*, 2015). A microporosidade do solo é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo, enquanto que a macroporosidade influencia diretamente na capacidade de infiltração, na drenagem do solo e na sua capacidade de aeração (HILLEL, 1998). Devendo salientar que a mecanização promove alterações negativas na estruturação do solo comprometendo a qualidade dos solos.

A estrutura do solo é definida como sendo o arranjo das partículas, ou seja, das frações argila, silte e areia (RESENDE *et al.*, 1995). Em sua avaliação, o fator primordial a ser considerado diz respeito à estabilidade dos agregados, a qual é dependente das forças que ligam as partículas e também, da natureza e magnitude das forças desagregantes aplicadas nesta avaliação. Aliada à estabilidade dos agregados, a resistência tênsil do agregado se apresenta como uma outra propriedade estrutural que pode afetar a qualidade física do solo (GUEDES FILHO *et al.*, 2013), sendo definida como a força ou estresse por unidade de área necessária para que o solo falhe a tensão, isto é, para que se produza a quebra ou fratura dos agregados (DEXTER e WATTS, 2000).

Num Latossolo Vermelho eutroférico de textura muito argilosa, Castro *et al.* (2013) avaliaram o comportamento do solo ao longo do tempo em cultura de cana com 1, 2, 3, 4 e 5 cortes e, verificaram no decorrer do tempo o aumento da compactação do solo, resultando em redução de macroporosidade, com conseqüente aumento da microporosidade e incremento considerável na densidade do solo, assim, como redução na estabilidade de agregados; corroborando com o efeito acumulativo da compactação ao longo do tempo. Richart *et al.* (2005) destaca que a compactação modifica a estrutura do solo, sendo que os macroagregados são destruídos e o solo apresenta estrutura degradada, podendo ainda impedir o crescimento de raízes e a diminuição do volume de solo explorado pelo sistema radicular.

A profundidade da compactação varia de acordo as especificações das máquinas e de seus rodados, condições do solo, quantidade de vezes em que o solo é trafegado e com seu histórico de pressões, além do manejo (REICHERT *et al.*, 2007). Segundo Silva *et al.* (2006) o tráfego do conjunto trator e transbordo na colheita e de máquinas autopropelidas na aplicação de insumos são os principais responsáveis pela compactação nos canaviais, pois apresentam uma menor área de contato pneu-solo, ao exercer pressões na superfície do solo que podem ultrapassar 0,45 MPa.

Em três classes texturais sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, Lima *et al.* (2013), avaliaram a resistência do solo à penetração no quarto corte e, verificaram num Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa os maiores valores de resistência do solo à penetração com valor máximo de 4,7 MPa na camada de 0,20-0,30 m, seguido pelo Latossolo Amarelo de textura areia franca com valor de 4,4 MPa na mesma profundidade e, pelo Latossolo Vermelho de textura muito argilosa com 4,2 MPa na camada de 0,30-0,40 m.

O solo sob os rodados das máquinas está sujeito à força de compressão e cisalhamento e a degradação do solo é devida à resposta do solo a esses esforços (BRAUNACK e JOHNSTON, 2014). A análise de compressibilidade do solo apresenta-se como sendo um dos

atributos mais adequado ao monitoramento da degradação física do solo (PACHECO e CANTALICE, 2011; SOUZA et al., 2012; SILVA et al., 2016b). Assim, para a determinação de atributos que ajudem a prevenir que solos agrícolas sejam excessivamente compactados, pode ser empregada a curva de compressão do solo, representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996; SILVA et al., 2009).

A pressão de preconsolidação, reflete o valor máximo de carga que o solo pode suportar sem que haja uma compactação adicional, ou seja, é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo e, o outro atributo é o índice de compressão, que descreve o decréscimo do volume de um solo quando alguma pressão externa foi aplicada (ASSIS e LANÇAS, 2005; SILVA et al., 2010). Cargas inferiores à pressão de preconsolidação geram deformações elásticas ou recuperáveis, refletindo a história das tensões (cargas) que foi submetido ao solo, entretanto, pressões superiores causam deformações plásticas ou não recuperáveis e reflete sua susceptibilidade à compactação (SILVA et al., 2009).

Como a resistência do solo a deformação é fortemente dependente do teor de água, solos com alta umidade são muito mais suscetíveis à compactação em relação aos solos secos, portanto, como regra geral é proibir o tráfego quando os solos estão mais úmidos do que a capacidade de campo (MITCHELL e BERRY, 2001; CHAMEN et al., 2015). Quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para aguentar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (RICHART et al., 2005).

Avaliando as alterações estruturais e a capacidade de suporte de carga do solo antes e após a colheita mecanizada da cana, Severiano et al. (2008) em estudo realizado num Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa e Cambissolo Háplico franco-argilo-arenoso, verificaram que a capacidade de suporte de carga foi considerada baixa sob altos teores de água, com redução abrupta conforme aumentou o conteúdo de água e, que as alterações estruturais nos solos ocasionadas pelas operações de colheita mecanizada ocorreram em função da capacidade de suporte de carga nas diferentes épocas. Severiano et al. (2010) como complemento ao estudo anterior, ressaltam que mesmo sendo realizada a colheita mecanizada com teor de água do solo na zona de friabilidade (intervalo entre o conteúdo de água no limite de contração e o limite de plasticidade), gerou compactação adicional ao solo.

Se não for manejada ou minimizada, a compactação do solo impõe maiores custos e menores receitas na produção. Menores rendimentos refletem em lucros mais baixos devido, por exemplo, nas reduções das taxas de brotação e de crescimento da cultura, mas também, possivelmente, pior qualidade da colheita. Sendo que custos mais elevados de produção

refletem em entradas adicionais, tais como maior utilização de fertilizantes para conter as perdas induzidas pela compactação, além de uma maior utilização de combustíveis, devido à maior energia necessária para puxar os implementos nas lavouras num solo compactado (CHAMEN *et al.*, 2015).

Algumas técnicas são recomendadas para o manejo da compactação do solo, entre elas destacam-se: adição de matéria orgânica no solo, controle de tráfego nas operações mecanizadas, afrouxamento mecânico como subsolagem profunda, rotação com culturas ou plantas forrageiras que apresentem raízes com capacidade de penetrar e romper os solos compactados (MITCHEL e BERRY, 2001; HAMZA e ANDERSON, 2005), realizar as operações mecanizadas nos teores de água do solo adequados para suportar as cargas impostas, uso de máquinas cujo peso seja conforme aos requerimentos de energia e com pneus de alta flutuação com baixas pressões de inflação e preparos reduzidos (MITCHEL e BERRY, 2001; CHAMEN *et al.*, 2003).

Dessa forma, é inevitável a busca de alternativas tecnológicas que minimizem o impacto das operações mecanizadas na cultura da cana-de-açúcar, assim como a avaliação das consequências da sua utilização na qualidade física do solo, pois elas terão reflexo na produtividade e sustentabilidade do sistema agrícola.

2.4 CONTROLE DE TRÁFEGO E SISTEMA DE PILOTO AUTOMÁTICO

O ciclo de produção da cana-de-açúcar, envolve as fases de plantio, tratamentos culturais e colheita nas quais são transportados fertilizantes, defensivos químicos, mudas, palhico e colmos para moagem, em ordem crescente de intensidade de tráfego pela quantidade de massa movimentada (CGEE, 2009). O tamanho cada vez maior das máquinas agrícolas empregadas nessas atividades, agrava o problema da compactação do solo causando aumento dos requisitos de energia, das emissões de CO₂, dificuldade de preparo do solo, diminuição da emergência e crescimento das plantas e redução da produtividade (BOCHTIS *et al.*, 2010; GALAMBOŠOVÁ *et al.*, 2017).

Para minimizar os efeitos negativos causados pelo contínuo tráfego das máquinas agrícolas sobre o solo, o controle de tráfego surge como uma alternativa para o cultivo de cana-de-açúcar, separando as zonas de tráfego daquelas em que há crescimento das plantas e concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas (ROQUE *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2015). O controle de tráfego agrícola é um conjunto de tecnologias e práticas que limita os danos no solo e a compactação de operações mecanizadas, obtendo melhores condições de solo,

tanto para o crescimento das culturas como para os pneus das máquinas (VERMEULEN e MOSQUERA, 2009).

Portanto, o controle de tráfego consiste em alinhar todas as rodas das máquinas para todas as operações da cultura e, em seguida, restringir o seu uso a faixas de tráfego definido permanentemente, assim, consegue-se reduzir a compactação do solo que ocorre em todo o campo como resultado das operações com máquinas agrícolas (KINGWELL e FUCHSBICHLER, 2011). Deste modo, promove-se na zona não trafegada o desenvolvimento e manutenção da estrutura do solo, uma condição de solo mais favorável e propícia para o desenvolvimento radicular, manutenção de carbono orgânico, maior infiltração e armazenamento de água no solo (LI *et al.*, 2009). Ao mesmo tempo, uma linha de tráfego firme que favorece os rodados dos pneus, melhorando a tração para as operações de máquinas (TULLBERG *et al.*, 2007). Potencialmente, também com a eliminação da compactação, se tem vantagens ambientais tais como uma melhor eficiência de absorção de nutrientes, menor emissão de gases de efeito estufa (VERMEULEN e MOSQUERA, 2009), assim como redução da erosão do solo (NAWAZ *et al.*, 2013).

Normalmente o sistema de manejo com controle de tráfego envolve a adequação do espaçamento entre linhas de culturas com largura da bitola das máquinas ou estabelecendo o espaçamento entre linhas como um múltiplo da largura da bitola, garantido assim, o tráfego sempre no mesmo local, sendo que essas zonas de tráfego podem permanecer por um ciclo de corte ou ser mantidas durante vários ciclos de cultivo (BRAUNACK e McGARRY, 2006). Braunbeck e Magalhães (2010) destacam que na implementação do controle de tráfego nos canaviais, faixas de aproximadamente 0,8 m de largura, espaçadas a cada 1,5 m, são dedicadas ao tráfego das máquinas, isso quer dizer que cerca de 50% da área é usada por pneus ou esteiras das máquinas. Segundo Bochtis *et al.* (2010) o controle de tráfego agrícola elimina a compactação do solo dentro da área de cultivo, promove o incremento da produção de diferentes culturas, reduz a energia requerida para a operação das máquinas na faixa de 37 a 70% e diminui a emissão de dióxido de carbono para atmosfera.

Estudando diferentes culturas com sistema de manejo de controle de tráfego, Vermeulen e Mosquera (2009) reportaram os seguintes resultados: 1) agricultura de sequeiro australiana em sistemas de manejo com controle de tráfego e plantio direto, reduziram o escoamento superficial; 2) o controle de tráfego quando comparado com parcelas que receberam rodados anuais e preparo com coberturas de palha, obtiveram um incremento de 9,4% ao rendimento de grãos; 3) controle de tráfego mais o plantio direto incrementaram 14,5% ao rendimento de grãos; 4) aumento no rendimento de trigo e cevada obtidos na faixa de 9 a

21% em comparação com um sistema convencional; e 5) rendimentos de beterraba, batatas e cebolas aumentaram de 4 a 14%.

Outra técnica de crescente importância na agricultura, podendo ser usada em conjunto com o controle de tráfego, é o sistema de direção assistida ou piloto automático (SOUZA *et al.*, 2014). Nas últimas duas décadas, a evolução de tecnologias inovadoras para navegação e posicionamento têm sido disponibilizadas na agricultura, devido ao surgimento do GNSS (Global Navigation Satellite Systems) e seu componente GPS (Global Positioning System). Estes sistemas têm sido implementados na agricultura em aplicações no direcionamento de conjuntos mecanizados agrícolas entre outras no conceito de piloto automático. Na prática, o operador define o espaçamento entre as passadas criando uma linha de referência, e o software do equipamento replica infinitas passadas a lado da linha de referência. O posicionamento do veículo é corrigido automaticamente por atuadores no sistema de direção hidráulica / elétrica ou no volante, entretanto o operador apenas precisa retomar o controle para fazer manualmente as manobras de cabeceira (OLIVEIRA e MOLIN, 2011; ASCOUGH, 2013).

Entre as diversas vantagens da aplicação do piloto automático destaca-se a redução da carga sobre o operador propiciando ao mesmo trabalhar mais horas com qualidade. Assim, permitindo prestar atenção a outros pontos como parâmetros de controle e à mecânica da colhedora, aumentando a capacidade operacional de campo e da produtividade, maior aplicação de precisão, operação e segurança reforçada e diminuição do uso de combustível (COEN *et al.*, 2008).

No Brasil, poucas pesquisas avaliaram o efeito do controle de tráfego com sistema de piloto automático na física do solo para a cultura de cana-de-açúcar. Souza *et al.* (2015) estudaram o efeito do controle de tráfego agrícola na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, num Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa e verificaram após três colheitas que o tratamento com controle de tráfego, ajuste de bitola e sistema de piloto automático apresentou menor densidade do solo e grau de compactação e maior macroporosidade na linha de plantio. O valor de resistência do solo à penetração foi inferior a 2,0 MPa na linha de plantio nos sistemas de manejo com controle de tráfego e uso do piloto automático, apresentando maior superfície e volume radicular, produtividade, com incremento de 18,72 e 20,29% na produtividade de cana e no rendimento de açúcar, respectivamente, em relação ao sistema de manejo sem controle de tráfego.

O controle de tráfego agrícola assistido com o piloto automático se apresenta como uma tecnologia que pode ser implementada na lavoura canavieira. A concentração de cargas no

solo em áreas permanentes pode trazer benefícios aumentando a produção, otimizando o uso das áreas, e reduzindo minimamente o impacto nos recursos ambientais no processo produtivo, no entanto, surgem a necessidade de estudos no cenário brasileiro sobre sua implementação aliado a outras alternativas que permitam a redução do tráfego nas áreas canavieiras.

2.5 ESPAÇAMENTOS EM CANA-DE-AÇÚCAR

A produtividade final da cana, é afetada pelo espaçamento de plantio (RIPOLI *et al.*, 2007; GARSIDE *et al.*, 2009). Estudos têm sido desenvolvidos para determinar o espaçamento ideal em cana-de-açúcar, apresentando resultados específicos às condições locais de clima e solo, assim como às variedades e considerações econômicas quanto a insumos (RICHARD *et al.*, 1991; GALVANI *et al.*, 1997; OMOTO *et al.*, 2013). No entanto, o espaçamento ótimo não depende apenas dessas condições, mas também, da adaptação às operações mecanizadas da cultura (ISMAEL *et al.*, 2007).

Durante o planejamento da cultura, a seleção de um adequado espaçamento das linhas de plantio possibilita otimizar atividades como o uso intensivo de máquinas, propicia o aumento da produção, interfere positivamente na disponibilidade de recursos como água, luz e temperatura (SINGELS *et al.*, 2005). Campos *et al.* (2008) identificaram e avaliaram dezessete variáveis críticas no processo de produção da cana-de-açúcar e, observaram que o espaçamento irregular entresulcos foi o mais crítico.

No atual sistema de produção da cana-de-açúcar no Brasil, prevalecem dois sistemas de espaçamentos, o espaçamento simples e o espaçamento duplo. O espaçamento simples é aquele que se configura no campo por meio de distâncias equidistantes e regulares entre os sulcos de plantio. Galvani *et al.* (1997) encontraram que a redução de espaçamento de 1,80 m para 0,90 m, acarretou acréscimos da ordem de 9% na produtividade agrícola, representando um montante de 9,24 toneladas de cana por hectare.

Avaliando os atributos físicos e hídricos do solo em dois espaçamentos de plantio após o tráfego de máquinas agrícolas no estado de São Paulo, Caseiro *et al.* (2014) observaram que os espaçamentos de plantio de 1,4 e 1,5 m não influenciaram nos valores médios de densidade do solo e no teor de água do solo nas faixas de profundidade e posições amostrais estudadas. Os valores máximos de índice de cone foram verificados na profundidade de 0,20-0,40 m nos dois espaçamentos, entretanto, no espaçamento de plantio de 1,5 m foi superior (3,2 MPa) ao de 1,4 m (2,7 MPa).

O espaçamento duplo combinado, é uma variação na distância entre os sulcos de plantio, implementados, em geral, com duas linhas de cana plantadas a 0,90 m de distância uma

da outra, com espaçamento da entrelinha de 1,5 m, combinando as faixas de espaçamentos uniformes com faixas de espaçamentos alternados a fim de fornecer condições melhores de produtividade e para o controle do tráfego (DINARDO-MIRANDA *et al.*, 2008). Esse sistema permite a realização da colheita simultânea de duas linhas de cana, aumentando a capacidade de colheita pela colhedora, resultando em menores distâncias percorridas pelas máquinas e maiores valores quanto a metros de sulco por hectare, além de um maior controle de tráfego devido o maior espaço destinado aos rodados das máquinas (ISMAEL *et al.*, 2008; GARSIDE *et al.*, 2009).

Segundo Ernandes (2005) os objetivos do espaçamento duplo são: adaptar as bitolas da colhedora e do transbordo, reduzir os danos às soqueiras, preservar a longevidade do canavial e, melhorar o desempenho da colheita mecânica. No entanto, apresenta algumas barreiras, como falta de trabalhos conclusivos sobre nutrição de plantas e variedades adaptadas ao espaçamento de linha dupla e incompatibilidade com os equipamentos existentes no mercado para o manejo mecânico da cultura.

Na busca da melhor relação entre o espaçamento de plantio e as operações mecanizadas, Garside *et al.* (2009), avaliaram na Austrália diferentes configurações de espaçamentos de plantio que melhor se adaptavam ao tráfego e o efeito destes na produtividade. Os resultados mostraram que a cana possui uma capacidade para compensar as diferentes configurações de linha e densidades de plantio por meio da variação do número e peso de colmos. No entanto, a melhor configuração encontrada foi de espaçamento duplo combinado 1,8 x 0,5 m podendo substituir o espaçamento convencional de 1,5 m, sem diminuição de rendimento.

Desse modo, é preciso explorar a possibilidade de adoção de espaçamentos entrelinhas da cultura, que aliado ao controle de tráfego agrícola gerem um impacto positivo na sustentabilidade do solo e ganhos de produtividade. A carência de avaliações nesse sentido na região mais importante de produção de cana-de-açúcar, a região centro sul do Brasil, aprimora estudos com esse objetivo, pois eles serão fundamentais para predizer os benefícios destas tecnologias.

2.6 SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR

Conhecer o desenvolvimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar é de vital importância para o adequado manejo agrônômico da cultura, permitindo estabelecer o espaçamento do plantio, o local apropriado para a aplicação de fertilizantes, a realização de

operações de cultivo, o projeto e implementação de sistemas de drenagem e de irrigação, assim como o controle da erosão e uso de culturas intercalares, etc. (JADOSKI *et al.*, 2010).

A distribuição do sistema radicular no perfil do solo e sua interação com o seu ambiente de produção, tem ação direta sobre alguns fatores dos quais depende a produtividade final da cultura, como tolerância a seca, capacidade de germinação e/ou brotação, porte da planta, tolerância à movimentação de máquinas, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, resistência ao ataque de pragas e parasitas do solo, etc. (VASCONCELOS e DINARDO-MIRANDA, 2011). A capacidade de explorar o solo e de aproveitar os nutrientes, a água e o oxigênio disponível é maior quanto maior for o enraizamento da planta (MEDINA *et al.*, 2002; BENGOUGH *et al.*, 2011).

Segundo Vasconcelos e Garcia (2005), a genética e o ambiente (solo e clima) são os fatores que afetam a arquitetura e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar. Nos fatores genéticos, as espécies e as variedades apresentam diferenças relevantes ao desenvolvimento e à arquitetura do sistema radicular. Algumas variedades têm maior concentração superficial, entretanto, outras alcançam maior distribuição em profundidade; algumas apresentam maior quantidade de raízes finas e macias e em outras prevalecem as raízes grossas e resistentes; há variedades que depois do período de seca tem rápida recuperação do crescimento radicular pela restauração da umidade do solo e, outras mais tardia.

Dentro do ambiente, e mais especificamente dentro do solo, um dos fatores físicos que maior influência o desenvolvimento das raízes é a densidade do solo, afetada pela compactação como consequência do tráfego de máquinas, veículos, implementos de preparo e animais. Esse aumento acarreta na redução da macroporosidade, diminuição da aeração, da condutividade hidráulica e aumento da resistência do solo à penetração, impedindo ou restringindo o desenvolvimento do sistema radicular (VASCONCELOS e DINARDO-MIRANDA, 2011).

Em resposta ao ambiente solo, as raízes criam plasticidade na forma e tamanho do sistema, isto é, ocorre uma variação considerável nas propriedades do sistema radicular com implicações para as funções das raízes e resposta da planta ao estresse (SMITH *et al.*, 2005). Deste modo, o sistema radicular é o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação que iniciam com um efeito de limitação ao desenvolvimento das raízes, com consequências físicas e fisiológicas sobre o crescimento da parte aérea e produtividade das plantas (REICHERT *et al.*, 2007; OTTO *et al.*, 2011).

Alterações das condições físicas do solo como resistência do solo à penetração, densidade e porosidade do solo, proporcionam um desenvolvimento do sistema radicular

resultando em distintas formas e tamanhos (BENGOUGH *et al.*, 2011). Os fatores morfológicos das raízes segundo Otto *et al.* (2009), estão associados com funções vitais para as plantas, como: o comprimento está relacionado com o potencial de absorção de nutrientes e água do solo; a massa de raízes se relaciona com o volume total de material e de nutrientes acumulados e determina o volume de solo ocupado pelas raízes; a área da raiz determina a absorção de água e nutrientes do solo e o diâmetro das raízes, se relaciona com a regulação do estresse hídrico.

O desenvolvimento do sistema radicular em cana planta se inicia a partir dos primórdios radiculares dos toletes plantados, com a formação das raízes de fixação, estas são finas e altamente ramificadas e se encarregam de sustentar o crescimento da planta nas primeiras semanas (SMITH *et al.*, 2005). Segundo Casagrande (1991) durante os primeiros 30 dias, ocorre a emissão das raízes de fixação e brotação de gemas, a cana planta sustenta da reserva de nutrientes do tolete que é redistribuída e, parcialmente dos nutrientes absorvidos pelas raízes de fixação. Após esse período, inicia-se o desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários, logo dos secundários, e assim sucessivamente, até as raízes de fixação perder a função e, a cana planta passa a depender unicamente da atividade das raízes dos perfilhos.

Após o corte da cana, as raízes permanecem em atividade por algum tempo, nesse período são substituídas gradualmente pelas raízes dos perfilhos da soqueira (FARONI e TRIVELIN, 2006). Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2011) destacam que o processo de morte ou renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar, ocorre devido aos ciclos de secagem e umedecimento do solo, mas não pelo fato do corte da parte aérea da planta. Quando o corte da cana é feito em período úmido, não há morte de raízes, entretanto, se formam novas a partir das velhas. O que ocorre é que na época seca, a aparência dessas raízes torna-se escurecidas dando a impressão de estarem mortas, mas no momento do umedecimento do solo elas emitem novas ramificações. Os autores ressaltam que o processo de morte das raízes pode ter iniciado antes do momento de ser feito o corte da cana em período de estresse hídrico.

Durante os ciclos da soqueira há um desenvolvimento acumulativo das raízes de um corte para outro, sobretudo nas camadas superfícies do solo onde se concentra a maior quantidade de matéria seca das raízes, devido à brotação dos perfilhos ocorrer mais próximo da superfície (FARONI e TRIVELIN, 2006; VASCONCELOS e DINARDO-MIRANDA, 2011), estando sujeitas a condições mais adversas do solo geradas pelo tráfego (ALVAREZ *et al.*, 2000).

Num Latossolo Vermelho distrófico típico, Otto *et al.* (2009) estudando a cultivar SP 81-3250, verificaram 65% das raízes concentradas nos primeiros 0,20 m de profundidade e 80% distribuídas no volume compreendido nos 0,60 m centrais da linha de plantio (0,30 m de

cada lado) até uma profundidade de 0,60 m. Nas mesmas condições de estudo, Otto *et al.* (2011) avaliando o efeito da compactação do solo na distribuição de raízes em área com colheita mecanizada, observaram que a densidade do sistema radicular da cana-de-açúcar decresce exponencialmente com a profundidade e distanciamento da planta. O crescimento das raízes não foi afetado por valores de resistência do solo à penetração até 0,75 MPa, entretanto, para valores de 0,75 a 2,0 MPa ocorreram diminuição no desenvolvimento das raízes e restrição severa a partir de 2,0 MPa.

Avaliando a distribuição do sistema radicular das variedades SP 70-1143, SP 71-799, SP 71-6163, NA 56-79 e RB 72-5828 em cana planta e soca, num Latossolo Vermelho Amarelo álico, Korndörfer *et al.* (1989), verificaram 89 a 92% das raízes nos primeiros 0,30 m de profundidade para cana planta e, 85 a 92% das raízes nos primeiros 0,40 m em cana soca e, não observaram diferença entre as variedades. Souza *et al.* (2012) avaliaram o desenvolvimento radicular de cana-de-açúcar do cultivar RB 85-5453 com espaçamentos simples, num Latossolo Vermelho distrófico típico álico e, observaram maior densidade radicular quando a cultura foi manejada com colheita mecanizada com controle de tráfego, piloto automático e ajuste de bitola em relação ao manejo sem controle de tráfego.

Assim, a avaliação do sistema radicular pode ser considerada fundamental no estudo dos efeitos da qualidade física do solo nos sistemas de colheita mecanizada, uma vez que seu desenvolvimento e distribuição no solo é afetado pelas características e interação com o ambiente, refletindo na produtividade final da cultura. Desse modo, espera-se que as plantas sem as restrições do tráfego na região da soqueira possam explorar maior volume de solo, possibilitando melhor distribuição do sistema radicular, refletindo na produtividade da cultura.

CAPÍTULO III – COMPACTAÇÃO DO SOLO, SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS E CONTROLE DE TRÁFEGO

RESUMO

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar usando máquinas cada vez maiores e mais pesadas promove o aumento da compactação do solo. O sistema de manejo com controle de tráfego por meio de piloto automático se apresenta como uma alternativa que minimiza a compactação nos canaviais, visando preservar um maior volume de solo favorável para o desenvolvimento das raízes da cultura. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as alterações em atributos físicos e mecânicos do solo bem como seus efeitos no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar cultivada em diferentes espaçamentos e com controle de tráfego agrícola. O experimento foi conduzido num Latossolo Vermelho no município de Nova Europa no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, durante as safras agrícolas 2015/2016 e 2016/2017. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições e três tratamentos. Os tratamentos foram: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento tradicional de 1,50 m entre as linhas e colhida sem controle de tráfego; T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento de 1,50 m e colhida em sistema de controle de tráfego; T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colhida com controle de tráfego. Amostras de solo foram retiradas nas posições relativas à linha de plantio, sob o rodado das máquinas e em local situado na distância médio entre a linha da cultura e a região do tráfego, usualmente denominado canteiro, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m. Foram medidos os seguintes atributos físicos: densidade do solo, porosidade e resistência do solo à penetração. Também foram medidas variáveis biométricas como o diâmetro de colmo, altura das plantas e rendimento da cultura. Parâmetros radiculares foram avaliados somente após a safra 2015/2016. O controle do tráfego resultou em menor densidade do solo e maior macroporosidade na linha de plantio e no canteiro. Independente do tratamento, verificou-se diferenças de resistência do solo à penetração, densidade do solo e macroporosidade entre os locais de amostragem. Observou-se um incremento de 17,9% da biomassa seca de raízes em T2 e de 18,5% no tratamento T3 bem como maior densidade, comprimento, volume e área radicular em comparação ao manejo sem controle de tráfego. A adoção do controle de tráfego resultou em ganhos na produtividade de 9 e 12% no T2 e de 21 e 18% no T3 na terceira e quarta colheita, respectivamente.

Palavras-chave: Estrutura do solo; densidade do solo; macroporosidade; piloto automático; biomassa seca radicular.

SOIL COMPACTION, ROOT SYSTEM AND PRODUCTIVITY OF SUGARCANE UNDER DIFFERENT ROW SPACINGS AND CONTROLLED TRAFFIC

ABSTRACT

A mechanical sugar cane harvest using increasingly larger and heavier machines promotes increased soil compaction. The management system with controlled traffic and automatic steering is presented as an alternative that minimizes compaction in the cane fields, aiming to preserve a greater volume of soil favorable for the root development of the crops. The objective of this study was to evaluate changes in the soil physical-mechanical attributes as well as their effects on root system growth and sugar cane productivity planted with different row spacings and with controlled traffic farming. The study was carried out on an Oxisol in the city of Nova Europa, state of São Paulo, Southeastern Brazil, during the 2015/2016 and 2016/2017 harvest periods. The experiment followed the randomized block design, with four replications and three treatments. The treatments were: T1 - sugar cane planted with traditional row spacing at 1.5 m between lines crop and harvested without controlled traffic; T2 - sugar cane planted with single row spacing at 1.5 m and harvested with controlled traffic; and T3 - sugar cane planted with double combined row spacing (1.50 x 0.90 m) and harvested with controlled traffic. Soil samples were collected in the positions relative to the plant row, under the wheels of the machines and in a place situated in the middle between the plant row and the traffic region, usually called the seedbed, at the layers 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, 0.30-0.40, 0.40-0.50, 0.50-0.70 and 0.70-1.00 m. The following physical attributes were measured: soil bulk density, porosity and soil resistance to penetration. Biometric variables such as stem diameter, plant height and crop yield were also measured. Root parameters were evaluated only after 2015/2016 harvest period. Controlled traffic resulted in lower bulk density and higher macroporosity at the plant row and seedbed. Regardless of the treatment, there were differences in soil resistance to penetration, bulk density and macroporosity between the sampling sites. There was an increase of 17.9% in dry biomass of roots in T2 and of 18.5% in T3 treatment as well as higher density, length, volume and root area compared to the control without traffic control. The adoption of traffic control resulted in crop yield increases of 9 and 12% in T2, and of 21 and 18% in T3 in the third and fourth harvest, respectively.

Keywords: Soil structure; bulk density; macroporosity; automatic steering; dry root matter.

3.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar tem grande importância econômica no Brasil em face da produção de açúcar, bioetanol e bioeletricidade, representando mais de 5% das exportações nacionais (MDIC, 2018) e ocupando cerca de 10% (9.049.000 ha) da área utilizada para a produção agrícola (CONAB, 2017). Neste contexto, a elevada disponibilidade de áreas para expansão da cultura, aliada à demanda crescente por fontes de energia renováveis e a regulamentação sobre a eliminação da queima da cultura, resultou na massiva mecanização das áreas produtoras com intensificação da colheita mecanizada.

A colheita mecanizada trouxe vantagens como redução dos custos de operação, aporte de biomassa e manutenção de resíduo vegetal na superfície resultando em maior proteção do solo contra a erosão, em incremento de matéria orgânica e de retenção de água no solo (SOUZA *et al.*, 2012; SÁ *et al.*, 2016). No entanto, a movimentação de máquinas com diferentes dimensões de bitola resulta no tráfego generalizado que favorece a compactação e a degradação da qualidade física do solo (TULLBERG *et al.*, 2018). No sistema atual de produção, ocorre tráfego aleatório de máquinas ocasionando compactação em aproximadamente 60% da superfície do solo, reduzindo o volume de solo explorado pelo sistema radicular e influenciando negativamente no desenvolvimento e na produtividade da cana-de-açúcar (SOUZA *et al.*, 2014).

A performance das máquinas e da cultura dependem de condições físico-mecânicas de solos contrastantes. A produtividade da cultura depende de condições físicas do solo que suportam o armazenamento e disponibilidade de água, a adequada difusão de gases e níveis não impeditivos de resistência ao crescimento das raízes. Já as máquinas requerem solo firme que proporcione condições para uma adequada tração e desempenho nas diferentes operações no sistema de produção (BRAUNACK e McGARRY, 2006). Com o uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas para as operações de manejo dos canaviais (por ex., colhedoras podem atingir massa de 20 toneladas e os transbordos até 30 toneladas (BRAUNACK e McGARRY, 2006), o incremento na compactação do solo pode culminar com redução de até 50% do potencial produtivo da cultura na quarta e quinta cana soca (CHERUBIN *et al.*, 2016a). Assim, são necessárias estratégias para reduzir a ocorrência de compactação e para minimizar os danos à estrutura do solo, os quais comprometem a absorção de água e nutrientes, a trocas gasosas no sistema solo-planta-atmosfera e promove decréscimos da produção (SOUZA *et al.*, 2014).

O controle de tráfego é um dos meios mais efetivos para o manejo da compactação, mediante o confinamento de toda a carga das rodas em linhas permanentes de tráfego,

preservando maior volume de solo sem compactação para o crescimento das plantas (GALAMBOŠOVÁ *et al.*, 2017). O piloto automático é um sistema de direção assistida em que o controlador GPS gerencia o deslocamento da máquina a partir de linhas de referência, melhorando a acurácia no controle de tráfego (SOUZA *et al.*, 2012 e 2014) e auxilia na redução de áreas compactadas nos canaviais. O uso desta técnica garante o paralelismo nas passadas das máquinas em relação às linhas da cultura, o que evita o dano do tráfego na região da touceira bem como a quebra de colmos (SOUZA *et al.*, 2014).

O rendimento da cultura da cana-de-açúcar também é afetado pelo espaçamento entre as linhas (GARSIDE *et al.*, 2009; ROSSI NETO *et al.*, 2018). Estudos têm sido desenvolvidos para determinar o espaçamento ideal para a produção de cana-de-açúcar e os resultados têm se mostrado serem específicos às condições locais de clima e solo bem como às variedades e ao uso de insumos (RICHARD *et al.*, 1991; GALVANI *et al.*, 1997; OMOTO *et al.*, 2013). No entanto, o espaçamento ótimo depende também da adaptação às operações mecanizadas da cultura (ISMAEL *et al.*, 2007), durante o planejamento da cultura, a seleção de um adequado espaçamento entre as linhas de plantio possibilita otimizar a disponibilidade de água, luz e temperatura (SINGELS *et al.*, 2005), o uso mais eficiente de máquinas, o que contribui para maiores patamares de rendimento.

O plantio alternado com espaçamento duplo favorece o controle de tráfego e se apresenta como alternativa na redução da compactação do solo em áreas de produção de cana-de-açúcar (GALVANI *et al.*, 1997; GARSIDE *et al.*, 2009). O espaçamento duplo combinado é uma variação na distância entre os sulcos de plantio, implementados, em geral, com duas linhas de cana plantadas a 0,90 m de distância uma da outra, espaçadas das outras linhas subsequentes em 1,5 m. Esta modalidade combina as faixas de espaçamentos uniformes com faixas de espaçamentos alternados, favorecendo a operação das máquinas (DINARDO-MIRANDA *et al.*, 2008). Um aumento de produtividade neste sistema tem sido atribuído também ao aumento da área efetivamente ocupada com a cultura devido o maior número de plantas por hectare (KLOMSA-ARD *et al.*, 2007).

Informações referentes ao comportamento físico do solo e do sistema radicular frente a estas alternativas de manejo (uso de controle de tráfego e espaçamentos entre linhas), possibilitarão um melhor entendimento das relações solo-máquina-planta. A distribuição do sistema radicular no perfil do solo e sua interação com o ambiente de produção tem ação direta sobre alguns fatores dos quais depende a produtividade final da cultura como tolerância a seca, capacidade de germinação e/ou brotação, porte da planta, movimentação de máquinas, uso dos

nutrientes, resistência ao ataque de pragas e parasitas do solo, dentre outros fatores (VASCONCELOS e DINARDO-MIRANDA, 2011).

A capacidade de explorar o solo e de aproveitar os nutrientes, a água e o oxigênio disponível é maior quanto maior for o volume de solo ocupado pelas raízes da planta (MEDINA *et al.*, 2002; BENGOUGH *et al.*, 2011). Em resposta ao ambiente solo, as raízes sofrem modificações geométricas com implicações para as funções das raízes e a respostas das plantas aos estresses (SMITH *et al.*, 2005). Deste modo, o sistema radicular é o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação que iniciam com a limitação ao desenvolvimento, com consequências físicas e fisiológicas sobre o crescimento e produtividade das plantas (REICHERT *et al.*, 2007; OTTO *et al.*, 2011).

No cenário atual de produção de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, ainda são limitadas as avaliações das condições físicas do solo e o desenvolvimento radicular em diferentes sistemas de manejo do tráfego. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações em atributos físicos e mecânicos do solo e sua influência no desenvolvimento do sistema radicular e na produtividade da cana-de-açúcar, cultivada com espaçamento simples e duplo combinado com controle de tráfego agrícola.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área e delineamento experimental

O estudo foi conduzido em uma área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum*), variedade RB867515, estabelecida em novembro de 2012, num Latossolo Vermelho distrófico, textura média, com relevo plano a suave ondulado, na Usina Santa Fé, município de Nova Europa, estado de São Paulo, Sudeste do Brasil (21°48'42"S, 48°36'33"W e 500 m de altitude). As características físicas do solo até 0,30 m de profundidade estão apresentadas na Tabela 3. O clima da região é subtropical úmido do tipo Cwa (classificação climática de Köppen), com temperatura mínima de 16 °C, máxima de 29 °C e precipitação média anual de 1.340 mm.

O experimento foi implantado utilizando o delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições, no esquema de parcelas sub-subdivididas, com três tratamentos: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m entre linhas e colheita mecanizada sem controle de tráfego; T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m e colheita mecanizada com controle de tráfego; T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado (1,50 m x 0,90 m) e colheita mecanizada com controle de tráfego. As parcelas experimentais tinham dimensões de 50 m de comprimento por 30 m de largura e as linhas de

plântio foram estabelecidas em sentido paralelo ao comprimento da parcela, com 20 linhas por parcela nos tratamentos com espaçamentos simples (T1 e T2) e 12 linhas duplas no tratamento T3. As configurações dos espaçamentos entre linhas de plântio resultaram em 6.667 m lineares de cana por hectare em T1 e T2 e em 8.333 m lineares de cana por hectare em T3.

Tabela 1. Caracterização física e granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Camada (m)	AG	AF	AT	Silte	Argila	Classe textural ¹	Dp	Ds	MaP	MiP	PT
	g kg ⁻¹						Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³		
0,00-0,10	183,5	430,2	613,7	171,9	214,4	Média	2,67	1,32	0,17	0,33	0,50
0,10-0,20	179,6	443,9	623,5	158,4	218,1	Média	2,65	1,34	0,15	0,34	0,49
0,20-0,30	152,9	422,3	575,2	161,0	263,8	Média	2,75	1,36	0,15	0,36	0,51

AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; Dp = densidade da partícula; Ds = densidade do solo; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total. ¹Classificação conforme Embrapa (2013).

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar em todos os ciclos da cultura foi realizada por uma colhedora da marca CASE, modelo B8800, com rodados de esteira de 0,47 m de largura, bitola de 1,90 m e massa de 20,60 Mg. O transporte da cana-de-açúcar colhida foi realizado em transbordos da marca ANTONIOSI, modelo ATA-8000, operados em sistema tandem, com bitola de 3,00 m, massa de 6,50 Mg e capacidade para transportar 8,50 Mg de cana. Os transbordos foram tracionados por tratores VALTRA modelo BH 180, com bitola de 2,10 m e massa de 10,50 Mg. Nas parcelas correspondentes aos tratamentos 2 e 3, a colheita foi realizada com o uso do piloto automático marca Topcon, modelo System 150, usando-se os mapas construídos para cada parcela experimental. Os mapas foram gerados durante o plântio da cultura e foram configurados por meio de piloto automático com padrões de orientação automática com 0,02 m de precisão em tempo real, incluindo as bordaduras e reconhecimento que auxiliam na conclusão de voltas e na captação das informações de faixas posteriores.

3.2.2 Avaliações realizadas

As avaliações dos atributos físicos do solo e da produtividade da cultura foram realizadas nos períodos correspondentes à terceira e quarta colheita (safra 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente). O sistema radicular foi avaliado somente para o período correspondente à terceira colheita (safra 2016/2017).

3.2.2.1 Amostragem do solo

Amostras de solo não deformadas para determinações dos atributos físicos do solo foram obtidas por meio de cilindros de aço inoxidável com dimensões de 0,05 m de diâmetro e altura. As amostras foram coletadas em uma trincheira com dimensões 1,50 m de comprimento x 0,50 m de largura x 1,00 m de profundidade aberta no interior de cada parcela para os

tratamentos T1 e T2 e dimensões de 2,40 m de comprimento x 0,50 m de largura x 1,00 m de profundidade para o tratamento T3.

As amostras foram coletadas em posições relativas à linha de plantio (LP) – local correspondente à região da touceira ou sulco de plantio; à linha do rodado (LR) – local correspondente à entrelinha, localizado no centro das duas linhas de plantio e distanciado a 0,75 m da linha de plantio e onde ocorre o tráfego dos rodados das máquinas; e à região correspondente ao ponto médio entre a linha de plantio e a linha do rodado, denominado de canteiro (C) localizado a 0,375 m da linha de plantio. Estes locais de coleta de amostras bem como as camadas amostradas são mostrados na Figura 14.

Em cada local foram coletadas sete amostras de solo, correspondentes a uma amostra das camadas de 0,0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m, 0,40-0,50 m, 0,50-0,70 m e 0,70-1,00 m. Nos tratamentos com espaçamentos simples entre linhas (T1 e T2) foram retiradas 140 amostras em cada tratamento e no tratamento de espaçamento duplo combinado (T3) um total de 168 amostras.

Figura 14. Esquema de amostragem do solo e dos monólitos para avaliação do sistema radicular. A) nos tratamentos de espaçamentos simples sem e com controle de tráfego (T1 e T2); B) no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego (T3). LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. M1, M2 e M3 = dimensões dos monólitos para as profundidades de 0,00-0,50, 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, respectivamente. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem dos monólitos.

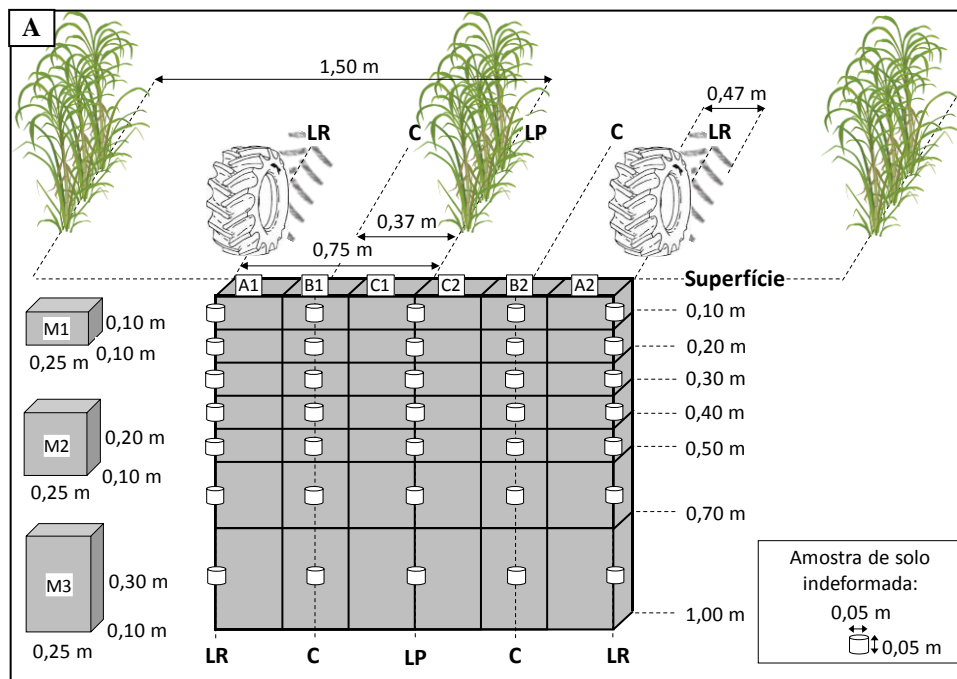
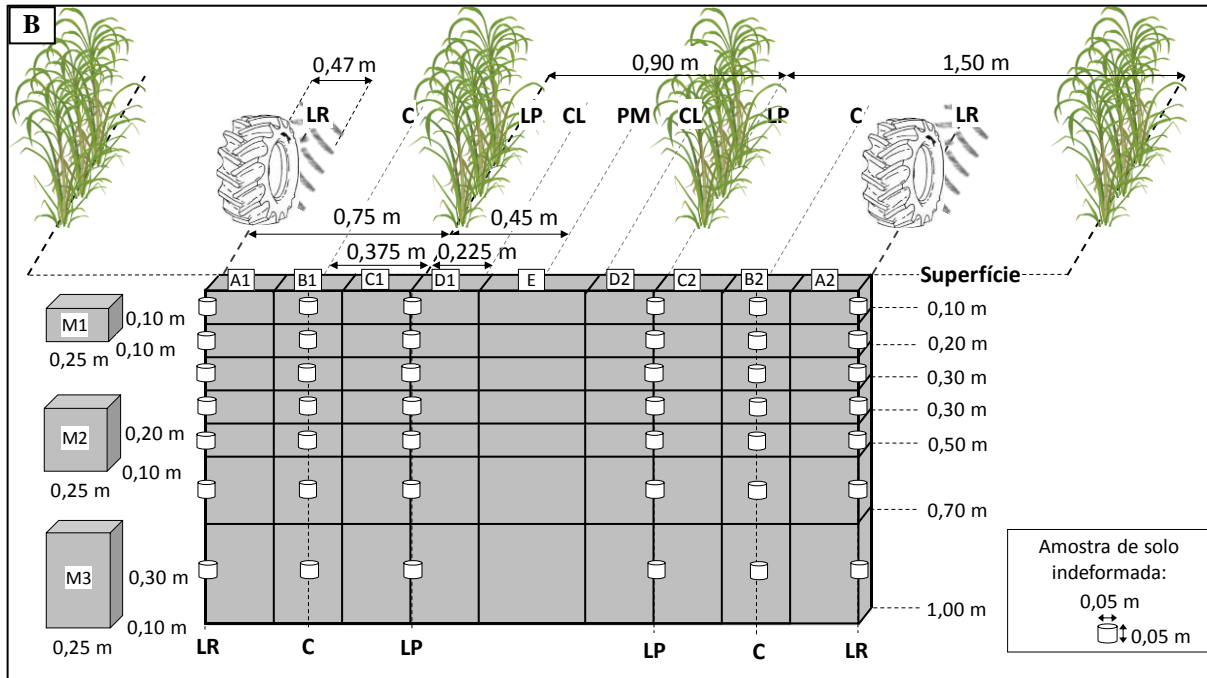


Figura 14. (Continuação)



3.2.2.2 Atributos do solo

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada após colheita da cana utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar (STOLF *et al.*, 2014), com ponta cônica com área de 1,29 cm², ângulo de penetração de 30° e haste com 0,7 m de comprimento. Os locais de avaliação corresponderam aos mesmos locais de amostragem do solo especificados na Figura 14, sendo que para o tratamento de espaçamento duplo (T3), na região entre as linhas duplas foram acrescentados dois pontos, sendo um no canteiro de linha dupla (CL) situado a 0,225 m da linha de plantio e outro no ponto médio da linha dupla (PM) situado a 0,450 m de distância da linha de plantio. O cálculo da RSP foi feito conforme a equação 13:

$$RSP = 0,56 + 0,689 \times (N/P) \times 10 \quad (13)$$

em que, RSP = resistência do solo à penetração (MPa); N = número de impactos; P = distância de penetração do cone (cm). Independente do tratamento, as determinações de RSP foram realizadas no mesmo dia para reduzir a variação da umidade do solo. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 2011), utilizando um trado tipo rosca para coleta da amostra de solo em camadas de 0,10 m até 0,70 m de profundidade. Cada amostra de solo foi acondicionada numa lata de alumínio para impedir a perda de água até seu processamento no laboratório.

As amostras indeformadas foram ajustadas às dimensões dos cilindros e em seguida foram saturadas em uma bandeja mediante o aumento gradual da lâmina de água até alcançar

2/3 da altura do cilindro. Após saturadas, as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão para drenagem no potencial mátrico de -6 kPa durante 16 horas. Posteriormente, elas foram pesadas para determinar o teor de água retido nessa tensão. Em seguida foram secadas em estufa a 105 °C por 24 h. A densidade do solo (D_s) foi calculada pela razão entre a massa do solo seco e o volume da amostra. O volume de macroporos (MaP) foi calculado pela diferença entre o teor de água do solo saturado e o teor de água retido do solo após o equilíbrio no potencial -6 kPa (EMBRAPA, 2011).

3.2.2.3 Avaliação do sistema radicular

As avaliações dos parâmetros radiculares foram feitas após a terceira colheita da cana-de-açúcar utilizando a metodologia descrita por Böhm (1976). As amostras dos monólitos de solo foram coletadas nas mesmas trincheiras usadas para a retirada das amostras indeformadas (Figura 14). Foram utilizadas caixas metálicas de 0,25 x 0,10 x 0,10 m de largura, altura e comprimento, respectivamente, nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. Nas camadas de 0,50-0,70 e 0,70-1,00 m, as dimensões do monólito foram de 0,25 x 0,20 x 0,10 m e 0,25 x 0,30 x 0,10 m, respectivamente.

A separação das raízes do solo foi feita por meio de lavagem em água corrente e peneiramento com abertura de malha de 2,0 mm conforme Vasconcelos *et al.* (2003). As raízes foram avaliadas por meio de um scanner ótico com resolução de 300 dpi e as imagens geradas foram processadas no software SAFIRA® para a determinação do comprimento total (CTR), da área (AR), do volume (VR) e do diâmetro radicular (DiR) agrupado em três classes: raízes finas (DiR < 0,5 mm); raízes médias (DiR entre 0,5 e 2,0 mm); e raízes grossas (DiR > 2,0 mm). Finalmente as raízes foram secas em estufa com circulação de ar a 65 °C por 72 horas para obtenção da massa seca de raízes (M_s), da biomassa seca (BSR) e da densidade radicular (DR). A biomassa seca das raízes e a densidade de raízes foram calculadas de acordo com Otto *et al.* (2011), como descrito pelas equações 14 e 15 respectivamente.

$$BSR=(DR*V_s) \quad (14)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (kg ha^{-1}); DR = densidade radicular em (g dm^{-3}); V_s = volume do solo representado em cada ponto amostrado em ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

$$DR=M_s / V_m \quad (15)$$

sendo, M_s = massa seca de raízes (g); V_m = volume do monólito - dm^{-3} ($V_m = 2,5 \text{ dm}^3$ para as camadas de 0,00-0,50 m, $V_m = 5,0 \text{ dm}^3$ para as camadas de 0,50-0,70 m, $V_m = 7,5 \text{ dm}^3$ para a camada de 0,70-1,00 m). Os valores de V_s foram obtidos conforme as equações 16 (tratamentos T1 e T2) e 17 (tratamento T3) segundo as orientações de Otto *et al.* (2011):

$$V_s = (0,25 \text{ m} * h * 10.000 \text{ m}^2 / 1,5 \text{ m}), \text{ para os tratamentos T1 e T2} \quad (16)$$

$$V_s = (0,25 \text{ m} * h * 10.000 \text{ m}^2 / 2,4 \text{ m}), \text{ para o tratamento T3} \quad (17)$$

em que, h = altura do monólito (m) para cada camada de solo.

3.2.2.4 Avaliações biométricas e produtividade

As avaliações biométricas e de produtividade foram realizadas em 28 de novembro de 2016 e em 9 de outubro de 2017 (terceira e quarta colheita, respectivamente). Estas avaliações foram determinadas para cada parcela em 3 faixas de 5 metros de comprimento da linha de plantio, aleatoriamente distribuídas na parcela. Foram avaliadas a população de plantas (número de plantas ha⁻¹) por meio de contagem, o rendimento (Mg ha⁻¹), o diâmetro (cm) e altura do colmo (cm).

3.2.3 Análises dos resultados

Para análise dos resultados dos atributos físicos do solo foram realizadas comparações entre os tratamentos para os locais comuns entre eles (LR, C e LP) utilizando um modelo matemático para delineamento em blocos ao acaso com parcelas sub-subdivididas: parcela = tratamento (n = 3); sub = local de amostragem (n = 3); sub-sub = camada de solo (n = 7). Para os atributos biométricos (população de plantas, diâmetro e altura de colmos) e de rendimento, as comparações foram realizadas apenas considerando os tratamentos T1, T2 e T3. A análise estatística foi realizada no software Assistat v.7.7, por meio da análise de variância usando o teste F ao nível de 5% de probabilidade. Quando houve significância nas interações ou entre os níveis dos fatores, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Atributos físicos do solo

Independente do ano agrícola, não se constatou interações triplas significativas (manejo x local de amostragem x camada de solo) para os atributos físicos do solo. Contudo, interações duplas apresentaram significância (manejo versus local e manejo versus camada de solo), a partir do qual procedeu-se o desdobramento destas interações.

Resistência do solo à penetração (RSP)

A RSP foi menor nos tratamentos com controle de tráfego (T2 e T3) em comparação com T1. Em relação aos locais avaliados, verificou-se que a RSP foi menor na LP e C comparado com LR, sendo que a RSP aumentou na sequência LP<C<LR (Tabela 4). Na terceira colheita, o T1 apresentou menor RSP na LP comparado com C e LR. No entanto, na quarta colheita não foram constatadas diferenças significativas entre os locais de amostragem, embora o aumento de RSP ocorreu na sequência LP<LR<C independentemente da safra avaliada.

Tabela 4. Resistência do solo à penetração e teor de água no solo após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos, locais e camadas de amostragem.

	-----Terceira colheita -----					-----Quarta colheita -----				
	T1	T2	T3	Média	CV (%)	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Local	Resistência do solo à penetração (MPa)									
LR	2,66 Aa	2,85 Aa	3,18 Aa	2,90 A		3,52 Ab	3,97 Aa	4,21 Aa	3,90 A	
C	2,79 Aa	2,37 ABa	2,35 Ba	2,51 B	30,06	3,53 Aa	3,05 Ba	3,20 Ba	3,26 B	28,22
LP	2,06 Ba	1,91 Ba	1,83 Ba	1,93 C		2,92 Aa	2,68 Ca	2,79 Ba	2,80 C	
Camada (m)										
0,00-0,10	1,45 Aa	1,36 Aa	1,20 Aa	1,34 B		2,68 Aa	2,35 Aa	2,41 Aa	2,48 C	
0,10-0,20	2,66 Aa	2,45Aa	2,28 Aa	2,46A		3,49 Aa	3,59 Aa	3,76 Aa	3,61 AB	
0,20-0,30	2,65 Aa	2,62 Aa	2,74 Aa	2,67 A		3,74 Aa	3,75 Aa	3,62 Aa	3,70 A	
0,30-0,40	2,75 Aa	2,49 Aa	2,76 Aa	2,67 A	16,70	3,70 Aa	3,41 Aa	3,46 Aa	3,52 AB	19,28
0,40-0,50	2,77 Aa	2,60 Aa	2,86 Aa	2,74 A		3,32 Aa	3,11 Aa	3,53 Aa	3,32 AB	
0,50-0,70	2,64 Aa	2,60 Aa	2,77 Aa	2,67 A		3,10 Aa	3,20 Aa	3,35 Aa	3,22 B	
0,70-1,00	2,61 Aa	2,51 Aa	2,52 Aa	2,55 A		3,23 Aa	3,19 Aa	3,66 Aa	3,36 AB	
Média	2,50 a	2,38 a	2,45 a			3,32 a	3,23 a	3,40 a		
CV (%)		40,60					30,13			
Local	Teor de água no solo (kg kg⁻¹)									
LR	0,20 Aa	0,19 Aa	0,18 Aa	0,19 B		0,18 Aa	0,16 Aa	0,16 Aa	0,17 B	
C	0,20 Aa	0,19 Aa	0,18 Aa	0,19 B	10,42	0,18 Aa	0,16 Aa	0,16 Aa	0,17 B	11,38
LP	0,22 Aa	0,20 Aa	0,21 Aa	0,21 A		0,19 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,19 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,20 Aa	0,20 Aa	0,19 Aa	0,20 A		0,15 Aa	0,16 Aa	0,15 Aa	0,15 C	
0,10-0,20	0,19 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,18 B		0,16 Aa	0,14 Aa	0,14 Aa	0,15 C	
0,20-0,30	0,18 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,18 B		0,17 Aa	0,16 Aa	0,15 Aa	0,16 C	
0,30-0,40	0,22 Aa	0,19 Aa	0,18 Aa	0,20 A	9,95	0,19 Aa	0,17 Aa	0,17 Aa	0,18 B	8,85
0,40-0,50	0,22 Aa	0,20 Aa	0,19 Aa	0,20 A		0,20 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,19 AB	
0,50-0,70	0,23 Aa	0,21 Aa	0,20 Aa	0,21 A		0,21 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	0,20 A	
0,70-1,00	0,22 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 A		0,21 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	0,20 A	
Média	0,21 a	0,19 a	0,19 a			0,18 a	0,17 a	0,17 a		
CV (%)		19,16					15,48			

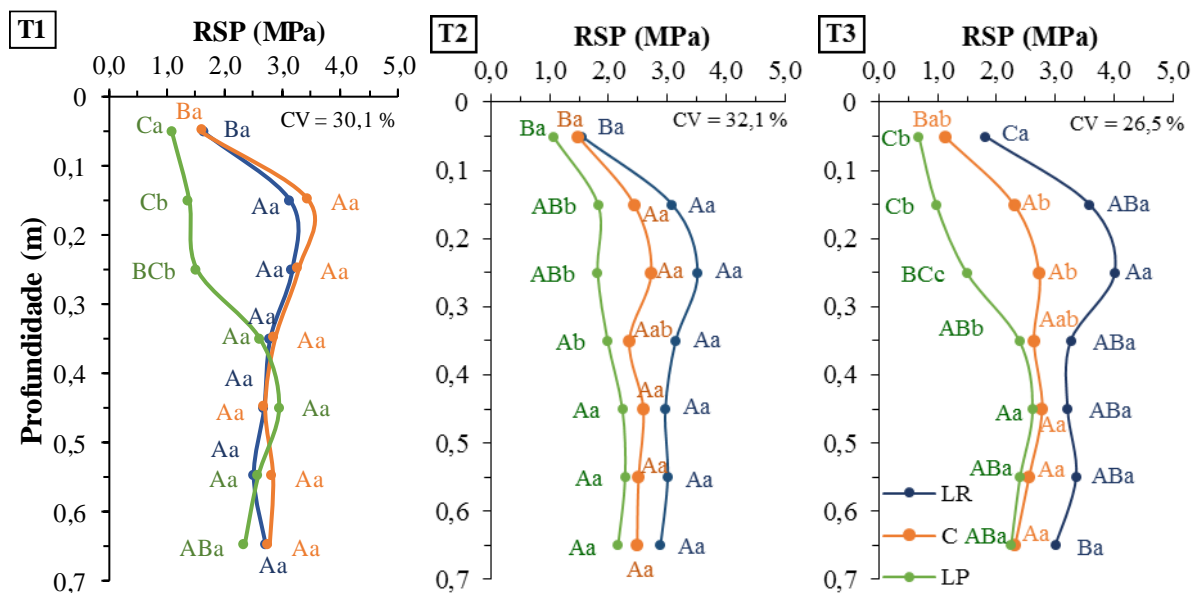
LR = linha do rodado, C = canteiro, LP = linha de plantio; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A máxima RSP ocorreu na LR do T3 em consequência da concentração do tráfego das máquinas. Contudo, a concentração do tráfego em LR não afetou a RSP no C e LP (Tabela 4). Após a quarta colheita, verificou-se que o controle do tráfego em T2 e T3 proporcionou as maiores diferenças de RSP entre LR, C e LP com valores de 3,97 e 4,21 MPa, para T2 e T3, respectivamente. Os resultados demonstram que houve um aumento da RSP da terceira para a quarta colheita em resposta ao tráfego das máquinas. Nos dois anos de avaliação não houve interação entre os tratamentos e camadas de solo, contudo a menor RSP foi obtida na primeira camada (0,00-0,10 m) com valores de 1,34 e 2,48 MPa, para a terceira e quarta colheita,

respectivamente (Tabela 4). A partir da camada de 0,10-0,20 m os valores obtidos foram superiores a 2,46 e 3,22 MPa, para as mesmas épocas de avaliação. Os teores de água no solo durante as avaliações da RSP não apresentaram interação entre tratamentos para os locais e camadas do solo nos dois anos de estudo. No entanto, independente do ano, os menores teores de água no solo foram encontrados nas primeiras três camadas, com exceção da camada de 0,0-0,10 m na terceira colheita.

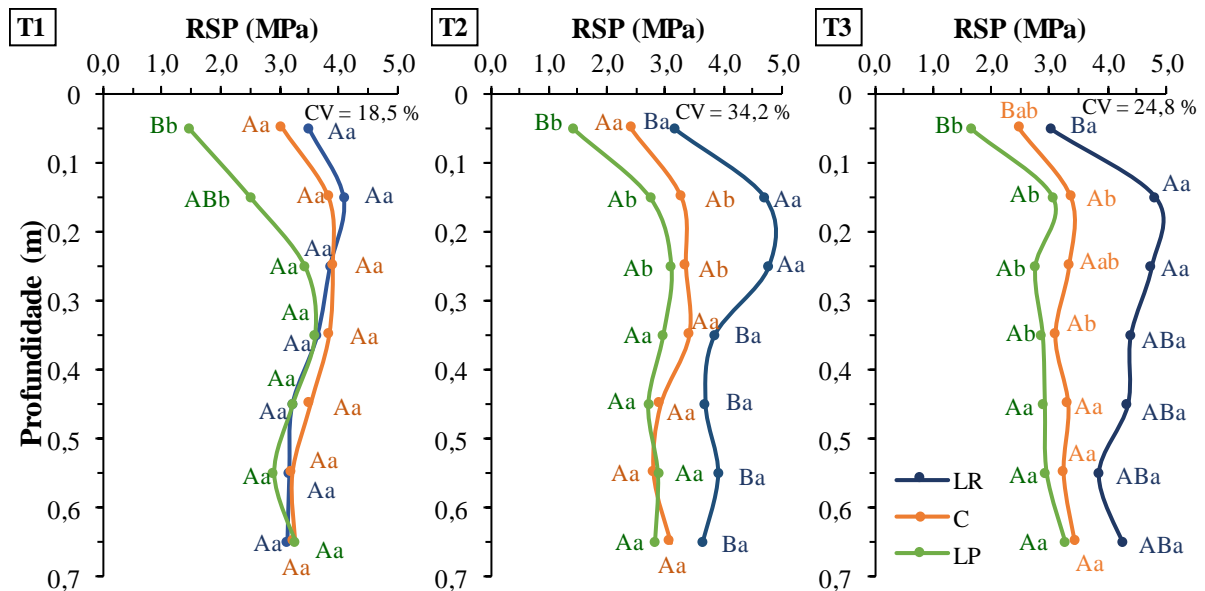
Para ampliar a compreensão dos efeitos do tráfego nos diferentes espaçamentos, local de amostragem e camada de avaliação, a RSP foi analisada para cada tratamento (T1, T2 e T3) individualmente (Figuras 15 e 16). Na terceira e quarta colheita, independente do tratamento, foram verificadas interações significativas entre locais e camadas de amostragem. Após a terceira safra, a maior RSP foi obtida na LR comparado com C e LP. Diferenças significativas de RSP foram verificadas nas quatro primeiras profundidades do tratamento T3 (Figura 15). No T1, verificou-se maiores valores de RSP em todas as camadas do C em relação a LR, indicando que o tráfego de máquinas ocorreu também no C, ainda que as diferenças não tenham sido significativas. A maior RSP foi constatada na LR na camada de 0,20-0,30 m em T2 e T3, atingindo RSP = 3,51 e RSP = 4,0 MPa, respectivamente. No T1, o maior valor de RSP = 3,41 MPa foi obtido na camada de 0,10-0,20 m no C. Os teores de água no solo não apresentaram diferenças entre locais e camadas de amostragem, estando na faixa de 0,18 a 0,25, 0,17 a 0,22 e 0,15 a 0,22 kg kg⁻¹, respectivamente em T1, T2 e T3.

Figura 15. Valores médios da resistência do solo à penetração após a terceira colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016). Letras maiúsculas comparam as camadas e letras minúsculas comparam os locais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). CV = coeficiente de variação.



Após a quarta colheita, nos tratamentos T2 e T3, a RSP foi maior em LR nas primeiras três camadas de solo comparado com C e LP, com valores de $RSP > 4,0$ MPa nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 16). No tratamento T1, a diferença da RSP somente foi significativa nas duas primeiras camadas de solo quando se comparou LP com C e LR; nas demais camadas a RSP foi maior no C do que na LR, embora esta diferença não tenha sido estatisticamente significativa. Os teores de água do solo não apresentaram diferenças entre os locais de amostragem e camadas, com valores entre 0,14 a 0,21, 0,15 a 0,20 e 0,14 a 0,20 kg kg^{-1} nos tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente.

Figura 16. Valores médios da resistência do solo à penetração após a quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2016/2017). Letras maiúsculas comparam as camadas e letras minúsculas comparam os locais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). CV = coeficiente de variação.



Densidade do solo (Ds) e Macroporosidade (MaP)

Comparado com a condição física antes da introdução dos tratamentos (Tabela 3) houve um aumento de Ds com incrementos acima de 21% nas primeiras três camadas em ambos os anos de avaliação (Tabela 5). A Ds foi significativamente influenciada pelos tratamentos na posição de amostragem C após a terceira colheita, sendo 5,26% maior em T1 comparado ao T2 e T3. Em ambos os anos, nos tratamentos com controle de tráfego houve diferenças entre os locais de amostragem com redução da Ds na sequência $LR > C > LP$. Já na quarta colheita, no T3 o aumento de Ds em LR comparado com C e LP foi de 12,2 e 4,1%; já no tratamento T2 esta diferença foi de 10,9 e 4,1%, respectivamente.

No tratamento T1, a Ds em LP diferiu de LR e C apenas na quarta colheita, sendo 6,7% maior no C do que em LP (Tabela 5). Entre as camadas de solo não foram obtidas diferenças entre os sistemas de manejo; contudo na terceira colheita os maiores valores de Ds

foram verificados na camada de 0,10-0,20 m em todos os tratamentos, enquanto que na quarta colheita os maiores valores de Ds foram constatados na camada de 0,10-0,20 m de T1 e na camada de 0,20-0,30 m nos tratamentos T2 e T3.

Tabela 5. Densidade do solo e macroporosidade após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos, locais e camadas de amostragem.

	----- Terceira colheita -----					----- Quarta colheita -----				
	T1	T2	T3	Média	CV (%)	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Local	Densidade do solo (kg dm⁻³)									
LR	1,57 Aa	1,59 Aa	1,66 Aa	1,61 A		1,60 Aa	1,63 Aa	1,66 Aa	1,63 A	
C	1,60 Aa	1,52 ABb	1,52 Bb	1,56 B	7,09	1,59 Aa	1,53 Ba	1,54 Ba	1,55 B	6,25
LP	1,53 Aa	1,50 Ba	1,51 Ba	1,51 C		1,49 Ba	1,47 Ba	1,48 Ba	1,48 C	
Camada (m)										
0,00-0,10	1,68 Aa	1,63 Aa	1,56 Aa	1,62 BC		1,65 Aa	1,59 Aa	1,55 Aa	1,60 BC	
0,10-0,20	1,75 Aa	1,74 Aa	1,59 Aa	1,69 A		1,69 Aa	1,65 Aa	1,66 Aa	1,67 A	
0,20-0,30	1,72 Aa	1,67 Aa	1,58 Aa	1,66 B		1,63 Aa	1,67 Aa	1,67 Aa	1,65 AB	
0,30-0,40	1,62 Aa	1,55 Aa	1,52 Aa	1,57 CD	5,56	1,55 Aa	1,61 Aa	1,60 Aa	1,58 CD	5,24
0,40-0,50	1,57 Aa	1,49 Aa	1,51 Aa	1,52 D		1,50 Aa	1,52 Aa	1,55 Aa	1,52 D	
0,50-0,70	1,49 Aa	1,45 Aa	1,43 Aa	1,46 E		1,46 Aa	1,40 Aa	1,49 Aa	1,45 E	
0,70-1,00	1,41 Aa	1,40 Aa	1,41 Aa	1,41 E		1,42 Aa	1,38 Aa	1,42 Aa	1,40 E	
Média	1,57 a	1,54 a	1,58 a			1,56 a	1,54 a	1,56 a		
CV (%)		17,09					7,50			
Local	Macroporosidade (m³ m⁻³)									
LR	0,093 Aa	0,084 Ba	0,064 Bb	0,080 B		0,072 Ba	0,086 Ba	0,070 Ba	0,076 C	
C	0,078 Ab	0,114 ABa	0,101 Aa	0,098 A	32,26	0,072 Bb	0,107 Aa	0,113 Aa	0,097 B	26,01
LP	0,091 Ab	0,120 Aa	0,115 Aa	0,108 A		0,110 Aa	0,124 Aa	0,117 Aa	0,117 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,079 Aa	0,103 Aa	0,091 Aa	0,091 B		0,077 Aa	0,099 Aa	0,107 Aa	0,094 BC	
0,10-0,20	0,082 Aa	0,096 Aa	0,091 Aa	0,089 B		0,078 Aa	0,099 Aa	0,089 Aa	0,089 C	
0,20-0,30	0,079 Aa	0,096 Aa	0,085 Aa	0,087 B		0,079 Aa	0,095 Aa	0,093 Aa	0,089 C	
0,30-0,40	0,087 Aa	0,104 Aa	0,083 Aa	0,091 B	24,61	0,091 Aa	0,096 Aa	0,091 Aa	0,093 BC	18,02
0,40-0,50	0,083 Aa	0,106 Aa	0,089 Aa	0,092 B		0,075 Aa	0,102 Aa	0,097 Aa	0,091 C	
0,50-0,70	0,098 Aa	0,113 Aa	0,096 Aa	0,102 A		0,089 Aa	0,126 Aa	0,104 Aa	0,106 AB	
0,70-1,00	0,106 Aa	0,148 Aa	0,119 Aa	0,124 A		0,102 Aa	0,123 Aa	0,119 Aa	0,104 A	
Média	0,087 b	0,106 a	0,093 ab			0,084 b	0,106 a	0,100 a		
CV (%)		25,81					46,98			

LR = linha do rodado, C = canteiro, LP = linha de plantio. CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Observou-se interação dupla ($p < 0,05$) entre tratamento e os locais de amostragem para a MaP (Tabela 5). Na terceira colheita, o controle de tráfego em T2 resultou em acréscimo de 31,9% em MaP para LP e 46,2% no C em comparação com o tratamento T1. Em comparação

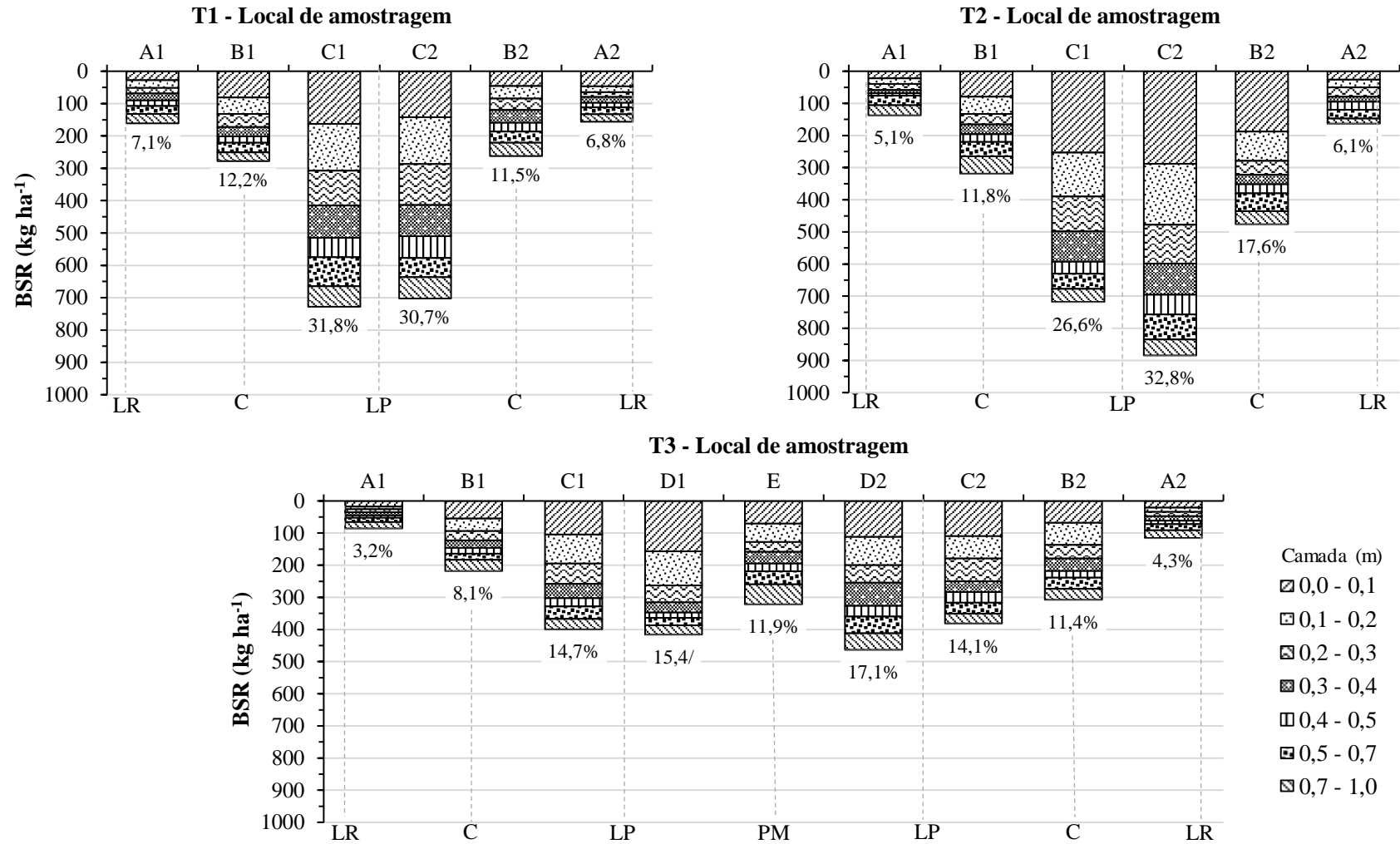
com T1, em T3 o acréscimo da MaP foi de 26,4% em LP e 10,0% no C; na quarta colheita, a MaP no C foi 48,6% e 56,9% maior no T2 e T3 comparado com T1. A ocorrência de tráfego no C do T1 propiciou valores de MaP de 0,078 e 0,072 m³ m⁻³ na terceira e quarta colheita, respectivamente. Contudo, as diferenças entre os locais de amostragem somente foram verificadas na quarta colheita. Nos tratamentos T2 e T3, a MaP aumentou na sequência LR<C<LP e não houve interação entre camadas de solo e tratamentos. Porém, as médias da MaP nas camadas até 0,50 m foram menores do que nas camadas mais profundas, variando de 0,087 a 0,092 e de 0,089 a 0,094 m³ m⁻³ na terceira e quarta colheita, respectivamente.

3.3.2 Desenvolvimento do sistema radicular

A biomassa seca de raízes (BSR) concentrou próximo à touceira da cana, diminuindo sequencialmente desde a LP (locais C1 e C2) até a LR (locais A1 e A2) e com o incremento da profundidade (Figura 17). De modo análogo, a densidade radicular (DR), o volume de raízes (VR), a área das raízes (AR) e o comprimento total de raízes (CTR) também diminuíram de LP para LR (Figura 18) em profundidade no perfil (Figura 19). Os tratamentos com controle do tráfego apresentaram maior BSR: 2.697,4 e 2.708,9 kg ha⁻¹ em T2 e T3, respectivamente, resultando em 17,9 e 18,5% mais BSR em relação ao T1 (BSR=2.286,7 kg ha⁻¹). No C (locais B1 e B2) e LP (locais C1 e C2) verificou-se maior BSR acumulada em T2 devido às melhores condições físicas do solo devido a menor compactação. Na LR, a BSR reduziu no sentido T1>T2>T3.

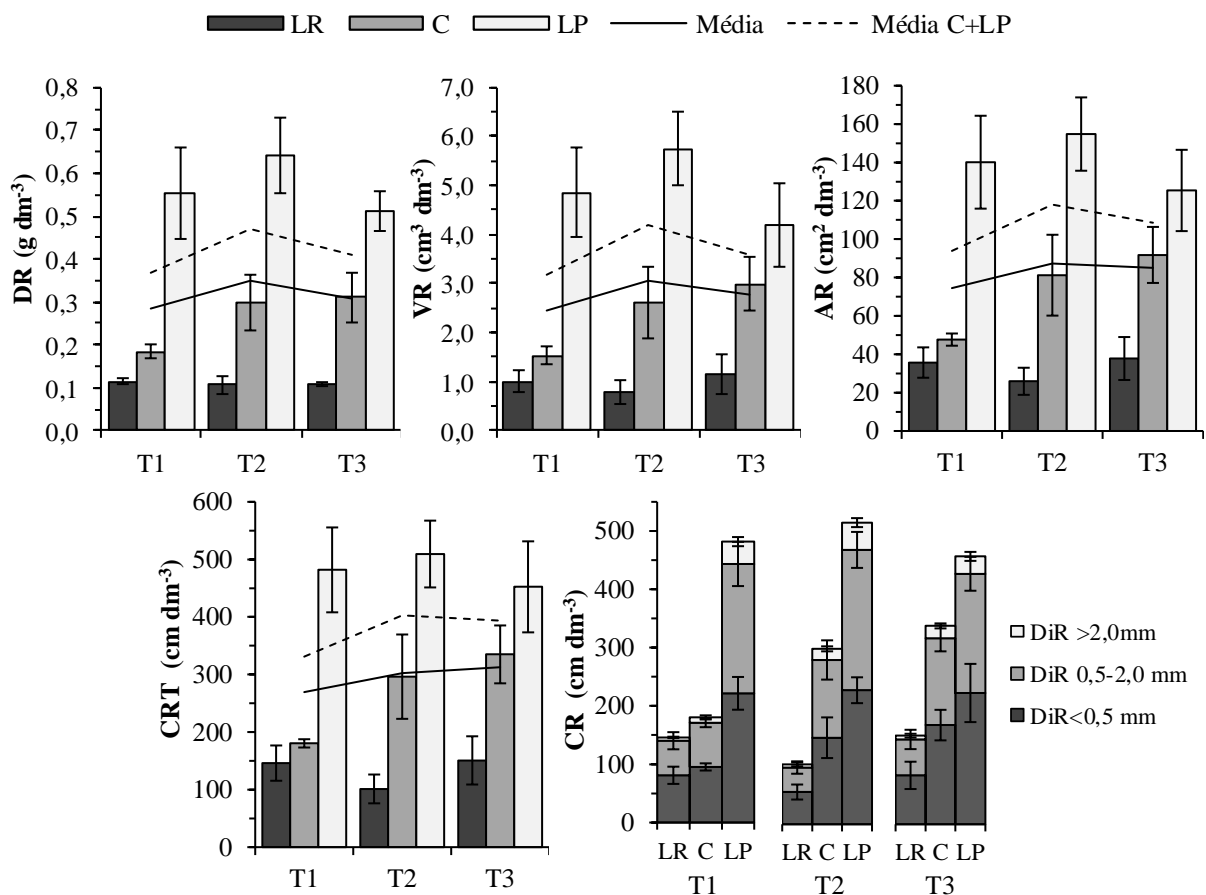
A camada de 0,00-0,10 m concentrou a maior porcentagem da BSR, totalizando 22,1, 31,7 e 26,4%, em T1, T2 e T3, respectivamente (Figura 17, Apêndice 2). Mais de 55% das raízes concentraram nos primeiros 0,30 m de profundidade, com maior BSR no tratamento T2 (1.721,8 kg ha⁻¹, 63,8%), seguido do T3 (1.621,1 kg ha⁻¹, 59,8%) e do T1 (1.270,4 kg ha⁻¹, 55,6%).

Figura 17. Distribuição da biomassa seca radicular (BSR) da cana-de-açúcar, variedade RB867515, após terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CL = canteiro da linha dupla; PM = ponto médio da linha dupla. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem. Dados em porcentagem representam a porcentagem acumulada para cada local.



Em LR, os valores de VR, AR e CRT foram menores no tratamento T2 enquanto que T1 e T3 não foram diferentes entre si (Figura 18). No C, todos os atributos radiculares aumentaram no sentido T1<T2<T3, com ganhos superiores a 62% e 68% em T2 e T3 comparado ao T1. Os valores de DR, VR, AR e CRT em T3 foram de 0,31 g dm⁻³, 2,99 cm³ dm⁻³, 91,77 cm² dm⁻³ e 334,94 cm dm⁻³, respectivamente; em T1 os mesmos atributos foram de 0,18 g dm⁻³, 1,53 cm³ dm⁻³, 47,64 cm² dm⁻³ e 180,31 cm dm⁻³, resultando em incremento de 68, 98, 93 e 86%, respectivamente de T3 para T1. Na LP, o incremento se deu na sequência T3<T1<T2, com aumento de T2 em relação a T1 acima de 6%; contudo, T3 apresentou uma redução superior a 7% em relação ao T1.

Figura 18. Variação dos atributos do sistema radicular: densidade radicular (DR), volume radicular (VR), área radicular (AR) e comprimento radicular total (CRT) da cana-de-açúcar, variedade RB867515, após terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio. As barras representam o erro padrão da média.

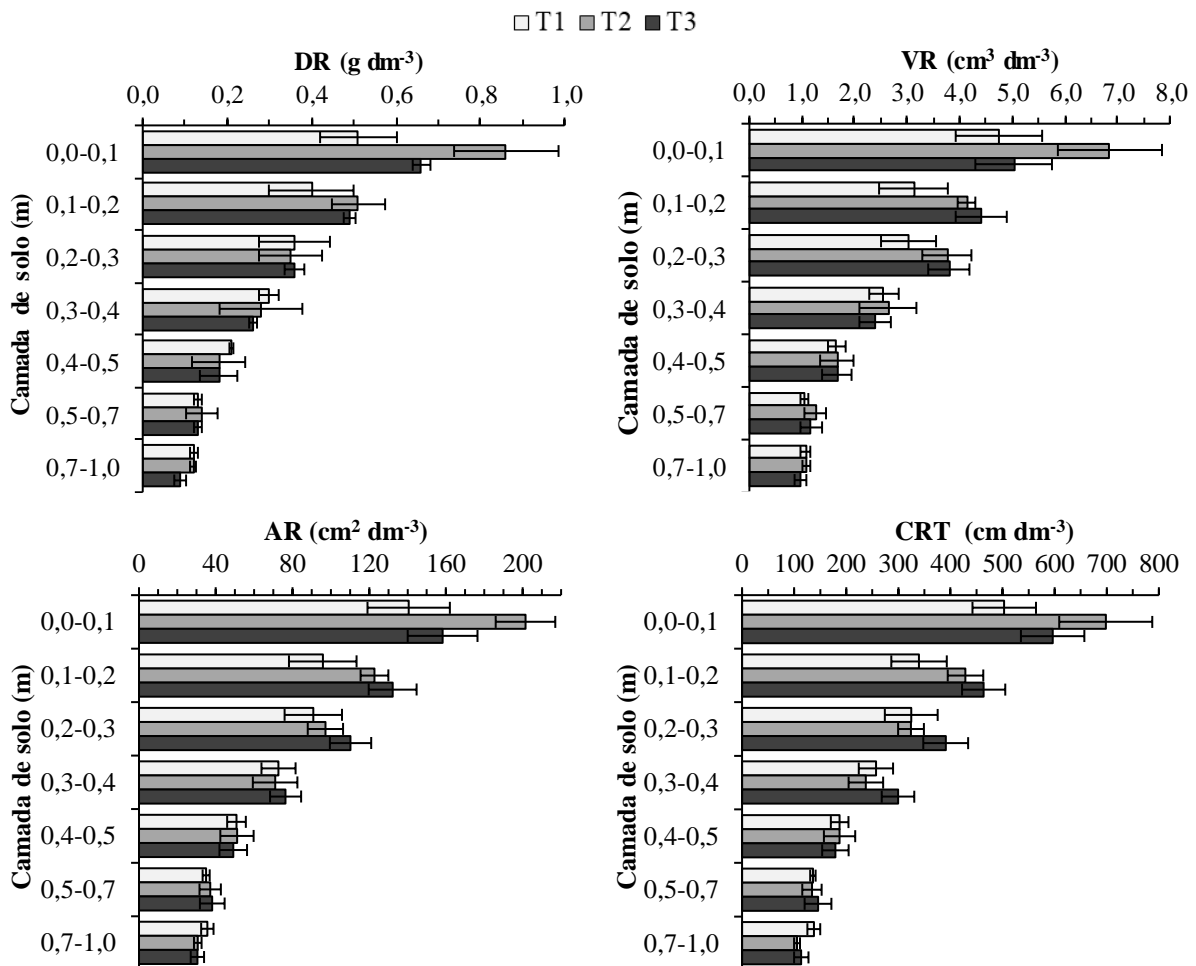


Considerando o CR das classes de diâmetro (DiR), verificou-se que predominou a presença de raízes finas e médias, com maior concentração na LP e no C (Figura 18). No C verificou-se as maiores diferenças entre os tratamentos, com maior CR nos tratamentos que utilizaram o controle de tráfego. Nesse local de amostragem, o T2 apresentou 146,13, 131,28 e 18,8 cm dm⁻³ (49,3, 44,3 e 6,4%), o T3 apresentou 167,47, 146,43 e 21,3 cm dm⁻³ (50,0, 43,7 e

6,3%) e o T1 teve 95,37, 75,56 e 9,38 cm dm^{-3} (52,9, 41,9 e 5,2%) de raízes finas, médias e grossas, respectivamente.

A diminuição da DR com a profundidade do solo foi acompanhada pela redução dos atributos VR, AR e CRT, com as maiores diferenças nas primeiras três camadas de solo e o maior valor nos manejos com controle de tráfego (Figura 19). Houve redução exponencial da DR em função da profundidade conformada pelas equações de $DRT1 = 0,546e^{-1,953*Prof}$ ($R^2 = 0,93$), $DRT2 = 0,729e^{-2,497*Prof}$ ($R^2 = 0,92$) e $DRT3 = 0,681e^{-2,582*Prof}$ ($R^2 = 0,97$), sendo DR (g dm^{-3}) e profundidade do solo (m).

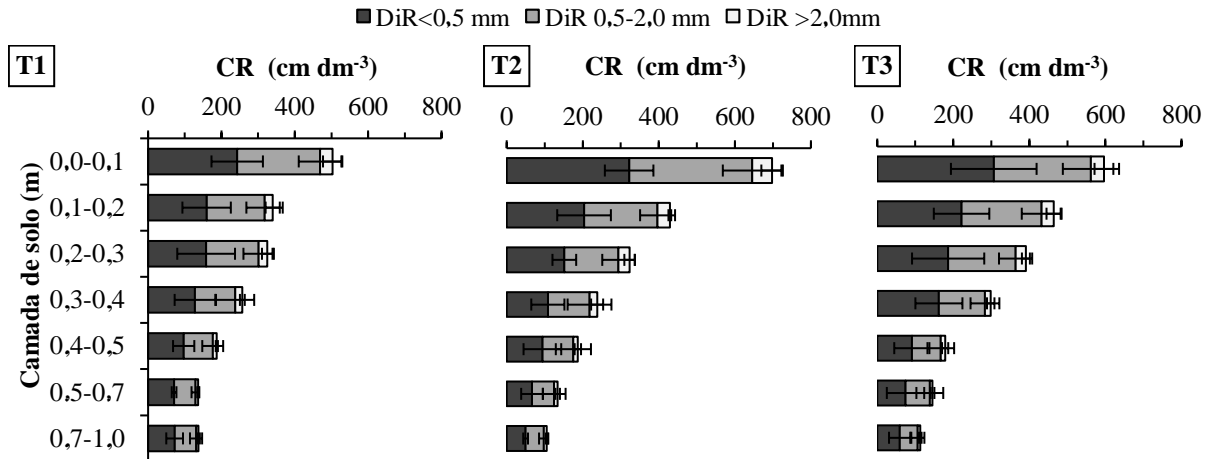
Figura 19. Variação dos atributos densidade radicular (DR), volume radicular (VR), área radicular (AR) e comprimento radicular total (CRT) da cana-de-açúcar, variedade RB867515 após a terceira colheita, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego em camadas de solo até 1,0 m de profundidade. As barras representam o erro padrão da média.



A partir da camada 0,30-0,40 m, à medida que se aprofunda no perfil do solo, raramente foram encontradas raízes grossas (menos de 1% do CR), indicando maior presença de raízes finas e médias nas camadas mais profundas (Figura 20). O CR das raízes finas e médias foi semelhante entre os tratamentos ($p > 0,05$). Nas primeiras três camadas de solo, a

porcentagem de raízes finas foi de 29,7, 32,0 e 32,6% e de 28,0, 31,2 e 29,4% para raízes médias, respectivamente, para T1, T2 e T3.

Figura 20. Comprimento radicular (CR) por classes por diâmetro (DiR) após terceira colheita nos diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego nas camadas de solo até 1,0 m de profundidade. As barras representam o erro padrão da média.



3.3.3 Produtividade e variáveis biométricas da cana-de-açúcar

As variáveis agrônômicas diâmetro, número de plantas por hectare e rendimento foram significativamente influenciadas pelos tratamentos (Tabela 6). No entanto, maior altura de plantas foi verificada na terceira colheita, com valor médio de 2,57 m enquanto que na quarta colheita o valor foi de 2,12 m e, para o número de colmos o valor médio foi de 10,24 e 11,93 colmos m⁻¹ para a terceira e quarta colheita, respectivamente.

Verificou-se redução no rendimento de 5,25, 2,66 e 7,16% nos tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente, da terceira para a quarta colheita (Tabela 6). A maior produtividade foi obtida no tratamento com controle de tráfego e espaçamento duplo combinado (T3) em ambos anos de avaliação. Comportamento idêntico foi verificado em relação ao número de plantas por hectare.

Tabela 6. Atributos biométricos e produtividade na terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar, variedade RB867515, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

Tratamento	Diâmetro de colmo (cm)	Altura de planta (cm)	Número de colmos m ⁻¹	Número de plantas ha ⁻¹	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
Terceira colheita (safra 2015/2016)					
T1	2,61 a	254 a	10,20 a	68,05 a	88,34 b
T2	2,68 a	254 a	10,72 a	71,43 a	96,58 ab
T3	2,69 a	263 a	9,80 a	81,68 a	107,11 a
CV (%)	2,83	7,83	10,60	12,20	9,47
Quarta colheita (safra 2016/2017)					
T1	2,49 b	210 a	11,68 a	77,88 b	83,70 b
T2	2,64 ab	202 a	12,71 a	84,77 ab	94,01 ab
T3	2,76 a	223 a	11,41 a	95,14 a	99,44 a
CV (%)	4,59	9,72	8,73	11,93	7,81

As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey (p<0,05).

3.4 DISCUSSÃO

Atributos físicos do solo

O efeito da compactação do solo devido ao tráfego das máquinas foi identificado pelos maiores valores de RSP e Ds e menores valores de MaP tanto na LR como no C. Estes resultados corroboram os de Castro *et al.* (2013) e de Braunack *et al.* (2006). Os resultados obtidos por Cavalieri *et al.* (2011) também indicam valores similares de Ds nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (1,74 e 1,75 kg dm⁻³) após terceira colheita mecanizada da cana-de-açúcar em solo de mesma classe deste estudo. Com exceção da LP e do C em T2 e T3 e da camada de 0,0-0,10 m nos três tratamentos (terceira colheita), os valores de RSP foram superiores a 2,0 MPa. Valores de RSP>2,0 MPa são adotados como restritivos ao crescimento radicular por alguns autores (OTTO *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2012; BENGOUGH *et al.*, 2011). Entretanto, Sá *et al.* (2016) reportaram RSP=3,8 MPa como valor crítico para crescimento de raízes de cana-de-açúcar da variedade SP86-155.

O comportamento da RSP foi relacionado inversamente com o teor de água no solo, como já atestado por vários estudos (OTTO *et al.*, 2011; VAZ *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2012). Contudo, os resultados mostraram que não houve variação significativa do teor de água no solo durante as avaliações da RSP. Valores similares de RSP e teor de água foram observados por Lima *et al.* (2013) em um Latossolo Vermelho de textura média sob cultivo de cana-de-açúcar. Os autores verificaram que após a quarta colheita mecanizada, a máxima RSP de 4,69 e 4,79 MPa foram verificadas nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m cujo teor de água no solo era de 0,20 kg kg⁻¹.

A redução da RSP nos tratamentos T2 e T3, na sequência LR>C>LP minimizou a compactação na região da soqueira (C e LP), o que corrobora os resultados de Souza *et al.* (2014) em termos do efeito do controle de tráfego na colheita mecanizada da cana-de-açúcar num Latossolo Vermelho distrófico. Esses resultados sugerem a importância do controle de tráfego com auxílio de piloto automático, uma vez que a concentração do tráfego na LR propicia zonas de elevada trafegabilidade na LR bem como melhores condições físicas para o desenvolvimento da cultura no C e LP.

Nos tratamentos com controle de tráfego, mesmo não havendo tráfego dos rodados das máquinas na região do C, os valores de RSP foram maiores do que na LP. Segundo Braunack e McGarry (2006) esses resultados podem indicar o efeito da distribuição lateral das cargas aplicadas na LR, induzindo compactação em subsuperfície, podendo ainda, essa compactação atingir a região da soqueira se existir algum tráfego na região do C. Potencial para reduzir a largura efetiva dos rodados deve ser considerado com a adoção do sistema de tráfego controlado nos sistemas de produção de cana-de-açúcar com colheita mecanizada.

Após terceira colheita, os tratamentos apresentaram menores valores de RSP na LP até 0,30 m de profundidade. Elevados valores de RSP em camadas subsuperficiais podem indicar o efeito de manejos anteriores que não foram removidos no momento da implantação da lavoura. Outro fator que pode ter influenciado os elevados valores de RSP nas camadas mais internas do perfil é o efeito das pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as camadas mais profundas como exposto por Gao *et al.* (2016). A compactação em camadas mais profundas agrava o problema como destacam Tullberg *et al.* (2007) e Chamem *et al.* (2015) devido à dificuldade em recuperação da estrutura do solo por processos naturais ou mecânicos.

A concentração das forças compressivas aplicadas no solo pelo tráfego das máquinas na LR em T2 e T3 reduziu a compressão do solo na região da soqueira, o que resultou em menor Ds e maior MaP na LP e C comparado com T1. Braunack e McGarry (2006) também observaram reduções na Ds e RSP nos primeiros 0,30 m de profundidade em área de cana-de-açúcar com controle de tráfego. A Ds na LP e no C nos manejos com controle de tráfego foram da ordem de 1,47 a 1,53 kg dm⁻³ em T2, e 1,48 e 1,54 kg dm⁻³ em T3, respectivamente. Resultados similares foram observados por Vischi Filho *et al.* (2017) num Latossolo Amarelo após seis anos de colheita mecanizada com controle de tráfego. McHugh *et al.* (2009) observaram menores Ds na LP e no C nos primeiros 0,20 m de profundidade nos tratamentos com controle de tráfego.

Nos tratamentos com controle de tráfego, tanto no C como na LP, a MaP foi superior a 0,10 m³ m⁻³, valor mínimo considerado para promover as trocas gasosas necessárias

ao desenvolvimento do sistema radicular (REICHERT *et al.*, 2007). Na ausência do controle de tráfego, a MaP foi superior ao valor crítico apenas na LP após quarta colheita. Assim, o tráfego aleatório que pode ter ocorrido em T1, possibilitando tráfego no C e possivelmente em LP, o que afetou a distribuição dos poros de forma significativa, com a redução do valor de MaP para abaixo do nível mínimo adequado para a aeração do solo. McHugh *et al.* (2009), Souza *et al.* (2014) e Sousa *et al.* (2017) também verificaram efeitos benéficos na MaP em função do controle do tráfego.

A melhoria nos atributos físicos do solo em T3 também está relacionada com a configuração das linhas de plantio. O espaçamento duplo combinado de 1,5 x 0,9 m possibilitou que linhas duplas de cana-de-açúcar fossem colhidas com uma passagem da colhedora, resultando numa menor área trafegada e, portanto, em menor área compactada. Na configuração de espaçamento simples, nos tratamentos T1 e T2, somente é possível realizar a colheita de uma linha de cana por vez, resultando em maior intensidade de tráfego na área com incrementos de até 60% na área trafegada comparado com o uso do espaçamento duplo combinado. Com o uso do espaçamento simples, cada máquina que atua na colheita (colhedora, trator e transbordo) deve trafegar duas vezes em cada entrelinha ou linha de tráfego.

A ausência de padronização na largura das bitolas das máquinas e os espaçamentos entre linhas de cultivo é um problema recorrente na produção de cana-de-açúcar no Brasil (SOUZA *et al.*, 2014). Isto pode ter minimizado as diferenças encontradas nos atributos físicos do solo entre os tratamentos T2 e T3 comparado ao T1. O não sincronismo das máquinas agrícolas também tem sido relatado em outros estudos com controle de tráfego em áreas de canaviais (BRAUNACK *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2015). As diferenças dimensionais dos implementos e das bitolas das máquinas geralmente resultam em padrões de tráfego aleatórios, promovendo compactação de aproximadamente 50% da área em cada ciclo da cultura, com a possibilidade de degradar a área ao longo do tempo de cultivo conforme destacado por Tullberg *et al.* (2018). Eles argumentam que se as larguras das bitolas das máquinas fossem ajustadas ao espaçamento das linhas da cultura, o controle de tráfego com sistemas de orientação precisos concentraria toda a carga gerada em linhas permanentes que ocupam entre 10 e 15% da área.

Desenvolvimento do sistema radicular

A concentração do sistema radicular próximo à região da touceira (LP e C) e nas camadas superficiais evidenciada em BSR e na DR, foi consistente com resultados prévios encontrados na literatura (OTTO *et al.*, 2011; CURY *et al.*, 2014; SILVA-OLAYA *et al.*, 2017). A maior DR obtida na LP e no C em T2 comparado a T1 pode estar associada à melhor qualidade física do solo nesses locais decorrentes do controle de tráfego, uma vez que o

desenvolvimento das raízes é fortemente influenciado pelas condições físicas do solo (VASCONCELOS *et al.*, 2003). Os resultados obtidos por Otto *et al.* (2009) indicam BSR = 2.447 kg ha⁻¹ entre as linhas de plantio distanciadas a 1,5 m, corroborando com os resultados obtidos nos diferentes tratamentos estudados. Também observaram uma concentração de 65% das raízes nos primeiros 0,20 m de profundidade e de 80% distribuídas entre os 0,60 m centrais da linha de plantio. Souza *et al.* (2014) indicam que após a terceira colheita mecanizada, maior DR na LP e no C foi verificada nos primeiros 0,30 m de profundidade, que foi associada à melhor condição física no solo sob controle de tráfego e ajuste da bitola do trator frente ao manejo convencional.

A maior compactação do solo na região do C em T1 resultou em menor DR em relação aos tratamentos T2 e T3, concentrando maior porcentagem de raízes na LP. A RSP é considerada por Bengough *et al.* (2011) como o principal fator limitante no crescimento das raízes. Num estudo conduzido por Otto *et al.* (2011) também foram observadas restrições no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar quando a RSP e Ds foi maior que 2,0 MPa e 1,78 kg dm⁻³, respectivamente. Os atributos do sistema radicular (VR, AR e CRT), foram maiores nos tratamentos com controle de tráfego, em concordância à menor compactação do solo. Valores similares do CRT (265 e 329 cm dm⁻³) foram obtidos por Lana *et al.* (2017). Maior CRT implica em maior potencialidade das raízes para absorção de nutrientes e água do solo (OTTO *et al.*, 2009).

Respostas das plantas à compactação do solo são primeiramente manifestadas por alterações nas características e funcionamento das raízes, resultando em redução do comprimento e da quantidade de raízes finas (ALAMEDA *et al.*, 2012). O aumento da área superficial e do volume das raízes favorece o desenvolvimento da parte aérea da cultura, uma vez que um maior volume do solo pode ser explorado. A redução exponencial na DR em função da profundidade do solo também foi observada por Otto *et al.* (2011). A maior concentração das raízes (superior de 55,0% da BSR) nas camadas superficiais do solo (até 0,30 m de profundidade) com DR superiores a 0,40 g dm⁻³ está relacionada ao desenvolvimento acumulativo das raízes durante os ciclos da soqueira, principalmente nas camadas superficiais onde concentra a maior quantidade de raízes devido a brotação dos perfilhos próximo da superfície (FARONI e TRIVELIN, 2006). A concentração de raízes e rizomas (órgãos subterrâneos de reserva de nutrientes da planta) nestas camadas devem-se aos melhores níveis de fertilidade do solo (ROSSI NETO *et al.*, 2018), o que é consistente com os resultados obtidos por Vasconcelos *et al.* (2003) e Cury *et al.* (2014). Os resultados do presente estudo sugerem que o controle de tráfego e o espaçamento duplo combinado resultou em uma distribuição mais

uniforme do sistema radicular no perfil do solo, com menores diferenças principalmente entre a LP e o C quando comparado com o espaçamento simples.

Maiores valores de DR, VR, AR e CRT nos tratamentos T2 e T3, nas primeiras duas camadas de solo em comparação ao T1, estão de acordo com o menor valor de RSP e Ds e maior MaP nos tratamentos com controle de tráfego. Os parâmetros morfológicos das raízes desempenham papel fundamental nas funções vitais para as plantas (OTTO *et al.*, 2009). Maior CR permite maior absorção de nutrientes e água no solo; maior massa e DR de raízes indica maior quantidade de nutrientes acumulados e maior volume de solo explorado; maior AR determina maior potencial para absorção de água e nutrientes (SOUZA *et al.*, 2014); e maior DiR permite melhor regulação no estresse hídrico, favorecendo o desenvolvimento da parte aérea da cultura, devido a maior absorção de água e nutrientes.

Maior CR de raízes finas, médias e grossas na região do C nos tratamentos T2 e T3 em relação ao T1 pode ser devido a melhor condição física do solo nessa região, principalmente a maior MaP nos tratamentos com controle de tráfego. Bergamin *et al.* (2010) argumentam que a redução no DiR pode ser uma adaptação das plantas para que as raízes possam penetrar no espaço poroso de menor diâmetro em decorrência da compactação. Chimento e Amaducci (2015) sustentam que as raízes com diâmetros inferiores a 2,0 mm desenvolvem um papel fundamental no ecossistema e nas funções fisiológicas como absorção (DiR < 0,5 mm) e transporte (DiR 0,5-2,0 mm) de água e nutrientes. Estes parâmetros radiculares podem ser afetados pela compactação do solo como relatam Souza *et al.* (2012) que verificaram redução no DiR, CR e DR com aumento da compactação do solo. As indicações de Morris e Tal (2004) apontam uma correlação positiva entre produtividade da cultura de cana-de-açúcar com os parâmetros BSR, CRT e CR de raízes finas e médias e com menor CR de raízes grossas.

Os dados dos atributos radiculares permitem afirmar que a existência de estreita relação entre os atributos físicos do solo no C e LP com controle de tráfego proporcionaram melhor desenvolvimento do sistema radicular, como atestam Vasconcelos *et al.* (2003) e Souza *et al.* (2012), refletindo em maior produtividade da cultura da cana-de-açúcar. No entanto, os atributos biométricos altura de planta e número de colmos por metro linear não foram influenciados pelos tratamentos.

Produtividade e variáveis biométricas da cana-de-açúcar

As produtividades obtidas de cana-de-açúcar foram superiores à média para o estado de São Paulo de 77,50 Mg ha⁻¹ para a safra 2016/2017 (CONAB, 2017). O uso do piloto automático aumentou a precisão no paralelismo das passadas das máquinas na operação de colheita, o que resultou em ganhos de rendimento na terceira colheita de 21,2 e 9,3% (18,77 e

8,24 Mg ha⁻¹) para o T3 e T2 em relação ao T1 e de 18,8 e 12,3% (15,74 e 10,30 Mg ha⁻¹) na quarta colheita. Esses resultados estão em consonância com os obtidos por Braunack e McGarry (2006) e Souza *et al.* (2014). Apesar da compactação interferir negativamente na produtividade das culturas, o controle de tráfego reduz esse efeito (BRAUNACK *et al.*, 2006; VERMEULEN e MOSQUERA, 2009; SOUZA *et al.*, 2014; GALAMBOŠOVÁ *et al.*, 2017).

O maior número de colmos por hectare no espaçamento duplo combinado (T3) também influenciou na maior produtividade da cultura (Tabela 6). O espaçamento duplo combinado permitiu obter 22 e 12% mais plantas quando comparado com o T1 e o T2 na quarta colheita. Segundo Galvani *et al.* (1997), a redução do espaçamento de plantio gera maior índice de área foliar, que proporciona um acréscimo na taxa líquida de fotossíntese pela maior absorção de radiação solar, o que pode explicar os ganhos em produtividade obtidos no espaçamento duplo combinado.

O controle efetivo do tráfego também foi verificado utilizando o espaçamento duplo combinado 1,8 x 0,5 m na Austrália por Garside *et al.* (2009), podendo substituir o espaçamento convencional de 1,5 m, sem diminuição de rendimento. Klomsa-Ard *et al.* (2007) também constataram incremento na produção em espaçamentos duplo de 18% a 53% em relação a espaçamento simples. O controle do tráfego preserva a qualidade física do solo e propicia maior desenvolvimento radicular.

3.5 CONCLUSÕES

Os sistemas de manejo com controle de tráfego preservaram a qualidade física do solo na região do canteiro e da linha de plantio. O controle de tráfego promoveu maior desenvolvimento do sistema radicular, com maior densidade, comprimento, volume e área radicular, em relação ao manejo sem controle de tráfego.

Nos manejos com controle de tráfego houve um incremento da biomassa seca radicular em relação ao manejo sem controle de 17,9% no tratamento de espaçamento simples e de 18,5% no tratamento de espaçamento duplo combinado com controle de tráfego.

O controle de tráfego permitiu ganhos na produtividade da cana-de-açúcar em relação ao manejo sem controle de tráfego de 9 e 12% no espaçamento simples com controle de tráfego e, de 21 e 18% no espaçamento duplo combinado com controle de tráfego, na terceira e quarta colheita, respectivamente.

CAPÍTULO IV - CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB CONTROLE DE TRÁFEGO

RESUMO

O sistema de produção da cana-de-açúcar promove o tráfego intenso, gerando a compactação do solo. Nesse contexto, o manejo com controle de tráfego agrícola se apresenta como uma alternativa tecnológica para minimizar os efeitos danosos nos atributos físicos do solo. A degradação física do solo pode ser monitorada mediante parâmetros de compressibilidade do solo, pois a compactação ocorre quando sua capacidade de suporte de carga é superada, gerando um aumento na densidade do solo e redistribuição do espaço poroso. Portanto, a presente pesquisa teve como objetivo modelar a capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho após o terceiro corte da cana-de-açúcar, cultivada com espaçamento simples e duplo combinado em sistemas de manejo com e sem controle de tráfego agrícola. O experimento foi realizado no município de Nova Europa no estado de São Paulo, Brasil, utilizando os seguintes tratamentos: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento tradicional de 1,50 m entre as linhas e colhida sem controle de tráfego; T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento de 1,50 m e colhida em sistema de controle de tráfego; T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colhida com controle de tráfego. A capacidade de suporte de carga do solo foi avaliada na linha do rodado e no canteiro, na camada superficial de 0,00-0,10 m e na camada de máxima resistência do solo à penetração de 0,20-0,30 m. A capacidade de suporte de carga do solo foi alterada em função dos sistemas de manejo, como constatado pelas diferenças entre os modelos ajustados para a linha do rodado em ambas as camadas de solo e para o canteiro na camada de 0,00-0,10 m. Na linha do rodado, os sistemas de manejo com controle de tráfego agrícola, independente do teor de água no solo, apresentaram valores maiores de pressão de preconsolidação que o manejo sem controle de tráfego, indicando maior compactação nesse local. Valores menores de índice de compressão obtidos na linha do rodado nos sistemas com controle de tráfego indicam menor suscetibilidade à compactação adicional, proporcionando condições de maior resistência mecânica para as atividades de trabalhabilidade das máquinas.

Palavras-chave: Compactação do solo; pressão de preconsolidação; compressão uniaxial; trabalhabilidade do solo; piloto automático.

LOAD-BEARING CAPACITY OF AN OXISOL IN A SUGAR CANE AREA WITH CONTROLLED TRAFFIC

ABSTRACT

Sugar cane production system promotes intense traffic, generating soil compaction. In this context, management with agricultural controlled traffic is presented as a technological alternative to minimize the harmful effects on the soil physical attributes. Soil physical degradation can be monitored by soil compressibility analysis, because compaction occurs when the load-bearing capacity is surpassed, generating an increase in bulk density and redistribution of pore space. Therefore, this research aimed to model the load-bearing capacity of an Oxisol after third sugar cane harvest, planted with single and double combined row spacing in management systems with and without controlled traffic. The experiment was performed in the city of Nova Europa, state of São Paulo, using the following treatments: T1 - sugar cane planted with traditional row spacing at 1.5 m between lines crop and harvested without controlled traffic; T2 - sugar cane planted with single row spacing at 1.5 m and harvested with controlled traffic; and T3 - sugar cane planted with double combined row spacing (1.50 x 0.90 m) and harvested with controlled traffic. The soil load-bearing capacity was evaluated at the inter-row center and seedbed, at the superficial layer of 0.00-0.10 m and at the maximum penetration resistance layer of 0.20-0.30 m. The soil load-bearing capacity was altered with regard to the management systems, as concluded by the differences between models adjusted for the inter-row center at both evaluated layers and for the seedbed at the layer of 0.00-0.10 m. At the inter-row center, the management systems with agricultural controlled traffic, independent of the soil water content, presented higher preconsolidation pressure than management without controlled traffic, indicating higher compaction at this site. Lower values of compression index obtained at the inter-row center in the controlled traffic systems indicated lower susceptibility to additional compaction, providing higher mechanical resistance conditions for the machine workability.

Keywords: Soil compaction; preconsolidation pressure; uniaxial compression; workability; automatic steering.

4.1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar envolve um grande número de operações mecanizadas desde o preparo para o plantio até a colheita prevista uma vez por ano, ocasionando tráfego intenso no solo e gerando problemas de compactação. O tamanho cada vez maior das máquinas agrícolas empregadas nessas atividades, agrava o problema da compactação do solo causando aumento dos requisitos de energia, aumento das emissões de CO₂, dificuldade de preparo do solo, diminuição da emergência e crescimento das plantas e redução da produtividade (BOCHTIS *et al.*, 2010). Na colheita, a máquina empregada tem a capacidade de colher uma linha de cana-de-açúcar, esses fatos implicam no final a necessidade de tráfego intenso numa determinada área para concluir a colheita, podendo promover algum tráfego perto da linha de cultivo ou ocasionalmente diretamente sobre a linha (BRAUNACK e MCGARRY, 2006).

Assim, um dos principais efeitos negativos da mecanização agrícola, pelo contínuo tráfego das máquinas, é a degradação dos atributos físicos do solo resultado da compactação, que provoca efeitos adversos na produção agrícola e ao meio ambiente (SAFFIHDADI *et al.*, 2009). Os problemas devidos à compactação se agravam potencialmente em lugares onde a agricultura é altamente mecanizada com o emprego de equipamentos mais pesados (SIVARAJAN *et al.*, 2018), sendo mais vulneráveis em condições de umidade elevada (SILVA e CABEDA, 2006; AN *et al.*, 2015).

A produtividade da cultura depende de um equilíbrio entre as condições do solo necessárias para o crescimento das plantas e para a operação de máquinas. As condições do solo apresentam influência direta nas reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta, sendo que as plantas requerem condições friáveis para o crescimento das raízes, boa aeração e fornecimento de água e, as operações de máquinas demandam de condições compactadas para tração e para suportar as cargas impostas (BRAUNACK e MCGARRY, 2006).

Na busca para minimizar os efeitos negativos sobre os atributos físicos do solo devido ao aumento do tráfego de máquinas, surgiu o controle de tráfego agrícola como uma prática de manejo, na qual se empregam as mesmas linhas de tráfego ano após ano. As linhas de tráfego concentram a compactação permanente do solo e fornecem uma superfície do solo firme para uma operação do trator mais eficiente (BRAUNACK *et al.*, 2006; TULLBERG *et al.*, 2007) e, na zona não trafegada, promove-se o desenvolvimento e manutenção da estrutura do solo, uma condição de solo mais favorável e propícia para o desenvolvimento radicular,

manutenção de carbono orgânico, maior infiltração e armazenamento de água no solo (LI *et al.*, 2009).

Associado ao controle de tráfego agrícola, outra técnica que pode ser utilizada em complemento é o uso do sistema de direção assistida conhecido como piloto automático (BAIO, 2012; ASCOUGH, 2013). 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 (ASCOUGH, 2013; SOUZA *et al.*, 2014).

Desta forma, para que seja possível o correto estabelecimento de uma metodologia capaz de aperfeiçoar o processo da colheita e que reduza minimamente a qualidade física do solo, o uso de indicadores sensíveis às alterações de manejo torna-se necessário para o monitoramento do processo de compactação (CHERUBIN *et al.*, 2016b). Sendo que o efeito do tráfego nos atributos físicos do solo é acumulativo, conforme acrescenta o número de colheitas afeta-se a resposta das culturas ano após ano (BRAUNACK *et al.*, 2006).

O solo sob os rodados das máquinas está sujeito à força de compressão e cisalhamento e a degradação do solo deve-se à resposta do solo a esses esforços (BRAUNACK e JOHNSTON, 2014). Assim, para a determinação de atributos que apoiem o monitoramento da degradação física do solo e ajudem a prevenir que solos agrícolas sejam excessivamente compactados visando a manutenção das condições físicas adequadas para o crescimento das plantas pode ser empregada a curva de compressão do solo, representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (SILVA *et al.*, 2009; PACHECO e CANTALICE, 2011) junto ao monitoramento das operações mecanizadas (SEVERIANO *et al.*, 2008).

A pressão de preconsolidação, reflete o valor máximo de carga que o solo pode suportar sem que haja uma compactação adicional, ou seja, é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo e, o índice de compressão descreve o decréscimo do volume de um solo quando alguma pressão externa foi aplicada (SILVA *et al.*, 2010). Cargas inferiores à pressão de preconsolidação geram deformações elásticas ou recuperáveis, refletindo a história das tensões (cargas) à que a massa de solo foi submetida no passado, entretanto, pressões superiores causam deformações plásticas ou não-recuperáveis e reflete sua susceptibilidade à compactação (SILVA *et al.*, 2009).

Como a resistência do solo a deformação é fortemente dependente do teor de água, solos com alta umidade são muito mais suscetíveis à compactação em relação aos solos secos,

portanto, como regra geral não é recomendado o tráfego quando os solos são mais úmidos do que a capacidade de campo (MÜLLER *et al.*, 2011; CHAMEN *et al.*, 2015). Quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (SILVA *et al.*, 2009).

O uso do controle de tráfego com o auxílio do piloto automático em áreas de cana-de-açúcar pode aumentar a capacidade de suporte de carga do solo na linha do rodado, melhorar a trafegabilidade das máquinas e preservar a qualidade física do solo na região da soqueira. Assim, este estudo teve como objetivo modelar a pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho após a terceira colheita da cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples e duplo combinado, em sistemas de manejo com e sem controle de tráfego agrícola.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum Ofificiarum*) variedade RB867515, na safra agrícola 2015/2016, após terceira colheita mecanizada (segunda cana soca). O experimento foi implantado em novembro de 2012 nas dependências da Usina Santa Fé no município de Nova Europa, São Paulo, Brasil (21°48'42" S, 48°36'33" W, a 500 de altitude), numa área com relevo variando de plano a suave ondulado. O clima da região é o subtropical úmido do tipo CWa, de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperatura mínima de 16 °C e máxima de 29 °C, e precipitação média anual de 1.340 mm.

O solo foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico de acordo ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), com textura média. Na caracterização física do solo (Tabela 7), foram determinadas as frações granulométricas pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011), empregando a solução de Hidróxido de Sódio 0,1 (NaOH) como agente dispersante, a densidade de partículas (Dp) pelo método do picnômetro, a densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico e a distribuição da porosidade pelo método da mesa de tensão conforme metodologias da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011).

Tabela 7. Caracterização física do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na área experimental no município de Nova Europa-SP, Brasil.

Camada (m)	AG	AF	AT	Silte	Argila	Classe textural ¹	Dp	Ds	MaP	MiP	PT
	g kg ⁻¹						Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³			
0,00-0,10	183,5	430,2	613,7	171,9	214,4	Média	2,67	1,32	0,17	0,33	0,50
0,10-0,20	179,6	443,9	623,5	158,4	218,1	Média	2,65	1,34	0,15	0,34	0,49
0,20-0,30	152,9	422,3	575,2	161,0	263,8	Média	2,75	1,36	0,15	0,36	0,51

AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; Dp = densidade da partícula; Ds = densidade do solo; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total. ¹Classificação conforme Embrapa (2013).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três tratamentos, quatro repetições e parcelas com dimensões de 30 m de largura e 50 m de comprimento. Os tratamentos adotados corresponderam aos sistemas de manejo: T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m e colheita mecanizada sem manejo de controle de tráfego; T2 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m e colheita mecanizada com manejo de controle de tráfego; T3 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m, e colheita mecanizada com manejo de controle de tráfego.

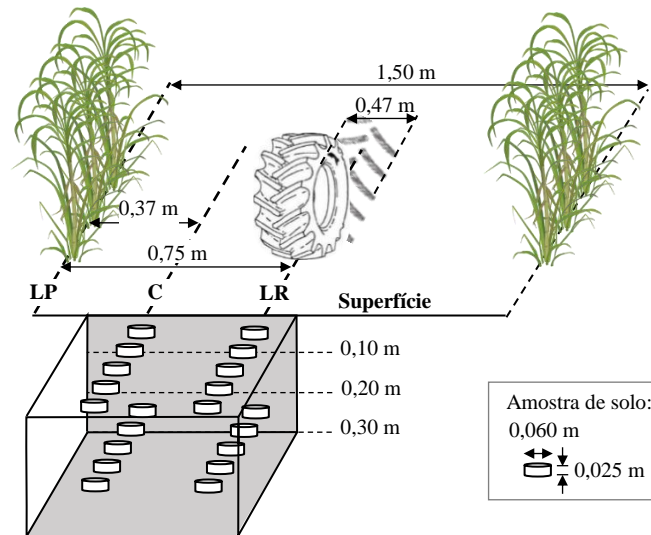
Anterior à instalação do experimento, a área encontrava-se cultivada com cana-de-açúcar no seu sexto corte seguido com colheita mecanizada. O preparo da área foi composto inicialmente pela eliminação de soqueira, utilizando para isso um eliminador de soqueira DMB na profundidade de 0,15 m, sucedida por uma gradagem com uso de grade aradora da CIVEMASA, modelo SGIC de 28 discos, tracionada por um trator BH 185 intercooler da Valtra, com potência nominal/máxima de 147 kW, bitola de 2,10 m, massa de 7,80 Mg. Após esse procedimento, realizou-se uma subsolagem a 0,40 m de profundidade, com tração procedida por um trator Magnum 340 da Case, com potência nominal/máxima de 253 kW, bitola de 2,10 m e, massa de 114,1 Mg. Por fim, realizou-se uma gradagem leve com uma grade aradora GNCR D.R.L 40 x 22 CIVEMASA, também tracionada por um trator Valtra BH 185 intercooler.

A colheita da cana-de-açúcar foi realizada por uma colhedora da marca CASE, modelo B8800, com potência nominal/máxima de 260 kW, rodados de esteira de 0,47 m de largura, bitola de 1,90 m e massa de 20,60 Mg. O transporte da cana-de-açúcar colhida foi realizado em transbordos da marca ANTONIOSI, modelo ATA-8000, operados em tandem, com bitola de 3,00 m, massa de 6,50 Mg, pneus 600/50-22,5 e, capacidade para transportar 8,50 Mg de cana. Os transbordos foram tracionados por tratores VALTRA modelo BH 180, com potência nominal/máxima de 139 kW, bitola de 2,10 m, pneus dianteiros 600/60-30,5, pneus traseiros 710/70 R38 e, massa de 10,50 Mg. Nas parcelas correspondentes aos tratamentos 2 e 3, a colheita foi auxiliada com o uso do piloto automático marca Topcon, modelo System 150, usando-se os mapas da área experimental conforme aos tratamentos.

A capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) e os atributos físicos do solo foram avaliados após terceira colheita da cana-de-açúcar, em novembro de 2016, em duas profundidades e dois locais. As profundidades corresponderam à camada superficial de 0,00-0,10 m e à camada de máxima resistência do solo à penetração identificada na profundidade de 0,20-0,30 m, e os locais corresponderam à linha do rodado (LR) e ao canteiro (C), sendo que a LR corresponde à faixa no centro das duas linhas de plantio e distante a 0,75 m de cada, esse é

o local teórico onde deve ocorrer o tráfego dos rodados das máquinas; e o C corresponde à faixa de solo no ponto médio entre a linha de plantio e a LR, distante a 0,375 m da linha de plantio (LP) (Figura 21).

Figura 21. Esquema de coleta de amostras de solo indeformadas para avaliação da capacidade de suporte de carga no solo de um Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m. LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio.



A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada mediante o índice de cone (IC) obtido por meio de ensaio em campo usando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30° , área do cone de $1,29 \text{ cm}^2$ e haste de 0,7 m de comprimento. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto^{-1}) em resistência à penetração foi obtida conforme Stolf *et al.* (2014): $\text{IC} = 0,56 + 0,689 \times (\text{N/P}) \times 10$, em que, IC é o índice de cone em MPa, N é o número de impactos, P é a penetração do cone do penetrômetro no solo em cm. Ao mesmo tempo que foi feito o ensaio de resistência do solo à penetração foram coletadas amostras de solo para a determinação do teor de água no solo pelo método gravimétrico conforme Embrapa (2011).

Foram coletadas amostras de solo indeformadas (corpos de prova) em anéis de aço inoxidável com dimensões de 0,060 m de diâmetro por 0,025 m de altura, com o auxílio do coletor de amostra indeformada tipo uhlant (Figura 21). Em cada local de amostragem foram coletadas cinco amostras por profundidade, totalizando 20 amostras por parcela e 80 amostras por tratamento. No total foram coletadas 240 amostras indeformadas para a construção de 12 modelos de CSCS (um modelo por local de avaliação (LR e C) x profundidade (0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m) x tratamento (T1, T2 e T3)), assim cada modelo foi construído usando 20 amostras. Nos mesmos locais foram coletadas amostras de solo indeformadas para determinação da densidade e porosidade do solo (EMBRAPA, 2011).

Para a elaboração dos modelos de CSCS foi determinada a pressão de preconsolidação (σ_p) dos corpos de prova mediante o ensaio de compressão uniaxial. Os corpos de prova foram saturados e posteriormente equilibrados no laboratório a temperatura ambiente, em cinco teores de água definidos em função dos limites e estados de consistência do solo conforme sugestão de Silva *et al.* (2010). O primeiro teor de água correspondeu a $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$, o segundo a um teor de água na região de tenacidade do solo (teores médios de água entre $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$ e valores abaixo do limite de contração-LC), o terceiro a um teor de água na região de friabilidade (valores acima do limite de contração e abaixo do limite de plasticidade-LP), o quarto a um teor de água na região de plasticidade (valores acima do limite de plasticidade e abaixo do limite de liquidez-LL) e, o quinto e último teor de água ao valor de saturação do solo. Os limites de contração, plasticidade e liquidez foram obtidos para cada camada e tratamento segundo Embrapa (2011), a partir de amostras deformadas de solo passadas por peneira de malha de $0,425 \mu\text{m}$.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado num consolidômetro automatizado com interação homem máquina (IHM), modelo CNTA-IHM/BR-001/07, de acordo com Silva *et al.* (2015a), no qual o corpo de prova confinado lateralmente em anel de aço, com drenagem livre nas superfícies superior e inferior, é submetido a incrementos sucessivos de pressão vertical. Os níveis de pressão aplicados ao corpo de prova foram 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, até atingir a deformação máxima de até 90% do corpo de prova para cada nível de pressão (TAYLOR, 1971).

O consolidômetro automatizado encontra-se acoplado ao software CA LINKER que permite sua interface com o computador, e processa os dados de força e deformação e, por meio de rotinas e pressuposições da mecânica de solo os valores de pressão e deformação foram devidamente tratados e plotados num gráfico, obtendo-se, assim, a curva de compressão do solo que expressa a densidade do solo em função do logaritmo das pressões aplicadas (SILVA *et al.*, 2015a). A partir da curva de compressão, foram obtidos o índice de compressão (m) e a σ_p , por dois métodos propostos por Dias Júnior e Pierce (1995), M1 quando o potencial matricial for menor ou igual a 100 kPa e M3 quando o potencial matricial for maior que 100 kPa.

Para a elaboração dos modelos de CSCS, os valores de σ_p foram plotados em função do teor de água no solo em que cada amostra foi submetida e, posteriormente, ajustou-se ao modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ (DIAS JÚNIOR, 2003), em que: σ_p é a pressão de preconsolidação (kPa); U é o teor de água no solo (kg kg^{-1}); parâmetros de ajuste “a” e “b”, “a” é o eficiente linear e “b” é o coeficiente angular.

A realização das análises de regressão conforme o modelo e a obtenção dos parâmetros de ajuste "a" e "b", foram determinadas por meio do software Sigma Plot 11.0 (Systat Software Inc®). Os modelos obtidos, após linearizados (transformação logarítmica) foram comparados com base ao teste F de homogeneidade de dados de Snedecor e Cochran (1989), utilizando-se um algoritmo elaborado no software Microsoft Excel® o qual compara os parâmetros dos modelos "a" e "b" e a homogeneidade dos dados (F).

4.3 RESULTADOS

Após terceira colheita mecanizada da cana-de-açúcar ocorreu um incremento da Ds e redução da MaP, MiP e PT (Tabela 8). A máxima resistência do solo à penetração foi obtida na camada de 0,20-0,30 m nos três tratamentos com valor de IC de até 4,01 MPa. Nos tratamentos com controle de tráfego (T2 e T3), o solo na LR apresentou maiores valores de IC e Ds e, menores valores de MaP no C nas duas camadas avaliadas. No entanto, no tratamento sem controle de tráfego (T1), os maiores valores de IC e Ds foram observados na camada de 0,20-0,30 m no C, indicando a ocorrência de tráfego dos rodados das máquinas nesse local.

Tabela 8. Atributos físicos e índice de compressão de um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

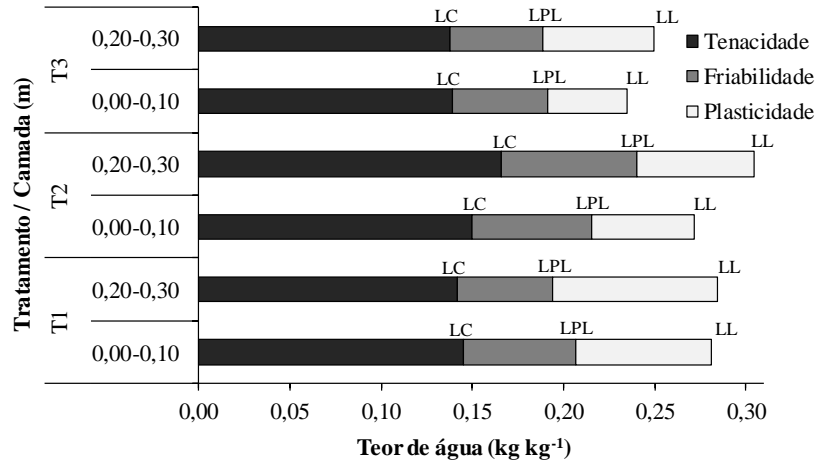
Tratamento	Local de avaliação	Camada (m)	Ds	IC	U	MaP	MiP	PT	m
			Mg m ⁻³	MPa	kg kg ⁻¹		m ³ m ⁻³		
T1	LR	0,00-0,10	1,70	1,65	0,19	0,07	0,31	0,38	0,14
		0,20-0,30	1,70	3,17	0,18	0,07	0,31	0,38	0,14
	C	0,00-0,10	1,65	1,61	0,20	0,08	0,33	0,41	0,13
		0,20-0,30	1,79	3,45	0,18	0,06	0,31	0,37	0,13
T2	LR	0,00-0,10	1,63	1,55	0,19	0,07	0,33	0,40	0,14
		0,20-0,30	1,65	3,51	0,17	0,08	0,31	0,39	0,12
	C	0,00-0,10	1,62	1,48	0,19	0,11	0,30	0,41	0,15
		0,20-0,30	1,57	2,73	0,17	0,10	0,35	0,45	0,14
T3	LR	0,00-0,10	1,73	1,82	0,17	0,06	0,30	0,36	0,12
		0,20-0,30	1,80	4,01	0,15	0,05	0,30	0,35	0,11
	C	0,00-0,10	1,63	1,12	0,19	0,10	0,29	0,39	0,15
		0,20-0,30	1,65	2,73	0,18	0,09	0,33	0,42	0,14

T1 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita sem controle de tráfego; T2 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita com controle de tráfego; T3 = espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colheita com controle de tráfego; LR = linha do rodado; C = canteiro; Ds = densidade do solo; IC = índice de cone; U = teor de água no solo; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total; m = índice de compressão.

Os valores de 0,14 kg kg⁻¹ e 0,24 kg kg⁻¹, respectivamente, mínimo e máximo, definiram a região de friabilidade do solo, determinada como o intervalo do teor de água entre o LC e o LP (Figura 22). Após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar o teor de água do solo

manteve-se na faixa de 0,15 a 0,20 kg kg⁻¹ (Tabela 8), demonstrando, que as operações agrícolas foram realizadas atendendo o estado friável do solo.

Figura 22. Limites e regiões de consistência do Latossolo Vermelho distrófico nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m, na área experimental localizada no município de Nova Europa-SP, Brasil. LL = limite de liquidez; LPL = limite de plasticidade; LC = limite de contração.



A Ds e o teor de água no solo influenciaram de forma significativa o índice de compressão e a deformação do solo obtidos no ensaio de compressão uniaxial. Incrementos na Ds reduziram linearmente a deformação ($r = 0,77^{**}$) e o índice de compressão do solo ($r = 0,70^{**}$) (Figura 23). Porém, incrementos no teor de água aumentaram a deformação ($r = 0,80^{**}$) e o índice de compressão do solo ($r = 0,81^{**}$) (Figura 24).

Figura 23. Deformação do solo (ϵ) e índice de compressão (m) em função da densidade do solo (Ds) para todos os tratamentos, locais e camadas avaliadas, para um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar após terceira colheita sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. ****** Modelo estatisticamente significativo a $p < 0,01$; $n = 240$.

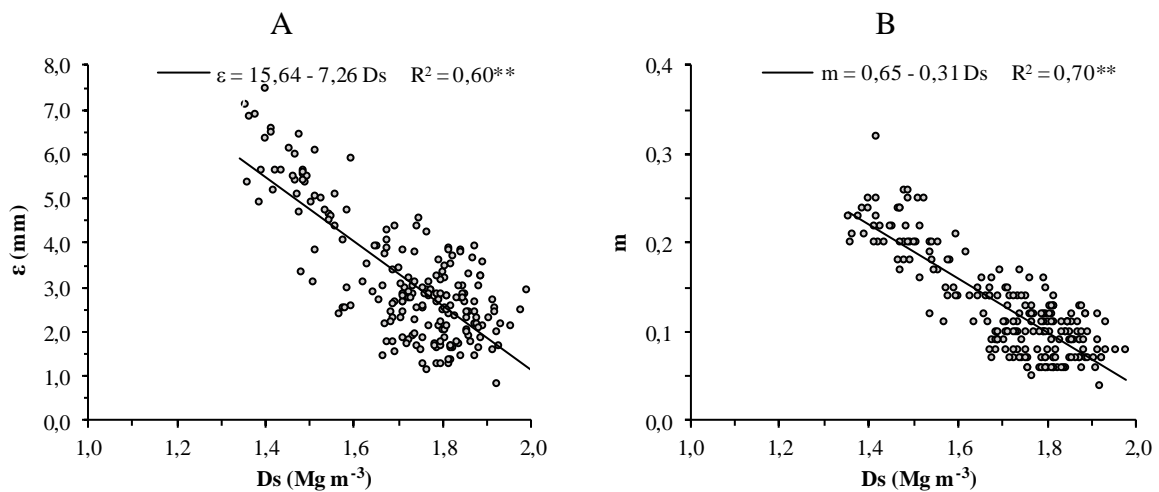
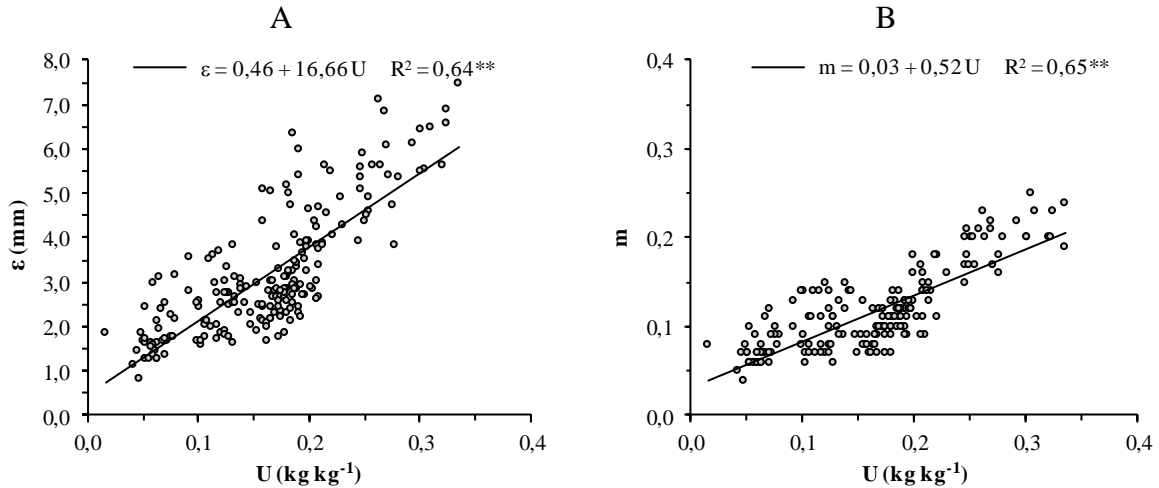


Figura 24. Deformação do solo (ε) e índice de compressão (m) em função do teor de água no solo (U), para todos os tratamentos, locais e camadas avaliadas, para um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar após terceira colheita sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego. ** Modelo estatisticamente significativo a $p < 0,01$; $n = 240$.



A pressão de preconsolidação do solo (σ_p), estimada a partir dos modelos de CSCS, reduziu em função do aumento do teor de água do solo, aspecto que influenciou diretamente nos parâmetros (a e b) dos modelos, os quais variaram de 2,54 a 2,81 e de -0,97 a -2,77, respectivamente e, por conseguinte, nos coeficientes e determinação (R^2), que variaram de 0,71 a 0,92 (Tabela 9).

Quando comparados os modelos de CSCS, usando o teste F de homogeneidade de Snedecor e Cochran (1989) na camada superficial de 0,00-0,10 m, verificou que os modelos da LR e do C apresentaram diferença entre todos os tratamentos, sendo as interações de T1xT2 nos dois locais e T1xT3 no C significativas ao nível de 5% de probabilidade e, as interações T2xT3 nos dois locais e T1xT3 na LR significativas a 1% de probabilidade (Tabela 10). Na camada de máxima resistência do solo à penetração (0,20-0,30 m) as interações T1xT2 e T1xT3 da LR apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade, indicando diferenças entre os sistemas de manejo com e sem controle de tráfego para esse local, entretanto, não houve diferenças entre os modelos do C e da LR para a interação T2xT3.

Tabela 9. Coeficientes a e b, dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p=10^{(a+bU)}$] em função da umidade gravimétrica U (kg kg⁻¹) para um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

Tratamento	Local de avaliação	Camada (m)	Parâmetro do modelo		R ²
			Coefficiente linear a	Coefficiente angular b	
T1	LR	0,00-0,10	2,54**	-0,97**	0,71**
		0,20-0,30	2,72**	-2,02**	0,86**
	C	0,00-0,10	2,64**	-1,60**	0,83**
		0,20-0,30	2,71**	-1,63**	0,89**
T2	LR	0,00-0,10	2,69**	-1,66**	0,81**
		0,20-0,30	2,69**	-1,34**	0,91**
	C	0,00-0,10	2,73**	-2,77**	0,91**
		0,20-0,30	2,72**	-2,33**	0,84**
T3	LR	0,00-0,10	2,68**	-1,28**	0,87**
		0,20-0,30	2,81**	-2,29**	0,92**
	C	0,00-0,10	2,56**	-1,23**	0,87**
		0,20-0,30	2,61**	-1,57**	0,75**

T1 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita sem controle de tráfego; T2 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita com controle de tráfego; T3 = espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colheita com controle de tráfego; LR = linha do rodado; C = canteiro. ** Significativo a $p<0,01$.

As comparações dos modelos nos locais de avaliação dentro de cada tratamento, apresentaram diferenças nas interações entre a LR das duas camadas em T1, na LR versus C na camada de 0,20-0,30 m em T2, na LR e no C da camada de 0,00-0,10 m e, no C nas duas camadas em T3 (Tabela 10).

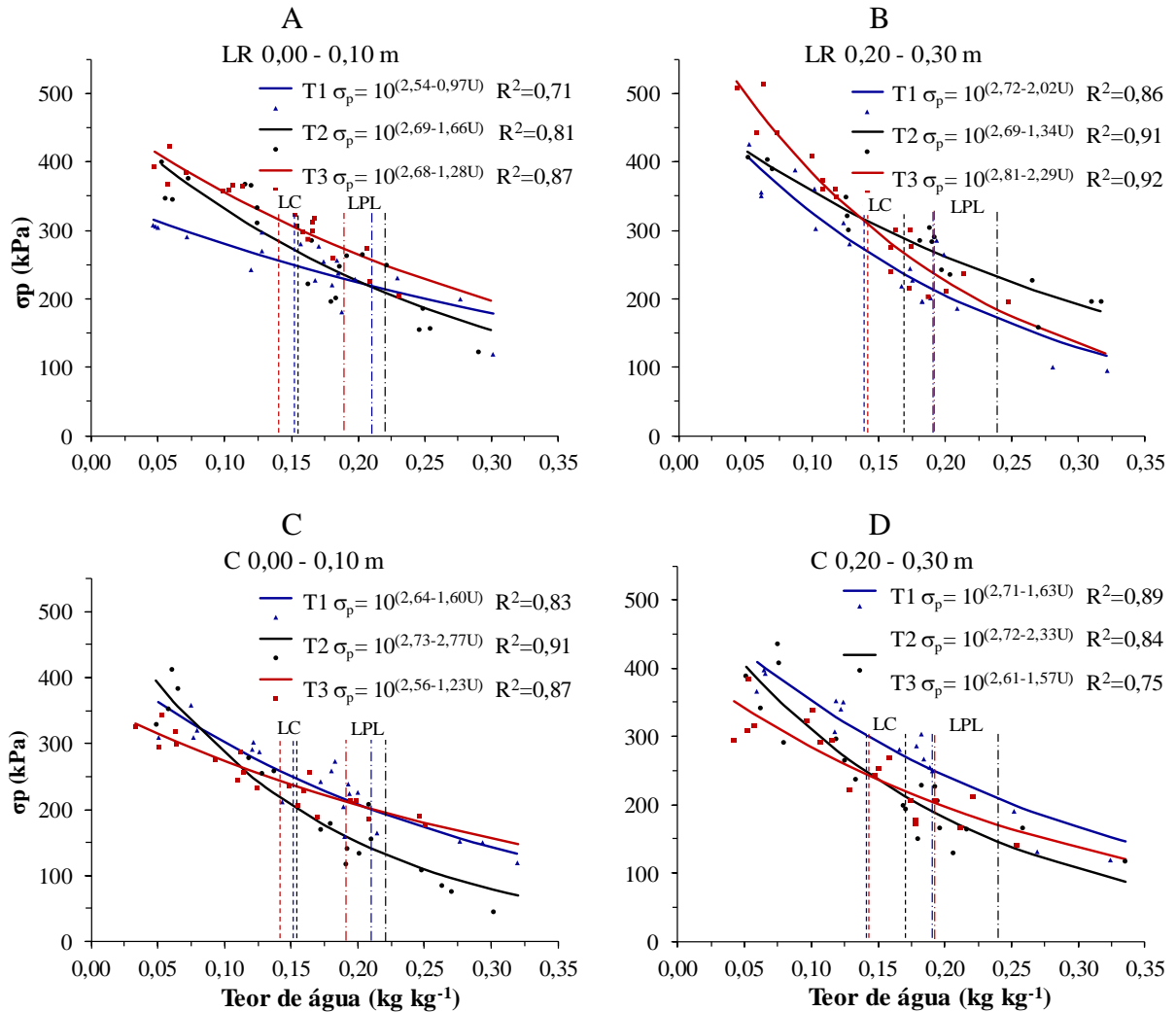
Os maiores valores de σ_p foram encontrados na camada de máxima resistência do solo à penetração (Figura 25). Nos modelos de CSCS da camada superficial (0,00-0,10 m), na LR, independente do teor de água no solo o T3 apresentou maior σ_p , seguido pelo T2 e T1, respectivamente (Figura 25A). Na faixa de friabilidade do solo, σ_p variou de 168 a 264 kPa para T1, de 214 a 274 kPa para T2 e, de 282 a 317 kPa para T3. Comportamento contrário ocorreu no C, onde os valores de σ_p são maiores em T1 na faixa de friabilidade (Figura 25C), variando de 203 a 255 kPa para T1, de 136 a 207 kPa para T2 e de 220 a 245 kPa para T3 e, com diferença entre todos os sistemas de manejo. Este comportamento comprova a presença de tráfego na região do C quando não existe o controle de tráfego.

Tabela 10. Teste de significância da comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, em função da umidade gravimétrica para um Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita da cana-de-açúcar, sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

Tratamento	Ponto de coleta (local - profundidade)	Estatística		
		F	a	b
Comparação dos tratamentos				
T1 x T2	LR 0,00-0,10	*	ns	**
	C 0,00-0,10	*	**	**
	LR 0,20-0,30	*	**	**
	C 0,20-0,30	ns	**	ns
T1 x T3	LR 0,00-0,10	**	**	ns
	C 0,00-0,10	*	ns	*
	LR 0,20-0,30	*	**	ns
	C 0,20-0,30	ns	ns	**
T2 x T3	LR 0,00-0,10	**	**	ns
	C 0,00-0,10	**	ns	**
	LR 0,20-0,30	ns	ns	**
	C 0,20-0,30	ns	ns	ns
Comparação dos locais de avaliação em cada tratamento				
T1	LR 0,00-0,10 x LR 0,20-0,30	**	ns	**
	LR 0,00-0,10 x C 0,00-0,10	ns	ns	**
	C 0,00-0,10 x C 0,20-0,30	ns	ns	**
	LR 0,20-0,30 x C 0,20-0,30	ns	ns	**
T2	LR 0,00-0,10 x LR 0,20-0,30	ns	**	ns
	LR 0,00-0,10 x C 0,00-0,10	ns	**	**
	C 0,00-0,10 x C 0,20-0,30	ns	**	*
	LR 0,20-0,30 x C 0,20-0,30	*	*	**
T3	LR 0,00-0,10 x LR 0,20-0,30	ns	ns	**
	LR 0,00-0,10 x C 0,00-0,10	*	**	ns
	C 0,00-0,10 x C 0,20-0,30	*	ns	*
	LR 0,20-0,30 x C 0,20-0,30	ns	**	ns

T1 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita sem controle de tráfego; T2 = espaçamento simples (1,50 m) e colheita com controle de tráfego; T3 = espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) e colheita com controle de tráfego; LR = linha do rodado; C = canteiro; F = teste F de Snedecor e Cochran (1989); a = coeficiente linear; b = coeficiente angular; ns = não significativo; ** e * significativo a $p < 0,01$ e a $p < 0,05$, respectivamente. Dados transformados $x' = \text{Log } x$.

Figura 25. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo em função do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distrófico para os tratamentos sem e com controle de tráfego após terceira colheita da cana-de-açúcar. A) na linha de rodado (LR) e na camada de 0,00-0,10 m. B) na linha de rodado e na camada de 0,20-0,30 m. C) no canteiro (C) e na camada de 0,00-0,10 m. D) no canteiro (C) e na camada de 0,20-0,30 m. LPL = limite de plasticidade; LC = limite de contração.



Para a camada de 0,20-0,30 m, os sistemas de manejo com controle de tráfego, independente do teor de água no solo na LR, apresentaram maior σ_p do que o manejo sem controle de tráfego (Figura 25B), indicando uma maior compactação do solo nesse local em resposta ao efeito acumulativo da concentração do tráfego das máquinas ao longo dos ciclos da cultura. No entanto, na região de tenacidade do solo ($U < 0,14 \text{ kg kg}^{-1}$) o T3 apresentou maiores valores de σ_p do que no T2, comportamento oposto foi verificado nas regiões de friabilidade e plasticidade do solo, onde o T2 apresenta maiores valores do que T3.

Na camada de máxima resistência do solo à penetração (0,20-0,30 m), para a região do C não houve diferença significativa entre os tratamentos, contudo, independente do teor de água no solo, a σ_p para os sistemas de manejo com controle de tráfego (T2 e T3) foi menor do

que no manejo sem controle de tráfego T1, indicativo de maior compactação em ausência do controle de tráfego (Figura 25D). Os valores de σ_p para os sistemas de manejo com controle de tráfego foram menores do que na LR independente do teor de água no solo, no entanto, para teores de água na região de tenacidade os valores foram maiores no T2 e acima do limite de contração os valores de σ_p foram maiores no T3.

Para a mesma camada na LR a σ_p em função do teor de água na região de friabilidade, variou de 214 a 270 kPa para T1, de 231 a 287 kPa para T2 e de 239 a 311 kPa para T3 (Figura 25B). Demonstrando que a aplicação de cargas maiores no solo para os teores de umidade dessa região ou se o solo é manejado em teores de água acima do limite de plasticidade (região de plasticidade), ocorrerá uma deformação não recuperável ou compactação adicional no solo.

4.4 DISCUSSÃO

O efeito da trafegabilidade das máquinas após quatro anos de operações mecanizadas na cana-de-açúcar gerou alteração dos atributos físicos do solo. A concentração do tráfego dos rodados das máquinas sempre no mesmo local, na LR, ano após ano, nos sistemas de manejo com controle de tráfego usando o piloto automático (T2 e T3), permitiram uma melhor qualidade física do solo na região do C para as duas camadas, como constatado pelos menores valores de IC e Ds, maior MaP e PT nessa região em contraste ao sistema sem controle de tráfego (T1), uma vez que não ocorre trafegabilidade na região do C. Nas áreas não trafegadas, as condições do solo favorecem o desenvolvimento da cultura, uma vez que os impedimentos mecânicos para o crescimento do sistema radicular são minimizados, permitindo maior volume de solo para a exploração das raízes e favorecendo a produtividade e longevidade da cana-de-açúcar (BRAUNACK e McGARRY, 2006).

O uso do controle de tráfego resultou em maior MaP na região do C, principalmente no T2, em relação ao manejo sem controle de tráfego, T1. Resultados similares foram obtidos por Roque *et al.* (2011) e Souza *et al.* (2014) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. A concentração do tráfego na mesma LR, gerou uma região mais compactada. Segundo Braunack *et al.* (2006) e Tullberg *et al.* (2007), as condições de solo firme obtidas pela concentração da compactação na LR permitem o tráfego das máquinas mais eficiente.

O teor de água no solo no momento da colheita da cana-de-açúcar e durante a avaliação da resistência mecânica do solo à penetração encontrava-se na faixa de friabilidade, ideal para o tráfego de máquinas e as operações agrícolas, amplamente preconizado por diferentes autores (SILVA *et al.*, 2009; SEVERIANO *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2014).

Demonstrando que durante a colheita da cana-de-açúcar pode não ter sido induzida compactação adicional no solo, pois diversos autores relatam que as operações mecanizadas nas áreas agrícolas podem gerar alteração nos atributos físicos do solo promovendo compactação se a operação das máquinas ocorrer sob teores de água no solo acima da condição friável (HORN *et al.*, 1995; SILVA *et al.*, 2009; MAZURANA *et al.*, 2017). O teor de água no solo não apresentou diferença entre tratamentos, locais e camadas, desse modo não influenciou nas diferenças obtidas para resistência do solo à penetração.

O aumento no índice de compressão e deformação do solo em função do teor de água no solo, também observado por Imhoff *et al.* (2004), Saffih-Hdadi *et al.* (2009) e Souza *et al.* (2012), assim como a redução da σ_p em função do aumento do teor de água do solo obtida nos modelos de compressibilidade do solo, deve-se ao efeito da água. Ela atua como agente lubrificante no solo, gerando a diminuição da coesão entre as partículas sólidas e a formação de filmes sobre estas, reduzindo o atrito entre elas e a resistência dos agregados à ruptura e permitindo maior arranjo das partículas do solo no processo de compressibilidade (LIMA *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2009; PACHECO e CANTALICE, 2011).

Comportamento inverso ocorre na deformação do solo e no índice de compressão em função da D_s , onde o aumento de D_s gerou redução desses atributos. Ao contrário do efeito que gera o aumento da água no solo, o atrito entre as partículas é maior com aumentos da D_s , assim ocorre maior número de pontos de contato entre as partículas reduzindo a compressibilidade do solo (PACHECO e CANTALICE, 2011). Esse comportamento foi verificado por Imhoff *et al.* (2004), Debiasi *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2012). Segundo Suzuki *et al.* (2008), a redução da deformação e do índice de compressão, com o aumento da D_s promove o aumento do grau de compactação, diminuindo a suscetibilidade à compactação e aumentando a CSCS. Essa condição favorece o tráfego das máquinas uma vez que proporcionam uma condição do solo mais firme, no entanto, densidades elevadas podem limitar o desenvolvimento radicular das plantas (LIMA *et al.*, 2006; SUZUKI *et al.*, 2008).

Os sistemas de manejo influenciaram o comportamento da compressibilidade do solo, constatado pelo teste de homogeneidade de Snedecor e Cochran (1989). As diferenças entre os modelos do T1 com os modelos de T2 e T3 na LR deve-se à concentração do tráfego nos sistemas com controle de tráfego, refletindo em maiores valores de σ_p nesse local, entretanto, as diferenças no C devem-se a cargas aplicadas no solo pela ocorrência do tráfego no sistema sem controle de tráfego (T1). Os resultados corroboram com os dados obtidos por Souza *et al.* (2012) para as mesmas camadas avaliadas na LR, onde a maior CSCS foi obtida

em sistemas de colheita mecanizada com controle de tráfego frente a sistema sem controle de tráfego em área sob cultivo de cana-de-açúcar num Latossolo Vermelho.

Os maiores valores de σ_p foram encontrados na camada de máxima resistência do solo à penetração, resultados semelhantes foram encontrados por Vischi Filho *et al.* (2015) num Latossolo Vermelho em área de cana-de-açúcar com colheita mecanizada e um ciclo de cultivo (6 anos). Esse comportamento confirma os maiores valores de D_s e menores de PT e MaP , quando comparados com os valores da camada superficial, estando também de acordo com os resultados encontrados por Debiasi *et al.* (2008). Comportamento reforçado considerando que o índice de compressão diminui linearmente em relação a acréscimos da D_s .

Na camada de máxima resistência do solo à penetração (0,20-0,30 m), tanto na LR quanto no C, não verificou diferença entre os modelos do manejo com controle de tráfego, uma vez que o manejo no solo é o mesmo, isto é, a concentração dos rodados das máquinas sempre nesse local. Os menores valores de índice de compressão obtidos na LR nos sistemas com controle de tráfego indicam uma maior compactação do solo nessa região, assim como uma menor suscetibilidade a sofrer compactação adicional, proporcionando condições mais firmes para o rodado das máquinas (SOUZA *et al.*, 2012). No entanto, os maiores valores do índice de compressão na região do C demonstram maior risco de ocorrência de compactação em caso de tráfego posterior nesse local, com aplicação de cargas superiores à CSCS.

Na LR (local onde deve ocorrer o tráfego das máquinas), as σ_p dentro da região de friabilidade obtidas nos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, foram superiores às pressões de contato estática exercida no solo na colheita mecanizada, reportadas por Silva *et al.* (2016b), isto implica que quando ocorre tráfego das máquinas sobre a LR, não vai ocorrer compactação adicional do solo. Segundo os autores a pressão de contato estática exercida no solo por uma colheitadeira pode alcançar 100 kPa e 77 kPa, quando trafega em áreas sem e com palhada da cana, respectivamente. Os mesmos autores reportaram pressões de contato de 106 e 98 kPa para o pneu dianteiro e o pneu traseiro do trator, e de 169 kPa para um transbordo carregado com 14,0 Mg de cana-de-açúcar, em condições de tráfego com palhada da cana na superfície do solo.

Na região do C, nos manejos com controle de tráfego (T2 e T3), as σ_p dentro da região de friabilidade do solo, resultaram em maior susceptibilidade de compactação do solo se ocorreu algum tráfego de máquinas nesse local, pois às pressões de contato aplicadas pelas máquinas, principalmente pelo transbordo, reportadas por Silva *et al.* (2016b), são próximas à σ_p . Isto implica que para evitar a ocorrência de compactação futura nessa região, deve continuar com o uso do controle de tráfego evitando o tráfego dos rodados nessa região.

Os modelos de CSCS obtidos permitem identificar o momento adequado para a operação das máquinas no canavial em função do teor de água no solo, associados às informações dos limites e estados de consistência do solo, como por exemplo, à faixa de friabilidade, podem limitar carregamentos indesejáveis à conservação da estrutura do solo (SILVA *et al.*, 2009; ALLMAN *et al.*, 2017). Por outro lado, operações agrícolas que requerem somente o tráfego de máquinas, como adubação, colheita e transporte, pode ser executado com o solo na condição tenaz, e neste caso, cargas maiores podem ser aplicadas, pois a capacidade de suporte de carga para este estado de consistência é elevada e não possibilitará alteração significativa na estrutura do solo (RICHART *et al.*, 2005).

As operações mecanizadas podem resultar na compactação do solo com efeitos negativos na qualidade física do solo (SOUZA *et al.*, 2012), assim, o conhecimento prévio desses efeitos deve ser um guia para medidas preventivas para minimizar danos, ajustando as condições de operação, uma vez que não há outro mecanismo que possa melhorar as operações de colheita de forma otimizada como a mecanização (PEREIRA *et al.*, 2015).

As LR ano após ano concentraram a compactação numa menor área no canavial, favorecendo o tráfego de máquinas sobre uma superfície mais firme. Concentrar o tráfego nessa região evita danos na cultura, uma vez que não tem rodados perto da touceira que possam causar a quebra de colmos. Menor CSCS observada na região do C com os tratamentos de controle de tráfego refletiu menor compactação em ausência de tráfego nessa região, resultando em melhores condições físicas numa maior área (50 a 70% da área do canavial) para o desenvolvimento das raízes e a produtividade final da cultura e redução no custo da preparação do solo na reforma do canavial.

4.5 CONCLUSÕES

A capacidade de suporte de carga do solo foi alterada em função dos sistemas de manejo como constatado pelas diferenças entre os modelos ajustados para a linha do rodado em ambas as camadas e no canteiro na camada de 0,00-0,10 m.

O controle de tráfego agrícola na colheita mecanizada da cana-de-açúcar aumentou a capacidade de suporte de carga na linha do rodado em relação ao canteiro, indicando que o manejo do canavial com esse sistema preserva a qualidade física do solo na região da soqueira e favorece a trafegabilidade das máquinas.

Menores valores de índice de compressão obtidos na linha do rodado nos sistemas com controle de tráfego indicaram menor suscetibilidade do solo à compactação adicional nesse local, proporcionando condições mais firmes para o tráfego das máquinas.

O uso dos modelos de capacidade de suporte de carga, possibilitam a determinação de uso de técnicas de manejo que propiciem a conservação do solo, definindo o teor de água no solo adequado para o tráfego das máquinas no canavial, no qual as cargas impostas podem ser suportadas sem resultar em compactação adicional no solo, além da redução da demanda energética nas operações mecanizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nessa pesquisa obtiveram resultados satisfatório, permitindo validar a hipótese, atingir os objetivos formulados, e adquirir novos conhecimentos e experiências.

Os dados obtidos mostraram que a colheita mecanizada com sistema de manejo com controle do tráfego agrícola por meio do uso de piloto automático em área de cana-de-açúcar, contribui para a redução da compactação do solo na região da soqueira, preservando a qualidade dos atributos físicos do solo proporcionando assim melhores condições para o desenvolvimento radicular e com reflexos no ganho de rendimento.

A capacidade de suporte de carga do solo mostrou-se como um adequado indicador da qualidade física do solo sendo sensível à compactação, uma vez que reflete a máxima carga que o solo recebeu em seu histórico e pode auxiliar no planejamento adequado das operações mecanizadas a ser realizadas.

Para que os benefícios oferecidos pelo uso do sistema de controle de tráfego agrícola em áreas de cana-de-açúcar possam se expressar é necessária concordância entre o espaçamento entre linhas de plantio e uniformização da bitola de todos os veículos e implementos usados nas diferentes operações mecanizadas, garantindo assim que os rodados trafeguem sempre nos mesmos locais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ALLMAN, M.; JANKOVSKÝ, M.; MESSINGEROVÁ, V.; ALLMANOVÁ Z. Soil moisture content as a predictor of soil disturbance caused by wheeled forest harvesting machines on soils of the Western Carpathians. **Journal of Forestry Research**, v.28, n.2, p.283-289, 2017.
- ALVAREZ, E.A.; CASTRO, P.R.C.; 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.
- AN, J.; ZHANG, Y.; YU, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.145, p.216-223, 2015.
- ARBEX, M.A.; CANÇADO, J.E.D.; PEREIRA, L.A.A.; BRAGA, A.L.F.; SALDIVA, P.H.N. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v.30, n.2, p.158-175, 2004.
- ASCOUGH, G.W. GPS Technology: applications in sugarcane production. **British Society of Sugar Technologists – Autumn Technical Meeting**, Bletchley, p.1-10, 2013.
- ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2002. **Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002**. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>>. Data de acesso: 2/06/2016.
- ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.515-522, 2005.
- BAIO, F.H.R. Evaluation of an auto-guidance system operating on a sugar cane harvester. **Precision Agriculture**, v.13, n.1, p.141-147, 2012.
- BANGITA, B.; RAO, B.K.R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum* spp.) under zonal tillage system. **Geoderma**, Amsterdam, v.189, p.351-356, 2012.
- BEN-DOR, E.; A. BANIN. Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple ‘loss-on-ignition’ method. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, v.20, n.15-16, p.1675-1695, 1989.
- BENGOUGH, A.G.; MCKENZIEL B.M.; HALLETT, P.D.; VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.62, n.1, p.59-68, 2011.
- 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.
- BOCHTIS, D.D.; SORENSEN, C.G.; BUSATO, P.; HAMEED, I.A.; RODIAS, E.; GREEN, O.; PAPADAKIS, G. Tramline establishment in controlled traffic farming based on operational machinery cost. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v.107, p.221-231, 2010.

- 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.
- BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, 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, 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.
- BRAUNACK, M.V.; JOHNSTON, D.B. Changes in soil cone resistance due to cotton picker traffic during harvest on Australian cotton soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.140, p.29-39, 2014.
- BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES P. S. G. 2010. **Avaliação tecnológica da mecanização da cana-de-açúcar**. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). Bioetanol de Cana-de-Açúcar, P&D para Produtividade e Sustentabilidade. São Paulo: Edit. Edgar Blucher, p.451-464.
- 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.
- CARVALHO, L.C.; NETO, V.J.M.; SILVA, L.F.; PEREIRA, J.G.; NUNES, W.A.; CHAVES, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brillhante-MS. **Agrarian**, Dourados, v.1, n.2, p.7-22, 2008.
- CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.
- CASEIRO, D.A.P.; LANÇAS, K.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Influência dos espaçamentos de plantio da cultura de Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) nos atributos físico-hídricos do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.29, n.4, p.236-240, 2014.
- CASTRO, A.M.C.; SANTOS, K.H.; MIGLIORANZA, E.; GOMES, C.J.A; MARCHIONE, M.S. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 6, n. 22, p. 415-422, 2013.
- 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.
- CERVI, R.G.; ESPERANCINI, M.S.E.; SILVA, H.O.F.; ISLER, P.R.; OLIVEIRA, P.A. Avaliação do desempenho operacional da colheita e transbordo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.30, n.3, p.232-241, 2015.
- CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009. 536p.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.73, p.161-174, 2003.
- CHAMEN, W.C.T.; MOXEY, A.P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLET, P.S.D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.146, p.10-25, 2015.

CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; CERRI, C.E.P.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.A. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, San Francisco, v.11, n.3, p.1-26, 2016a.

CHERUBIN, M.R., KARLEN, D.L., FRANCO, A.L.C., TORMENA, C.A., CERRI, C.E.P., DAVIES, C.A., CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.267, p.156-168, 2016b.

CHIMENTO, C.; AMADUCCI, S. Characterization of fine root system and potential contribution to soil organic carbon of six perennial bioenergy crops. **Biomass and Bioenergy**, v.83, p.116-122, 2015.

COEN, T.; VANRENTERGHEM, A.; SAEYS, W.; BAERDEMAEKER, J. Autopilot for combine harvester. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.63, n.1, p.57-64, 2008.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 4 - Safra 2017/18 N.2 - Segundo levantamento. 2017.** p.76. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_24_08_59_54_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_17-18.pdf>. Data de acesso: 21/12/2017.

CURY, T.N.; DE MARIA, I.C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.6, p.1929-1938, 2014.

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, p.2629-2637, 2008.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.31, n.2, p.139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. **Tensile strength and friability**. In: SMITH, K., MULLINS, C. (Eds.). *Soil and Environmental Analysis, Physical Methods*, 2nd ed. New York: Marcel Decker, p.401-430. 2000.

DIAS JÚNIOR M.S. **A soil mechanics approach study soil compaction** (Ed. H. Achyuthan). In: *Soil and soil physics in continental environment*. Chenna: Allied Publishers Private, p.179-199, 2003.

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. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.175-182, 1996.

DIAS, L.P. **Emissões nas queimadas de cana; controle**. In: MACEDO, I.C. *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo. p.85-90, 2005.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, v.1. 882p., 2008.

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. 2009. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 55p., (Documento 110)
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2011. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 230 p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª Ed. Revista e ampliada. Embrapa Solos. Brasília, DF. 353 p.
- ERNANDES, M. L. **Comportamento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivadas em espaçamentos simples e duplos**. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia na Área de Sistemas de Produção). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, 2005.
- FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. **Food and Agricultural commodities production**. 2015. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Data de acesso: 25/04/2016.
- 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.
- FIESP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Outlook Fiesp 2023: projeções para o agronegócio brasileiro**. São Paulo, p.37-45, 2013.
- GALAMBOŠOVÁ, J.; MACÁK, M.; RATAJ, V.; ANTILLE, D.L.; GODWIN, R.J.; CHAMEN, W.C.T.; ŽITŇÁK, M.; VITÁZKOVÁ, B.; ĎUĐÁK, J.; CHLPÍK, J. Field evaluation of controlled traffic farming in Central Europe using commercially available machinery. **Transactions of the ASABE**, v.60, n.3, p.657-669, 2017.
- GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEIREIRA, A.B.; VILA NOVA, N. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.54, n.1, p.62-68, 1997.
- GAO, W.; WHALLEY, W.R., TIAN, Z.; LIU, J.; REN, T. A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.155, p.190-198, 2016.
- GARSIDE, A.L.; BELL, M.J.; ROBOTHAM, B.G. Row spacing and planting density effects on the growth and yield of sugarcane. 2. Strategies for the adoption of controlled traffic. **Crop and Pasture Science**, v.60, n.6, p.544-554, 2009.
- GONÇALVES, D.B. **A regulamentação de queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas**. São Carlos: Rima, 2002. 127 p.
- GUEDES FILHO, O.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v.204-205, p.94-101, 2013.
- 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, p.121-145, 2005.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771p.
- HORN, R.; DOMZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1-2, p.23-36, 1995.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil – safra 2016/17**. Boletim técnico, n.217. 2017.

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.29, n.1, p.1-78. 2016.

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

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Balanço Hídrico de Cultivo e Produtividade, 2017. Disponível em: <http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>. Data de acesso: 21/12/2017.

ISMAEL, F.M.; SEERUTTUN, S.; BARBE, C.; GAUNGOO. Improving cane productivity with dual row planting in Mauritius. **Proceedings - International Society of Sugar Cane Technologists**, Mauritius, v.26, p.220-226, 2007.

ISMAEL, F.M.; SEERUTTUN, S.; BARBE, C.; GAUNGOO. A review of changing cultural practices to improve productivity of sugarcane in Mauritius. **Proceedings South African Sugar Cane Technologists Ass**, Mauritius, v.81, p.539-544, 2008.

JADOSKI, C.J.; TOPPA, B. E. V.; JULIANETTI, A.; HULSBOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.3, n.2, p.169-175, 2010.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size Distribution of Aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties**. Madison: American Society Agronomy., p.499-510, 1965.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v.104, n.7, p.513-521, 2011.

KLOMSA-ARD, T.; PRASANTREE, C.; JOMSRI, S.; TENGLOLAI, A.; PRAMMANEE P.; WEERATHAWORN, P. Dual row planting. A system to increase Thai farmers. Cane yield and economic returns. **Proceedings International Society of Sugarcane Technologists**, v.26, p.298-300, 2007.

KÖPKE, V. **Methods for studying root growth**. In: SYMPOSIUM ON THE SOIL/ROOT SYSTEM IN RELATION TO BRAZIL AGRICULTURE, Londrina, 1980. Londrina: Fundação Instituto Agrônomo do Paraná, p.130, 1981.

KORNDÖRFER, G. H.; PRIMAVERESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. **Boletim Técnico Coopercucar**, São Paulo, v.47, p.32-36, 1989.

LANA, R.M.Q.; DOMINGUES, L.A.S.; TORRES, J.L.R.; MAGESTE, J.G.; MORAES, E.R. Soil physical attributes and productivity of sugarcane under different cropping systems in the Savannah Goiano. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n.2, p.149-155, 2017.

LI, Y.X.; TULLBERG, J.N.; FREEBAIRN, D.M.; LI, H.W. Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, p.156-163, 2009.

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

- LIMA, R.P.; LEÓN, M.J.; SILVA, A.R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Ceres**, Viçosa, v.60, n.1, p.16-20, 2013.
- LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.F.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.789-800, 2008.
- MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; PASSOS, G.M.; KERPEN, H.S. Dynamic of pressure-deformation curve in uniaxial compression test in different load times. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.37, n.5, p. 973-986, 2017.
- 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.
- MEDINA, C.C.; NEVES, C.S.V.J.; FONSECA, I.C.B.; TORRETI, A.F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.23, n.2, p. 179-184. 2002.
- MDIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Exportação Brasileira**. Disponível em: < <http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/series-historicas>>. Data de acesso: 11/03/2018.
- MITCHELL, F.; BERRY, W. **The effects and management of compaction in agricultural soils**. Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists' Association, p.118-124, 2001.
- MORRIS, D.R.; TAI, P.Y.P. Water table effects on sugarcane root and shoot development. **Journal American Society Sugar Cane Technologists**, v.24, p.41-59, 2004.
- MÜLLER, L.; LIPIEC, J.; KORNECKI, T.S.; GEBHARD, S. **Trafficability and workability of soils**. In: Encyclopedia of agrophysics. Lublin: Springer. p.912-924, 2011.
- NASTARI, P.M. A importância do setor sucroenergético no Brasil. **Agroanalysis**, São Paulo, v.32, n.3, p.16-17, 2012.
- NAWAZ, M.F., BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris. v.33, n.2, p.291-309, 2013.
- NYKO, D.; VALENTE, M.S.; MILANEZ A.Y.; TANACA, A.K.; RODRIGUES, A.V. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial**, n.37, p.399-442, 2013.
- OLIVEIRA, T.C.; MOLIN, J.P. Uso de piloto automático na implantação de pomares de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.2, p.334-342, 2011.
- OMOTO, G.; AUMA, E.O.; MUASYA, R.M. Effect of row spacing on seed cane yield and yield components in western Kenya. **Proceedings South African Sugar Cane Technologists Ass**, Mauritius, v.86, p.149-155, 2013.
- 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, p.201-210, 2011.

- PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a 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.
- PEREIRA, A.H.F.; VITORINO, A.C.T.; PRADO, E.A.F.; BERGAMIN, A.C., MAUAD, M.; ARANTES, H.P. Least limiting water range and load bearing capacity of soil under types of tractor-trailers for mechanical harvesting of green sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.6, p.1603-1610, 2015.
- REICHERT, J.M.; SUSKI, L.E.A.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.5, p.49-134, 2007.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.
- RICHARD, E.P.; DUNCKELMAN, J.W.; CARTER, C.E. Productivity of sugarcane on narrow rows, as affected by mechanical harvesting. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.26, p.375-386, 1991.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.
- RIDESA - REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Curitiba. p.1-136. 2010.
- RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Edição dos Autores. 722 p. 2007.
- RONQUIM, C.C. **Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 48 p. (Documentos, 77)
- RODRIGUES, E. B.; ABI SAAB, O. J. G. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Bandeirantes-PR. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.4, p.581-588, 2007.
- 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.
- ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; ARAUJO, F.S.; VASCONCELOS, G.R. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.
- ROSSI NETO, J.; SOUZA, Z.M.; KÖLLN, O.T.; CARVALHO, J.L.N.; FERREIRA, D.A.; CASTIONI, G.A.F.; BARBOSA, L.C.; CASTRO, S.G.Q.; BRAUNBECK, O.A.; GARSIDE, A.L.; FRANCO, H.C.J. The Arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. **Bioenergy Research**, v.10, p.1-14, 2018.
- SÁ, M.A.C. de; SANTOS JUNIOR, J.de D.G. dos; FRANZ, C.A.B.; REIN, T.A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.
- 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, p.96-103, 2009.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro** Paulista. 2007. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/files/2011/10/protocoloAgroindustriais.pdf>. Acesso em: 26/06/2016.

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.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L.F.C.; COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: i - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, 2010.

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

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

SILVA, R.B. da; 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, p.384-401, 2006.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAIIO, 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, R.B.; IORI, P.; LANÇAS, K.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.33, n.1, p.376-389, 2010.

SILVA, R.B.; MASQUETTO, B.J.; LANÇAS, K.P.; SILVA, F.A.M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.416-427, 2015a.

SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IORI, P.; SILVA, F.A.M.; FOLLE, S.M.; FRANZ, C.A.B.; SOUZA, Z.M. Prediction of soil shear strength in agricultural and natural environments of the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p.82-91, 2015b.

SILVA, J.R.; COELHO, P.J.; CASER, D.V.; BUENO, C.F.; BINI, D.C.; PINATTI, E.; CASTANHO FILHO, E.P. **Valor da Produção Agropecuária do Estado de São Paulo, Resultado Final de 2015**. Análises e Indicadores do Agronegócio, São Paulo, v.11, n.4, p.6, 2016a.

SILVA, R.B.; IORI, P.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, D.M.G.; VISCHI FILHO, O.J.; SILVA, F.A.M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v.40, n.3, p.265-278, 2016b.

SILVA-OLAYA A.M.; DAVIES C.A.; CERRI C.E.P.; ALLEN D.J.; MELLO F.F.C.; CERRI C.C. Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugar-cane production in Brazil. **Soil Research**, Melbourne, v.55, p.640-648, 2017.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, n.2-3, p.249-260, 2005.

SISTEMA AMBIENTAL PAULISTA – Secretaria do Meio Ambiente, Governo de Estado de São Paulo. **Etanol Verde - Relatório Safra 2015_2016**. 2016. 10 p. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanol-verde-relatorio-safra-2015_2016-2/>. Data de acesso: 26/06/2016.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S.G.; NOWATZK, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.175, p.234-243, 2018.

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

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

SOUSA, A.C.M.; SOUZA, Z.M.; POCH CLARET, R.; TORRES, J. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Mérida, v.20, n.1, p.173-181, 2017.

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

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; BARBOZA, R.S.; BARBOSA, R.S.; SILVA, F.A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.8, n.1, p.135-146, 2014.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.72, n.3, p.270-277, 2015.

STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L.G.; SILVA, L.C.F.; MARGARIDO, L.A.C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.3, p.774-782, 2014.

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

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, p.292-305, 1971.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; machadKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. 3, 943-952, 2008.

TULLBERG, J.; ANTILLE, D.L.; BLUETT, C.; EBERHARD, J.; SCHEER, C. Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.176, n.2, p.18-25, 2018.

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. **A bioeletricidade da cana em números**. São Paulo, 2016. Disponível em: <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=6703271>. Data de acesso: 04/07/2016.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil quality physical indicators: selecting dynamic soil properties to assess soil function**. Soil Quality Technical. Note N^o. 10, Greensboro, NC. 2008.

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.

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.

VASCONCELOS, A.C.M.; GARCIA, J.C. **Cana-de-açúcar: Ambientes de produção**. 1. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Ribeirão Preto: IAC/Apta. n.110, p.5. 2005.

VASCONCELOS, A.C.M.; DINARDO-MIRANDA, L.L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides**. Revista e Ampliada. 2^a Edição. Campinas. 2011.

VAZ, C.M.P.; MANIERI, J.M.; DE MARIA, I.C.; TULLER, M. Modelling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, Amsterdam, v.166, p.92-101, 2011.

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.2, p.126-134, 2009.

VISCHI FILHO, O.J.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; LIMA, C.C.; PEREIRA, D.M.G.; LIMA, M.E.; SOUSA, A.C.M.; SOUZA, G.S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.4, p.322-332, 2015.

VISCHI FILHO, O.J.; SOUZA, Z.M.; SOUZA, G.S.; SILVA, R.B.; TORRES, J.L.R.; LIMA, M.E.; TAVARES, R.L.M. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n.2, p.169-176, 2017. WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effect of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.49, n.1, p.73-84, 1998.

WOLKOWSKI, R.; LOWERY, B. **Soil compaction: Causes, concerns, and cures**. Department of Soil Science, College of Agricultural & Life Sciences – University of Wisconsin, Madison, p.1-8, 2008.

APÊNDICES

Apêndice 1. Distribuição granulométrica e densidade da partícula do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental na Usina Santa Fé no município de Nova Europa-SP, Brasil.

Tratamento	Camada (m)						
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,40-0,50	0,50-0,70	0,70-1,00
	Densidade de partícula (kg dm⁻³)						
	2,67	2,65	2,75	2,63	2,66	2,67	2,65
	Areia (g kg⁻¹)						
T1	589,50 Aa	609,00 Aa	550,37 Aab	492,62 Abc	440,62 Abc	403,50 Ac	416,50 Ac
T2	590,00 Aa	606,87 Aa	557,25 Aab	488,87 Abc	464,75 Abc	425,75 Ac	410,00 Ac
T3	661,62 Aa	654,63 Aab	618,00 Aab	545,37 Abc	495,87 Ac	432,50 Ac	434,87 Ac
Média	613,70 a	623,50 a	575,21 ab	508,96 bc	467,08 cd	420,58d	420,46 d
	Silte (g kg⁻¹)						
T1	176,31 Aa	158,56 Aa	171,00 Aa	168,56 Aa	158,56 Aa	172,00 Aa	168,06 Aa
T2	173,62 Aa	159,19 Aa	148,81 Aa	183,5 Aa	166,69 Aa	161,62 Aa	155,81 Aa
T3	165,69 Aa	157,37 Aa	163,31 Aa	152,75 Aa	208,25 Aa	161,31 Aa	160,94 Aa
Média	171,87 a	158,37 a	161,04 a	168,27 a	177,83 a	164,98 a	161,60 a
	Argila (g kg⁻¹)						
T1	234,19 Aa	232,44 Aa	278,62 Aa	338,81 Aa	400,81 Aa	424,50 Aa	415,74 Aa
T2	236,37 Aa	233,94 Aa	293,94 Aa	327,62 Aa	368,81 Aa	412,62 Aa	434,19 Aa
T3	172,69 Aa	188,00 Aa	218,69 Aa	301,87 Aa	368,56 Aa	406,19 Aa	404,19 Aa
Média	214,42 d	218,13 d	263,75 cd	322,77 bc	355,08 ab	414,44 a	417,94 a
	Classe textural (EMBRAPA, 2013)						
	Média	Média	Média	Média	Argilosa	Argilosa	Argilosa

Letras maiúsculas comparam os tratamentos e letras minúsculas comparam as camadas. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 2. Biomassa seca radicular (BSR) da cana-de-açúcar, variedade RB867515, plantada num Latossolo Vermelho distrófico após terceira colheita, sob diferentes manejos com e sem controle de tráfego. A1, B1, C1, D1, E, A2, B2, C2 e D2 = locais de amostragem. Dados em porcentagem representam o percentual acumulado para cada local.

Biomassa Seca Radicular (kg ha⁻¹)											
T1											
----- Local de amostragem -----											
Camada (m)	A1	B1	C1	C2	B2	A2	Total	%			
0,00-0,10	27,5	81,2	162,4	142,3	46,1	46,6	506,0	22,1			
0,10-0,20	24,0	50,7	145,1	144,9	38,7	18,4	421,7	18,4			
0,20-0,30	17,7	41,0	107,9	126,6	35,2	14,2	342,6	15,0			
0,30-0,40	21,4	28,6	99,9	96,2	39,5	18,7	304,3	13,3			
0,40-0,50	17,0	19,8	60,0	67,2	27,1	14,0	205,1	9,0			
0,50-0,70	24,8	29,8	89,2	59,2	34,5	21,5	259,0	11,3			
0,70-1,00	29,1	26,8	63,3	65,6	40,7	22,3	247,8	10,8			
Total	161,4	277,9	727,7	702,0	261,9	155,8	2286,7	100,0			
%	7,1	12,2	31,8	30,7	11,5	6,8	100,0				
T2											
----- Local de amostragem -----											
	A1	B1	C1	C2	B2	A2	Total	%			
0,00-0,10	22,0	79,2	253,2	288,0	187,4	26,5	856,3	31,7			
0,10-0,20	17,5	54,2	136,5	189,4	91,2	23,6	512,4	19,0			
0,20-0,30	18,8	31,8	108,8	121,4	43,3	29,0	353,1	13,1			
0,30-0,40	10,6	31,1	94,2	96,7	29,7	16,2	278,5	10,3			
0,40-0,50	6,8	23,7	37,5	61,5	28,7	24,6	182,8	6,8			
0,50-0,70	29,7	45,2	47,5	77,5	55,4	27,2	282,6	10,5			
0,70-1,00	31,8	53,3	40,5	49,7	40,2	16,2	231,7	8,6			
Total	137,2	318,5	718,2	884,3	476,0	163,3	2697,4	100,0			
%	5,1	11,8	26,6	32,8	17,6	6,1	100,0				
T3											
----- Local de amostragem -----											
	A1	B1	C1	D1	E	D2	C2	B2	A2	Total	%
0,00-0,10	17,3	54,9	104,6	156,5	70,6	111,8	109,5	67,9	21,0	714,2	26,4
0,10-0,20	8,6	38,9	90,5	106,6	57,4	87,7	69,8	68,6	12,7	540,8	20,0
0,20-0,30	8,9	29,1	63,1	52,5	30,6	55,0	70,9	42,3	13,6	366,0	13,5
0,30-0,40	10,3	22,6	44,5	32,0	36,5	71,7	33,2	39,6	14,2	304,5	11,2
0,40-0,50	7,2	18,6	25,3	16,6	23,6	33,5	33,2	20,5	10,7	189,1	7,0
0,50-0,70	13,7	19,1	38,8	23,1	41,2	51,8	33,9	34,2	19,4	275,1	10,2
0,70-1,00	19,9	35,1	32,5	28,6	61,7	51,8	31,1	34,4	24,0	318,9	11,8
Total	85,8	218,4	399,3	415,8	321,5	463,3	381,6	307,5	115,6	2708,7	100,0
%	3,2	8,1	14,7	15,4	11,9	17,1	14,1	11,4	4,3	100,0	

Apêndice 3. Microporosidade e porosidade total do solo após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

	----- Terceira colheita -----					----- Quarta colheita -----				
	T1	T2	T3	Média	CV (%)	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Local	Microporosidade (m³ m⁻³)									
LR	0,338 Aa	0,328 Aa	0,323 Aa	0,330 AB		0,341 Aa	0,293 Ba	0,307 Ba	0,314 B	
C	0,333 Aa	0,331 Aa	0,320 Aa	0,328 B	9,66	0,321 Aa	0,339 Aa	0,339 Aa	0,333 A	10,92
LP	0,357 Aa	0,335 Aa	0,333 Aa	0,342 A		0,317 Aa	0,339 Aa	0,316 ABa	0,324 AB	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,335 Aa	0,312 Aa	0,303 Aa	0,316 B		0,305 Aa	0,317 A	0,300 Aa	0,307 B	
0,10-0,20	0,313 Aa	0,306 Aa	0,309 Aa	0,309 B		0,330 Aa	0,326 Aa	0,308 Aa	0,321 AB	
0,20-0,30	0,321 Aa	0,325 Aa	0,314 Aa	0,320 B		0,318 Aa	0,326 Aa	0,315 Aa	0,319 AB	
0,30-0,40	0,353 Aa	0,345 Aa	0,327 Aa	0,342 A	8,03	0,335 Aa	0,329 Aa	0,325 Aa	0,330 AB	11,81
0,40-0,50	0,357 Aa	0,335 Aa	0,342 Aa	0,344 A		0,358 Aa	0,332 Aa	0,337 Aa	0,342 A	
0,50-0,70	0,360 Aa	0,352 Aa	0,346 Aa	0,353 A		0,326 Aa	0,331 Aa	0,339 Aa	0,332 AB	
0,70-1,00	0,361 Aa	0,345 Aa	0,335 Aa	0,347 A		0,309 Aa	0,304 Aa	0,323 Aa	0,312 AB	
Média	0,343 a	0,331 a	0,325 a			0,326 a	0,324 a	0,320 a		
CV (%)		30,34					29,95			
Local	Porosidade total (m³ m⁻³)									
LR	0,431 ABa	0,412 Ba	0,387 Ba	0,410 B		0,413 ABa	0,379 Ba	0,377 Ba	0,389 B	
C	0,412 Ba	0,444 ABa	0,423 Aa	0,426 B	9,45	0,392 Ba	0,446 Aa	0,426 Aa	0,430 A	6,94
LP	0,449 Aa	0,456 Aa	0,447 Aa	0,451 A		0,426 Aa	0,462 Aa	0,433 Aa	0,440 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,414 Aa	0,414 Aa	0,392 Aa	0,407 D		0,382 Aa	0,416 Aa	0,408 Aa	0,402 B	
0,10-0,20	0,396 Aa	0,402 Aa	0,399 Aa	0,399 D		0,408 Aa	0,425 Aa	0,397 Aa	0,410 AB	
0,20-0,30	0,400 Aa	0,421 Aa	0,401 Aa	0,407 D		0,397Aa	0,420 Aa	0,408 Aa	0,408 AB	
0,30-0,40	0,441 Aa	0,448 Aa	0,410 Aa	0,433 C	6,80	0,427 Aa	0,425 Aa	0,416 Aa	0,423 AB	9,39
0,40-0,50	0,442 Aa	0,438 Aa	0,433 Aa	0,437 BC		0,434 Aa	0,434 Aa	0,434 Aa	0,434 AB	
0,50-0,70	0,457 Aa	0,466 Aa	0,441 Aa	0,455 AB		0,415 Aa	0,458 Aa	0,442 Aa	0,438 A	
0,70-1,00	0,466 Aa	0,494 Aa	0,454 Aa	0,471 A		0,411 Aa	0,427 Aa	0,442 Aa	0,427 AB	
Média	0,431 a	0,437 a	0,418 a			0,410 a	0,429 a	0,429 a		
CV (%)		25,49					32,96			

LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 4. Estabilidade de agregados após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

	-----Terceira colheita -----					-----Quarta colheita-----				
	T1	T2	T3	Média	CV (%)	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Diâmetro Médio Ponderado (mm)										
Local										
LR	0,61 Aa	0,60 Ba	0,54 Ba	0,58 C		0,64 Aa	0,63 Aa	0,53 Aa	0,60 B	
C	0,65 Aa	0,69 Ba	0,62 Ba	0,65 B	27,22	0,72 Aa	0,83 Aa	0,70 Aa	0,75 B	43,23
LP	0,62 Aa	0,90 Aa	0,76 Aa	0,76 A		0,91 Aa	1,05 Aa	0,95 Aa	0,97 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,85 Aa	0,85 Aa	0,83 Aa	0,84 A		0,90 Aa	1,37 Aa	1,16 Aa	1,14 A	
0,10-0,20	0,62 Aa	0,76 Aa	0,71 Aa	0,70 AB		0,85 Aa	0,95 Ba	0,80 Ba	0,87 B	
0,20-0,30	0,60 Aa	0,65 Aa	0,64 Aa	0,63 B		0,71 Aa	0,62 Ca	0,58 Ba	0,64 C	
0,30-0,40	0,60 Aa	0,65 Aa	0,56 Aa	0,60 B	23,28	0,70 Aa	0,72 BCa	0,74 Ba	0,72 C	24,55
0,40-0,50	0,62 Aa	0,73 Aa	0,60 Aa	0,65 B		0,79 Aa	0,76 BCa	0,64 Ba	0,73 BC	
0,50-0,70	0,57 Aa	0,74 Aa	0,58 Aa	0,63 B		0,67 Aa	0,80 BCa	0,59 Ba	0,68 C	
0,70-1,00	0,52 Aa	0,72 Aa	0,54 Aa	0,59 B		0,71 Aa	0,63 Ca	0,58 Ba	0,64 C	
Média	0,63 a Aa	0,73 a	0,64 a			0,76 a	0,84 a	0,73 a		
CV (%)		43,27					43,33			
Índice de Estabilidade de Agregados (%)										
Local										
LR	54,16 Aa	56,36 Aa	52,21 Aa	54,25 B		55,19 Aa	56,59 Aa	50,98 Aa	53,59 B	
C	55,93 Aa	57,50 Aa	52,45 Aa	55,29 AB	14,09	56,62 Aa	60,17 Aa	52,91 Aa	56,57 B	15,17
LP	55,35 Aa	62,40 Aa	57,39 Aa	55,38 A		61,33 Aa	64,56 Aa	59,67 Aa	61,85 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	60,02 Aa	63,14 Aa	57,85 Aa	60,34 A		51,47 Aa	68,65 Aa	61,64 Aa	60,59 A	
0,10-0,20	54,77 Aa	59,32 Aa	54,93 Aa	56,34 AB		60,64 Aa	64,07 Aa	51,93 Aa	58,88 A	
0,20-0,30	51,81 Aa	57,76 Aa	53,00 Aa	54,19 AB		55,33 Aa	54,99 Aa	50,95 Aa	53,76 A	
0,30-0,40	56,52 Aa	57,30 Aa	52,88 Aa	55,56 AB	13,55	59,70 Aa	57,26 Aa	58,76 Aa	58,57 A	13,31
0,40-0,50	59,06 Aa	59,16 Aa	55,3 Aa	58,01 AB		62,85 Aa	59,51 Aa	55,92 Aa	59,42 A	
0,50-0,70	55,47 Aa	58,84 Aa	54,82 Aa	56,37 AB		53,97 Aa	62,74 Aa	52,82 Aa	56,51 A	
0,70-1,00	48,39 Aa	55,74 Aa	48,80 Aa	50,98 B		55,38 Aa	55,87 Aa	49,60 Aa	53,62 A	
Média	55,15 a	58,75 a	54,02 a			57,05 a	60,44 a	54,52 a		
CV (%)		34,44					26,47			

LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 5. Resistência tênsil do agregado e friabilidade do solo após terceira e quarta colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016 e 2016/2017), sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

	----- Terceira colheita -----					----- Quarta colheita -----				
	T1	T2	T3	Média	CV (%)	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Resistência tênsil do agregado (kPa)										
Local										
LR	85,85 Aa	97,01 Aa	104,64 Aa	95,83 B		89,41 Aa	93,69 Aa	85,92 Aa	89,67 B	
C	83,51 Aa	107,50 Aa	110,15 Aa	100,39 AB	18,56	93,68 Aa	98,43 Aa	106,66 Aa	98,69 AB	20,46
LP	92,30 Aa	106,89 Aa	121,86 Aa	107,02 A		85,92 Aa	103,95 Aa	105,92 Aa	104,36 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	93,80 Aa	112,59 Aa	121,82 Aa	109,40 AB		94,64 Aa	111,78 Aa	87,50 Aa	97,97 BC	
0,10-0,20	76,81 Aa	97,83 Aa	111,02 Aa	95,22 B		111,07 Aa	130,48 Aa	109,99 Aa	117,18 AB	
0,20-0,30	95,78 Aa	119,15 Aa	127,27 Aa	114,07 A		126,95 Aa	123,10 Aa	123,97 Aa	124,67 A	
0,30-0,40	84,08 Aa	97,32 Aa	95,31 Aa	92,24 B		108,98 Aa	107,51 Aa	116,22 Aa	110,90 AB	23,85
0,40-0,50	87,11 Aa	101,42 Aa	112,58 Aa	100,37 AB	19,58	91,77 Aa	95,68 Aa	86,32 Aa	91,25 CD	
0,50-0,70	99,55 Aa	101,61 Aa	112,14 Aa	104,43 AB		72,27 Aa	65,76 Aa	88,58 Aa	75,54 D	
0,70-1,00	73,39 Aa	96,68 Aa	105,38 Aa	91,82 B		56,02 Aa	62,84 Aa	77,61 Aa	65,49 D	
Média	87,22 b	103,80 a	112,22 a			94,53 a	99,59 a	98,60 a		
CV (%)		17,94					26,75			
Friabilidade (adimensional)										
Local										
LR	0,18 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,20 A		0,22 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,19 A	
C	0,21 Aa	0,20 Aa	0,18 Aa	0,20 A	57,46	0,23 Aa	0,25 Aa	0,18 Aa	0,22 A	66,80
LP	0,22 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	0,20 A		0,22 Aa	0,19 Aa	0,21 Aa	0,21 A	
Camada (m)										
0,00-0,10	0,13 Aa	0,17 Aa	0,23 Aa	0,18 B		0,30 Aa	0,32 Aa	0,28 Aa	0,27 A	
0,10-0,20	0,25 Aa	0,23 Aa	0,23 Aa	0,24 A		0,27 Aa	0,22 Aa	0,16 Aa	0,22 AB	
0,20-0,30	0,22 Aa	0,17 Aa	0,17 Aa	0,19 AB		0,20 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 AB	
0,30-0,40	0,18 Aa	0,24 Aa	0,22 Aa	0,21 AB	42,31	0,15 Aa	0,17 Aa	0,16 Aa	0,16 B	46,34
0,40-0,50	0,14 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,17 B		0,21 Aa	0,19 Aa	0,17 Aa	0,19 B	
0,50-0,70	0,26 Aa	0,18 Aa	0,20 Aa	0,21 AB		0,22 Aa	0,17 Aa	0,23 Aa	0,21 AB	
0,70-1,00	0,24 Aa	0,21 Aa	0,12 Aa	0,19 AB		0,19 Aa	0,18 Aa	0,14 Aa	0,17 B	
Média	0,20 a	0,20 a	0,19 a			0,22 a	0,21 a	0,19 a		
CV (%)		45,41					52,09			

LR = linha do rodado, C = canteiro, LP = linha de plantio; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 6. Carbono orgânico total no solo após terceira colheita da cana-de-açúcar (safra 2015/2016), sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

----- Carbono orgânico total (g kg ⁻¹) -----					
	T1	T2	T3	Média	CV (%)
Terceiro corte					
Local					
LR	25,17 Ba	26,22 Ba	27,99 Ba	26,46 B	
C	28,88 ABa	31,17 Aa	32,63 Aa	30,89 AB	20,75
LP	31,02 Aa	32,91 Aa	33,14 Aa	32,36 A	
Camada (m)					
0,00-0,10	32,64 Aa	32,22 Aa	33,36 Aa	32,74 A	
0,10-0,20	29,64 Aa	29,82 Aa	30,54 Aa	30,00 AB	
0,20-0,30	27,95 Aa	28,71 Aa	29,93 Aa	28,86 B	
0,30-0,40	26,67 Aa	28,69 Aa	30,18 Aa	28,52 B	16,18
0,40-0,50	28,21 Aa	29,36 Aa	31,75 Aa	29,77 AB	
0,50-0,70	27,01 Aa	31,83 Aa	31,43 Aa	30,09 AB	
0,70-1,00	26,38 Aa	30,07 Aa	31,57 Aa	29,33 AB	
Média	28,38 a	30,10 a	31,25 a		
CV (%)		42,33			

LR = linha do rodado; C = canteiro; LP = linha de plantio; CV = coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 7. Coeficientes do ajuste da curva de retenção de água pelo modelo de van Genuchten (1980), $\Theta = \Theta_R + (\Theta_S - \Theta_R) / [1+(\alpha \psi)^n]^m$ e capacidade de água disponível de um Latossolo Vermelho distrófico após terceiro corte (safra 2015/2016) da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos com e sem controle de tráfego.

Tratamento	Local	Parâmetros					R ²	Umidade (m ³ m ⁻³)		
		α	m	n	Θ_R	Θ_S		10 kPa	1500 kPa	CAD
T1	LR	4,279	0,071	1,077	0,011	0,383	0,896	0,346	0,243	0,103
	C	0,464	0,293	1,415	0,241	0,421	0,923	0,378	0,261	0,117
	LP	0,900	0,177	1,216	0,160	0,428	0,874	0,384	0,242	0,142
T2	LR	2,840	0,088	1,097	0,064	0,395	0,811	0,359	0,251	0,108
	C	0,813	0,300	1,428	0,227	0,449	0,836	0,368	0,245	0,123
	LP	0,424	0,410	1,694	0,201	0,446	0,861	0,347	0,206	0,141
T3	LR	0,217	0,329	1,490	0,202	0,351	0,915	0,330	0,217	0,112
	C	0,446	0,332	1,496	0,192	0,410	0,881	0,347	0,207	0,140
	LP	0,346	0,457	1,843	0,186	0,439	0,851	0,332	0,189	0,144

LR = Linha do rodado; C = Canteiro; LP = Linha de plantio; α , m e n = parâmetros do modelo; θ_s = conteúdo de água na saturação; θ_r = conteúdo de água residual; CAD = capacidade de água disponível