



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Agrícola

ALLAN CHARLLES MENDES DE SOUSA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DE PLANTA EM ÁREA
DE CANA-DE-AÇÚCAR COM CONTROLE DE TRÁFEGO EM
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

CAMPINAS

2016



ALLAN CHARLLES MENDES DE SOUSA

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DE PLANTA EM ÁREA DE CANA-DE-
AÇÚCAR COM CONTROLE DE TRÁFEGO EM DIFERENTES
ESPAÇAMENTOS

Allan Charlles Mendes de Sousa

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

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Co-orientador: Reginaldo Barboza da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO ALLAN CHARLLES
MENDES DE SOUSA, E ORIENTADA PELO PROFESSOR DR.
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA.

CAMPINAS

2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2012/21094-0

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

So85a Sousa, Allan Charles Mendes de, 1987-
Atributos físicos do solo e de planta em área de cana-de-açúcar com controle de tráfego em diferentes espaçamentos / Allan Charles Mendes de Sousa. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.

Coorientador: Reginaldo Barboza da Silva.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Física do solo. 2. Solo - Conservação. 3. Mecanização agrícola - Aspectos econômicos. 4. Cana-de-açúcar. 5. Sistema radicular. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Silva, Reginaldo Barboza. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Physical attributes of soil and plant in sugar cane area with traffic control in different spacings

Palavras-chave em inglês:

Soil Physics

Solo - Conservation

Agricultural mechanization - Economic aspects

Sugarcane

Root system

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Frdson Fiji Matsura

Miguel Cooper

Marlene Cristina Alves

Isabella Clerice de Maria

Data de defesa: 26-02-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado defendida por Allan Charles Mendes de Sousa, aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2016, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



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

DEDICATÓRIA

Os esforços que vocês fazem com tanta compreensão, amor e bondade me enchem de
gratidão!

Carlos Alberto de Sousa (Pai)

Maria Silene Mendes de Sousa (Mãe)

Maria Aparecida Mendes de Sousa (Irmã)

Dedico a vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao criador, pelo dom da vida e pelas oportunidades e habilidades dadas.

Aos meus pais, Sr. Carlos Alberto de Sousa e D. Maria Silene Mendes de Sousa, pelo amor incondicional, apoio, sustento, educação e exemplos de vida.

À minha amada irmã Maria Aparecida Mendes de Sousa, pelo amor fraterno sempre disponível.

Ao meu orientador de doutorado Prof. Dr. Zigormar Menezes de Souza (Zigão), pela orientação que me foi dada, e por sua história de conquistas a ser seguida.

Ao meu namorado, Rogério Machado, e à sua família, pelo apoio e amor gratuito que me são dados.

Aos meus ex-orientadores Dr. Luís Fernando Carvalho Leite (Embrapa), Marcos Emanuel da Costa Veloso (Embrapa), Adeodato Ari Cavalcante Salviano (Graduação - UFPI) e Edson Eiji Matsura (Mestrado - UNICAMP), pelas contribuições que foram dadas à minha formação pessoal e profissional.

À minha orientadora de intercâmbio Prof. Dra. Rosa Maria Poch, pela boa acolhida em Lleida-ES, e pelos ensinamentos de micromorfologia.

Aos amigos de Lleida, Joan e Angel pelo apoio dado durante o exílio.

Aos eternos amigos de intercâmbio, José, Jairo, Vittor, Ruan e Jouhanna, pela família que construímos fora do país.

Ao professor Roberto (Bob), pelas conversas sempre construtivas. Obrigado!

Aos irmãos de graduação Artur, Dalila, Dyego, Poliana, Ilderlane, Gislane, Ivênio, James, Kadson, Eudes, Wllisses, Gleison e Tancredo pelas conversas, incentivos e pelos incontáveis momentos de alegrias.

Aos meus amigos da FEAGRI Ana, Camila, Guilherme, Marcelo Elaiuy, Cajuru, Daniel, Léo, Gustavo, Fernando Araújo, Leandro, Rodolfo, Wesley e Dayron.

Aos alunos de iniciação científica Leandra, Beraldo, Fran, Raíssa e Iago.

Aos amigos/irmãos da república Casarão, Fabão, Maycon, Marcelo, Leilton, Carlão e agregados, pelos momentos de alegrias, apertos, conversas e festas que tivemos.

Aos amigos Luiz, Mila, Lilo, Tita e Fernanda, por sempre me abrirem as portas de suas casas.

Aos cúmplices Bernardo, Rafael, Thiago e Tiaguinho, pelas conversas malucas, pelo ombro amigo e por sempre terem um tempinho para mim.

Aos amigos da moradia Mariana, Dani, Carol, Germano, Denize e Eveline. Gratidão!

Aos irmãos da Igreja Presbiteriana de Barão Geraldo - IPBG por me acolherem tão bem desde que entrei na comunidade em 2011.

À Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão da bolsa através do processo 2012/21094-2 e, pelo financiamento da pesquisa pelo processo 2012/14412-6.

À Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, pelo financiamento da bolsa de estudos na Universidade de Lleida, por meio do processo 99999.007493/2014-02.

Aos técnicos do laboratório de solos da FEAGRI Célia e Júnior, e à Sônia Moraes, da USP, pela ajuda que me foi dada para realizar as análises dessa pesquisa.

Aos funcionários da FEAGRI, em especial, Sidnei Trombeta, Marta Aparecida, Fábio, Cláudio, Rita e Célia Carvalho pelos desenrolares administrativos e burocráticos. Além disso, pela amizade, também!

Ao professor Miguel Cooper pelos ensinamentos sobre micropedologia e por disponibilizar o seu laboratório sempre que precisei.

A todos vocês, o meu OBRIGADO, e uma eterna GRATIDÃO!

“Digo o que penso, com esperança.

Penso no que faço, com fé.

Faço o que devo, com amor.

“Eu me esforço para ser cada dia melhor, pois bondade também se aprende.”

(Cora Coralina)

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DE PLANTA EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR COM CONTROLE DE TRÁFEGO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

RESUMO

O uso de piloto automático em veículos agrícolas e a adoção de espaçamento duplo combinado apresentam-se como possíveis soluções para mitigar os problemas de compactação do solo em área de cana-de-açúcar. Esse trabalho teve por objetivo avaliar o efeito do piloto automático e o uso de espaçamento duplo combinado sobre os atributos físicos do solo em área de produção de cana-de-açúcar. O experimento foi realizado no município de Nova Europa – SP, em duas áreas experimentais pertencentes a usina Santa Fé, que diferenciaram-se em função da classe de solo do terreno, um Latossolo Vermelho distrófico e um Neossolo Quartzarênico. Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições e três tratamentos: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m), e manejada com piloto automático. A densidade do solo apresentou diferença entre os pontos de coleta apenas no ciclo da cana soca. Não houve diferença entre os tratamentos para o carbono, umidade, teor de argila e agregação de partículas. Os tratamentos T2 e T3 apresentaram menor resistência do solo à penetração. Entre os tratamentos estudados não houve diferença nas médias dos tamanhos e formas de poros, nos dois anos de estudo. O segundo ano de estudo apresentou uma redução de poros grandes e complexos, em todos os tratamentos. Observou um aumento no intervalo hídrico ótimo (IHO) dos tratamentos T2 e T3 no segundo ano de pesquisa, especialmente na linha de plantio e no canteiro. Houve redução nos valores de IHO do T1 do primeiro para o segundo ano de coleta. O canteiro apresentou maior capacidade de suporte de carga em comparação a linha do rodado, em todos os tratamentos. As variáveis de diâmetro, comprimento de plantas, produtividade, qualidade tecnológica e o sistema radicular apresentaram-se iguais entre os tratamentos. Entre os pontos de coleta, a linha do rodado apresentou menor comprimento de raiz. Os três tratamentos apresentaram valor presente líquido negativo, e apenas o T3 obteve uma taxa interna de retorno positiva.

Palavras-chave: Piloto automático; espaçamento duplo combinado; compactação do solo.

PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND PLANT IN SUGERCANE AREA WITH TRAFFIC CONTROL IN DIFFERENT SPACING

ABSTRACT

The use of autopilot in agricultural vehicles and the adoption of combined double row spacing are possible solutions to mitigate the problems of soil compaction in sugarcane areas. The objective of this study was to evaluate the effects of autopilot and the use of combined double row spacing on the physical attributes of the soil in areas of sugarcane production. The experiment was undertaken in the city of Nova Europa – SP, in two experimental areas of the Santa Fé mill, differentiated by their soil class within the property, one dystrophic Red Latosol and the other Quartzipsamment. The experiment followed the randomized block design (RBD), with four repetitions and three treatments: T1 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed without autopilot; T2 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed with autopilot; T3 = sugarcane planted with combined double row spacing (1.5 x 0.90 m), and managed with autopilot. The collection sites presented a difference in density only within the ratoon cycle. There was no difference among the treatments in carbon, humidity, clay content and particle aggregation. Treatments T2 and T3 presented lower soil resistance to penetration. Among the treatments used, there was no difference in the average size and forms of the pores in the two years of study. The second year of the study presented a reduction in big and complex pores in all of the treatments. There was an increase in the least limiting water range (LLWR) in treatments T2 and T3 in the second year of the study, especially in the crop row and in the seedbed. There was a reduction in T1's LLWR value from the first to the second year of harvest. The seedbed presented a larger load-carrying capacity when compared with the wheel rows in all treatments. The diameter, plant length, productivity, technological quality and root system variables presented no difference among the treatments. Among the collection sites, the wheel rows presented the shortest root length. All three treatments showed negative net present value and only T3 provided a positive internal rate of return.

Keywords: Autopilot; combined double row spacing; soil compaction.

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Imagem aérea do experimento instalado em solo arenoso (a) e solo com textura média (b).....	31
Figura 2. Dados pluviométricos acumulados e temperatura média mensal do município de Nova Europa – SP registrados no período do experimento.....	32
Figura 3. Distribuição das parcelas da área experimental cultivada com cana-de-açúcar.	34
Figura 4. Trator BH 185 intercooler da Valtra (a), trator Magnum 340 da Case (b).	35
Figura 5. Plantadora DMB em operação com detalhe para o regulador de profundidade de plantio.	36
Figura 6. Avaliação da qualidade de plantio da cultura da cana-de-açúcar no Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, situado na localidade Rancho Azul (a), e, no Latossolo Vermelho distrófico de textura média, situado na localidade Mirante (b).	37
Figura 7. Colhedora CASE, modelo 8000, utilizada na colheita da cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,5m.....	37
Figura 8. Colhedora CASE, modelo 800, adaptado ao espaçamento duplo de 1,5 x 0,90m.	38
Figura 9. Transbordo da linha de implementos ANTONIOSI modelo 8000D, utilizado para o transporte da cana-de-açúcar após a colheita.	38
Figura 10. Monitor do piloto automático da marca Topcon modelo Sistem 150, utilizado no experimento.	39
Figura 11. Mapa de localização da cidade de Nova Europa – SP e das áreas experimentais situadas na localidade Rancho Azul (a) e Mirante (b).....	59
Figura 12. Pontos de coleta das amostras de solo. LR = linha do rodado, CT = canteiro e LP = linha de plantio.	62
Figura 13. Pontos de coleta das amostras de solo nas parcelas com espaçamento duplo combinado. LR = linha do rodado; CT = canteiro; LP = linha de plantio; PM = ponto médio da linha dupla e CL = canteiro da linha dupla.	63
Figura 14. Imagens de lâminas delgadas de um Neossolo Quartzarênico, sob área de mata nas camadas de 0,00-0,15 m (a e b) e 0,15-0,30 m (c e d), com e sem luz polarizada (a e c), e (b e d), respectivamente, na escala de 8 μ m.	104
Figura 15. Formas e tamanhos dos poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar após a primeira colheita. T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T3 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m – (G: Grande, M: Médio, P: Pequeno, Com: Complexos, Alon: alongados; Red: Redondos).	108
Figura 16. Formas e tamanhos dos poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar após a segunda colheita. T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T3 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m – (G: Grande, M: Médio, P: Pequeno, Com: Complexos, Alon: alongados; Red: Redondos).	109

Figura 17. Esquema da trincheira utilizada para a realização da coleta de amostras indeformadas de solo, utilizadas na determinação do intervalo hídrico ótimo.	120
Figura 18. Curva de retenção de água do solo de um Neossolo Quartzarênico. T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,50 m e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,50 m e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado de 1,5 x 0,90 m e manejada com piloto automático.	124
Figura 19. Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo de um Neossolo Quartzarênico nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração limitante (RSP) de 2,00 (a), 2,50 (b), 3,50 e 4,50 MPa (d).	129
Figura 20. Variação do intervalo hídrico ótimo de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar em função da densidade do solo com resistência limitante de 2,00 (a), 2,50 (b), 3,50 (c) e 4,50 MPa (d). DO= densidade ótima e DC = Densidade crítica.	131
Figura 21. Intervalo hídrico ótimo de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana de açúcar sob diferentes manejos. LR = linha do rodado; CT = canteiro; LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m), com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m), com piloto automático.	132
Figura 22. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar (cana planta). T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m sem piloto automático T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples de 1,50 m com piloto automático ; e T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo de 1,50 x 0,90 m com piloto automático.	134
Figura 23. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar (cana soca). T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m sem piloto automático T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples de 1,50 m com piloto automático; e T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo de 1,50 x 0,90 m com piloto automático.	135
Figura 24. Abertura dos canais de acesso para a instalação dos tubos de acrílico utilizados na avaliação do sistema radicular.	149

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Caracterização granulométrica do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico utilizados no experimento.	32
Tabela 2. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.	33
Tabela 3. Caracterização granulométrica do Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.	60
Tabela 4. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.	60
Tabela 5. Resistência do solo à penetração de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.	61
Tabela 6. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-planta sob diferentes manejos.	66
Tabela 7. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Neossolo Quartzarênico cultivado com cana soca sob diferentes manejos.	67
Tabela 8. Teste de significância para as variáveis de macroporosidade, microporosidade e porosidade total de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes manejos de cana-de-açúcar. .	68
Tabela 9. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-planta sob diferentes manejos.	69
Tabela 10. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana soca sob diferentes manejos.	70
Tabela 11. Teste de significância para as variáveis de macroporosidade, microporosidade e porosidade total de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.	71
Tabela 12. Densidade do solo (kg dm^{-3}) em um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	72
Tabela 13. Densidade do solo (kg dm^{-3}) em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	73
Tabela 14. Teste de significância para densidade do solo de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.	74
Tabela 15. Índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	76
Tabela 16. Índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	77
Tabela 17. Teste de significância para índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana de açúcar.	78
Tabela 18. Resistência tênsil do agregado (RTA) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	79
Tabela 19. Resistência tênsil do agregado (RTA) de um Latossolo Vermelho Ditrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	80

Tabela 20. Teste de significância para a resistência tênsil do agregado (RTA) de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.....	80
Tabela 21. Teor de carbono de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	81
Tabela 22. Teor de carbono de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	82
Tabela 23. Teor de argila do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico cultivados com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	83
Tabela 24. Teste de significância para teor de carbono e teor de argila de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.....	84
Tabela 25. Umidade volumétrica de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	85
Tabela 26. Umidade volumétrica de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	86
Tabela 27. Teste de significância para umidade do solo de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.	87
Tabela 28. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.	87
Tabela 29. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.....	88
Tabela 30. Teste de significância para resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.....	89
Tabela 31. Critérios para distinção entre grupos de forma de poros.	103
Tabela 32. Área total ocupada por poros (%) obtida por imagens digitais de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar manejada com piloto automático em distintos espaçamentos de plantio.	106
Tabela 33. Superfície específica (mm) em 2D de poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com piloto automático e distintos espaçamentos de plantio.	107
Tabela 34. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água pelo método de van Genuchten para os solos cultivados com cana de açúcar.....	124
Tabela 35. Teor de argila de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.	125
Tabela 36. Teor de carbono orgânico de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.	126
Tabela 37. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para resistência do solo à penetração ($RP = MPa$) em função do conteúdo de água no solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo ($Ds = Mg m^{-3}$): $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$	126

Tabela 38. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para conteúdo de água do solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) em função da densidade do solo ($Ds = Mg m^{-3}$) e do potencial matricial do solo ($\theta = kPa$): $\ln \theta = d + e Ds + f \ln \theta$	127
Tabela 39. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.....	128
Tabela 40. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos e uso piloto automático, por dois ciclos.....	133
Tabela 41. Teste de significância comparando os modelos de suporte de carga do solo entre pontos de coleta em áreas com diferentes sistemas de manejo de cana.	136
Tabela 42. Indicadores de qualidade tecnológica da cultura da cana-de-açúcar.	150
Tabela 43. Variáveis biométricas de cana-de-açúcar plantada num Neossolo Quartzarênico em diferentes espaçamentos com tráfego de máquinas controlado por piloto automático.	152
Tabela 44. Área (cm^2) e comprimento de raiz (cm) de cana-de-açúcar cultivada em Neossolo Quartzarênico e manejada com controle de tráfego em diferentes espaçamentos em cana planta e soca.....	154
Tabela 45. Variáveis de qualidade tecnológica da cultura da cana-de-açúcar plantada num Neossolo Quartzarênico em diferentes espaçamentos com tráfego de máquinas controlado por piloto automático em cana planta e soca.	156
Tabela 46. Estimativa do custo operacional de preparo, plantio, tratos culturais e colheita em 1,0 ha de cana-de-açúcar planta com espaçamento simples (1,5 m) e duplo combinado (15 x 0,90 m) manejado com e sem piloto automático.	158
Tabela 47. Açúcares totais recuperáveis (ATR), valor pago pela ATR, produtividade de cana-de-açúcar ($t ha^{-1}$) e valor pago pela ATR total produzida por hectare no Neossolo Quartzarênico com cana planta e soca.....	160
Tabela 48. Fluxo de caixa líquido/ha, fluxo de caixa acumulado, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR), para as duas primeiras colheitas da cultura da cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos de plantio no Neossolo Quartzarênico.	161

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
1. INTRODUÇÃO.....	27
2. HIPÓTESE	29
3. OBJETIVOS.....	30
3.1 Geral.....	30
3.2 Específicos	30
4. METODOLOGIA GERAL	31
4.1 Localização do experimento e histórico da área.....	31
4.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	33
4.3 Etapas da produção	34
4.3.1 Preparo da área.....	34
4.3.2 Plantio e adubação.....	35
4.3.3 Colheita	37
4.3.4 Transporte da cana-de-açúcar no canavial (transbordo)	38
4.3.5 Piloto automático.....	38
4.5.6 Análises realizadas nas áreas experimentais.	39
CAPÍTULO I.....	40
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
1.1 Importância econômica da cultura da cana-de-açúcar	40
1.2 Tráfego de máquinas e compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar.....	41
1.3 Piloto automático.....	43
1.4 Qualidade física do solo	45
1.5 Espaçamento de linhas de plantio de cana-de-açúcar	47
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
CAPITULO II.....	56
RESUMO.....	56
1. INTRODUÇÃO	58
2. MATERIAL E MÉTODOS	59
2.1 Localização do experimento.....	59
2.2 Caracterização das áreas experimentais	59
2.3 Delineamento experimental e tratamentos	61

2.4. Amostragem de solo.....	62
2.5. Análises	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo.....	65
3.2 Densidade do solo	72
3.3 Agregação das partículas, carbono e teor de argila.....	75
3.4 Resistência do solo à penetração	85
4. CONCLUSÕES	90
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
Tamisador de Yoder a úmido (a) e conjunto de peneiras utilizadas no tamisamento (b).	95
CAPITULO III	97
RESUMO	97
1. INTRODUÇÃO.....	99
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	100
2.1 Localização do experimento.....	100
2.2 Coleta dos blocos de solo	100
2.3 Preparo das amostras	101
2.4 Impregnação das amostras	101
2.5 Confecção das lâminas	102
2.6 Análises micromorfométricas	102
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
3.1 Descrição das lâminas	104
3.2 Porosidade do solo e superfície específica.....	105
4. CONCLUSÕES	110
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	111
RESUMO	116
1. INTRODUÇÃO.....	118
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	119
2.1 Intervalo hídrico ótimo.....	119
2.2 Capacidade de suporte de carga do solo.....	122
2.3 Análise granulométrica e Carbono orgânico total.....	123
2.4 Análise estatística.....	123
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	123

3.1 Intervalo hídrico ótimo.....	123
4. CONCLUSÕES	137
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
CAPÍTULO V	144
RESUMO	144
1. INTRODUÇÃO.....	146
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	147
2.1 Localização do Experimento.....	147
2.2 Avaliações biométricas	148
2.2 Avaliação econômica	151
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	152
3.1 Avaliação biométrica e do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar.....	152
3.2 Sistema radicular	153
3.4 Qualidade industrial da cana-de-açúcar	156
3.5 Avaliação econômica	157
4. CONCLUSÕES	163
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	170

CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa o primeiro lugar no ranking mundial entre os produtores de cana-de-açúcar, com uma área de 7,9 milhões de hectares e uma produção de 560,36 milhões de toneladas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor brasileiro, responsável por 51,82% da área total colhida (PORTAL BRASIL, 2013). Além disso, ressalta-se que a atividade canavieira, ao longo do seu processo produtivo, que vai desde o planejamento até a comercialização dos seus derivados, oferece inúmeras oportunidades de empregos diretos e indiretos ao país.

Os fatores supracitados acarretam na expansão de áreas cultivadas, e na modernização de algumas práticas de manejo realizadas na cultura. Uma dessas mudanças diz respeito à eliminação do uso do fogo como etapa antecessora ao corte, discutida no âmbito (a) social; uma vez que os funcionários responsáveis corte manual podem ser redirecionados à executar atividades com maior qualificação técnica; (b) ambiental; visto que a permanência da palha sobre a superfície funciona como fonte de material orgânica para o solo, e gera uma série de benefícios químicos, físicos e biológicos ao sistema, e (c) econômico; no qual se encaixam os ganhos tidos com o aumento da produtividade. Com isso, instituiu-se no estado de São Paulo, em 11 de março de 2003, o decreto de lei 47.700 que regulamenta a lei estadual 11.241 de 19 de setembro de 2002, na qual estabeleceram prazos para a eliminação gradativa da prática da queima da palha, e determina sua completa extinção até os anos de 2021 e 2031 para áreas com e sem condições mecanizáveis, respectivamente.

A erradicação das queimadas incentiva a modernização das colheitas, uma vez que quando realizada de forma mecanizada pode ser procedida com a cana crua, o que seria inviável se realizada de forma manual.

Porém, a mecanização dos campos de produção desperta uma outra preocupação ao setor, desta vez relacionada ao processo de compactação do solo, proporcionado pelo aumento do tráfego de máquinas. Essa problemática ganha mais destaque pelo fato da cana-de-açúcar ser uma cultura semi-perene, com vida útil média de 5-6 anos e, que, portanto, encontram-se submetidas ao tráfego e aos riscos de compactação por um longo período.

Diante disso, é fundamental a investigação de metodologias que reduzem os riscos de compactação, visto que a alteração da estrutura do solo, no que refere-se à redução do espaço poroso, oferece um aumento da resistência ao desenvolvimento do sistema radicular, e,

com isso, compromete a absorção de água, gases e nutrientes, tão necessários ao crescimento das plantas.

Uma dessas tecnologias consiste no emprego de piloto automático nos veículos agrícolas, que consiste numa tecnologia que determina, por meio de sinais enviados por satélites, o trajeto que o veículo agrícola irá percorrer. Assim, o equipamento é capaz de orientar o trator por rotas que não há, ou que há pouco crescimento de plantas, preservando, especialmente, a região do canteiro e da linha de plantio.

Além dessa tecnologia, o uso de espaçamentos combinados também funcionam como alternativas de controle de tráfego, pois reduzem o número de ruas destinadas ao trânsito e proporcionam o plantio de uma maior população de plantas. Entre os benefícios proporcionados pela redução do espaçamento, destaca-se também, a maior eficiência no uso dos recursos envolvidos no processo de produção, como por exemplo, água, luz e nutrientes.

2. HIPÓTESE

O controle do tráfego de máquinas com o uso do piloto automático, em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, tanto para o espaçamento simples como para o espaçamento duplo combinado, reduz a compactação do solo na região da soqueira e aumenta a produtividade da cultura, quando comparada a uma área sem controle de tráfego, plantada com espaçamento simples, no município de Nova Europa - SP.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

O presente trabalho teve por objetivo estudar, por dois anos consecutivos, as alterações físicas do solo e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, plantada com espaçamento simples e duplo, em áreas com e sem controle de tráfego de máquinas.

3.2 Específicos

Determinar o teor de água, a estabilidade e a resistência tênsil de agregados, a densidade e a porosidade para dois solos de diferentes classes texturais, cultivados com cana-de-açúcar em áreas com e sem controle de tráfego de máquinas sob diferentes espaçamentos de plantio.

Verificar a capacidade de suporte de carga (CSC) e o intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Neossolo Quartzarênico, submetido ao manejo da cultura da cana-de-açúcar cultivada com e sem o controle de tráfego de máquinas, em diferentes espaçamentos de plantio.

Quantificar, por meio de estudos micromorfométricos, as formas, os tamanhos as e orientações dos poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar manejada com e sem o controle de tráfego de máquinas sob diferentes espaçamentos de plantio.

Avaliar o desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade da cana-de-açúcar cultivada num Neossolo Quartzarênico com espaçamento simples e duplo combinado, em áreas com e sem controle de tráfego de máquinas.

Avaliar de forma econômica o desempenho dos tratamentos estudados.

4. METODOLOGIA GERAL

4.1 Localização do experimento e histórico da área

O experimento foi instalado nas dependências da Usina Santa Fé, numa área com relevo variando de plano a suave-ondulado, localizada no município de Nova Europa-SP. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é o tropical com estação seca (Aw), apresentando temperatura mínima e máxima de 16 e 29° C, respectivamente, e índice pluviométrico anual em torno de 1.340 mm.

A pesquisa foi desenvolvida em duas áreas com distintas classes de solos, sendo um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, situado na localidade Rancho Azul, localizado a 48° 34' 41,76" de longitude oeste e 21°53' 44,89" de latitude sul (Figura 1a), e um Latossolo Vermelho distrófico de textura média, situado na localidade Mirante com coordenadas 48°37'0,54" longitude oeste 21°48'29,18" de latitude sul (Figura 1b).

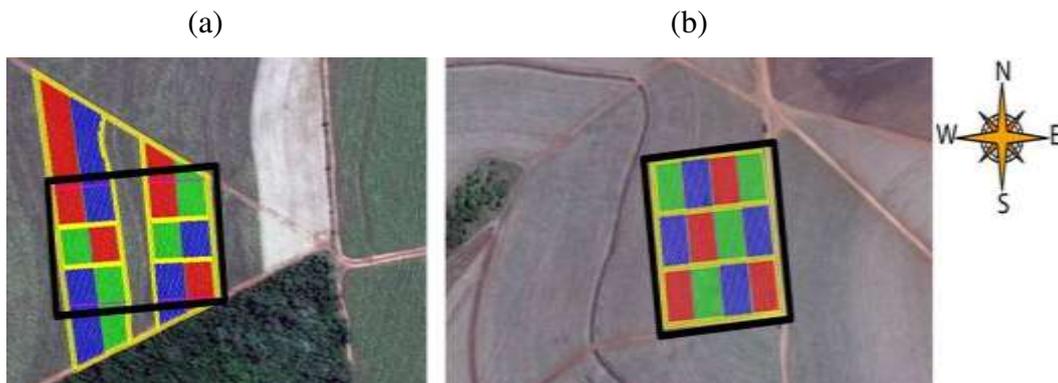


Figura 1. Imagem aérea do experimento instalado em solo arenoso (a) e solo com textura média (b).

A Figura 2 apresenta as temperaturas médias mensais e os dados pluviométricos acumulados durante o período de realização do estudo, adquiridos por uma estação meteorológica localizada próximo ao local do experimento. Nessa figura, encontram-se ainda o registro das atividades que foram realizadas em cana área experimental.

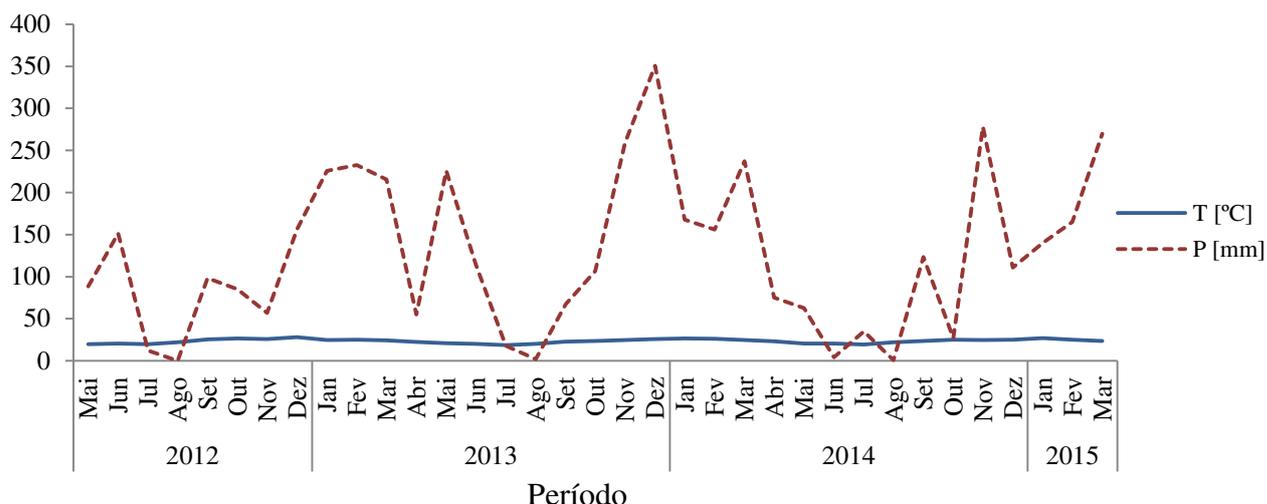


Figura 2. Dados pluviométricos acumulados e temperatura média mensal do município de Nova Europa – SP registrados no período do experimento.

A área do Latossolo Vermelho distrófico, anterior à instalação do experimento, encontrava-se cultivada com cana-de-açúcar, no seu oitavo corte seguido, com colheita sendo realizada de forma mecanizada. Já o Neossolo Quartzarênico, a renovação do canavial se deu após o sexto ciclo, com todas as práticas também sendo realizada mecanicamente.

Na Tabela 1 encontra-se descrita a composição granulométrica de partículas e as respectivas classificações texturais do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico. Essa classificação foi realizada antes da instalação do experimento, com a finalidade de identificar solos com distintas classes texturais.

Tabela 1. Caracterização granulométrica do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico utilizados no experimento.

Camadas (m)	AG	AF	AT	Silte	Argila	Textura
	g kg ⁻¹					
Neossolo Quartzarênico						
0,00-0,10	400,50	440,15	840,65	79,00	80,35	Arenosa
0,10-0,20	420,90	390,84	811,74	107,36	80,90	Arenosa
0,20-0,30	480,30	380,02	860,32	89,50	50,18	Arenosa
Latossolo Vermelho distrófico						
0,00-0,10	150,80	430,00	580,80	160,00	259,20	Média
0,10-0,20	150,90	440,70	591,60	160,10	248,30	Média
0,20-0,30	160,40	490,40	650,80	188,50	160,70	Média

AG =areia grossa; AF =areia fina; AT =areia total.

Na Tabela 2 encontra-se apresentada a caracterização física dos atributos do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico, realizada antes da instalação do experimento.

Tabela 2. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.

Camadas (m)	Macro		Micro (m ³ m ⁻³)		PT		Densidade kg dm ⁻³	
	MT	AC	MT	AC	MT	AC	MT	AC
Neossolo Quartzarênico								
0,00-0,10	0,12	0,05	0,36	0,32	0,48	0,38	1,29	1,60
0,10-0,20	0,10	0,04	0,32	0,31	0,42	0,35	1,35	1,66
0,20-0,30	0,10	0,04	0,34	0,31	0,44	0,35	1,36	1,69
Latossolo Vermelho distrófico								
0,00-0,10	0,09	0,09	0,40	0,33	0,49	0,42	1,26	1,32
0,10-0,20	0,10	0,08	0,32	0,34	0,42	0,42	1,23	1,34
0,20-0,30	0,13	0,08	0,35	0,36	0,48	0,44	1,24	1,36

Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade, PT = porosidade total. AC = Área cultivada com cana-de-açúcar anterior a instalação do experimento. MT = Área remanescente de mata.

4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O projeto foi conduzido em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), num experimento com os tratamentos distribuídos em blocos ao acaso no esquema de sub-sub parcelas (parcela = tratamento; sub = ponto de coleta; sub-sub = camada). Foram avaliados os seguintes tratamentos: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m), e manejada com piloto automático. Cada unidade experimental apresentou uma área de 1.500 m² e dimensões laterais de 50 x 30 m (Figura 3).

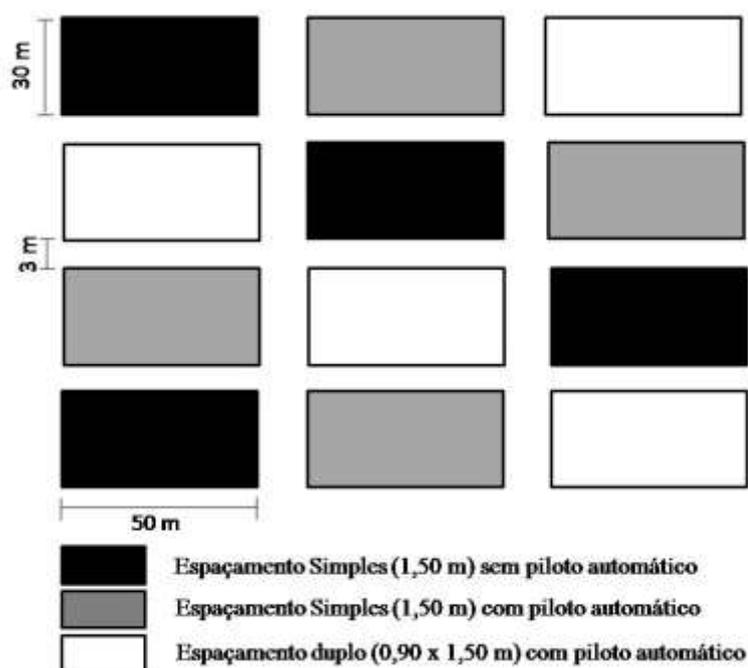


Figura 3. Distribuição das parcelas da área experimental cultivada com cana-de-açúcar.

4.3 Etapas da produção

4.3.1 Preparo da área

Somente na área do Latossolo Vermelho distrófico houve eliminação de soqueira, utilizando para isso um eliminador de soca DMB, a uma profundidade de 0,15 m. Tanto na área de solo de textura média como na de solo arenoso, os restos culturais remanescentes foram dessecados aplicando-se $5,76 \text{ L ha}^{-1}$ de Tensor Plus e $5,76 \text{ kg ha}^{-1}$ de Roundup WG.

Em seguida, foi realizada uma gradagem por meio de uma grade aradora da CIVEMASA, modelo SGIC de 28 discos, tracionada por um trator BH 185 intercooler da Valtra 185 intercooler. Após esse procedimento, utilizou-se um subsolador da linha de implementos Stara, modelo asa laser, com 7 hastes espaçadas a 0,40 m, ponteiros de aço fundido e endurecido do tipo “botinha”, tracionada por um trator Magnum 340 da Case (Figura 4).



Figura 4. Trator BH 185 intercooler da Valtra (a), trator Magnum 340 da Case (b).

4.3.2 Plantio e adubação

Nas parcelas cultivadas com espaçamento simples foram plantadas 30 linhas distanciadas a 1,50 m. Nas parcelas plantadas com espaçamento duplo combinado, adotou-se o espaçamento de 1,50 x 0,90 m, que resultou no plantio de 12 linhas duplas. Nos dois espaçamentos utilizados as linhas de plantio apresentaram 50 m de comprimento.

O plantio, tanto para o espaçamento simples como para o duplo, foi realizado a 0,30 m de profundidade, com densidade de 18 gemas m^{-1} linear. Essa operação 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. O implemento possui volume de 24 m^3 , massa de 9320 kg, altura de 4,30 m, comprimento de 7,60 m e largura de 3,65 m em operação. Conta ainda com 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 feita por meio de rodas estabilizadoras com pneus superflotation 10,5/80 x 18-10 lonas (Figura 5).



Figura 5. Plantadora DMB em operação com detalhe para o regulador de profundidade de plantio.

A plantadora apresenta um reservatório de aço inoxidável provido de um sensor de nível, com capacidade para receber 1250 kg de adubo. Possui também, um sistema de distribuição do tipo “rosca sem fim”, que é acionado por um motor hidráulico com válvula de regulagem de fluxo e óleo, o qual permitiu aplicar $0,45 \text{ t ha}^{-1}$ e $0,50 \text{ t ha}^{-1}$ do formulado 05-25-23 + 1,5% de zinco + 0,4% de boro, para a área arenosa e de textura média, respectivamente. Na ocasião do plantio, em cada área, foram aplicados $0,25 \text{ kg ha}^{-1}$ de Regente 800 WG e $0,5 \text{ L ha}^{-1}$ de Comet, para controle de insetos e fungos, respectivamente. Ressalta-se que as áreas já encontravam-se com o pH corrigido, tendo sido realizada a aplicação de $1,40 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico em 24/04/2012. Não houve aplicação de torta e nem de vinhaça nas áreas experimentais.

Em seguida, realizou-se a avaliação da qualidade de plantio, no qual observou-se a profundidade na qual os toletes foram enterrados e o número de gemas por metro linear (Figura 6). Esse procedimento foi realizado com o objetivo de evitar a ocorrência de falhas nas linhas de plantio, que pudessem interferir na produtividade da cana-de-açúcar de acordo com os tratamentos estudados.



Figura 6. Avaliação da qualidade de plantio da cultura da cana-de-açúcar no Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, situado na localidade Rancho Azul (a), e, no Latossolo Vermelho distrófico de textura média, situado na localidade Mirante (b).

4.3.3 Colheita

A colheita foi realizada por uma colhedora da marca CASE, modelo 8000, que 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, com massa aproximada de 15 toneladas (Figura 7).



Figura 7. Colhedora CASE, modelo 8000, utilizada na colheita da cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,5m.

No tratamento plantado com espaçamento duplo combinado, a colheita foi realizada por uma colhedora CASE, modelo 8000 adaptada para esse tipo de espaçamento, com características semelhantes às descritas para a colhedora de espaçamento simples (Figura 8).



Figura 8. Colhedora CASE, modelo 800, adaptado ao espaçamento duplo de 1,5 x 0,90m.

4.3.4 Transporte da cana-de-açúcar no canavial (transbordo)

Para o transporte da cana-de-açúcar utilizou-se uma carreta de transbordo da linha de implementos ANTONIOSI, modelo 8000D, com capacidade para transportar 8,50 toneladas num volume de 20 m³. O implemento possui aproximadamente 6,50 toneladas, largura máxima de 3,30 m, altura mínima de 3,50 m, e altura de basculamento de 4,70 m, com pneus 600/50-22,5 de baixa pressão. O tracionamento do transbordo foi realizado por reboque, utilizando um trator HB 185 intercooler da Valtra (Figura 9).



Figura 9. Transbordo da linha de implementos ANTONIOSI modelo 8000D, utilizado para o transporte da cana-de-açúcar após a colheita.

4.3.5 Piloto automático

Utilizou-se um piloto automático da Topcon, modelo System 150, com uma série de padrões de orientação automática, incluindo o reconhecimento de fronteiras que auxiliam na conclusão de voltas e na captação das informações de faixas posteriores. O aparelho

multifuncional é de rápida ação, possui um menu em tela que auxilia nas mudanças de funções e operações, bem como recursos visuais para configuração e adaptação a diversos veículos. O piloto conta ainda com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, facilmente atualizável, com 2,00 cm de precisão em tempo real. Atrelado a isso, o aparelho permite a captação de redes de referência existentes por meio da conexão via telefone celular (Figura 10).



Figura 10. Monitor do piloto automático da marca Topcon modelo Sistem 150, utilizado no experimento.

4.5.6 Análises realizadas nas áreas experimentais.

Esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo que, apenas no capítulo II realizou-se por dois anos consecutivos, nos dois solos, as análises de densidade do solo, porosidade do solo, estabilidade de agregados, resistência do solo à penetração, teor de carbono, teor de argila e resistência tênsil do agregado. Nos demais capítulos, as análises de micromorfometria, intervalo hídrico ótimo, capacidade de suporte de carga e a avaliação econômica, foram executadas apenas no Neossolo Quartzarênico.

CAPÍTULO I

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Importância econômica da cultura da cana-de-açúcar

A atividade canavieira, historicamente uma das maiores importâncias econômicas do Brasil, vivencia uma crescente expansão e desenvolvimento tecnológico, em especial após a década de 1990, em que o país tornou-se o principal produtor e exportador de açúcar. Esse período foi caracterizado por grandes transformações que exigiram dos agentes envolvidos no processo de produção da cana-de-açúcar uma maior competitividade e eficiência para a permanência na atividade.

A cultura destaca-se na economia do país, dentre outros motivos, pelas inúmeras oportunidades de empregos diretos e indiretos que são ofertados ao longo do processo de produção, que estende-se desde o planejamento do plantio, até a comercialização de seus derivados (RONQUIM, 2010). Além disso, o setor tem mostrado significativa participação no processo de evolução dos indicadores socioeconômicos das regiões próximas às unidades de produção (GOMES et al., 2012).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, registrando no ano-safra de 2011-2012, a produção de 560,36 milhões de toneladas e, uma área destinada à safra de 2012-2013 de 8,52 milhões de hectares. O estado de São Paulo é o maior produtor brasileiro, com 52% da área total colhida, seguido dos estados de Minas Gerais, Goiás e Paraná com 8,95; 8,11 e 7,31 %, respectivamente (CONAB, 2012a; MAPA, 2013).

No ano safra 2012-2013 a moagem foi de 595,12 milhões de toneladas, correspondente a 6,20% a mais que a safra anterior. Desse total, 50,53% da cana processada foi destinada à produção de etanol, o que representou 300,74 milhões de toneladas de cana colhida. O restante do percentual foi destinado à produção de açúcar. Na safra 2013-2014 foram colhidas 652,01 milhões de toneladas, sendo, deste total, 54,36% destinados à produção de etanol e 45,64% à produção de açúcar (CONAB, 2012b; CONAB 2013).

Em 2015, o setor passou por uma das piores crises econômicas em função da grande oferta dos produtos e da desvalorização do real, o que provocou a demissão de alguns funcionários, e, em situação mais extremas, o fechamento de usinas. Contudo, as perspectivas para o ano de 2016 são animadoras, graças ao aumento dos preços dos derivados (NOVA CANA, 2016).

O destaque brasileiro no topo do ranking dos maiores produtores de cana-de-açúcar decorre, basicamente, de dois fatores que contribuíram para o crescimento da demanda

de exportação dos seus derivados. O primeiro relacionado à criação da organização mundial do comércio (OMC) que regulamentou-se a comercialização internacional do açúcar, com conseguinte redução dos subsídios nos países desenvolvidos e, o segundo, referente aos interesses mundiais por fontes renováveis de energia, o que estimulou a produção do etanol (MONTAGNHAN;SHIKIDA, 2012). Além dos incentivos econômicos dados ao setor, as características climáticas e agrônômicas das áreas de produção brasileiras são favoráveis aos altos rendimentos de sacarose.

Distribuída numa ampla faixa geográfica, a área de cultivo de cana-de-açúcar no país, concentra-se entre o paralelo 5º, no Rio Grande do Norte, até o paralelo 23º de latitude Sul, no estado do Paraná, o que propicia a atividade das usinas, em diversas regiões, com oferta de produtos durante o ano inteiro e, que, portanto, facilita a sua distribuição (CONAB, 2012b). Além das condições geográficas favoráveis à produção, o Brasil também tem investido na realização de pesquisas que buscam o aperfeiçoamento técnico das áreas de produção (NICOLOSI et al., 2012), o que visa maiores rendimentos à cultura e a manutenção da qualidade dos recursos ambientais envolvidos no processo produtivo.

Porém, ainda há necessidade de responder muitos questionamentos, visto que o setor canavieiro encontra-se em constante transformação em prol da verticalização de sua produção. Um deles diz respeito à eliminação completa do fogo como etapa antecessora a colheita, obrigando os produtores realizarem o corte de forma mecanizada, o que exige respostas, tais como: (a) Quais as consequências do aumento do tráfego de máquinas sobre a qualidade do solo nas áreas de cana-de-açúcar? (b) Qual o impacto econômico gerado na atividade canavieira? (c) Que medidas alternativas devem ser adotadas para minimizar os efeitos negativos que essa mudança poderá trazer?

1.2 Tráfego de máquinas e compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar

O setor sucroalcooleiro, atualmente, apresenta-se como uma das mais importantes atividades do agronegócio brasileiro, e, para sua permanência, requer o uso de veículos e implementos agrícolas em todas as etapas do processo de produção.

Desde os anos 70, as tecnologias empregadas na cultura da cana-de-açúcar sofreram inúmeras evoluções nas mais diversas etapas de produção, que estende-se desde o carregamento mecanizado, por meio de guinchos à completa mecanização da colheita. Neste período, o cenário canavieiro caracterizou-se pelo corte manual da cana queimada, com média de quatro cortes, e somente nos anos 80, esse número aumentou para 5-6, devido ao surgimento de novas variedades. Ainda nos anos 80, a compactação do solo causada pelo

tráfego de máquinas não era muito significativa, uma vez que somente após a colheita de cinco ruas, a cana-de-açúcar era amontoada e em seguida transportada (BENEDINE; CONDE, 2008).

Com o passar dos anos, o aumento do tráfego de máquinas, em áreas de produção de cana-de-açúcar, especialmente após a obrigatoriedade da eliminação do fogo, favoreceu o surgimento de um cenário propício à compactação do solo. Tal situação trouxe consigo efeitos prejudiciais ao desenvolvimento das plantas, a exemplo, o aumento da resistência ao crescimento radicular, indisponibilidade de água, nutrientes e de gases (SEVERIANO et al., 2010; BECERRA et al., 2011; SOUZA et al., 2012).

De acordo com o levantamento realizado pela associação nacional dos fabricantes de veículos automotores, referente ao mês de abril de 2013, o comércio interno brasileiro movimentou 1,54 bilhão de dólares. Em 2014, o número de colheitadeiras, cultivadores, tratores de rodas e de esteiras vendidos no mercado interno foi de 74552 unidades (ANFAVEA, 2013; ANFAVEA; 2014).

O conhecimento das interações com o solo, especialmente as relacionadas com a pressão do pneu, tipo de rodado, carga de eixo e a intensidade com que as máquinas trafegam, são os fatores mais relevantes para o estudo da compactação dos solos cultivados. Esse fenômeno ganha maior intensidade em função do tempo de aplicação da carga e o número de vezes que uma nova carga é aplicada (KAMIMURA et al., 2009). Visando mitigar essa problemática, o controle de tráfego de máquinas tem surgido como alternativa promissora em áreas de cana-de-açúcar, visto que consegue separar as zonas de tráfego agrícola das zonas onde há o desenvolvimento de plantas. Dessa forma, essa tecnologia proporciona alguns benefícios à cultura, tais como: aumento da produtividade, maior longevidade ao canavial, redução da resistência do solo à penetração e preservação da soqueira (LECLER; TWEDDLE, 2010; ROQUE et al., 2011).

Pesquisa reporta que áreas cultivadas com cana-de-açúcar e colhidas mecanicamente, independente da classe textural do solo, apresentam camadas com características de compactação (LIMA et al., 2013). No estudo de Cavichioli et al. (2012), o tráfego de máquinas proporcionou compactação no perfil do solo até a profundidade de 0,50 m, tanto na linha de tráfego como na linha de plantio. Severiano et al. (2010), destacam a vulnerabilidade de compactação do solo nas áreas com altos teores de água, e ressaltam que esse risco permanece mesmo quando o tráfego de máquinas ocorre na zona de friabilidade.

Trabalho que avaliou a influência do número de passagens de máquinas sobre a densidade do solo utilizando trator com massa de 1,90 Mg, verificou aumento da compactação

diretamente proporcional ao número de passagens (GUIMARÃES JUNYOR et al., 2012). De acordo com Souza et al. (2012), a mecanização da cana-de-açúcar aumenta a resistência do solo, reduz a porosidade e aumenta a densidade do solo, oferecendo maiores impedimentos ao crescimento radicular. Carvalho et al. (2011), verificaram que a menor intensificação do uso de máquinas e implementos agrícolas contribui significativamente com o aumento da produtividade da cana-de-açúcar. Sousa (2012), afirma que o controle do tráfego de máquinas proporciona melhores condições para o desenvolvimento radicular na região da soqueira.

Dada a relação existente entre o tráfego de máquinas, a compactação do solo e a produtividade da cana-de-açúcar, torna-se necessário a realização de pesquisas que reportam sobre a mecanização dos canaviais e que visam minimizar sua influência sobre a degradação física do solo. Isso, visto que o uso de máquinas e implementos, nas diversas etapas do processo produtivo, torna-se indispensável para atender a demanda de cana-de-açúcar requerida pelo mercado externo e interno.

1.3 Piloto automático

O controle de tráfego de máquinas, por meio do uso do piloto automático, constitui-se numa tecnologia promissora para o desenvolvimento da atividade canavieira e para mitigação dos impactos negativos causados aos atributos físicos do solo.

O piloto automático consiste num sistema de direcionamento via satélite integrado ao sistema hidráulico do trator, responsável por fornecer correções de direcionamento durante a realização de operações de campo, o que proporciona uma redução dos erros de sobreposição e falhas entre as passadas do rodado (MONTANHA et al., 2011).

Essa tecnologia originou-se da evolução do método de orientação de faixas paralelas por barra de luz, sendo os primeiros trabalhos relacionados ao seu estudo datados nos anos 60. Contudo, somente nas últimas décadas sua adoção ganhou destaque no cenário agrícola nos mais diferentes tipos de cultura e etapas do processo produtivo (MAPA, 2013). Em 2011, cerca de 39% das usinas de cana-de-açúcar brasileiras já adotavam o sistema de direcionamento por piloto automático (SILVA et al., 2011).

O sistema conta com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS (Global Navigation Satellite Systems), por meio do qual é possível captar informações de latitude, longitude e altitude, o que permite a localização de qualquer ponto no globo terrestre (ANSELMINI, 2012). O receptor é provido de um menu de correções diferenciais, como, por exemplo o sistema RTK (Real Time Kinematic), no qual o sinal de correção é captado por uma base fixa que orienta corretamente o posicionamento

enviado pelos satélites, repassando a um receptor móvel, neste caso representado por um veículo agrícola (BERGTOLD et al., 2009).

Funcionalmente, o operador determina uma linha de referência que servirá de orientação para as demais, sendo esta determinada em função do espaçamento adotado entre as passadas. Em seguida, o sistema computacional do equipamento reproduz infinitas linhas de tráfego à esquerda e à direita do referencial. Ressalta-se, que a posição do veículo é corrigida por meio automático que atuam no volante ou no próprio rodado, no entanto, as manobras procedidas nas cabeceiras das linhas de plantio são realizadas de forma manual (OLIVEIRA; MOLIN, 2011).

A orientação automatizada destaca-se por proporcionar inúmeros benefícios, dentre eles a diminuição do estresse do operador e, em consequência, o aumento da capacidade operacional de campo, o que contribui para o aumento da velocidade de trabalho. Além disso, promove à redução do consumo de combustível, a possibilidade de realização de trabalhos noturnos, a melhoria de gestão e rendimentos mais elevados (SILVA et al., 2010; OLIVEIRA; MOLIN, 2011; OTOBONI et al., 2011).

A tecnologia do piloto automático é potencialmente aplicável em todas as etapas de produção da cultura da cana-de-açúcar, controlando o tráfego de máquinas nas áreas de produção e mitigando os efeitos negativos oriundos da compactação do solo. Isso resulta na melhoria da qualidade da cultura e em menores impactos danosos aos recursos naturais (CIRANI et al., 2010).

A cultura da cana-de-açúcar, por tratar-se de uma cultura semi-perene com vida útil média de 5 anos, necessita de uma alta eficiência durante o plantio, visto que a realização das etapas seguintes, tais como, a realização de tratos e a colheita, podem ser comprometidas devido à má disposição das linhas. Diante disso, o piloto automático apresenta-se como tecnologia mitigadora para esse problema, pois facilita o plantio de linhas paralelas à linha pré-determinada, com distanciamento uniformes, o que proporciona um aumento no aproveitamento da área em torno de 5 a 6%, e melhores rendimentos operacionais das máquinas (BENEDINE; CONDE, 2008; MOLIN et al., 2008; LIONÇO et al., 2010).

Estudo realizado por Baio e Moratelli (2011), observou que o uso de piloto automático no plantio de cana-de-açúcar promove uma acurácia de 0,033 m entre as passadas, cinco vezes maior do que quando direcionada manualmente, o que possibilita o plantio de um maior número de linhas por área. ROQUE et al. (2011) e SOUZA et al. (2012), verificaram a manutenção da qualidade física do solo na região da soqueira quando utiliza-se o piloto automático comparativamente ao sistema manual.

A agricultura de precisão, por meio do uso de piloto automático, torna-se necessária para a permanência do Brasil no cenário agrícola mundial, especialmente, na produção de culturas energéticas como a cana-de-açúcar. Essa afirmação baseia-se no crescente interesse, interno e externo, pelo consumo dos seus derivados, o que exige, para isso, a adoção de tecnologias que além de contribuírem para o aumento da produção, otimizem o uso das áreas, e agridam minimamente os recursos ambientais envolvidos no processo de produção.

1.4 Qualidade física do solo

A atividade canavieira mecanizada torna-se indispensável para atender a demanda por produtos e subprodutos da cana-de-açúcar, especialmente nas regiões onde há escassez de mão-de-obra. Porém, quando realizada de forma excessiva ou de forma não planejada, pode promover alterações negativas na qualidade física do solo.

A fase física do solo exerce importante função nos estudos de indicadores de sustentabilidade, pois apresenta influência direta nas reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta (STRECK et al., 2008; SOUZA et al., 2012). Dessa forma, a identificação dos impactos da mecanização da colheita da cultura da cana-de-açúcar sobre a estrutura do solo, tornam-se importantes ferramentas para a tomada de decisões com relação ao manejo adotado (SEVERIANO et al., 2010).

De acordo com Pacheco e Cantalice (2011), as análises de compressibilidade e do comportamento hídrico do solo apresentam-se como importantes indicadores aplicáveis ao monitoramento da degradação física em áreas de cana-de-açúcar, causada, especialmente, pelo tráfego de máquinas. Além disso, pode servir de embasamento para a realização de mudanças no manejo adotado.

A análise de compressibilidade do solo fornece informações sobre duas variáveis que podem ser utilizadas na avaliação da qualidade física do solo. Uma delas é a tensão de pré-consolidação, que reflete o valor máximo de carga que o solo pode suportar sem que haja uma compactação adicional e, a segunda é o coeficiente de compressão, que representa o decréscimo do volume de um solo quando este é submetido à aplicação de uma pressão externa (ASSIS; LANÇAS, 2005; TORMENA et al., 2008; SILVA et al., 2010).

Em estudo desenvolvido por Pacheco et al. (2010), foi verificado, por meio da avaliação da capacidade de suporte de carga, um aumento na compactação de um Argissolo em áreas de cana-de-açúcar mecanizada no estado de Alagoas. Lima et al. (2006), ao realizarem estudo em área de citros na região de Piracicaba, verificaram que há correlação

linear e positiva entre a pressão de pré-consolidação e a resistência à penetração em um Latossolo. Estudo realizado por Silva et al. (2006), em um Argissolo sob cultivo de café, no estado de Alagoas, concluiu que os efeitos das operações mecanizadas podem ser quantificados por meio do modelo de capacidade de suporte de carga, e que sua aplicação possibilita quantificar a influência do tráfego de máquinas. Ressalta-se que o aumento da umidade do solo influencia na pressão de pré-compactação e no aumento do índice de compressão do solo, o que reduz a capacidade de suporte de carga (SILVA; CABEDA, 2006).

No estudo realizado por Visch Filho et al. (2015), em São Pulo, foi verificado um aumento na capacidade de suporte de carga de um Latossolo, especialmente, na linha do rodado. Souza et al. (2014) destacam que o intenso tráfego de máquinas nas áreas de cana-de-açúcar, sem considerar a umidade do solo, tem sido um dos principais responsáveis pelo aumento da capacidade de suporte de carga.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) também funciona como excelente indicador de qualidade física, por reunir em um único atributo o efeito do potencial matricial, a aeração e a resistência mecânica do solo oferecida ao sistema radicular, o que possibilita estabelecer condições de umidades limitantes ao crescimento das plantas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 2007; PEREIRA et al., 2011; BLAINSKI et al., 2012).

Ao avaliarem o comportamento do intervalo hídrico ótimo de três Latossolos no município de Rio Brilhante - MS, sob cultivo de cana-de-açúcar mecanizado, Cavalieri et al. (2011), verificaram que o solo de textura média apresentou maiores restrições físicas ao crescimento e desenvolvimento de raiz comparativamente aos Latossolos de textura arenosa e argilosa. Pacheco e Cantalice (2011), ao realizarem estudo em Alagoas, afirmam que a mecanização da cana-de-açúcar aumenta a densidade do solo, a resistência à penetração e, em consequência, reduz o intervalo hídrico ótimo dos horizontes AB e Bt de um Argissolo Amarelo.

Outra análise a ser aplicada no estudo da qualidade física do solo é a avaliação de imagens micropedológicas, uma vez que permitem observar mudanças ocorridas no formato dos poros em função da pressão exercida pelo maquinário, complementando informações de outros indicadores de compactação, tais como; densidade, porosidade e resistência do solo à penetração (SOUZA et al., 2006, GENARO et al. 2015).

De acordo com Souza (2012), os formatos dos poros estão associados ao tipo de estrutura e sofrem modificações de acordo com a pressão exercida sobre o solo, especialmente nos pontos situados nas linhas de tráfegos. Silva (2011), observou que solos mecanizados sofrem mudanças microscópicas, o que indica estresse físico, ao ser comparado com solos de

áreas sob vegetação espontânea de igual natureza. Souza et al. (2006), verificaram a ocorrência de compactação por meio dos estudos de imagens micromorfológicas, associando esses resultados às análises convencionais de física do solo.

Além desses, a resistência tênsil do agregado pode ser utilizada como um atributo físico aplicável ao estudo das mudanças causadas pelo impacto do tráfego, uma vez que o comportamento do solo, em macroescala, varia em função das propriedades mecânicas dos agregados (FERREIRA et al., 2011). A resistência tênsil do agregado pode ser definida como sendo o estresse ou força por unidade de área necessária para quebrar os agregados do solo, quando submetido a uma determinada pressão, podendo variar em função do conteúdo de argila, teor de água e de matéria orgânica (DEXTER; WATTS, 2000).

No estudo de Ferreira et al. (2011), realizada no Paraná, foi verificada a redução da resistência tênsil do agregado de dois Latossolos com diferentes classes texturais. Nesse trabalho, os autores observaram, especialmente no solo mais argiloso, que há uma relação inversa entre o teor de carbono e a resistência tênsil do agregado. Reis et al. (2011), também encontraram o mesmo resultado entre o teor de carbono e a resistência tênsil do agregado de um Argissolo vermelho no Rio Grande do Sul.

O monitoramento dos atributos físicos é de grande importância para a elaboração de estratégias que visam reduzir os impactos causados pelo tráfego de máquinas sobre a qualidade física do solo. Portanto, sua aplicação nessa pesquisa, permitirá a elaboração de informações que indicarão, ou não, o controle de tráfego de máquinas por piloto automático como tecnologia mitigadora dos problemas relacionados à compactação em áreas de cana-de-açúcar.

1.5 Espaçamento de linhas de plantio de cana-de-açúcar

O potencial produtivo da cultura da cana-de-açúcar é resultante da interação de diversos fatores, dentre eles, a variedade cultivada, a adubação, a época de implantação do canavial e o espaçamento adotado entre as linhas de plantio.

A determinação do espaçamento de plantio adequado é de grande importância no processo de planejamento, pois favorece a potencialização de atividades realizadas durante o processo de produção, a exemplo, o uso intensivo de máquinas. Além disso, contribui para o favorecimento da captação de alguns recursos necessários à produção como; luminosidade, disponibilidade hídrica e temperatura (EMBRAPA, 2013).

Na escolha do espaçamento para cultivos mecanizados é mais interessante optar por aqueles que proporcionarão um menor perfilhamento e, ao mesmo tempo, a produção de

colmos mais pesados, pois quanto menor o número de perfilhos menor o número de colmos a serem cortados e, em consequência disso, maior eficiência por tempo de serviço. No entanto, é importante esclarecer, que a redução do número de perfilhos promove a produção de colmos mais grossos, o que pode diminuir a eficiência da colhedora, necessitando, portanto, que seja levado em consideração a relação existente entre o número de perfilhos e o diâmetro do colmo a ser cortado (MILKPONIT, 2001).

De acordo com MAPA (2000), o estreitamento do espaço existente entre as linhas de plantio pode resultar na redução do diâmetro dos colmos e, conseqüentemente, da produtividade. Embora existam cultivos em áreas mecanizadas com espaçamentos variando entre 1,00 m e 1,60 m, recomenda-se que seja utilizado um espaçamento mínimo de 1,50 m entre as linhas de plantio, visto que, abaixo disso, os rodados das máquinas promovem injúrias às plantas, fazendo com que a colhedora e o transbordo "pisem" sobre as soqueiras próximas às linhas que estão sendo colhidas (BENEDINE; CONDE, 2008; NOVA AMÉRICA, 2012; VIANA et al., 2013).

De acordo com Anibal et al. (2013), a redução do espaçamento contribui para o aumento da absorção da radiação solar, o que proporciona um acréscimo na taxa líquida de fotossintetizados e um aumento de até 9% na produtividade. Este autor ainda afirma que é necessário levar em consideração se há disponibilidade, no parque de máquinas, de maquinário adequado para espaçamentos menores, uma vez que a renovação deste não é simples e exige um alto investimento financeiro.

Diante disso, o espaçamento duplo alternado, que consiste na variação da distância combinada entre as linhas de plantio, com um espaçamento médio de 0,90 m entre os sulcos e 1,50 m entre as fileiras duplas, apresenta-se como alternativa mitigadora desse problema por dois motivos: o primeiro devido ao aumento da eficiência operacional da colhedora, pois duas linhas são colhidas simultaneamente, e o segundo por funcionar como controle de tráfego de máquinas, por conta do menor número de ruas trafegadas e pelo maior número de metros lineares de linhas colhidas por unidade de tempo (FURLANI NETO, 2009; ROSA, 2013).

Na pesquisa realizada por Monaco Junior (2011), avaliou-se a eficiência do desempenho de duas colhedoras, no qual foi observado, para uma mesma produtividade, um rendimento de 50% da colhedora para espaçamento duplo, comparativamente a colhedora para espaçamento simples e, uma economia de até 45% de óleo diesel por tonelada colhida.

Diante disso, o espaçamento duplo combinado associado ao piloto automático será apresentado nessa pesquisa como alternativa capaz de controlar o tráfego de máquinas e

mitigar os problemas relacionados à compactação do solo, de tal forma que sua adoção possa garantir uma produtividade que seja capaz de cobrir os custos de implantação.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA- **Associação nacional dos fabricantes de veículos automotores**. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/cartas/Carta324.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2013.

ANFAVEA- **Associação nacional dos fabricantes de veículos automotores**. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/cartas/Carta324.pdf>. Acesso em: 29 de julho 2014.

ANIBAL, E. R.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; BRANCALIÃO, S. R. Perdas visíveis na colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua cultivada em espaçamento uniforme e combinado. In: VII Workshp de Agroenergia; 2013, Ribeirão Preto, **Anais...** Ribeirão Preto, p. 1-5, 2013.

ANSELMÍ, A. A. **Adoção da agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

BAIO, F. H. R.; MORATELLI, R. F. Avaliação da acurácia no direcionamento com piloto automático e contraste de capacidade de campo operacional no plantio mecanizado da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.2, p.367-375, 2011.

BECERRA, A. T.; BRAVO, X. B. L.; BOTTA, G. F.; TOURN, M.; LINARES, P.; RESSIA, M.; BALBUENA, R. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v.9, n.2, p. 395-403, 2011.

BENEDINE, M. S.; CONDE, A. J. Sistematização de área para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Coplana**, Guariba, v.1, n.1, p. 23-24, 2008.

BERGTOLD, J. S.; RASPER, R. L.; SCHWAB, E. B. The economic benefit of improving the proximity of tillage and planting operations in cotton production with automatic steering. **Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.25, n.2, p. 133-143, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p. 79-87, 2012.

CARVALHO, L. A.; SILVA JUNIOR, C. A.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; SOUZA JÚNIOR, S. S. Produtividade e variabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no centro-oeste do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.34, n.1, p. 199-211, 2011.

CASTILHO, S. C. P.; COOPER, M.; SILVA, L. F. S.; Micromorfometric analysis porosity changes in the surface crusts of three soils in the Piracicaba region, São Paulo State, Brazil, **Acta Scientiarum Agronomy**, v.37, n.3, Maringá, 385-395, 2015.

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.

CAVICHIOLO, F. A.; FURLANI, C. E. A.; TOLEDO, A.; SILVA, R. P.; RIBEIRO, C. A. Resistência mecânica do solo à penetração na fileira e entre fileira de cana-de-açúcar em função da mecanização. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.20, n.1, p. 46-51, 2012.

CIRANI, C. B. S.; MORAES, M. A. F. D.; PESSOA, L. C.; SILVA, D. Uma análise de inovação a partir do estudo da adoção e uso de tecnologias de agricultura de precisão na indústria sucroalcooleira paulista. **Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v.7, n.4, p. 186-205, 2010.

CONAB - Companhia nacional de abastecimento: **Acompanhamento da safra brasileira Cana-de-açúcar: 2012/2013, Segundo levantamento**. Brasília: CONAB, 2012a, 18 p.

CONAB - Companhia nacional de abastecimento: **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil: Edição para a Safra de 2009-2010**. Brasília: CONAB, 2012b, 62 p.

CONAB - **Companhia nacional de abastecimento**: Acompanhamento da safra brasileira Cana-de-açúcar: 2012/2013, Segundo levantamento. Brasília: CONAB, 2013, 19 p.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 132 p. Tese (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. **Tensile strength and friability**. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (eds.). *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2000. p. 405-433.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: **Cana-de-açúcar**. 2013. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html> Acesso em 14 de março de 2013.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p. 437-445, 2011.

FURLANI NETO, V. L. Proposta de espaçamentos para mecanização de solos de baixa fertilidade - Ambientes C, D e E. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 11. 2009, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2009.

GENARO, L. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. F.; COOPER, M. CAMPOS, M. C. C. Estrutura do solo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, n. 2. P. 608-614, 2015.

GOMES, A. C. A; MEURER, A. P. S.; SOUZA, E. L. C.; BIANCO, T. S.; SHIKIDA, P. F. A. Agroindústria canavieira, base econômica e desenvolvimento local: Estudo de casos e

Naviraí (MS) e Umuarama (PR). **Revista Ciências Sociais em Perspectivas**, Araraquara. v.11, n.1, P.1-25, 2012.

GUIMARÃES JÚNYOR.; SILVA. W.; SEVERIANO, E. C.; GONÇALVES, W. G.; MELO, G. B.; SILVA, J. F. G.; INQUE, M. C. COMPACTAÇÃO DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR. In: I Congresso de Pesquisa e Pós-graduação do Campus Rio Verde do IFGoiano; 2012, Rio Verde, **Anais...** Rio Verde, p. 1-3, 2012.

KAMIMURA, K. M.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. DEBIASE, H.; CONTE, O. Parâmetros solo-máquina em função de doses de resíduos vegetais e profundidades de deposição de adubo em semeadura direta. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, p. 431-439, 2009.

LECLER, N. L.; TWEDDLE, P. B. Double profits with a controlled traffic zero-till irrigation farming system? **South African Sugar Technologists' Association**, Durban, v.83, n.1, p. 46-62, 2010.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p. 217-223, 2006.

LIMA, R. P.; DE LEÓN, M, J.; SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v.60, n.1, p. 16-20, 2013.

LIONÇO, E.; BRESSAN, J.; SILVA, C. M. Sistematização da área para implantação da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Campo Digital**, Campo Mourão, v.5, n.1, p. 20-25, 2010.

MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. ed.3, Brasília, 2000, 40 p. (Boletim Técnico).

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento). **Cana-de-açúcar**. 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-açúcar>>. Acesso em: 21 de junho de 2013.

MILKPONIT- O ponto de encontro da cadeia produtiva do leite: **Características da cultura da cana-de-açúcar para o corte mecanizado**. 2001. Disponível em: <<http://m.milkpoint.com.br/radar-tecnico/pastagens/caracteristicas-da-cultura-da-canadeacucarpara-o-corte-mecanizado-16092n.aspx>> . Acesso em 15 de março de 2013.

MOLIN, J. P.; OLIVEIRA, T. C. A.; POVH, F. P.; SALVI, J. V. No piloto automático. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.8, n.8, p. 6-9, 2008.

MONACO JUNIOR, L. C. Plantio espaçamento alternado. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 13, 2001 Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2011.

MONTAGNHAM, B. A.; SHIKIDA, P. F. A. Base econômica e desenvolvimento local: Estudo de caso múltiplo em município canavieiro. **Revista Economia e Desenvolvimento**, Goiânia, v.2, n.24, p. 107-125, 2012.

MONTANHA, G. K.; GUERRA, S. P. S.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; CAMPOS, F. H.; LANÇAS, K. P. Consumo de combustível de um trator agrícola no preparo do solo para a cultura do algodão irrigado em função da pressão de inflação dos pneus. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.26, n.1, p. 39-51, 2011.

NICOLOSI, P.; CARDOZO, A. C.; MARTANI, W. R.; MONACO, E. T. Risco biológico na indústria canavieira. **Revista Complexus**, São Paulo, v.3, n.5, p. 106-138, 2012.

NOVA AMÉRICA - **Estudo de espaçamento de cana para garantir maior produtividade. 2012.** Disponível em: http://www.novamerica.com.br/noticia/102/grupo_faz_estudo_de_espaçamento_de_cana_para_garantir_maior_produtividade> Acesso em 15 de março de 2013.

NOVACANA – **Setor de cana começa a sair da crise com retomada de preços de etanol e açúcar.** Disponível em: <http://www.novacana.com/n/cana/mercado/setor-cana-sair-crise-2015-retomada-precos-etanol-acucar-060116>. Acesso em 14 de janeiro de 2016.

OLIVEIRA, T. C. A.; MOLIN, J. P. Uso de piloto automático na implantação de pomares de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.2, p. 334-342, 2011.

OTOBONI, C. E. M.; GARCIA, L. H. T.; ORVATE, C. A.; SILVA, C. A. C. Elaboração de ferramenta para tomada de decisão em agricultura de precisão. Encontro de mecanização em agricultura de precisão. In: ENCONTRO DE MECANIZAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO. Pompéia. **Anais...** Pompéia: 3 EncMAP, 2011. p. 10-29.

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.

PACHECO, E. P.; COSTA, J. V. T.; CANTALICE, J. R. B. **Uso da capacidade de suporte de carga como prevenção da compactação subsuperficial de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar.** ed 1. Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2010. 18 p. (Boletim Técnico)

PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F. S.; OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; FALQUETO, R. J.; MARTINS, A. L. S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p. 87-95, 2011.

REIS, D. A.; LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; GARCIA, G. F. Resistência tênsil de agregados e friabilidade de um solo construído em área de mineração de carvão em candiota, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO; 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, p. 1-5, 2011.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p. 1536-1542, 2011.

RONQUIM, C. C. **Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. ed. 1, Campinas: EMBRAPA Monitoramento por satélites, 2010. 45 p. (Boletim técnico).

ROSA, J. H. M. **Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (Saccharum spp) em espaçamento duplo alternado**. 2013. 154 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo - ESALQ, Piracicaba.

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, R. B.; IORI, P.; LANÇAS, K. P.; DIAS JUNIOR, 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. 376-3789, 2010.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, New York, v.12, n.1, p. 67-81, 2011.

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

SOUSA, G. S. **Controle de tráfego Agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar**. 2012. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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

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**, Viçosa, v.47, n.4, p. 603-612, 2012.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; BARBOSA, R.S.; ARAÚJO, F.S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p. 135-146, 2014.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, New York, v.12, n.1, p. 67-81, 2011.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. especial, p. 2603-2612, 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p. 573-581, 1998.

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

VIANA, A. R.; FERREIRA, J. M.; RIBAS FILHO, S. B.; RIBEIRO FILHO, J. **Cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: PESAGRO, 2013.1 p. (Recomendações Técnicas).

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T.; Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2015-2011.

VISCHI-FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; SILVA, R. B. ET AL. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.4, p. 322-332, abr. 2015.

CAPITULO II

QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR MANEJADA COM CONTROLE DE TRÁFEGO

RESUMO – A colheita mecanizada da cana-de-açúcar é uma das principais responsáveis pelo aumento da compactação nos canaviais. Dessa forma, o emprego de tecnologias como, por exemplo, a adoção de piloto automático e o uso de espaçamentos combinados, podem contribuir para a mitigação dessa problemática. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência do uso de piloto automático e de diferentes espaçamentos de plantio, sobre os atributos físicos de dois solos cultivados com cana-de-açúcar, no período correspondente a cana planta e a primeira soca. O experimento foi realizado no município de Nova Europa – SP, Brasil, nas dependências da usina Santa Fé, em duas áreas com classes de solo distintas, sendo um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, e o outro um Latossolo Vermelho distrófico de textura média. Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições e com três tratamentos: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejada com piloto automático. As coletas foram realizadas nos pontos correspondentes a linha do rodado, linha de plantio e ao ponto médio entre esses dois, chamado de canteiro. Foram avaliadas as camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Entre os tratamentos não houve diferença entre a macroporosidade, a microporosidade e a porosidade total do Neossolo Quartzarênico. Já nos pontos de coleta, em todos os tratamentos, a macroporosidade e a porosidade total do solo, quando apresentaram diferença, obtiveram maiores médias na linha de plantio. No Latossolo Vermelho distrófico o T3 apresentou maior macroporosidade e porosidade total (PT). Houve contraste significativo na combinação T3 x demais, para a variável PT nos dois solos estudados, no ciclo da cana soca, conferindo maiores médias ao T3. A densidade do solo evoluiu de forma crescente nos dois ciclos estudados, tendo como comparativo as médias de caracterização da área remanescente de mata. Nos dois solos a densidade apresentou diferença entre os pontos de coleta apenas no ciclo da cana soca, em que a linha de plantio apresentou maior média. Não houve diferença entre os tratamentos para carbono, umidade do solo, teor de argila, IEA, DMP e RTA. Os tratamentos T2 e T3 apresentaram menor RSP.

Palavras-chave: Tráfego controlado, compactação do solo, física do solo.

CHAPTER II

SOIL PHYSICAL QUALITY CULTIVATED WITH SUGARCANE MANAGED WITH TRAFFIC CONTROL

ABSTRACT – Mechanized harvesting is one of the main factors leading to the increase of compaction in sugarcane fields. The employment of technologies such as the adoption of autopilot and the use of combined spacing can contribute to the mitigation of this problem. The objective of this study was to evaluate the influence that the use of autopilot and different spacing may have on the physical attributes of two soils cultivated with sugarcane. The experiment was conducted in the city of Nova Europa – SP, Brazil, in the Santa Fé mill, in two areas with distinct soil classes, one of which was Quartzipsamment with a sandy texture and the other was dystrophic Red Latosol with an average texture. The experiment adopted the randomized block design (RBD), with four replicate and three treatments: T1 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed without autopilot; T2 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed with autopilot; T3 = sugarcane planted with combined double row spacing (1.5 x 0.90 m), and managed with autopilot. The attributes evaluated included soil density and porosity, aggregate stability index (ASI), mean weight diameter (MWD), aggregate tensile strength (ATS), total organic carbon, clay content, humidity and soil resistance to penetration (SRP). The treatments presented no difference between the macroporosity, the microporosity and the total porosity of the Quartzipsamment. However, the macroporosity and the total porosity, when differences were observed, obtained higher averages in the crop row of the collection sites for all treatments. In the dystrophic Red Latosol, T3 presented higher macroporosity and total porosity (PT). There was a significant contrast in combination T3 x too, for the variable PT in both soils, the cycle of ratoon cane, giving higher averages to T3. The density of the soil evolved incrementally in the two study cycles, with the comparative average characterization of the remaining area of forest. The density in both soils presented a difference between the collection sites only in the ratoon cycle, in which the crop row presented a higher average. There was no difference among the treatments in respect to carbon, humidity, clay content, ASI, MWD and ATS. Treatments T2 and T3 presented a lower SRP.

Keywords: Controlled traffic, soil compaction, soil physics.

1. INTRODUÇÃO

A mecanização da colheita da cana-de-açúcar torna-se necessária para agilizar o fornecimento do produto às usinas, e para contribuir com a melhoria da qualidade do ambiente, uma vez que dispensa o uso da queima como etapa antecessora ao corte. Porém, essa modernização trouxe outra preocupação ao setor, também de caráter ambiental, relacionada, desta vez, aos efeitos negativos que o aumento do tráfego de máquinas pode proporcionar ao solo (SEVERIANO et al., 2010a).

A compactação é um dos principais responsáveis pelos baixos rendimentos das culturas, pois o aumento da resistência do solo proporciona uma redução do crescimento radicular, e por consequência, menor absorção de água e nutrientes pelas plantas (SOUZA et al., 2012; SOUSA et al., 2013).

A qualidade física do solo exerce importante função nos estudos de indicadores de sustentabilidade, pois apresenta intima relação com as reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta (STRECK et al., 2008). Diante disso, o diagnóstico dos impactos da mecanização da colheita da cultura da cana-de-açúcar sobre as propriedades e características do solo é uma importante ferramenta para a tomada de decisão com relação ao manejo adotado.

Dessa forma, surge o interesse por tecnologias que visam a redução da compactação do solo, a exemplo disso, o controle do tráfego de máquinas, que tem por princípio concentrar o tráfego do maquinário em locais determinados, onde há pouco, ou nenhum crescimento de plantas (ROQUE et al., 2010).

O uso dessa técnica como método de controle de tráfego, apresenta-se como excelente alternativa para preservar a estrutura do solo nos locais desejáveis, no caso da cana-de-açúcar, situados na região próxima à linha de plantio. Essa técnica baseia-se na determinação de linhas de tráfego imaginárias, as quais serão trafegadas pela máquina e apresentadas ao tratorista por meio de um display localizado dentro da cabine (MONTANHA et al., 2011; OLIVEIRA; MOLIN, 2011).

Outra tecnologia que apresenta-se bastante promissora para a redução da compactação do solo é a adoção do espaçamento duplo combinado, que consiste em alternar ruas de tráfego com ruas não trafegadas, porém, estas, com espaçamentos menores entre si. Esse manejo da cultura reduz o número de ruas transitadas, aumenta a densidade de plantas, e, por consequência, diminui os riscos de compactação. Além disso, seus benefícios envolvem a redução do número de horas trabalhadas por área e economia com os custos (ROSA, 2010).

Essa investigação teve por objetivo avaliar a influência do uso de piloto automático e da adoção de diferentes espaçamentos de plantio, sobre os atributos físicos de duas classes de solo, de diferentes texturas, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do experimento

O estudo foi instalado nas dependências da Usina Santa Fé, situada no município de Nova Europa-SP, com coordenadas $21^{\circ} 46' 42''$ de latitude sul e $48^{\circ} 33' 33''$ de longitude oeste. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é o tropical com estação seca (Aw), com temperatura média variando entre 16 e 29° C, e índice pluviométrico anual em torno de 1.340 mm (Figura 11). A pesquisa foi desenvolvida em duas áreas com distintas classes de solos, sendo um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, situado na localidade Rancho Azul, localizado a $48^{\circ} 34' 41,76''$ de longitude oeste e $21^{\circ} 53' 44,89''$ de latitude sul, e um Latossolo Vermelho distrófico de textura média, situado na localidade Mirante com coordenadas $48^{\circ} 37' 0,54''$ longitude oeste $21^{\circ} 48' 29,18''$ de latitude sul (Figura 11).

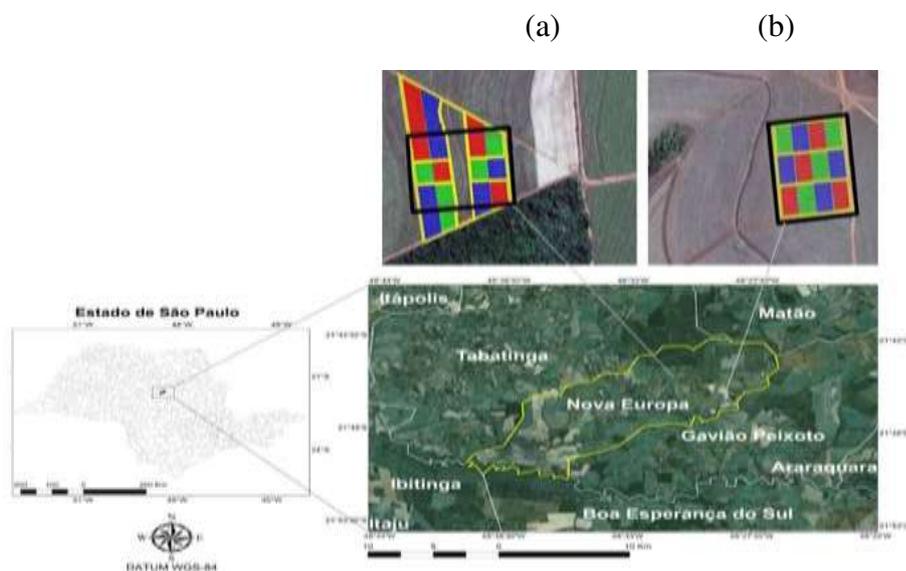


Figura 11. Mapa de localização da cidade de Nova Europa – SP e das áreas experimentais situadas na localidade Rancho Azul (a) e Mirante (b).

2.2 Caracterização das áreas experimentais

Cada área experimental foi caracterizada por meio de análises físicas do solo realizadas em uma área remanescente de mata nativa, adjacente à área do estudo. Os solos das áreas de mata apresentam classificação idêntica ao solo do experimento (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização granulométrica do Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.

Camadas (m)	AG	AF	AT	Silte	Argila	Textura
	g kg ⁻¹					
Área do experimento (Neossolo Quartzarênico)						
0,00-0,10	400,50	440,15	840,65	79,00	80,35	Arenosa
0,10-0,20	429,00	390,84	811,74	107,36	80,90	Arenosa
0,20-0,30	480,00	380,02	860,32	89,50	50,18	Arenosa
Mata remanescente (Neossolo Quartzarênico)						
0,00-0,10	482,00	375,00	857,00	24,00	119,00	Arenosa
0,10-0,20	455,00	414,00	869,00	34,00	97,00	Arenosa
0,20-0,30	468,00	406,00	874,00	25,00	101,00	Arenosa
Área do experimento (Latossolo vermelho distrófico)						
0,00-0,10	150,80	430,00	580,80	160,00	259,20	Média
0,10-0,20	150,90	440,70	591,60	230,30	248,30	Média
0,20-0,30	160,40	490,40	650,80	188,50	160,70	Média
Mata remanescente (Latossolo vermelho distrófico)						
0,00-0,10	194,00	461,00	655,00	159,00	186,00	Média
0,10-0,20	144,00	528,00	672,00	163,00	165,00	Média
0,20-0,30	155,00	457,00	612,00	210,00	178,00	Média

AG =areia grossa; AF =areia fina; AT =areia total.

Na Tabela 4 são apresentados os atributos físicos do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho Distrófico cultivados com cana-de-açúcar, anterior a instalação do experimento, e sob mata nativa remanescente localizada próximo ao local do experimento.

Tabela 4. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.

Camadas (m)	Macro		Micro		PT		Densidade	
	(m ³ m ⁻³)						kg dm ⁻³	
	Mata	Cana	Mata	Cana	Mata	Cana	Mata	Cana
Neossolo Quartzarênico								
0,00-0,10	0,12	0,05	0,36	0,32	0,48	0,38	1,29	1,60
0,10-0,20	0,10	0,04	0,32	0,31	0,42	0,35	1,35	1,66
0,20-0,30	0,10	0,04	0,34	0,31	0,44	0,35	1,36	1,69
Latossolo Vermelho distrófico								
0,00-0,10	0,09	0,09	0,40	0,33	0,49	0,42	1,26	1,32
0,10-0,20	0,10	0,08	0,32	0,34	0,42	0,42	1,23	1,34
0,20-0,30	0,13	0,08	0,35	0,36	0,48	0,44	1,24	1,36

Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade, PT = porosidade total.

Nas duas áreas experimentais cultivadas com cana-de-açúcar, observou-se uma menor macroporosidade e maiores médias de densidade do solo comparativamente a área de mata nativa. Esses resultados confirmam uma compactação nas áreas cultivadas independente da classe textural do solo. Em geral, a área arenosa apresentou menor resistência em comparação ao solo de textura argilosa, que por sua vez, apresentou maiores valores de resistência na profundidade de 0,30 m, possivelmente ocasionados pelo pé de grade e/ou pé de arado (Tabela 5).

Tabela 5. Resistência do solo à penetração de um Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar e sob mata nativa adjacente a área experimental.

Camadas (m)	Neossolo Quartzarênico				Latosolo Vermelho distrófico			
	AMN		AC		AMN		AC	
	RSP (MPa)	U (m ³ m ⁻³)	RSP (MPa)	U (m ³ m ⁻³)	RSP (MPa)	U (m ³ m ⁻³)	RSP (MPa)	U (m ³ m ⁻³)
0,00-0,10	1,70	10,52	2,33	9,52	6,00	8,25	12,70	9,27
0,10-0,20	2,00	10,25	2,30	10,25	7,90	7,25	12,20	8,21
0,20-0,30	2,30	11,47	3,80	8,25	8,50	9,25	9,26	7,24
0,30-0,40	2,53	8,25	4,40	9,28	5,30	10,15	7,00	8,16
0,40-0,50	3,20	8,45	3,73	7,63	3,40	9,27	5,56	8,21
0,50-0,60	2,73	9,42	2,40	8,47	2,16	8,14	2,20	7,14

AMN = Área remanescente de mata nativa; AC = Área cultivada com cana-de-açúcar; RSP = Resistência do solo à penetração; U = umidade do solo.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O projeto foi conduzido em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), num experimento com os tratamentos distribuídos em blocos ao acaso no esquema de sub-sub parcelas (parcela = tratamento; sub = ponto de coleta; sub-sub = camada) com quatro repetições. Foram avaliados os seguintes tratamentos: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejada com piloto automático. Cada unidade experimental possuía dimensões de 50 x 30 m e, área de 1.500 m².

Em cada parcela foram abertas três trincheiras para a avaliação das camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, sendo que, em cada cruzamento de “tratamento x ponto de coleta x camada”, coletaram-se amostras deformadas e indeformadas, totalizando 540 pontos de observação.

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo as medias comparadas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) utilizando o sistema computacional Sisvar, versão 5.1 Build 72 (FERREIRA, 2011). Além disso, realizou-se uma análise de contraste entre os tratamentos estudados ($p < 0,05$).

2.4. Amostragem de solo

Além da busca do efeito da compactação em camadas, as amostras foram coletadas em três diferentes pontos, sendo uma no ponto central, entre as duas linhas de plantio, chamado de linha do rodado (LR), uma na linha de plantio (LP) e, outra na metade da distância dos dois pontos anteriores, chamado de canteiro (CT). As coletas foram procedidas após a realização da colheita e, corresponderam aos ciclos da cana-planta e da primeira soca.

2.4.1 Coleta de solo para os tratamentos com espaçamento de 1,50 m entrelinhas

As coletas foram realizadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, nos pontos situados a 0,00, 0,375 e 0,750 m de distância da linha de plantio (Figura 12).

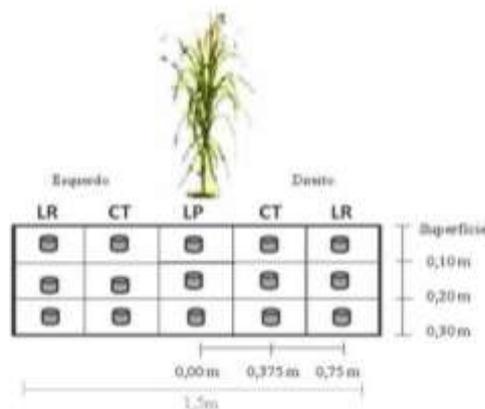


Figura 12. Pontos de coleta das amostras de solo. LR = linha do rodado, CT = canteiro e LP = linha de plantio.

2.4.2 Coleta de solo no tratamento com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m

Para o lado de maior espaçamento (0,75 m), as coletas foram realizadas semelhantes ao procedimento adotado nas parcelas plantadas com espaçamento simples. Com relação ao menor espaçamento (0,45 m), os pontos de coleta situaram-se à 0,225 m e 0,450 m de distância da linha de plantio, nas mesmas camadas descritas anteriormente (Figura 13).

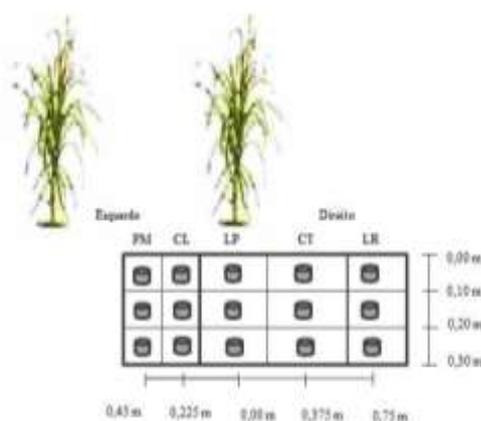


Figura 13. Pontos de coleta das amostras de solo nas parcelas com espaçamento duplo combinado. LR = linha do rodado; CT = canteiro; LP = linha de plantio; PM = ponto médio da linha dupla e CL = canteiro da linha dupla.

2.5. Análises

2.5.1 Análise granulométrica e Carbono orgânico total

Foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar, pelo método da pipeta, empregando Hidróxido de Sódio 0,1 N (NaOH), como agente dispersante (CAMARGO et al., 1986). O carbono orgânico total foi determinado por oxidação do carbono orgânico à CO_2 por íons de dicromato, empregando, para isso, solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ em meio fortemente ácido e com fonte externa de calor (YEOMANS e BREMNER, 1988).

2.5.2 Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo foi calculada pela relação existente entre a massa do solo seco em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, e o volume da amostra. Determinou-se a porosidade pelo método da mesa de tensão, aplicando-se uma coluna de água com altura de 0,60 m nas amostras saturadas para a determinação da microporosidade. Após isso, as amostras foram levadas à estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$), e em seguida pesadas para a determinação da porosidade total. A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 2011).

2.5.3 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi obtida por meio de um medidor automatizado de compactação do solo, o Falker Soil Track, modelo PLG5200, provido de display digital com menu de configuração. As leituras foram realizadas no mesmo dia para

todos os tratamentos de uma mesma repetição, buscando-se, dessa forma, eliminar o efeito da variação da umidade do solo, que foi determinado pelo método volumétrico, utilizando sondas de TDR.

2.5.4 Estabilidade de agregados

O índice de estabilidade de agregados foi determinado de acordo com o método estabelecido por Kemper e Chepil (1965), obtendo os agregados por meio do peneiramento das amostras em vibrador Prooutest, utilizando os agregados que passaram pela peneira de 9,52 mm e que ficaram retidos na peneira de 4,76 mm.

Após serem secos ao ar, os agregados foram trabalhados no procedimento padrão adotado pelo laboratório de solo da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, sendo saturados por dez minutos e posteriormente levados ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água com duração de 30 minutos. Utilizou-se 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).

O índice de estabilidade de agregados foi determinado pela relação existente entre a massa de solo retida na primeira peneira e, a massa de solo total da amostra. Os resultados foram expressos em porcentagem.

2.5.5 Cálculo da resistência tênsil do agregado (RTA)

A RTA foi calculada conforme a Equação 1, descrita por Dexter e Kroesbergen (1985).

$$RT = 0,576 * \left(\frac{P}{D^2} \right)$$

(1)

em que: RT é a resistência tênsil; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade resultante da relação entre a carga compressiva aplicada e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (m). O diâmetro efetivo (D) foi calculado conforme Watts e Dexter (1998), (Equação 2).

$$D = Dm \left(\frac{M}{M_0} \right)^{1/3} \quad (2)$$

em que: M é a massa do agregado individual (g); M_0 , a massa média dos agregados na população (g); e D_m , o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média dos tamanhos das peneiras $[(12,5 + 19,0)/2 = 15,75 \text{ mm}]$.

A força (P) necessária para a quebra tênsil do agregado foi determinada por meio de um dinamômetro-IMPAC, marca Lutron, modelo FG-20 kg.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo

No Neossolo Quartzarênico, no período correspondente a cana planta, o ponto de coleta LP, em todos os tratamentos, apresentou as maiores médias de macroporosidade e não houve diferença entre os pontos LR e CT (Tabela 6). O tratamento T2 apresentou maior e menor média nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m, respectivamente, que por sua vez apresentaram-se iguais à camada de 0,10-0,20 m.

Para a microporosidade, não verificou-se diferença entre os distintos pontos de coleta e camadas estudadas (Tabela 6). As médias gerais dos tratamentos também foram estatisticamente iguais. A porosidade total foi diferente entre os tratamentos no ponto de coleta LP, em que o T2 e T3 apresentaram a maior e menor média, respectivamente. Ainda para o ponto de coleta LP, o tratamento T1 apresentou média intermediária e igual ao T2 e T3. Apenas o tratamento T2 apresentou diferença entre os pontos de coleta, no qual observou-se menor média no ponto LR e maiores nos pontos CT e LP, que por sua vez apresentaram-se iguais.

Tabela 6. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-planta sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,11 Ab	0,14 Ab	0,18 Aa	0,14 Aa	0,15 Aa	0,13 Aa	0,14 A
T2	0,11 Ab	0,13 Ab	0,18 Aa	0,15 Aa	0,13 Aa	0,12 Aa	0,13 A
T3	0,11 Ab	0,12 Ab	0,12 Aa	0,12 Aa	0,11 Aa	0,10 Aa	0,11 A
Média	0,11 b	0,13 b	0,16 a	0,14 a	0,13 a	0,11 ab	
CV (%)	14,20						
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,24 Aa	0,23 Aa	0,21 Aa	0,22 Aa	0,23 Aa	0,23 Aa	0,23 A
T2	0,25 Aa	0,25 Aa	0,25 Aa	0,26 Aa	0,24 Aa	0,24 Aa	0,25 A
T3	0,24 Aa	0,24 Aa	0,22 Aa	0,24 Aa	0,23 Aa	0,23 Aa	0,23 A
Média	0,24 a	0,24 a	0,22 a	0,24 a	0,23 a	0,23 a	
CV (%)	9,01						
Porosidade total (m ³ m ⁻³)							
T1	0,35 Aa	0,37 Aa	0,39 ABa	0,37 Aa	0,38 Aa	0,36 Aa	0,37 A
T2	0,36 Ab	0,39 Aab	0,44 Aa	0,42 Aa	0,36 Ab	0,36b Ab	0,38 A
T3	0,35Aa	0,36 Aa	0,35 Ba	0,37 Aa	0,34 Aa	0,34 Aa	0,35 A
Média	0,35 a	0,37 a	0,39 a	0,38 a	0,36 a	0,35 a	
CV (%)	11,86						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Para a cana soca, o Neossolo Quartzarênico apresentou, em todos os tratamentos, maiores médias de macroporosidade no ponto de coleta LP (Tabela 7). Não houve diferença entre as médias das camadas.

A microporosidade apresentou-se igual entre todos os tratamentos, pontos de coleta e camadas estudadas (Tabela 7). Para a porosidade total, os tratamentos diferenciaram-se somente na LP, em que os tratamentos T3 e T1 apresentaram as menores médias. Apenas na camada de 0,20-0,30 m houve diferença entre os tratamentos, em que a T2 apresentou menor média que o T1 e o T3, que por sua vez foram estatisticamente iguais.

Tabela 7. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Neossolo Quartzarênico cultivado com cana soca sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,09 Ab	0,12 Ab	0,12 Aa	0,09 Aa	0,11 Aa	0,14 Aa	0,11 A
T2	0,10 Ab	0,11 Ab	0,16 Aa	0,12 Aa	0,10 Aab	0,15 Ab	0,12 A
T3	0,11 Ab	0,12 Ab	0,12 Aa	0,10 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,11 A
Média	0,10 a	0,11 a	0,13 a	0,11 a	0,10 a	0,13 a	
CV (%)	16,32						
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,22 Aa	0,22 Aa	0,20 Aa	0,21 Aa	0,23 Aa	0,20 Aa	0,21 A
T2	0,23 Aa	0,22 Aa	0,21 Aa	0,22 Aa	0,23 Aa	0,21 Aa	0,22 A
T3	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,20 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 A
Média	0,22 a	0,21 a	0,20 a	0,21 a	0,22 a	0,20 a	
CV (%)	18,27						
Porosidade total (m ³ m ⁻³)							
T1	0,31 Aa	0,34 Aa	0,32 Ba	0,30 Aa	0,34 Aa	0,34 Aa	0,32 A
T2	0,33 Aa	0,33 Aa	0,37Aa	0,34 Aa	0,36 Aa	0,36 Ab	0,35 A
T3	0,32 Aa	0,33 Aa	0,33 Ba	0,30 Aa	0,32 Aa	0,33 Aa	0,32 A
Média	0,32 a	0,33 a	0,34 a	0,31 a	0,33 a	0,34 a	
CV (%)	19,84						

(1)LR = linha do rodado; (2)CT = Canteiro; (3)LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Ao final do segundo ciclo as variáveis macroporosidade, microporosidade e porosidade total apresentaram evoluções negativas em todos os tratamentos, tendo como ponto de partida os valores obtidos na caracterização da área de mata remanescente (Tabela 4). O T3 promoveu menores alterações para as variáveis de macroporosidade. O T2 proporcionou menor redução na microporosidade. A porosidade total sofreu maior redução no tratamento que não utilizou piloto automático (Tabela 8).

Tabela 8. Teste de significância para as variáveis de macroporosidade, microporosidade e porosidade total de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1	T2	T3	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
		--- GP (%) ---							
Macro	Planta	+3	-2	-1	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	-3	-1	0	ns	ns	ns	ns	ns
Micro	Planta	-11	+2	-2	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	-2	-3	-2	ns	ns	ns	ns	ns
PT	Planta	-7	-1	-3	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	-5	-3	-3	*	*	*	ns	*

GP = Ganho de porosidade a partir da caracterização feita na área de mata remanescente antes da instalação do experimento. Macro = Macroporosidade do solo; Micro = Microporosidade do solo; PT = Porosidade de alteração; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

Houve significância nos contrastes apenas para a variável de porosidade total no segundo ciclo para as combinações T1 x demais, T3 x demais, T1 x T2 e T3 x T2, em que o T2 foi responsável pelas maiores médias. Embora o contraste T3 x T1 não tenha apresentado significância, é importante ressaltar que a área de canteiro proporcionada pelo espaçamento duplo é maior, podendo, portanto, diluir esses valores.

No Latossolo Vermelho distrófico, para o período de cana planta, a macroporosidade apresentou diferença entre os pontos de coleta e camadas estudadas (Tabela 9). Entre os tratamentos, houve diferença apenas para o ponto de coleta CT, em que o T3 apresentou maior média que o T1 e o T2. Entre os pontos de coleta, apenas o T2 não apresentou diferença entre as médias encontradas. O T1 e o T3 apresentaram maiores médias na LP e, não houve diferença entre as médias dos pontos CT e LR.

Ainda sobre a macroporosidade, para as diferentes camadas estudadas, o T1 e o T3 apresentaram maior média na camada de 0,00-0,10 m e não houve diferença entre as outras duas (Tabela 9). Para o tratamento T2, não observou-se diferença entre as médias estudadas, e entre os tratamentos, a camada de 0,00-0,10 apresentou maior média no T1. Não houve diferença entre as médias em 0,10-0,20 m e, na camada de 0,20-0,30 m, o T3 apresentou-se maior.

Tabela 9. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-planta sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,06 Ab	0,07 Bab	0,09 Aa	0,12 Aa	0,06 Ab	0,08 Bb	0,08 A
T2	0,05 Aa	0,08 Ba	0,07 Aa	0,08 Ba	0,06 Aa	0,05 Ba	0,06 A
T3	0,07 Ab	0,07 Ab	0,12 Aa	0,09 Ba	0,06 Ab	0,05 Ab	0,07 A
Média	0,06 b	0,07 a	0,09 a	0,09 a	0,06 a	0,06 a	
CV (%)	20,55						
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,29 Aa	0,28 Aa	0,32 Aa	0,33 Aa	0,30 Ab	0,26 Ab	0,30 A
T2	0,28 Aa	0,31 Aa	0,31 Aa	0,32 Aa	0,30 Aa	0,28 Aa	0,30 A
T3	0,36 Aa	0,34 Aa	0,34 Aa	0,34 Aa	0,35 Aa	0,35 Aa	0,34 A
Média	0,34 a	0,31 a	0,32 a	0,33 a	0,32 a	0,30 a	
CV (%)	35,49						
Porosidade total (m ³ m ⁻³)							
T1	0,35 Aa	0,35 Aa	0,41 Aa	0,45 Aa	0,36 Aa	0,34 Ba	0,38 A
T2	0,33 Aa	0,39 Aa	0,38 Aa	0,40 Aa	0,36 Aa	0,33 Ba	0,37 A
T3	0,43 Aa	0,41 Aa	0,46 Aa	0,43 Aa	0,41 Aa	0,40 Aa	0,42 A
Média	0,40 a	0,39 a	0,42 a	0,41 a	0,37 a	0,35 a	
CV (%)	29,46						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna, e letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Não houve diferença entre as médias de microporosidade para os diferentes pontos de coleta estudados (Tabela 9). No T1 a camada de 0,00-0,10 m apresentou a maior média e não houve diferença entre as camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30. Entre as médias de porosidade total, não houve diferença entre os pontos de coleta. Apenas na camada de 0,20-0,30 m, o tratamento T3 apresentou maior média que os demais, que por sua vez, foram estatisticamente iguais.

No segundo ano de pesquisa, no Latossolo, não houve diferença entre as médias de macroporos dos diferentes tratamentos (Tabela 10). Apenas no T2 observou-se diferença entre os pontos de coleta, em que o LP e o LR apresentaram a maior e menor média respectivamente e, o CT apresentou-se estatisticamente iguais aos dois pontos de coleta. Não houve diferença entre as médias de macroporos para as diferentes camadas estudadas.

Tabela 10. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana soca sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,10 Aa	0,09 Aa	0,12 Aa	0,09 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,10 A
T2	0,06 Ab	0,09 Aab	0,14 Aa	0,11 Aa	0,09 Aa	0,09 Aa	0,10 A
T3	0,09 Aa	0,09 Aa	0,13 Aa	0,09 Aa	0,10 Aa	0,10 Aa	0,10 A
Média	0,08 a	0,09 a	0,13 a	0,09 a	0,10 a	0,10 a	
CV (%)	22,49						
Microporosidade (m ³ m ⁻³)							
T1	0,22 Bc	0,32 Aa	0,27 ABb	0,29 Aa	0,28 ABa	0,24 Ba	0,27 AB
T2	0,22 Ba	0,26 Bab	0,24 Bb	0,28 Aa	0,24 Ba	0,22 Ba	0,24 B
T3	0,27 Ab	0,32 Aa	0,30 Aab	0,29 Aa	0,30 Aa	0,30 Aa	0,30 A
Média	0,23 b	0,30 a	0,27 b	0,28 a	0,27 a	0,25 a	
CV (%)	11,66						
Porosidade total (m ³ m ⁻³)							
T1	0,32 Ca	0,41 Aa	0,39 Aa	0,38 Aa	0,38 Aa	0,36 Ba	0,37 AB
T2	0,28 Ba	0,35 Ba	0,38 Aa	0,39 Aa	0,33 Ba	0,31 Ca	0,34 B
T3	0,36 Aa	0,41 Aa	0,40 Aa	0,38 Aa	0,40 Aa	0,40 Aa	0,40 A
Média	0,32 b	0,39 a	0,39 a	0,38 a	0,37 a	0,35 a	
CV (%)	8,75						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Para a microporosidade, no segundo ano, entre as médias gerais dos pontos de coleta, o CT apresentou a maior média e, não houve diferença entre a LR e a LP. Entre as médias gerais dos tratamentos, o T3 e o T2 apresentaram a maior e a menor média, respectivamente e, foram estatisticamente iguais ao T1. Para a porosidade total, o T3 apresentou maior média na LR. No CT, o T3 e o T1 apresentaram-se iguais e maiores que o T2. Não houve diferença entre as médias na LP.

Em todos os tratamentos a macroporosidade sofreu uma redução ao final do primeiro ciclo, seguido de uma ascensão após o ciclo da cana soca, tornando os valores iguais aos encontrados inicialmente na área remanescente de mata, que pode estar relacionado a presença de raízes, especialmente na linha de plantio. A microporosidade apresentou evolução negativa nos dois ciclos estudados. No entanto, os tratamentos que utilizaram espaçamento simples e, portanto, apresentaram maior intensidade de tráfego, tiveram maior redução que o T3 (Tabela 11).

Apenas no contraste T3 x demais, houve significância entre as médias de porosidade total, revelando maiores valores dessa variável para o tratamento com espaçamento duplo com piloto automático.

Tabela 11. Teste de significância para as variáveis de macroporosidade, microporosidade e porosidade total de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Var	Ciclos	T1	T2	T3	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
		--- GP (%) ---							
Macro	Planta	-2	-4	-3	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	+2	+4	+3	ns	ns	ns	ns	ns
Micro	Planta	-10	-10	-6	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	-3	-6	-4	ns	ns	ns	ns	ns
PT	Planta	-11	-12	-7	ns	*	ns	ns	ns
	Soca	-1	-3	-2	ns	*	ns	ns	ns

GP = Ganho de porosidade a partir da caracterização feita na área de mata remanescente antes da instalação do experimento. Macro = Macroporosidade do solo; Micro = Microporosidade do solo; PT = Porosidade de alteração; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

Nas duas áreas experimentais a macroporosidade do solo apresentou maior sensibilidade sob os tratamentos quando comparada com a microporosidade e com a porosidade total (Tabelas 6, 7, 9 e 10). Tanto no Neossolo Quartzarênico como no Latossolo Vermelho distrófico, observou-se redução na macroporosidade à medida que o ponto de coleta aproximou-se da linha do rodado, com exceção apenas dos tratamentos T1 e T3 no segundo ano de avaliação do Latossolo, em que todos os valores de macroporos foram iguais entre os pontos.

Os resultados obtidos nessa pesquisa corroboram com Souza et al. (2014), ao observarem que o uso de piloto automático associado ao aumento da bitola, reduz o espaço poroso da linha do rodado e, preserva a qualidade física do solo na linha de plantio. Esse trabalho também concorda com Vasconcelos et al. (2014), ao afirmarem que a compactação proporcionada pelo tráfego de máquinas diminui a porosidade do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Ainda de acordo com a presente pesquisa, Castro et al. (2013) verificaram redução da macroporosidade de um Latossolo vermelho eutroférico submetido ao cultivo da cana-de-açúcar, em comparação a uma área de mata nativa com solo de mesma classificação.

3.2 Densidade do solo

No período correspondente a cana planta, não verificou-se diferença entre as médias de densidade do solo para o Neossolo Quartzarênico nos diferentes pontos de coleta para todos os tratamentos estudados (Tabela 12). Somente na primeira camada houve diferença entre os tratamentos, em que o T2 e o T3 apresentaram-se iguais e maiores que o T1.

Tabela 12. Densidade do solo (kg dm^{-3}) em um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
(kg dm^{-3})							
Cana planta							
T1	1,52 Aa	1,53 Aa	1,46 Aa	1,44 Ba	1,61 Aa	1,47 Aa	1,50 A
T2	1,68 Aa	1,64 Aa	1,61 Aa	1,76 Aa	1,65 Aa	1,51 Ab	1,64 A
T3	1,65 Aa	1,60 Aa	1,59 Aa	1,61 Aa	1,66 Aa	1,40 Ab	1,61 A
Média	1,61 a	1,58 a	1,58 a	1,66 a	1,64 a	1,46 a	
CV (%)				21,91			
Cana soca							
T1	1,75 Aa	1,74 Aa	1,47 Ab	1,60 Aa	1,61 Aa	1,62 Aa	1,61 A
T2	1,70 Aa	1,63 Ba	1,48 Ab	1,59 Aa	1,61 Aa	1,56 Aa	1,59 A
T3	1,70 Aa	1,60 Bb	1,46 Ac	1,58 Aa	1,59 Aa	1,61 Aa	1,61 A
Média	1,72 a	1,61b	1,47c	1,59 a	1,60 a	1,59 a	
CV (%)				8,23			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Na cana soca, a densidade do solo mostrou-se diferente apenas entre os pontos de coleta, em que os tratamentos T1 e T2 apresentaram médias iguais entre a LR e o CT, e maiores que o LP (Tabela 12). O T3 apresentou médias distintas entre os três pontos coletados, mostrando-se crescente na sequência $LP < CT < LR$.

No ciclo da cana planta, não houve diferença entre as médias de densidade do Latassolo Vermelho distrófico nos diferentes pontos de coleta, em todos os tratamentos estudados (Tabela 13).

Tabela 13. Densidade do solo (kg dm^{-3}) em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
(kg dm^{-3})							
Cana planta							
T1	1,65 Aa	1,62 Aa	1,56 Aa	1,66 Aa	1,63 Aa	1,52 Aa	1,60 A
T2	1,61 Aa	1,56 Aa	1,52 Aa	1,60 Aa	1,59a Aa	1,53 Ab	1,57 A
T3	1,63 Aa	1,56 Aa	1,54 Aa	1,59 Aa	1,60a Aa	1,53 Ab	1,57 A
Média	1,63 a	1,58a	1,54a	1,61 a	1,60 a	1,52 a	
CV (%)	18,87						
Cana soca							
T1	1,74 Aa	1,66 Ab	1,63 Ab	1,67 Aab	1,66 Aab	1,64 Aa	1,65 A
T2	1,73 Aa	1,69 Ab	1,47 Bc	1,67 Aa	1,52 Ab	1,63 Aab	1,60 A
T3	1,77 Aa	1,68 Ab	1,59 ABc	1,69 Aa	1,64 Aab	1,64 Aa	1,65 A
Média	1,75 a	1,67 ab	1,56 b	1,67 a	1,60 a	1,63 a	
CV (%)	5,96						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

No Neossolo, as médias de densidade evoluíram de forma crescente no primeiro ano em todos os tratamentos, e no segundo ano, apenas o tratamento que não contou com a orientação do piloto automático continuou evoluindo de forma crescente (Tabela 14).

No Latossolo, os dois anos de pesquisa também foram caracterizados pela evolução dos valores das médias de densidade do solo, sendo os maiores valores verificados no T1. Semelhante ao comportamento verificado entre as médias gerais dos tratamentos na Tabela 13, os contrastes estudados também não apresentaram diferença significativas nos dois solos estudados (Tabela 14).

Tabela 14. Teste de significância para densidade do solo de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Ciclos	T1	T2	T3	T1 x	T3 x	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
	--- GD (kg dm ⁻³) ---			demais	demais			
Neossolo Quartzarênico								
Planta	+0,17	+0,21	+0,18	ns	ns	Ns	ns	ns
Soca	+0,11	-0,05	+0,00	ns	ns	Ns	ns	ns
Latossolo Vermelho distrófico								
Planta	+0,26	+0,23	+0,23	ns	ns	Ns	ns	ns
Soca	+0,31	+0,26	+0,31	ns	ns	Ns	ns	ns

Den = densidade do solo; GP = Ganho de porosidade a partir da caracterização feita na área de mata remanescente antes da instalação do experimento. Macro = Macroporosidade do solo; Micro = Microporosidade do solo; PT = Porosidade de alteração; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

Observou-se nas duas áreas uma tendência de aumento das médias na linha do rodado (Tabela 13), que foi atribuída a maior intensidade do tráfego de máquinas nesse local, podendo apresentar-se maior com o decorrer dos ciclos, uma vez que este atributo apresenta caráter acumulativo, quando não há revolvimento do solo.

Essa justificativa baseia-se nos resultados encontrados por Silva Junior et al. (2013), ao verificarem um aumento da densidade do solo no ano-safra 2009/2010 em comparação a safra anterior, em áreas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes sistemas de preparo. A presente pesquisa também corrobora com Viana et al. (2011), ao verificarem aumento de 0,12 kg dm⁻³ na densidade de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar, em relação a uma área de mata, na região do Paraná.

No ciclo da cana soca, as médias da LR foram maiores em todos os tratamentos. O CT apresentou maiores médias que a LP nos tratamentos T2 e T3. No tratamento T1 o CT e a LP apresentaram-se iguais. No ponto de coleta LP, o T1 e o T2 apresentaram a maior e a menor média, respectivamente. Ainda nesse ponto, o T3 apresentou média intermediária e igual aos demais tratamentos. Não houve diferença entre os tratamentos nos pontos LR e CT.

Nos dois solos estudados, o decréscimo das médias de densidade observado da primeira para a terceira camada, foi atribuído ao tráfego, visto que as camadas superficiais possuem maior contato com o rodado e, por isso encontram-se mais suscetíveis à compactação (Tabelas 12 e 13). Porém, esses dados discordam de Grego et al. (2013), ao verificarem maiores valores de densidade em camadas subsuperficiais em área de cana-de-açúcar cultivada em Nitossolo. Souza et al. (2005), também observaram menores médias nas

camadas superficiais de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em cultivo de cana queimada e queimada e crua, com e sem incorporação da palhada.

Dessa forma, acredita-se, que continuidade da pressão exercida pelo tráfego de máquinas nos ciclos seguintes, poderá homogeneizar a densidade do solo em todas as camadas e, com isso, promover a ocorrência de médias iguais. Esperavam-se menores valores de densidade do solo para as amostras coletadas no Latossolo Vermelho em comparação com o Neossolo Quartzarênico (Tabelas 12 e 13). Porém, isso não foi verificado em todos os pontos de coleta e, quando houve diferença, não se apresentou de forma expressiva. Os resultados mostraram valores muito próximos, que variam entre de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ até $1,76 \text{ kg dm}^{-3}$ para o Neossolo e, $1,47 \text{ kg dm}^{-3}$ até $1,77 \text{ kg dm}^{-3}$ para o Latossolo.

Tais resultados podem ser justificados pelo histórico do Latossolo, que se tratava de uma área sem renovação há oito anos, ou seja, com efeito de tráfego acumulado, principalmente abaixo da profundidade de 0,20 m, que não foi revolvida para o plantio. Vale ressaltar que a colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar oferece riscos de compactação mesmo quando as exigências de friabilidade são atendidas (Severiano et al., (2010a).

3.3 Agregação das partículas, carbono e teor de argila

Nos diferentes pontos de coleta e camadas estudadas, não houve diferença entre as médias do índice de estabilidades de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) para o Neossolo Quartzarênico, nos dois períodos de avaliação (Tabela 15).

Tabela 15. Índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
IEA (%)							
Cana planta							
T1	1,00 Aa	1,43 Aa	2,08 Aa	1,11 Aa	2,45 Aa	1,50 Aa	1,69 A
T2	0,86 Aa	2,13 Aa	2,11 Aa	2,66 Aa	1,14 Aa	1,31 Aa	1,70 A
T3	1,08 Aa	1,67 Aa	1,72 Aa	1,05 Aa	0,86 Aa	2,50 Aa	1,49 A
Média	0,98 a	1,76 a	1,97 a	1,61 a	1,48 a	1,77 a	
CV (%)	23,04						
Cana soca							
T1	2,28 Aa	4,00 Aa	4,10 Aa	3,30 Aa	3,13 Aa	3,94 Aa	3,45 A
T2	3,86 Aa	6,52 Aa	3,21 Aa	3,04 Aa	5,81 Aa	4,74 Aa	4,53 A
T3	2,66 Aa	3,49 Aa	4,89 Aa	1,86 Aa	3,96 Aa	5,23 Aa	3,68 A
Média	2,93 a	4,67 a	4,07 a	2,73a	4,30 ^a	4,64 a	
CV (%)	53,71						
DMP (mm)							
Cana planta							
T1	0,30 Aa	0,35 Aa	0,59 Aa	0,37 Aa	0,46 Aa	0,37 Aa	0,40 A
T2	0,35 Aa	0,40 Aa	0,41 Aa	0,45 Aa	0,38 Aa	0,35 Aa	0,39 A
T3	0,36 Aa	0,37 Aa	0,39 Aa	0,34 Aa	0,32 Aa	0,44 Aa	0,36 A
Média	0,33 a	0,37 a	0,46 a	0,38 a	0,38 a	0,38 a	
CV (%)	13,58						
Cana soca							
T1	0,36 Aa	0,42 Aa	0,48 Aa	0,43Aa	0,40 Aa	0,43 Aa	0,42 A
T2	0,43 Aa	0,56 Aa	0,41 Aa	0,40Aa	0,52 Aa	0,47 Aa	0,46 A
T3	0,38 Aa	0,50 Aa	0,56 Aa	0,39Aa	0,54 Aa	0,51 Aa	0,48 A
Média	0,39 b	0,49a	0,48a	0,40 a	0,49 a	0,47 Aa	
CV (%)	19,16						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

O IEA apresentado nos diferentes pontos de coleta e camadas no Latossolo Vermelho distrófico, também não apresentou distinção entre as médias encontradas, para os dois períodos de avaliação (Tabela 16). O DMP registrado apresentou diferença entre as médias no período correspondente à cana soca, em que a LR, no T3, obteve menor média em comparação aos dois pontos de coleta, que foram iguais. Entre os pontos de coleta, os tratamentos diferenciaram-se apenas no CT, em que o T3 e o T1 apresentaram a maior e a menor média respectivamente e, foram estatisticamente iguais ao T2.

Tabela 16. Índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,0-0,10	0,1-0,20	0,20-0,30	
IEA (%)							
Cana Planta							
T1	2,44 Aa	3,08 Aa	4,67 Aa	2,71 Aa	3,33 Aa	4,15 Aa	3,39 A
T2	2,98 Aa	3,54 Aa	3,35 Aa	3,16 Aa	3,44 Aa	3,17 Aa	3,28 A
T3	2,39 Aa	2,39 Aa	2,98 Aa	2,10 Aa	3,44 Aa	2,23 Aa	2,59 A
Média	2,60 a	3,00 a	3,66 a	2,66 a	3,40 a	3,18 a	
CV (%)				30,25			
Cana Soca							
T1	1,46 Aa	1,95 Aa	0,38 Aa	1,06 Aa	1,24 Aa	1,49 Aa	1,26 A
T2	1,30 Aa	1,55 Aa	0,96 Aa	0,92 Aa	1,32 Aa	1,57 Aa	1,31 A
T3	1,67 Aa	3,55 Aa	1,70 Aa	1,31 Aa	1,50 Aa	4,11 Aa	2,30 A
Média	1,47 a	2,35 a	1,04 a	1,09 a	1,35 a	2,39 a	
CV (%)				53,98			
DMP (mm)							
Cana Planta							
T1	0,41 Aa	0,41 Aa	0,51 Aa	0,43 Aa	0,49 Aa	0,42 Aa	0,44 A
T2	0,33 Aa	0,38 Aa	0,42 Aa	0,27 Aa	0,42 Aa	0,43 Aa	0,37 A
T3	0,32 Aa	0,39 Aa	0,39 Aa	0,43 Aa	0,46 Aa	0,33 Aa	0,40 A
Média	0,35 a	0,39 a	0,44 a	0,37 a	0,45 a	0,39 a	
CV (%)				24,08			
Cana Soca							
T1	0,24 Aa	0,29 Ba	0,28 Aa	0,27 Ba	0,26 Ba	0,28 Ca	0,27 A
T2	0,36 Aa	0,43 ABa	0,37 Aa	0,44 Aa	0,38 Aab	0,34 Bb	0,38 A
T3	0,28 Ab	0,56 Aa	0,36 Aa	0,32 Ba	0,38 Aa	0,50 Aa	0,40 A
Média	0,29 a	0,42 a	0,34 a	0,34 a	0,34 a	0,37 a	
CV (%)				22,49			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = Canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

O IEA apresentou significância nos contrastes T3 x demais no período correspondente a cana soca, refletindo maiores valores para o T3. O DMP apresentou significância entre as médias nos contrastes T1 x demais, T3 x demais e T1 x T3 apenas no ciclo da cana soca no experimento realizado no Latossolo. Esses resultados traduzem maiores médias dos tratamentos com controle de tráfego sobre o tratamento T1 (Tabela 17).

Tabela 17. Teste de significância para índice de estabilidade de agregado (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana de açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
Neossolo Quartzarênico						
IEA	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
DMP	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
Latossolo Vermelho distrófico						
IEA	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	*	Ns	ns	ns
DMP	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	*	*	Ns	*	ns

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

A não diferença verificada na maioria dos casos, nas duas áreas em estudo, pode ser explicada pelo revolvimento do solo ocasionado pelo preparo convencional das áreas. De acordo com Tormena et al. (2008), a movimentação de terra proporciona o rompimento da estrutura do solo, o que pode ter contribuído para a homogeneização do tamanho médio dos agregados entre nos distintos tratamentos.

Embora não tenha sido verificada diferença entre as médias, ressalta-se a tendência de redução dos valores das duas variáveis, à medida que o ponto de coleta se aproxima da LR, que pode ser atribuída a maior intensidade do tráfego de máquinas nesse ponto (Tabela 16). Somado a isso, a maior concentração do sistema radicular da cana-de-açúcar na LP, pode contribuir para uma maior agregação de partículas, graças à ação cimentante proporcionada pela presença da matéria orgânica (VASCONCELOS et al., 2010; SOUZA et al., 2014).

No Neossolo Quartzarênico não foi verificada diferença entre as médias de resistência tênsil do agregado (RTA) para os diferentes pontos de coleta e camadas, nos dois ciclos estudados (Tabela 18).

Tabela 18. Resistência tênsil do agregado (RTA) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
kPa							
Cana planta							
T1	13,48 Aa	14,22 Aa	11,62 Aa	11,64 Aa	12,34 Aa	15,33 Aa	13,10 A
T2	13,71 Aa	16,62 Aa	19,75 Aa	14,42 Aa	15,54 Aa	20,12 Aa	16,69 A
T3	9,58 Aa	11,07 Aa	9,58 Aa	8,82 Aa	12,99 Aa	8,40 Aa	13,25 A
Média	12,25 a	13,97 a	13,65 a	11,62 a	13,62 a	14,61 a	
CV (%)				35,82			
Cana soca							
T1	15,95 Aa	16,96 Aa	10,20 Aa	13,25 Aa	14,17 Aa	15,69 Aa	14,37 A
T2	19,03 Aa	18,71 Aa	18,41 Aa	18,07 Aa	18,91 Aa	19,20 Aa	18,71 A
T3	7,95 Aa	10,41 Aa	14,39 Aa	7,84 Aa	7,83 Aa	16,82 Aa	10,91 A
Média	14,31 a	15,36 a	14,33 a	13,05 a	13,67 a	17,23 a	
CV (%)				36,01			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

No Latossolo Vermelho distrófico foi observada diferença apenas entre as médias encontradas nos diferentes pontos de coleta, no ciclo correspondente a cana soca (Tabela 19). Em todos os tratamentos, as médias verificadas no ponto de coleta LP, apresentaram-se maiores que as médias obtidas no ponto LR. Já as médias do CT foram iguais e intermediárias aos dois pontos de coleta citados anteriormente. Entre as médias gerais, os três pontos de coleta diferenciaram-se estatisticamente entre si, na sequência: LR < CT < LP.

Tabela 19. Resistência tênsil do agregado (RTA) de um Latossolo Vermelho Ditrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
kPa							
Cana planta							
T1	90,91 Aa	107,26 Aa	99,14 Aa	97,74 Aa	99,46 Aa	100,10 Aa	99,10 A
T2	81,73 Aa	88,00 Aa	117,61 Aa	84,78 Aa	96,66 Aa	105,91 Aa	95,78 A
T3	110,91 Aa	119,81 Aa	119,66 Aa	103,37 Aa	122,56 Aa	124,45 Aa	116,79 A
Média	94,51 a	105,02 a	112,13 a	93,29	106,22	110,15	
CV (%)				27,53			
Cana soca							
T1	100,20 Ab	140,01 Aab	167,00 Aa	128,43 Aa	144,31 Aa	134,47 Aa	135,63 A
T2	97,97 Ab	146,18 Aab	166,00 Aa	130,03 Aa	139,94 Aa	140,18 Aa	136,71 A
T3	93,22 Ab	130,10 Aab	175,00 Aa	139,84 Aa	127,42 Aa	131,05 Aa	132,77 A
Média	97,13 c	138,76 b	169,33 a	132,76 a	137,22 a	135,23 a	
CV (%)				20,62			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Assim como verificado na análise estatística realizada entre os três tratamentos (Tabela 19), não houve diferença entre os diferentes contrastes analisados, nos dois solos em estudo (Tabela 20).

Tabela 20. Teste de significância para a resistência tênsil do agregado (RTA) de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
Neossolo Quartzarênico						
RTA	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
	Latossolo Vermelho distrófico					
	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

No Neossolo, as médias de RTA variaram entre 8,40-20,12 kPa, e 7,83-19,20 kPa para os ciclos correspondentes a cana planta e a cana soca, respectivamente (Tabela 18). No Latossolo, as médias apresentaram valores superiores, limitando-se entre 81,73 – 124,45 kPa

e 93,22 – 175,00 kPa, para o primeiro e segundo ano de pesquisa, nessa ordem. Ferreira et al. (2009), verificaram maiores valores de RTA num solo de textura média ao ser comparado com um solo de textura argilosa. Os autores atribuíram o resultado de sua pesquisa às maiores concentrações de carbono orgânico total, que foram encontradas na área de solo argiloso, em comparação a outra área de textura média.

A RTA é uma variável indicadora de qualidade do manejo, uma vez que sensibilidade aos processos físicos e mecânicos relacionados com a movimentação do solo, podendo ainda ser influenciada pelos teores de carbono do solo e pela concentração de argila (FERREIRA et al., 2009). Não foi verificada diferença entre as médias de carbono orgânico total para os diferentes pontos de coleta e camadas, nos dois anos de estudo no Neossolo (Tabela 21).

Tabela 21. Teor de carbono de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta		Camadas (m)				Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Carbono (g.dm ⁻³)							
Cana planta							
T1	12,00 Aa	15,25 Aa	14,25 Aa	13,00 Aa	14,00 Aa	14,00 Aa	13,83 A
T2	15,00 Aa	14,75 Aa	13,25 Aa	13,50 Aa	15,00 Aa	14,00 Aa	13,50 A
T3	13,75 Aa	13,75 Aa	13,25 Aa	10,84 Aa	10,45 Aa	10,40 Aa	14,41 A
Média	13,58 a	14,58	13,58 a	13,58 a	14,58 a	13,58 a	
CV%				17,49			
Cana soca							
T1	14,66 Aa	14,66 Aa	15,60 Aa	14,66 Aa	15,00 Aa	15,20 Aa	14,95 A
T2	13,66 Aa	14,33 Aa	14,33 Aa	15,33 Aa	13,66 Aa	13,31 Aa	14,10 A
T3	13,66 Aa	14,30 Aa	14,33 Aa	15,33 Aa	13,00 Aa	14,00 Aa	14,11 A
Média	13,99 a	14,43 a	14,75 a	15,10 a	13,88 a	14,17 a	
CV (%)				15,22			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

No Latossolo, o carbono apresentou o mesmo comportamento verificado no Neossolo, não diferenciando-se entre os diferentes pontos de coleta e camadas estudadas (Tabela 22). Os teores de carbono encontrados apresentaram valores médios próximos, nos dois solos estudados. Na presente pesquisa, as médias de carbono no Neossolo variaram entre 10,40 – 15,00 g dm⁻³, e 13,31 – 15,33 g dm⁻³, para a primeira e segunda soca,

respectivamente. Para o Latossolo Vermelho distrófico os valores oscilaram entre 8,00 – 16,00 g dm⁻³ e 10,24 – 13,92 g dm⁻³ nos dois anos consecutivos de estudo.

Em função da proximidade dos valores de carbono observados nas duas áreas, as maiores médias de RTA encontradas no Latossolo, foram atribuídas as maiores concentrações de argila em sua composição granulométrica. Essa afirmação baseia-se na característica de grande reatividade dos minerais de argila, dada em função da sua maior carga elétrica, que por sua vez, proporciona um maior número de ligações entre partículas orgânicas e/ou minerais.

Tabela 22. Teor de carbono de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Carbono (g.dm ⁻³)							
Cana planta							
T1	14,00 Aa	13,00 Aa	16,00 Aa	15,33 Aa	12,66 Aa	15,00 Aa	14,33 A
T2	14,44 Aa	11,00 Aa	9,20 Aa	12,45 Aa	12,20 Aa	10,00 Aa	11,55 A
T3	8,88 Aa	9,68 Aa	10,44 Aa	11,00 Aa	10,00 Aa	8,00 Aa	9,66 A
Média	12,44 a	11,22 a	11,88 a	12,92 a	11,62 a	11,00 a	
CV (%)	30,36						
Cana soca							
T1	12,31 Aa	11,37 Aa	13,60 Aa	13,58 Aa	12,75 Aa	10,95 Aa	12,42 A
T2	12,93 Aa	10,67 Aa	12,98 Aa	14,59 Aa	10,25 Aa	11,74 Aa	12,19 A
T3	10,83 Aa	12,06 Aa	13,92 Aa	12,87 Aa	10,24 Aa	13,70 Aa	12,27 A
Média	12,02 a	11,37 a	13,50 a	13,68 a	11,08 a	12,13 a	
CV (%)	30,39						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

O Neossolo Quartzarênico apresentou menores concentrações de argila em comparação ao Latossolo e, em ambos os casos, não houve diferença entre as médias dos teores de argila em nenhum dos pontos de coleta e camadas, para os dois anos de estudo (Tabela 23). Os Neossolos são solos mais jovens, formados por depósitos arenosos, sendo o quartzo o mineral predominante. Diferente do Latossolo, que são solos mais desenvolvidos e apresentam maior concentração de minerais de argila (EMBRAPA, 2005).

Tabela 23. Teor de argila do Neossolo Quartzarênico e do Latossolo Vermelho distrófico cultivados com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Argila (g kg ⁻¹)							
Neossolo Quartzarênico							
Cana planta							
T1	110,0 Aa	105,7 Aa	107,5 Aa	111,6 Aa	103,5 Aa	100,2 Aa	108,4 A
T2	106,1 Aa	105,0 Aa	101,2 Aa	102,5 Aa	105,2 Aa	106,0 Aa	104,5 A
T3	105,2 Aa	102,2 Aa	108,0 Aa	107,2 Aa	103,5 Aa	101,2 Aa	103,8 A
Média	107,1 A	104,3	105,5	107,1	105,5	104,3	
CV%	4,89						
Cana soca							
T1	100,5 Aa	110,1 Aa	110,3 Aa	113,5 Aa	98,0 Aa	110,0 Aa	107,0 A
T2	110,5 Aa	107,6 Aa	117,5 Aa	108,8 Aa	109,8 Aa	117,0 Aa	111,8 A
T3	111,8 Aa	118,3 Aa	116,5 Aa	113,8 Aa	117,8 Aa	115,0 Aa	115,5 A
Média	107,6 a	112,0 a	114,7 a	112,0 a	108,5 a	114,0 a	
CV (%)	11,00						
Latossolo Vermelho distrófico							
Cana planta							
T1	221,6 Aa	234,5 Aa	250,3 Aa	233,1 Aa	241,0 Aa	232,3 Aa	235,4 A
T2	179,6 Aa	214,6 Aa	229,0 Aa	221,0 Aa	217,3 Aa	185,0 Aa	207,7 A
T3	219,3 Aa	222,6 Aa	217,6 Aa	221,0 Aa	215,6 Aa	223,0 Aa	219,8 A
Média	206,8 a	223,9 a	232,3 a	225,0 a	224,6 a	213,4 a	
Cana soca							
T1	219,8 Aa	210,9 Aa	228,7 Aa	221,5 Aa	211,2 Aa	226,7 Aa	219,8 A
T2	208,7 Aa	199,2 Aa	215,7 Aa	195,7 Aa	215,8 Aa	212,1 Aa	207,8 A
T3	199,0 Aa	200,6 Aa	208,7 Aa	204,8 Aa	213,5 Aa	190,0 Aa	202,7 A
Média	209,1 a	203,5 a	217,7 a	207,3 a	213,5 a	209,6 a	
CV (%)	13,26						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Na pesquisa de Tormena et al. (2008b) os autores não verificaram influência do teor de carbono sobre a RTA de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes manejos. Em discordância, Guimarães et al., (2009), verificaram aumento nas médias de RTA em consonância com o aumento das médias de carbono orgânico total na camada de 0,10-0,20 m de um Latossolo Vermelho distroférico sob integração lavoura-pecuária. Bavoso et al. (2010), observaram maior RTA em um Latossolo sob sistema de plantio com maior aporte de carbono, em comparação ao sistema convencional. No estudo de Ferreira et al., (2011), a RTA agregado reduziu a medida que o conteúdo de carbono aumentou.

De acordo com Schimiguel et al. (2014), o sistema de preparo convencional, utilizado na implantação dessa pesquisa, com intenso revolvimento do solo e exposição da matéria orgânica, promove um rompimento da estrutura do solo e, com isso, ocorre a formação de agregados menores. Complementando essa informação, Bavoso et al., (2010), acreditam que curtos prazos de estabilização do sistema sejam insuficientes para a matéria orgânica funcionar como agente cimentante de partículas.

Ressalta-se que essa pesquisa foi realizada no final dos dois primeiros ciclos após a implantação do experimento e, por isso, observou-se pouca diferença entre as médias das variáveis de agregação. Acredita-se que com o decorrer dos ciclos, o efeito cimentante da matéria orgânica seja verificado sobre a agregação das partículas e sobre a RTA, em especial, entre os pontos de coleta e camadas estudadas. Entre os tratamentos, é esperada pouca ou nenhuma diferenciação, visto que todos recebem o mesmo manejo de palha, que é deixada sobre a superfície do solo após a colheita.

A análise de contraste confirmou a igualdade entre os tratamentos das médias de carbono e teor de argila, visto que também não houve significância entre as médias das combinações estudadas (Tabela 24).

Tabela 24. Teste de significância para teor de carbono e teor de argila de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
Neossolo Quartzarênico						
Carbono	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
Argila	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
Latossolo Vermelho distrófico						
Carbono	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns
Argila	Planta	ns	ns	Ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	Ns	ns	ns

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

3.4 Resistência do solo à penetração

A avaliação da umidade do solo fez-se necessária, visto que esta interfere no comportamento da resistência do solo à penetração, diminuindo os valores à medida que o teor de água no solo aumenta (TAVARES et al., 2014). Nos dois solos, não houve diferença das médias de umidade volumétrica observadas entre os pontos de coleta e camadas estudadas, nem entre os tratamentos nos dois anos de estudo (Tabelas 25 e 26). Isso ocorreu pelo fato das análises terem sido realizadas no mesmo dia, em todos os tratamentos de uma mesma repetição.

Tabela 25. Umidade volumétrica de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Umidade do solo (m ³ m ⁻³)							
Cana planta							
T1	0,088 Aa	0,091 Aa	0,089 Aa	0,090 Aa	0,101Aa	0,077 Aa	0,089 A
T2	0,092 Aa	0,088 Aa	0,084 Aa	0,083 Aa	0,098 Aa	0,083 Aa	0,088 A
T3	0,091 Aa	0,089 Aa	0,084 Aa	0,091 Aa	0,109 Aa	0,064 Aa	0,088 A
Média	0,090 a	0,089 a	0,085 a	0,088 a	0,102 a	0,074 a	
CV (%)				10,22			
Cana soca							
T1	0,113 Aa	0,111 Aa	0,108 Aa	0,110 Aa	0,114 Aa	0,108 Aa	0,110 A
T2	0,107 Aa	0,106 Aa	0,106 Aa	0,102 Aa	0,116 Aa	0,102 Aa	0,106 A
T3	0,110 Aa	0,100 Aa	0,109 Aa	0,100 Aa	0,105 Aa	0,113 Aa	0,106 A
Média	0,110 a	0,105 a	0,107a	0,104 a	0,111 a	0,107 a	
CV (%)				6,09			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

No solo de textura arenosa as médias de umidade volumétrica variaram entre 0,083 - 0,109 m³ m⁻³ na cana planta e 0,100 - 0,116 m³ m⁻³ para cana soca (Tabela 25), valores estes, menores dos que os registrados no Latossolo, que estão compreendidos no intervalo entre 0,094 m³m⁻³ - 0,147 m³m⁻³ para o primeiro ano e, entre 0,099 - 0,122 m³ m⁻³ para a cana soca (Tabela 26).

Tabela 26. Umidade volumétrica de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Umidade do solo (m ³ m ⁻³)							
Cana planta							
T1	0,140 Aa	0,101 Aa	0,126 Aa	0,130 A	0,133 Aa	0,104 Aa	0,122 A
T2	0,109 Aa	0,106 Aa	0,099 Aa	0,094 A	0,101 Aa	0,120 Aa	0,105 A
T3	0,116 Aa	0,115 Aa	0,122 Aa	0,099 A	0,106 Aa	0,147 Aa	0,117 A
Média	0,121 a	0,107 a	0,115 a	0,107 a	0,113 a	0,123 a	
CV (%)				36,66			
Cana soca							
T1	0,109 Aa	0,101 Aa	0,107 Aa	0,099 Aa	0,106 Aa	0,113 Aa	10,61 A
T2	0,105 Aa	0,111 Aa	0,122 Aa	0,108 Aa	0,115 Aa	0,116 Aa	11,32 A
T3	0,109 Aa	0,101 Aa	0,117 Aa	0,108 Aa	0,114 Aa	0,105 Aa	10,95 A
Média	0,107 a	0,104 a	0,115 a	0,105 a	0,111 a	0,111 a	
CV (%)				22,18			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

A maior retenção de água verificada no Latossolo foi atribuída a maior concentração de argila contida nesse solo, em comparação ao Neossolo, capaz de proporcionar uma maior retenção de água, graças sua maior microporosidade (Tabelas 6, 7, 9 e 10), corroborando com Carneiro et al., (2014) e Brito et al., (2015).

A maior capacidade de retenção de água dos solos argilosos deve ser levada em consideração, sobretudo no Latossolo, quando há a realização de práticas mecanizadas. Isso pelo fato de que os solos argilosos apresentam maiores riscos de compactação quando trabalhado em faixas de umidade que encontram-se acima do ponto friabilidade (SEVERIANO et al., 2010b; VISCH et al., 2015).

A análise de contraste também não revelou diferença entre as médias de umidade do solo para as combinações realizadas, nas duas áreas de estudos (Tabela 27). Os resultados foram semelhantes nos dois ciclos de avaliação.

Tabela 27. Teste de significância para umidade do solo de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
Neossolo Quartzarênico						
Umidade	Planta	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	ns	ns	ns
	Latossolo Vermelho distrófico					
	Planta	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	ns	ns	ns

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

No Neossolo, as médias de resistência do solo à penetração (RSP), não apresentaram diferença entre os pontos de coleta e nem entre as camadas estudadas (Tabela 28). Na cana soca, a média geral dos pontos de coleta revelaram que a LR apresentou maior resistência que o CT, que por sua vez, registrou maior RSP que a LP. Entre as médias gerais dos tratamentos, observou-se que o T1 apresentou maior média e não houve diferença entre o T2 e o T3. Observou-se diferença entre as médias gerais das camadas, em que a primeira apresentou maior média e, não houve diferença entre as outras duas.

Tabela 28. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Resistência do solo à penetração (MPa)							
Cana planta							
T1	2,32 Aa	2,20 Aa	1,80 Aa	2,10 Aa	2,20 Aa	2,00 Aa	2,10 A
T2	2,51 Aa	2,20 Aa	1,90 Aa	2,30 Aa	2,20 Aa	2,10 Aa	2,20 A
T3	2,30 Aa	2,00 Aa	1,60 Aa	2,10 Aa	1,90 Aa	1,90 Aa	1,96 A
Média	2,35a	2,13a	1,76a	2,16a	2,10a	2,00 a	
CV (%)	15,51						
Cana soca							
T1	3,29 Aa	2,81 Aa	2,45 Aa	3,77 Aa	2,68 Aa	2,10 Aa	2,85 A
T2	3,52 Aa	2,74 Aa	2,45 Aa	3,92 Aa	2,79 Aa	1,99 Aa	2,56 AB
T3	2,47 Aa	2,20 Aa	2,10 Aa	2,95 Aa	2,05 Aa	1,76 Aa	2,25 B
Média	3,09 a	2,58 ab	2,33 b	3,55 a	2,51 b	1,95 b	
CV (%)	14,12						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

As médias gerais dos tratamentos no Neossolo Quartzarênico, na cana soca, revelaram que o T2 e T3, nos quais adotou-se o controle de tráfego, apresentaram os menores valores de RSP (Tabela 28). Isso pode estar relacionado à redução dos desvios da linha do rodado proporcionado pela orientação do tráfego em função do uso do piloto automático.

A RSP do Latossolo Vermelho distrófico, no período correspondente a cana planta, apresentou diferença entre os tratamentos apenas na camada de 0,10-0,20 m e entre camadas nos tratamentos T2 e T3 (Tabela 29). Na camada de 0,10-0,20 m os tratamentos T1 e T3 apresentaram a maior e menor média, nessa ordem, igualando-se ao T2, que por sua vez, apresentou média intermediária nos dois tratamentos citados. Dentro dos tratamentos T2 e T3 as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m apresentaram as maiores e menores médias, respectivamente.

No ciclo da cana soca, dentro dos pontos de coleta, o T1 apresentou maiores médias na LR e no CT quando comparado aos tratamentos T2 e T3, que apresentaram-se iguais (Tabela 29). Não houve diferença entre as camadas estudadas.

Tabela 29. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Resistência do solo à penetração (MPa)							
Cana Planta							
T1	3,35 Aa	3,35 Aa	2,70 Aa	3,41Aa	3,01 Aa	2,98 Aa	3,13 A
T2	3,42 Aa	2,42 Aa	3,13 Aa	3,74 Aa	2,55 ABb	2,68 Aab	2,99 A
T3	2,82 Aa	2,66 Aa	2,01 Aa	3,03 Aa	1,87 Bb	2,59 Aab	2,50 A
Média	3,19 a	2,81 a	2,61 a	3,39 a	2,48 a	2,75 a	
CV (%)	14,42						
Cana Soca							
T1	4,06 ABa	3,66 Aa	2,63 Aa	2,99 Aa	3,52 Aa	3,84 Aa	3,31 A
T2	3,73 Ba	2,99 Ba	2,87 Aa	3,52 Aa	3,03 Aa	3,02 Aa	3,37 A
T3	3,93 Ba	2,99 Bb	2,21 Ab	3,16 Aa	2,90 Aa	3,08 Aa	3,04 A
Média	3,90 a	3,21 ab	2,57 b	3,22 a	3,15 a	3,31 a	
CV (%)	15,36						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e, letras minúsculas na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Nos dois solos, a análise de contraste também não revelou diferença entre as médias gerais das combinações estudadas. Esse resultado foi verificado nos dois ciclos avaliados (Tabela 30).

Tabela 30. Teste de significância para resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico e de um Latossolo Vermelho distrófico, ambos sob diferentes manejos de cana-de-açúcar.

Variáveis	Ciclos	T1 x demais	T3 x demais	T1 x T2	T1 x T3	T3 x T2
Neossolo Quartzarênico						
RSP	Planta	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	ns	ns	ns
	Latossolo Vermelho distrófico					
	Planta	ns	ns	ns	ns	ns
	Soca	ns	ns	ns	ns	ns

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. *: significativo a 5 %; NS: não significativo pelo teste F.

No Neossolo Quartzarênico os valores de RSP encontram-se compreendidos entre 1,60 e 2,51 MPa para cana planta e 1,76 e 3,92 MPa para a cana soca (Tabelas 28), enquanto que os valores verificados no Latossolo Vermelho estão entre 2,01 e 3,74 MPa; e 2,21 e 4,06 MPa para a cana planta e soca, respectivamente (Tabela 29). De acordo com Grant e Lafond (1993), todos esses valores são considerados como críticos ao crescimento do sistema radicular, visto que encontram-se acima de 1,5 MPa, em especial, nos pontos situados na linha do rodado.

Os valores de RSP no Neossolo Quartzarênico aumentaram, do primeiro ano (cana planta) para o segundo ano (cana soca) em todos os pontos de coleta (Tabela 28), especialmente, na LR, que apresentou menor porosidade. Esses resultados corroboram com Carvalho et al. (2012), ao afirmarem que o aumento da resistência do solo está relacionado com a redução da porosidade.

Resultados semelhantes foram observados por Roque et al. (2010) em área de cana-de-açúcar com controle de tráfego. No primeiro ano de pesquisa, os autores não verificaram diferença entre as médias de RSP para os diferentes pontos de coleta. Porém, no segundo ano de pesquisa, ocorreu uma redução das médias no sentido da LR para a LP. Souza et al. (2014), dando continuidade aos estudos de Roque et al. (2010), portanto, avaliando o terceiro ano seguido da mesma área, verificaram menor RSP na LP em relação ao canteiro e LR.

Num estudo que avaliou a RSP em área de cana-de-açúcar trafegada, Cavichioli et al. (2012), encontraram para um Latossolo Vermelho eutroférico, valores variando entre 2,0 e 6,0 MPa, sendo que nos pontos referentes a linha do rodado, foram registrados os maiores valores de resistência, variando entre 4,0 e 6,0 MPa. Os autores confirmam que o trânsito de

máquinas aumentam a compactação do solo, especialmente nas linhas de tráfego, corroborando com a presente pesquisa.

4. CONCLUSÕES

Entre os tratamentos não houve diferença para macroporosidade, microporosidade e porosidade total no Neossolo Quartzarênico, nos dois anos de estudo. Entre os pontos de coleta, em todos os tratamentos, a macroporosidade e a porosidade total do solo, quando apresentaram diferença, obtiveram maiores médias na linha de plantio, seguidos do canteiro e da linha do rodado.

No Latossolo Vermelho distrófico o tratamento com espaçamento duplo e que utilizou o piloto automático apresentou maior macroporosidade e porosidade total. Nos dois solos a densidade mostrou diferença entre os pontos de coleta apenas no ciclo da cana soca em que a linha de plantio apresentou menores médias que o canteiro e a linha do rodado.

Não houve diferença entre os tratamentos para as médias de carbono, umidade do solo teor de argila, índice de estabilidade de agregado, diâmetro médio ponderado e resistência tênsil do agregado. Os tratamentos que utilizaram piloto automático apresentaram menor resistência do solo à penetração.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F. B. TORMENA, A. C.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: Efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 227-234, 2010.
- BRITO, R. R.; GRASSI FILHO, H.; SAAD, J. C. C.; RIBEIRO, V. Q.; OLIVEIRA, S. R. M. Critérios de manejo na irrigação do feijoeiro em solos de textura arenosa. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 2. p. 334-347, 2015.
- CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; SILVA, V. P. R.; SILVA JUNIOR, R. S.; ANDRADE, A. M. D.; SANTOS, A. B. Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 18, n. 1. p. 99-108, 2014.
- CARVALHO, J. J.; MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P.; RODRIGUES, E. C. P. Avaliação da resistência do solo sob dois sistemas de manejo: Plantio direto e convencional. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Graça, v.22, n. 2, p. 10-21, 2012.
- 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.
- CAVICHIOLO, F. A.; FURLANI, C. E. A.; TOLEDO, A.; SILVA, R. P.; RIBEIRO, C. A. Resistência mecânica do solo à penetração na fileira e entrefileira de cana-de-açúcar em função da mecanização. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 20, n.1, p. 46-51, 2012.
- DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Nova York, v.31, n.2, p. 139-147, 1985.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011, 230 p.
- EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**- Acesso em 28 de janeiro de 2016. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_2_10112005101955.html
- FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B. HARMS, M. G.; BRIEDIS, C.; Resistência tênsil de agregados afetada pelo conteúdo de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho com textura média e argilosa sob plantio direto. **Synergismus Scyentifica**, Pato Branco, v. 4, n.1, p. 10- 13, 2009.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados

em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, n. 35, p. 437-445, 2011.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, n.2, p. 223-232, 1993.

GREGO, S.; GREGO, C. R.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; VAZ, C. M. P.; HURTADO, S.; RODRIGUES, K. M. **Densidade do solo de um Nitossolo sob cultivo de cana-de-açúcar utilizando análises geostatística e bayesiana**. In: III Simpósio de geoestatística aplicada em ciências agrárias, 2013, Botucatu – SP.

GUIMARÃES, R. M.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 4, p. 499-505, 2009.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. **Size distribution of aggregates**. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society Agronomy, 1965. p. 499-510.

MONTANHA, G. K.; GUERRA, S. P. S.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; CAMPOS, F. H.; LANÇAS, K. P. Consumo de combustível de um trator agrícola no preparo do solo para a cultura do algodão irrigado em função da pressão de inflação dos pneus. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.26, n.1, p. 39-51, 2011.

OLIVEIRA, T. C. A.; MOLIN, J. P.; Uso de piloto automático na implantação de pomares de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p.334-342, 2011.

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.

ROSA, J. H. M. **Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (Saccharum spp) em espaçamento duplo alternado**. 2013. 154 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo/ESALQ, Piracicaba.

SCHIMIGUEL, R.; SÁ, J. C. M.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; ZUFFO, J. Estabilidade de agregados do solo devido a sistemas de cultivo. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v. 9, n. 1, p. 20-15, 2014.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, 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, 2010a.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II -quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 414-423, 2010b.

SILVA JUNIOR, C. A.; CARVALHO, L. A.; CENTURION, J. F.; OLIVEIRA, E. C. A. Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo, sob diferentes tipos de preparo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, Supplement 1, p. 1489-1500, 2013.

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, A. C. M.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluente application by drip system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 647-657, 2013.

SOUZA, G. S. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 38, n. 1, p. 135-146, 2014.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. especial, p. 2603-2612, 2008.

TAVARES, E. U.; MONTENEGRO, A. A. A.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. S. S.; VICENTE, T. F. D.; ANDRADE, C. W. L. Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico. **Water Resources and irrigation management**. Campinas Grande, v. 3, n.2 p. 79-89, 2014.

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

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

VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, 2014. , n. 2, p. 79-89, 2014.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J. C.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p. 309-316, 2010.

VISCHI-FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; SILVA, R. B. ET AL. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.4, p. 322-332, abr. 2015.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: **Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content**. European Journal of Soil Science, Oxford, v.49, n.3, p. 73-84, 1998.

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

ANEXO



Abertura das trincheiras na área experimental.



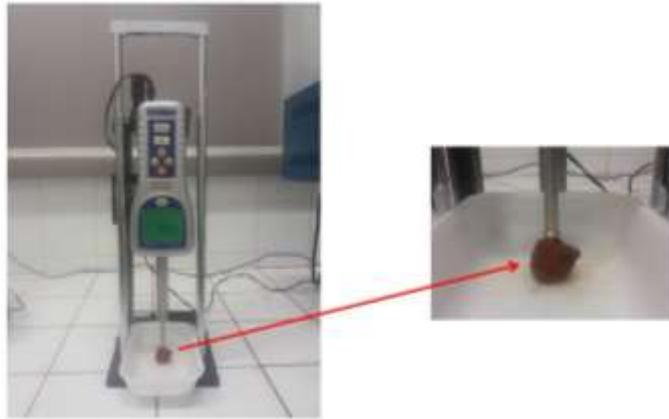
Avaliação da resistência do solo à penetração vertical e umidade volumétrica do solo nas áreas experimentais.

(a)

(b)



Tamisador de Yoder a úmido (a) e conjunto de peneiras utilizadas no tamisamento (b).



Dinamômetro-IMPAC, marca Lutron, modelo FG-20 k

CAPITULO III

MICROMORFOMETRIA DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO

RESUMO - O controle de tráfego de máquinas por meio de piloto automático e o uso do espaçamento duplo combinado apresentam-se como possíveis soluções para mitigar os problemas de compactação do solo. Essa pesquisa objetivou avaliar as características micromorfométricas de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com e sem piloto automático em diferentes espaçamentos de plantio. O experimento foi realizado num Neossolo Quartzarênico, numa área experimental pertencente à Usina Santa Fé, localizada no município de Nova Europa – SP. Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições e com três tratamentos, baseados no uso de piloto automático e diferentes espaçamentos de plantio. Os tratamentos estudados foram: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejada com piloto automático. As coletas foram realizadas nos pontos correspondentes a linha do rodado (LR) e a canteiro (CT), situado ao lado da linha de plantio, nas camadas de 0,00-0,15 m e 0,15 – 0,30 m. Apenas no segundo ano houve redução da área ocupada por poros, no ponto de coleta LR. Os tratamentos com piloto automático apresentaram maior área de poros no canteiro no segundo ano de avaliação. Não houve diferença de tamanhos e formas de poros entre os tratamentos nos dois anos de estudo. O segundo ano de avaliação apresentou redução de poros grandes e complexos.

Palavras - Chave: Estrutura do solo; micropedologia, controle de tráfego de máquinas, análise de imagens.

CHAPTER III

MICROMORMETRY OF A QUARTZIPSAMMENT CULTIVATED WITH SUGARCANE IN DIFFERENT CROP SPACING

ABSTRACT – Traffic control of machines through autopilot and the use of combined double row spacing have shown to be possible solutions for the mitigation of soil compaction problems. This research had as its objective the evaluation of the micromorphologic characteristics of a Quartzipsamment cultivated with sugarcane and managed with and without autopilot within different crop spacing. The experiment was conducted in a Quartzipsamment, in an experimental area of the Santa Fé mill, located in the city of Nova Europa – SP. A randomized block design (RBD) was adopted, with four repetitions and three treatments, based on the use of autopilot and different crop spacing. The treatments under study included: T1 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed without autopilot; T2 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed with autopilot; T3 = sugarcane planted with combined double row spacing (1.5 x 0.90 m), and managed with autopilot. The collections were conducted in sites corresponding to the wheel row (WR) and the seedbed (SB), in the layers 0.00-0.15m and 0.15 – 0.30m. The treatments with autopilot had higher pore area on the site in the second year of evaluation. There was no difference in sizes and shapes of pores between treatments in the two years of study. The second year of assessment was reduced by large and complex pores.

Keywords: Soil structure; micropedology, traffic control of machinery, image analysis.

1. INTRODUÇÃO

O tráfego de máquinas, nas áreas de produção de cana-de-açúcar, apresenta-se como um dos principais responsáveis pelos processos de compactação do solo, o que remete a uma maior necessidade de estudos sobre essa problemática (VASCONCELOS et al., 2014).

Tal afirmação baseia-se no fato de que o aumento da resistência do solo contribui para a redução do crescimento de raízes e, com isso oferece às plantas condições desfavoráveis de absorção de água, nutrientes e, por fim, menor produtividade (SOUSA et al., 2013).

Diante disso, torna-se necessário a realização de estudos que tratam da eficiência de técnicas que visam a mitigação dos efeitos adversos do tráfego de máquinas sobre o solo, à exemplo; o uso de piloto automático. Tal tecnologia tem como princípio a pré-determinação dos locais destinados ao tráfego e que, portanto, preserva as áreas em que ocorre o crescimento de plantas, no caso da cana-de-açúcar, localizadas próximas da soqueira (MONTANHA et al., 2011; SOUZA et al., 2015).

Associada ao uso do piloto automático, a adoção do espaçamento duplo, também, apresenta características que podem contribuir para a redução da compactação do solo. Dentre elas, destaca-se a redução do número de ruas destinadas ao tráfego, devido à necessidade do aumento da bitola (SOUZA et al., 2012).

As avaliações dos atributos físicos do solo, dada sua sensibilidade ao tráfego de máquinas, apresentam-se como excelentes indicadores de qualidade e, por isso, podem contribuir para a recomendação, ou não, das tecnologias supracitadas. Dentre essas avaliações, as investigações sobre as características dos poros do solo, por meio da análise de imagens de blocos impregnados e com estruturas preservadas, funcionam como ferramentas para o diagnóstico de compactação (GONÇALVES; MORAES, 2012).

O estudo da qualidade do solo por meio de imagens 2-D apresenta-se complementar às informações geradas pelas análises clássicas de densidade e de porosidade do solo. Somado a isso, a técnica permite maior detalhamento das transformações físicas ocorridas em função do manejo adotado, pois fornece informações a respeito do tamanho, tipo e quantidade de poros (GENARO et al., 2015).

O objetivo do trabalho foi avaliar as características micromorfométricas de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com e sem piloto automático em diferentes espaçamentos de plantio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do experimento

O estudo foi instalado nas dependências da Usina Santa Fé, situada no município de Nova Europa-SP, com coordenadas 48° 34' 41,76" de longitude oeste e 21°53' 44,89" de latitude sul. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é o tropical com estação seca (Aw), com temperatura média variando entre 16 e 29° C, e índice pluviométrico anual em torno de 1340 mm. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico, com aproximadamente 85% de areia.

No estudo foram avaliados três tratamentos com base no uso de piloto automático e na adoção de diferentes espaçamentos de plantio na cultura da cana-de-açúcar, são eles: T1 - cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m; T2 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m; T3 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso (DBC), com três tratamentos e quatro repetições, totalizando doze unidades experimentais. Cada parcela possuía dimensões de 30 m x 50 m, conferindo 20 linhas de plantio aos tratamentos que utilizou o espaçamento de 1,50, e 12 linhas duplas para o tratamento com espaçamento combinado de 1,50 x 0,90 m.

2.2 Coleta dos blocos de solo

Foram coletadas amostras indeformadas de solo nos pontos situados na linha do rodado (LR) e no canteiro (CT), situado ao lado da linha de plantio, nas camadas de 0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m. Além disso, foram coletadas amostra numa área de mata remanescente, situada ao lado do experimento, inserida num solo de mesma classificação ao da área experimental.

Com o auxílio de uma faca, esculpiu-se blocos de solo nas paredes das trincheiras com dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,06 m, sendo o tamanho de maior comprimento orientado para superfície do solo. Em seguida, os blocos foram acomodados em caixas de papel cartão, com dimensões semelhantes às da amostra e, cuidadosamente retirados para que não houvesse deformação da estrutura. Após a coleta, as amostras foram embrulhadas com plástico PVC e forradas com papel alumínio, com o objetivo de evitar danos causados por possíveis choques mecânicos durante o transporte.

2.3 Preparo das amostras

Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório de micromorfologia da Universidade de São Paulo, Campus ESALQ, em Piracicaba-SP, onde ficaram expostas ao ar durante 10 dias e, em seguida colocadas em estufa à 40° C (MURPHY, 1986).

Após a secagem, as amostras indeformadas foram impregnadas com solução a base de poliéster e monômero de estireno. Para isso, utilizou-se um sistema de sucção fechado, formado por três dissecadores, interligados por mangueiras e vinculados a uma bomba de vácuo utilizada para aplicar a pressão de 1 atm. Para o preparo da solução impregnadora, utilizou-se 1 L de resina de poliéster, 1 L de monômero de estireno, 5 g de pigmento tinopal OB, 15 gotas de butanox e 10 gotas de octoato de cobalto.

2.4 Impregnação das amostras

Primeiramente, em um béquer de 2 L, dissolveu-se 5 g do pigmento Tinopal OB em 1 L do monômero de estireno. Em seguida, acrescentou-se o 1 L da resina de poliéster, e com o auxílio de um bastão, misturou-se a solução até que esta tornou-se completamente homogênea. Por fim, acrescentou-se o endurecedor butanox e o catalizador octoato de cobalto.

Após a impregnação, as amostras foram colocadas em repouso, num ambiente fechado e, sempre que necessário, realizou-se a reposição da solução impregnadora, visto que durante o processo de endurecimento da resina ocorreu a perda de solução por volatilização (JONGERIUS; HEINTZBERGER, 1975; MURPHY, 1986). Passados aproximadamente 20 dias após a impregnação, as amostras encontravam-se curadas e prontas para serem cortadas em blocos com dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,02 m, utilizando, para isso, uma lâmina de diamante em meio úmido.

Posterior à realização do corte, as amostras tiveram suas superfícies niveladas em pedra e, quando necessário, realizou-se uma re-impregnação nos blocos que apresentaram espaços abertos após o nivelamento. Em seguida, os blocos foram polidos em placa de vidro, com superfície úmida, utilizando pó abrasivo número 500 e 200. Depois disso, realizou-se o polimento com uma lixa apropriada para superfícies úmidas.

2.5 Confeção das lâminas

Somente nas amostras coletadas na área de floresta remanescente foram confeccionadas lâminas pedológicas com o objetivo de realizar uma minuciosa descrição das camadas estudadas.

Após o processo de impregnação, foi colada sobre a superfície dos blocos uma placa de vidro com dimensões de 0,10 x 0,04 x 0,001 m. Logo em seguida, os blocos foram novamente cortados em lâmina de diamante, à uma dimensão de 0,01 m de espessura e, colocados numa máquina Politriz LP 30, da marca Logitech, sempre em ambiente úmido, até atingirem a espessura de 0,03 μm , requerida para a visualização em microscopia.

Na descrição das lâminas, utilizou-se um microscópio OLIMPUS – BX51, pertencente ao laboratório de microscopia da Universidade de Lleida, na Espanha. Para a realização dessa etapa adotou-se a chave de classificação proposta por Bullock et al. (1985).

2.6 Análises micromorfológicas

Para a análise de superfície específica dos poros, foram capturadas 10 imagens aleatórias em cada bloco, utilizando uma câmera OLYMPUS, modelo SC20, conectada a um microscópio OLYMPUS – BX51. Em seguida as imagens foram digitalizadas com uma resolução espacial de 1596 x 1196 pixels e espectral de 255 níveis de cinza, com aumento de 2 vezes na ocular e 10 vezes na objetiva. As imagens foram armazenadas, nomeadas e binarizadas e, em seguida procedeu-se a análise individual dos poros por meio do software *imagJ* (Rasband, 2008). A área superficial específica dos poróides (SE) foi encontrada por meio da Equação 1.

$$SE = (\text{Número de poros} \times \text{Perímetro}) / \text{Área total} \quad (1)$$

As análises de área, tamanhos e formas dos poros foram realizadas no laboratório de micropedologia da Universidade de São Paulo, campus de Piracicaba, utilizando imagens obtidas com aumento de 10 vezes na ocular e 10 vezes na objetiva. Para tanto, foram adquiridas 10 imagens aleatórias dos blocos impregnados, utilizando um microscópio petrográfico acoplado a uma câmera CCD, com uma resolução espacial de 1024 x 768 pixels e espectral de 256 níveis de cinza. Após a captura, as imagens foram binarizadas, nomeadas e, em seguida analisadas por meio do software *Visilog-Noesis5.4®*.

Os poros foram classificados em três grupos quanto ao tamanho das áreas: pequenos (0,000156 – 0,0156 mm^2), médios (0,0156 – 0,156 mm^2) e grandes (>0,156 mm^2) e,

em três grupos quanto a sua forma: arredondados, alongados e complexos. Para a determinação das formas dos poros utilizou-se os índices descritos nas Equações 2 e 3. (COOPER, 1999; LIMA et al., 2006; PIRES et al., 2008):

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

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_I)_i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F)_j} \quad (3)$$

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

Os valores encontrados a partir das Equações 2 e 3 foram utilizados para a classificação da forma dos poros de acordo com a Tabela 31.

Tabela 31. Critérios para distinção entre grupos de forma de poros.

Poros	Índice de forma	
	I_1	I_2
Arredondados	$I_1 \leq 5$	-
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$5 < I_1 \leq 25$ ou > 25	$> 2,2$

Os dados foram submetidos a análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade utilizando o sistema computacional Sisvar versão 5.1 Build 72 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Descrição das lâminas

A seguir são apresentadas as principais características micromorfológicas das camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m do Neossolo Quartzarênico sob mata remanescente, situada ao lado do experimento (Figura 14).

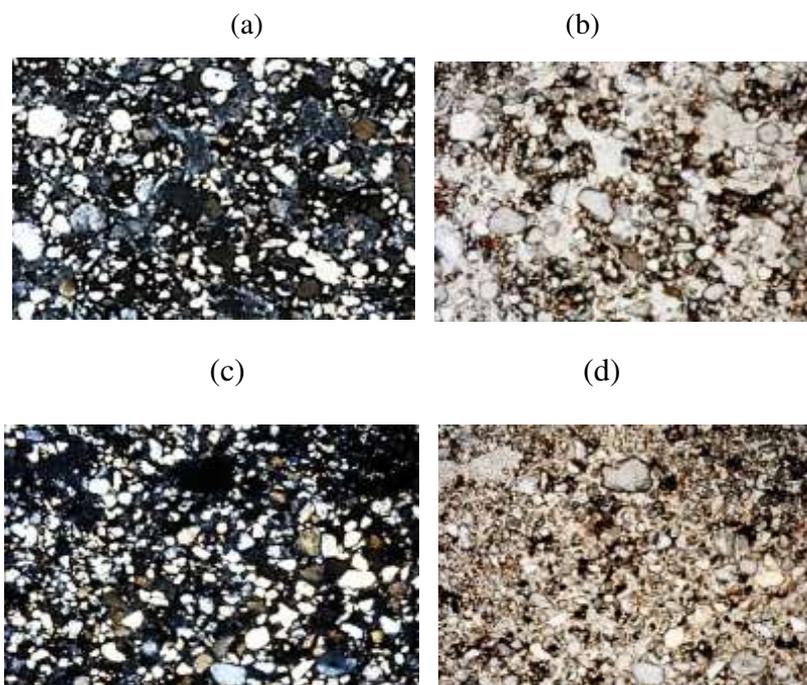


Figura 14. Imagens de lâminas delgadas de um Neossolo Quartzarênico, sob área de mata nas camadas de 0,00-0,15 m (a e b) e 0,15-0,30 m (c e d), com e sem luz polarizada (a e c), e (b e d), respectivamente, na escala de 8 μm .

As duas camadas apresentaram-se bastante homogêneas, sem zonas distintas quanto a porosidade e estrutura. Em cada camada, observou-se uma porcentagem de 45, 10 e 45% para o material grosso (g), fino (f) e para a porosidade, respectivamente, com uma relação g/f de 4/1, adotando-se o limite de 20 μm . Identificou-se partículas de areia grossa (35%), média (25%) e fina (20%), e partículas de silte e argila, preenchendo alguns vazios, que somados resultaram em torno de 20%.

O material grosseiro apresentou-se com uma frequência muito dominante, bem selecionado, com os minerais em formato equidimensional e moderadamente arredondados (corresponde a forma esférica em 3D). O grau de arredondamento foi identificado com sendo subangular e a rugosidade da parede do tipo ondulada.

O material fino encontrou-se distribuído de forma heterogênea, o que proporcionou a identificação de pequenas zonas distintas quanto à distribuição g/f (Figura 14).

Nas duas camadas, predominou a distribuição do tipo enáulica, apresentando também quitônica e mônica.

O material grosseiro apresentou-se sem orientação com relação à superfície, uma orientação de base do tipo fraca, e sem relação entre os componentes de mesma natureza (Figura 14). A microestrutura foi classificada como sendo apedal e muito dominante. No entanto, apresentou pequenas zonas com pedes de estrutura granular, fracamente desenvolvidos e, rugosidade da parede ondulada.

A área da porosidade total foi de 45%, sendo esta dividida em canais, empilhamentos e cavidades, com frequência de 15%, 75% e 10%, respectivamente, localizadas entre e intragregados, com orientação de base e por referência do tipo fraca e sem relação, nessa ordem. A distribuição de base foi classificada como aleatória e sem relação com a referência. De acordo com a formação, os poros foram identificados como sendo do tipo bioporos e físico-gênicos.

A micromassa apresentou-se constituída de argila, silte, matéria orgânica e óxidos de ferro com coloração avermelhada e fábrica birrefringente do tipo indiferenciada (Figura 14). Identificou-se também, resíduos de raízes com coloração preta, límpido, de forma alongada e tamanho aproximado de 1 mm. Além desses, verificou-se alguns fragmentos de carvão, e excrementos com formato esferoidal e elipsoide.

3.2 Porosidade do solo e superfície específica

As médias de área total de poróides (ATP) dos tratamentos estudados não apresentaram diferença entre si no primeiro ano de avaliação, tanto para os pontos de coleta, como para as camadas estudadas. No segundo ano de avaliação, verificou-se diferença entre os tratamentos apenas no ponto de coleta do canteiro (CT), em que o T2 e o T3, que utilizaram o piloto automático, apresentaram médias estatisticamente iguais e maiores que o T1. Não houve diferença entre as médias das áreas de poróides das camadas para o segundo ano de avaliação (Tabela 32).

Tabela 32. Área total ocupada por poros (%) obtida por imagens digitais de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar manejada com piloto automático em distintos espaçamentos de plantio.

Manejos	Ponto de Coleta		Camadas (m)		Média
	LR	CT	0,00-0,15	0,15-0,30	
----- Porosidade total (%) -----					
Primeiro ano					
T1	27,54 Aa	27,38 Aa	26,59 Aa	28,33 Aa	27,46A
T2	28,68 Aa	28,66 Aa	28,77 Aa	28,57 Aa	28,67A
T3	30,43 Aa	31,92 Aa	30,54 Aa	31,80 Aa	31,17A
Média	28,88 a	29,32A	28,63 a	29,56 a	
CV (%)	16,35				
Segundo ano					
T1	21,64 Aa	23,06 Ba	21,96 Aa	22,74 Aa	22,35 A
T2	23,42 Aa	24,81 ABa	23,48 Aa	24,75 Aa	24,11 A
T3	23,48 Ab	27,34 Aa	24,85 Aa	25,98 Aa	25,41 A
Média	22,84 a	25,07 a	23,43 a	24,49 a	
CV (%)	18,63				

T1= cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejada com piloto automático. CT = canteiro, LR = linha do rodado. Médias seguidas por letra minúsculas na linha e, por letra maiúscula na coluna, não se diferem pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

Observou-se no primeiro ano de pesquisa, uma tendência de menores valores nas médias de ATP no ponto de coleta da LR em comparação ao CT. Esses comportamentos podem ser justificados pela maior intensidade do tráfego nessa região, quando comparado ao CT.

No segundo ano, essa tendência foi comprovada ao verificar, por meio de diferença entre as médias, maiores valores de ATP no CT. Os tratamentos T2 e T3, que utilizaram a tecnologia do piloto automático, apresentaram maiores médias que o tratamento T1 no CT (Tabela 32). Esses resultados corroboram com Souza et al. (2015), ao verificarem que em área de cana-de-açúcar trafegada, os estudos micromorfométricos revelam uma maior porosidade nos pontos de coleta localizados próximos da linha de plantio e do canteiro. Para Cavalieri et al. (2011), a mecanização da colheita da cana-de-açúcar pode promover reduções na qualidade física do solo.

Ressalta-se, que para uma área de 1 ha, o tratamento T3, cujo o espaçamento adotado foi de 1,50 x 1,90 m, destina-se ao tráfego de máquinas aproximadamente 41,66 ruas, enquanto os tratamentos T1 e T2, que adotaram o espaçamento de 1,50 m, disponibiliza 66,66 ruas ao tráfego. Essa modificação no espaçamento proporcionou um aumento da área de canteiro para o tratamento T3, visto que o tráfego ocorre a cada 2,40 m e não houve trânsito

de máquinas entre as fileiras duplas. Embora, havendo igualdade entre as médias de ATP, no primeiro ano, o tratamento T3 apresenta maior totalidade de área não trafegada e, portanto, menor risco de compactação e danos às plantas.

Semelhante ao observado no comportamento da ATP, a superfície específica de poros não apresentou diferença estatística de médias entre os distintos pontos de coleta e camadas estudadas no primeiro ano (Tabela 33). No segundo ano, o tratamento T2, registrou menor média no ponto de coleta LR, em comparação ao CT. Entre as camadas, apenas a de 0,15-0,30 m apresentou diferença nas médias, em que o T1, que não foi beneficiado pela técnica do piloto automático, apresentou os menores valores.

Tabela 33. Superfície específica (mm) em 2D de poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com piloto automático e distintos espaçamentos de plantio.

Manejo	--Ponto de Coleta--		--Camadas (m)--	
	LR	CT	0,00-0,15	0,15-0,30
----- Superfície específica (mm) -----				
Primeiro ano				
T1	11,10 Aa	13,90 Aa	11,20 Aa	13,70 Aa
T2	7,70 Aa	9,50 Aa	8,14 Aa	9,11 Aa
T3	8,54 Aa	8,40 Aa	9,87 Aa	15,19 Aa
CV (%)	65,98			
Segundo ano				
T1	7,60 Aa	8,10 Aa	7,89 Aa	7,92 Ba
T2	7,40 Ab	21,30 Aa	11,33 Aa	17,44 Aa
T3	11,20 Aa	13,00 Aa	12,24 Aa	12,04 ABa
CV (%)	58,83			

T1= cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejado com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejado com piloto automático. CT = canteiro, LR = linha do rodado. Médias seguidas por letra minúsculas na linha e, por letra maiúscula na coluna, não se diferem pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

A compactação proporcionada pelo tráfego, especialmente a verificada no ponto de coleta situado na linha do rodado, reduz a porosidade do solo (Roque et al., 2001) e, por consequência, aumenta o contato entre as partículas de solo. Tal efeito promove a redução da superfície de exposição das partículas e, por com isso, reduz a superfície específica de poros. Embora não tenha sido verificada diferença estatística entre as médias dos tratamentos T1 e T3, tanto entre as camadas, como nos diferentes pontos de coleta, é importante ressaltar que a zona destinada ao tráfego no T1 é maior e, portanto, apresenta-se mais sujeita aos prejuízos da compactação, visto que o tráfego é realizado a cada 1,50m.

Apenas no CT da camada de 0,00-0,15 m houve diferença entre as médias, no qual o T3 apresentou maior porcentagem de área de poros complexos (Figura 15). Em todos os tratamentos, observou-se predominância dos poros complexos, especialmente no canteiro, seguidos dos poros arredondados e, em menor quantidade, os poros alongados.

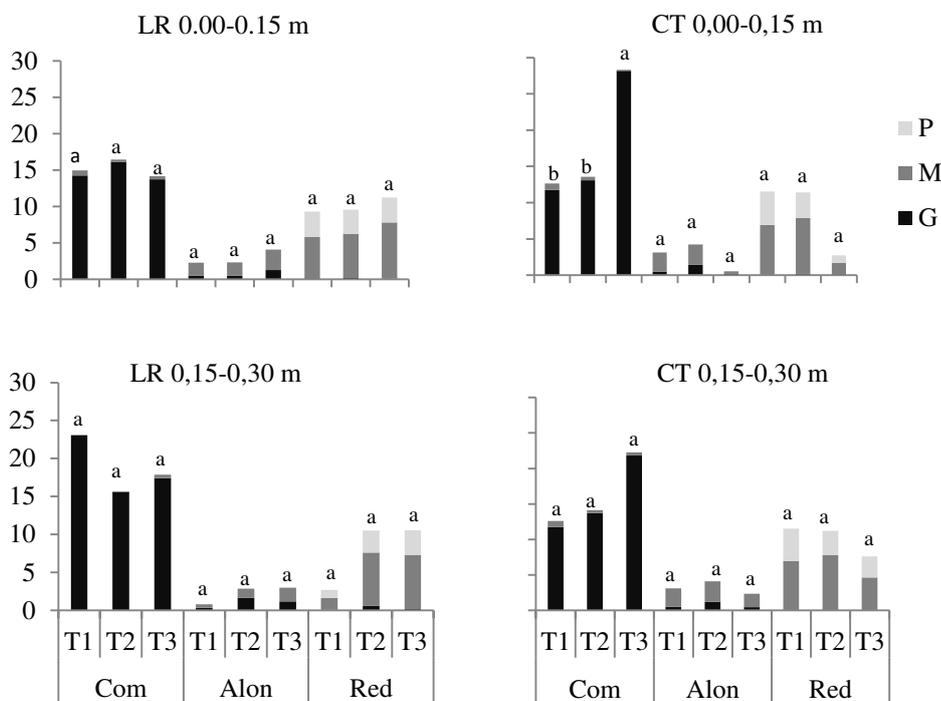


Figura 15. Formas e tamanhos dos poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar após a primeira colheita. T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T3 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m – (G: Grande, M: Médio, P: Pequeno, Com: Complexos, Alon: alongados; Red: Redondos).

Com relação ao tamanho dos poros, observou-se em todos os tratamentos, maiores médias para os poros grandes, especialmente no ponto de coleta localizado no canteiro. Esse resultado pode ser justificado pelo pouco tempo de aplicação dos manejos adotados, visto que, no ano seguinte, ocorreram em todos os tratamentos, ganhos no percentual de poros médios e pequenos, em função do maior período de tráfego de máquinas. Esses resultados são justificados pelo pouco tempo de aplicação dos tratamentos, uma vez que em todos eles foram realizadas práticas convencionais de preparo do solo, a exemplo, aração e gradagem, que podem ter contribuído para o aumento da porcentagem de poros complexos, oriundos do revolvimento.

Essa justificativa vai de acordo Genaro et al. (2015), ao afirmarem que o não revolvimento de camadas proporciona ao solo uma porosidade mais arredondada e menos complexa. Souza et al. (2006), complementam essa informação relatando que o aumento de poros redondos reduz a condutividade hidráulica do solo.

No segundo ano de pesquisa verificou-se que o tráfego de máquinas, em todos os tratamentos, contribuiu para a redução da porcentagem de poros grandes acompanhada da redução da complexidade destes (Figura 16). Dessa forma, é esperado que nos ciclos seguintes esse efeito torne-se mais expressivo, visto que não haverá revolvimento do solo até que o canavial seja renovado.

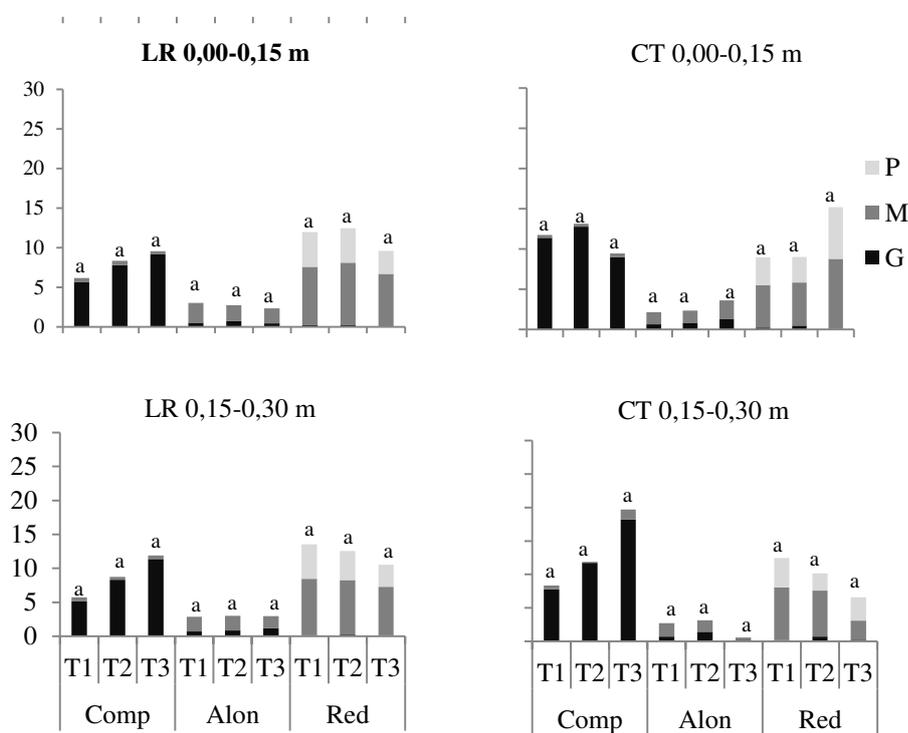


Figura 16. Formas e tamanhos dos poros de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar após a segunda colheita. T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T3 - cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m – (G: Grande, M: Médio, P: Pequeno, Com: Complexos, Alon: alongados; Red: Redondos).

Para Piron et al. (2011), a compactação do solo reduz a macroporosidade, tornando a estrutura maciça e com menor conectividade. O que pode estar relacionado à redução da complexidade dos poros, como a observada na presente pesquisa.

No segundo ano, a porcentagem de poros grandes reduziu em comparação ao primeiro ano nos dois pontos de coleta e nas camadas estudadas. Porém, continuou superior

ao percentual de poros pequenos e médios, especialmente, nas camadas do canteiro. Esses resultados revelam que o tráfego, independente do manejo adotado, foi responsável por reduzir a macroporosidade, uma vez que esta é mais sensível às modificações, quando comparada aos mesos e microporos.

No estudo de Streck et al. (2004), a redução da macroporosidade de um Argissolo foi verificada e atribuída ao tráfego de máquinas. Em estudo realizado no norte do Iran, Naghdi e Solgi (2014), verificaram que o tráfego de máquinas reduz a porosidade total, especialmente os poros grandes.

4. CONCLUSÕES

Os tratamentos com piloto automático apresentaram maior área de poros no canteiro no segundo ano de avaliação.

Não houve diferença de tamanhos e formas de poros entre os tratamentos nos dois anos de estudo. O segundo ano de avaliação apresentou redução de poros grandes e complexos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T.; BABEL, U. **Handbook for soil thin section description**. Albrington: Waine Reserch, 1985.

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.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 132 p. Tese (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GENARO, L. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. F.; COOPER, M. CAMPOS, M. C. C. Estrutura do solo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, n. 2. P. 608-614, 2015.

GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Irriga*, Botucatu, v. 17, n. 3, p. 337-345, 2012.

JONGERIUS, A.; HEINTZBERGER, G. **Methods in soil micromorphology**: a technique for the preparation of large thin sections. Wageningen: Soil Survey Institute, 1975. 48p. (Soil Survey Papers, 10).

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; SANTOS, M.C.; COOPER, M.; ROMERO, R.E. Micromorphology and image analysis of a hardsetting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). *Geoderma*, Amsterdam, v.132, n.3-4, p.416- 426, 2006b.

MONTANHA, G. K.; GUERRA, S. P. S.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; CAMPOS, F. H.; LANÇAS, K. P. Consumo de combustível de um trator agrícola no preparo do solo para a cultura do algodão irrigado em função da pressão de inflação dos pneus. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 26, n. 1, p. 39-51, 2011.

MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted, A.B. Academic Publishers, 1986.149p.

NAGHDI, R; SOLGI, A. Effects of skidder passes and slope on soil disturbance in two soil water contents. **Original scientific papper**, Amsterdam, v. 35, n. 1, p. 73-80, 2014.

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

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

RASBAND, W. ImageJ 1.40. **National Institute of Health**, USA, 2008. Disponível em: Acesso em: Janeiro. 2014.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, p. 1536-1542, 2011.

SOUSA, A. C. M.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 647-657, 2013.

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*, Viçosa, v.47, n.4, p. 603-612, 2012.

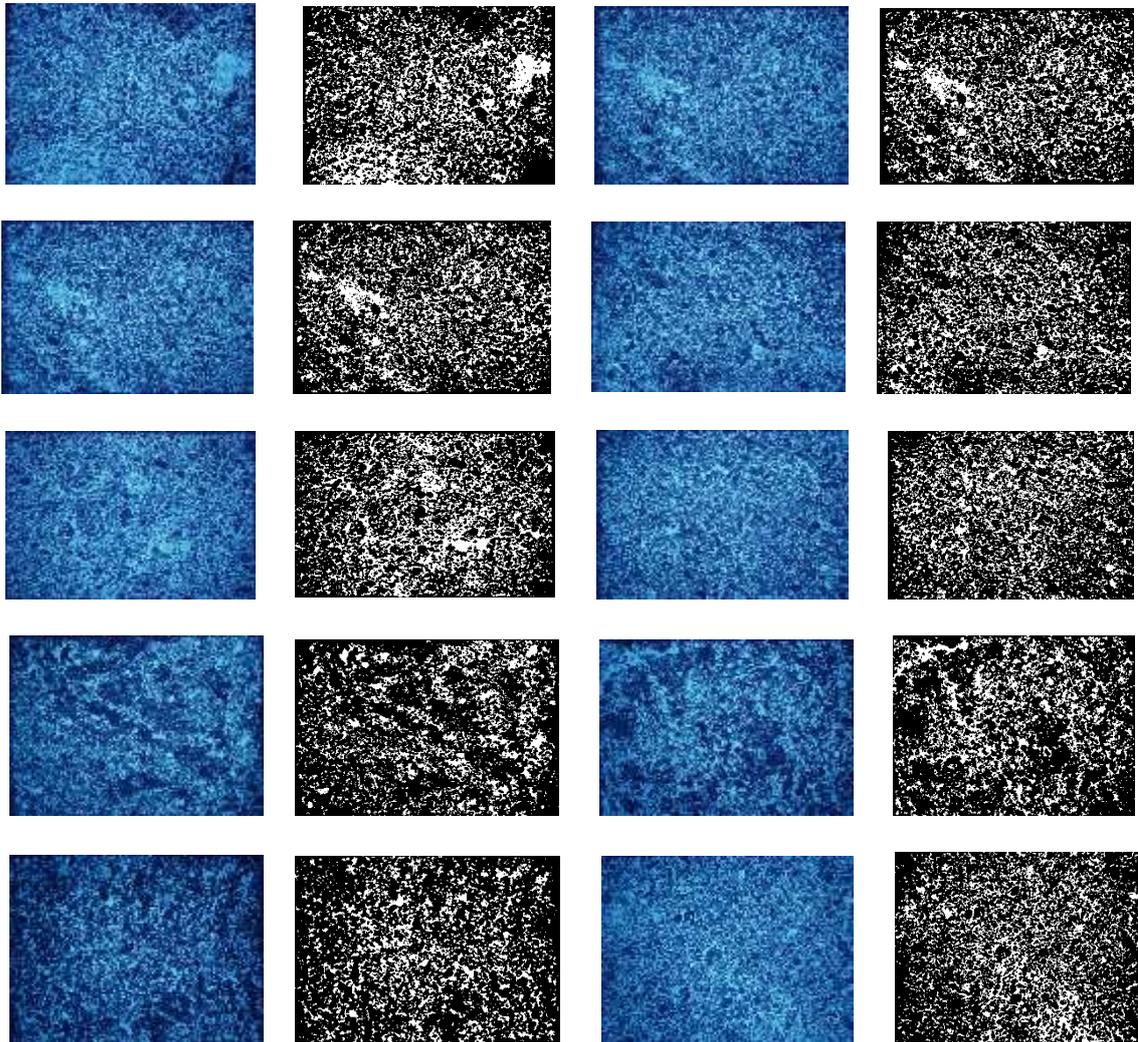
SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M. & TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 3, p. 270-277, 2015.

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

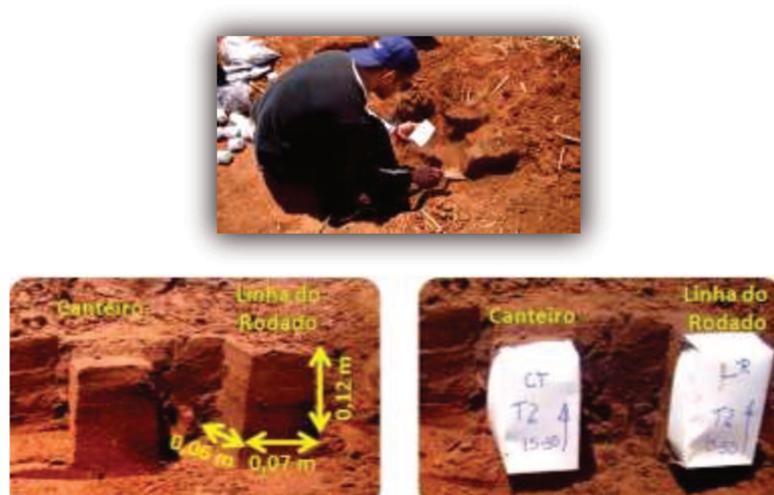
STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p. 755-760, 2004.

VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p. 381-386, 2014.

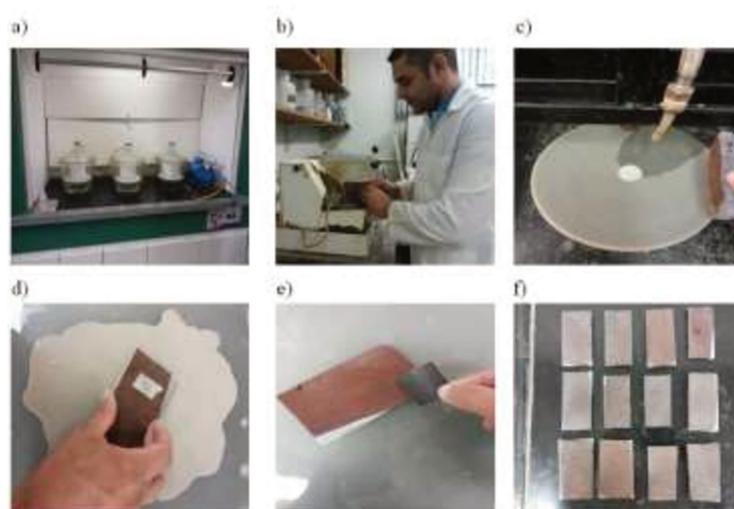
ANEXO



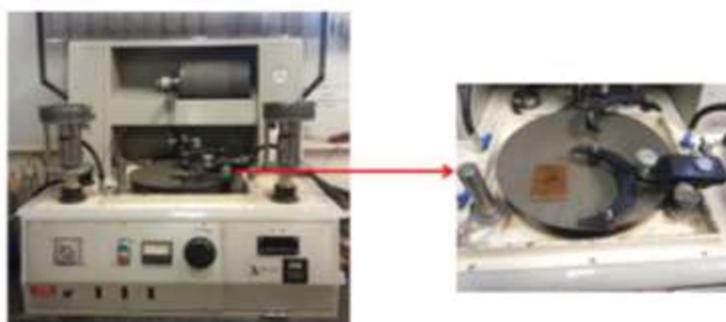
Imagens dos blocos impregnados e suas respectivas binarizações, utilizadas nas análises micromorfológicas.



Coleta de blocos para análise micromorfológica do solo em área cultivada com cana-de-açúcar.



Impregnação (a), corte (b), polimento grosseiro em pedra úmida (c), polimento suave em placa de vidro e pó abrasivo número 1200 (d), polimento leve com lixa d'água (e) e registro dos blocos polidos prontos para serem digitalizados (f).



Politriz, modelo LP 30, marca Logitech, utilizada no preparo da lâmina pedológica.



Blocos de solo impregnados sendo fotografados em microscopia.

CAPÍTULO IV

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM NEOSSOLO QUARTZAQRÊNICO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM TRÁFEGO CONTROLADO

RESUMO – O aumento do tráfego de máquinas em área de cana-de-açúcar tem sido o responsável pelo aumento de áreas compactadas e pela redução da disponibilidade hídrica às plantas. Assim, a adoção de técnicas que reduzem o tráfego de máquinas, como, por exemplo o uso de piloto automático e o uso de espaçamentos combinados, podem contribuir para a redução dessa problemática. Esse trabalho objetivou avaliar o intervalo hídrico ótimo (IHO) e a capacidade de suporte de carga (CSC) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar manejada com controle de tráfego de máquinas, por dois anos consecutivos. O experimento foi realizado na cidade de Nova Europa – SP, numa área experimental pertencente à usina Santa Fé. Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições e com três tratamentos: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m) e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m) e manejada com piloto automático. Foram avaliados a CSC, o IHO, a porcentagem de argila e o teor de carbono do solo. O aumento dos limites da resistência do solo a penetração considerados como críticos ao crescimento das plantas proporcionou uma maior amplitude ao intervalo. Observou um aumento no IHO dos tratamentos T2 e T3 no segundo ano de pesquisa, especialmente na LP e no CT. Houve uma redução nos valores de IHO do T1 do primeiro para o segundo ano de coleta. O IHO do T1 reduziu do primeiro para o segundo ano de coleta. Os modelos matemáticos para a capacidade de suporte de carga do solo dos três tratamentos estudados não apresentaram diferença entre si. O maior número de linhas plantadas proporcionado pelo T3 reduziu as áreas com maiores valores de capacidade de suporte de carga.

Palavras – chave: Estrutura do solo; umidade do solo; relação solo-máquina; água disponível.

CHAPTER IV

LEAST LIMITING WATER RANGE AND LOAD-CARRYING SOIL CAPACITY SOIL OF A TYPIC QUARTZIPISAMMENT UNDER SUGARCANE CULTIVATION WITH CONTROLLED TRAFFIC

ABSTRACT – The increase of machinery traffic in sugarcane areas has resulted in an increase in compacted areas and in the reduction of water availability to plants. Thus, the adoption of techniques that reduce traffic of machinery, such as the adoption of autopilot and the use of combined spacing can contribute to the reduction of this problem. The objective of this study was to evaluate the least limiting water range (LLWR) and the load-carrying capacity (LCC) of a Typic Quartzipisamment cultivated with sugarcane managed with traffic control of machinery for two consecutive years. The experiment was conducted in the city of Nova Europa – SP, in an experimental area within the Santa Fé mill. The experiment was carried out in a randomized block design (RBD), with four replicate and three treatments, based on the use of autopilot and different crop spacing. The treatments used included: T1 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed without autopilot; T2 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed with autopilot; T3 = sugarcane planted with combined double row spacing (1.5 x 0.90 m), and managed with autopilot. The LCC, the LLWR, clay percentage and the soil carbon content were evaluated. The increase in the limits of soil resistance to penetration (SRP), considered to be critical for the growth of plants, increased the amplitude of the interval. There was an increase in the LLWR within treatments T2 and T3 in the second year of the research, especially in the crop row and the seedbed. There was a reduction in the LLWR values in T1 from the first to the second year. The mathematical models for soil load bearing capacity of the three treatments studied showed no difference between them. The largest number of planted rows provided by the T3 reduced areas with higher load bearing capacity values.

Keywords: Soil structure; soil humidity; soil-machinery ratio; water availability.

1. INTRODUÇÃO

A mecanização da colheita da cana-de-açúcar tem se apresentado como a principal causa da compactação dos solos e um dos agentes responsáveis pela redução da produção da cultura.

A redução do espaço poroso do solo encontra-se intimamente relacionada com outras características e, que, portanto, comprometem o bom desenvolvimento dos vegetais. A exemplo disso destaca-se a disponibilidade de água às plantas, que é comumente conceituada como o intervalo hídrico compreendido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP).

Porém, esses atributos podem apresentar diferentes comportamentos em função das distintas classes de solos e manejos adotados, pois também são influenciados pela estrutura do solo, pela textura e pelo teor de matéria orgânica (TORMENA et al., 2007; BEUTLER et al., 2008; FREDDI et al., 2009). Além dos atributos de CC e PMP, a disponibilidade de água no solo conta ainda com a influência da resistência do solo à penetração (RSP) e da porosidade de aeração (PA) e, quando reunidas numa só análise, resultam na real disponibilidade de água, conceituada como intervalo hídrico ótimo (IHO).

Nas áreas de cana-de-açúcar, o estudo do IHO é recomendado em função da intensificação do tráfego de máquinas ocorrido nos últimos anos e, sua íntima relação com a redução do espaço poroso (ROQUE et al., 2011). O aumento da densidade do solo, por sua vez, relaciona-se de forma direta com a RSP, com o PMP e com a densidade do solo. Além disso, reduz a CC a PA e, por consequência, o intervalo entre hídrico disponível às plantas.

Outra análise que pode ser utilizada no monitoramento da qualidade física do solo diz respeito ao estudo da compressibilidade, que fornece informações sobre duas outras variáveis. Uma delas é a tensão de pré-consolidação, que reflete o valor máximo de carga que o solo pode receber sem que haja compactação adicional e, a segunda é o coeficiente de compressão, que representa o decréscimo do volume de um solo quando este é submetido à aplicação de uma pressão externa (ASSIS; LANÇAS, 2005; AJAYI et al., 2009; SILVA et al., 2010). Ressalta-se ainda, que a compressibilidade e a pressão de pré-consolidação são variáveis que relacionam-se de forma direta com a umidade e com o índice de compressão e, que, portanto, reduz a capacidade de suporte de carga do solo (SILVA; CABEDA, 2006).

Diante do exposto, torna-se necessária a adoção de tecnologias que minimizem a influência do tráfego de máquinas sobre a compactação do solo, á exemplo; o controle do tráfego de máquinas por meio de piloto automático e, a doção de espaçamento duplo combinado entre plantas. Essas tecnologias proporcionam a redução do tamanho da área

trafegada, e quando associadas, podem reduzir os problemas causados pela compactação promovida pelas máquinas.

Esse trabalho objetivou avaliar o intervalo hídrico ótimo e a capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar manejada com e sem controle de tráfego de máquinas, por dois anos consecutivos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado numa área experimental cultivada com cana-de-açúcar, instalada nas dependências da Usina Santa Fé, pertencente ao grupo Itaquerê, situada no município de Nova Europa – SP, com coordenadas 48° 34' 41,76" de longitude oeste e 21°53' 44,89" de latitude sul.

De acordo com a classificação de Köppen o clima da região é o tropical com estação seca. O índice pluviométrico anual é de 1340 mm e, a temperatura mínima e máxima são 16 e 29° C, respectivamente. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico, com aproximadamente 85% de areia.

No estudo foram avaliados três tratamentos com base no uso de piloto automático e na adoção de diferentes espaçamentos, são eles: T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m, T3 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso (DBC), com três tratamentos e quatro repetições, totalizando doze unidades experimentais. Cada parcela possuía dimensões de 30 x 50 m, conferindo 20 linhas de plantio aos tratamentos que utilizaram o espaçamento de 1,50 m e, 12 linhas duplas para o tratamento com espaçamento combinado de 1,50 x 0,90 m.

2.1 Intervalo hídrico ótimo

2.1.1 Coleta de amostras

As amostras foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m, nos pontos situados na linha do rodado (LR) e no canteiro (CT). Foram coletadas, em cada tratamento, 28 amostras de solo indeformado em anéis de aço inox com dimensões de 0,05 m x 0,05 m (Figura 17).

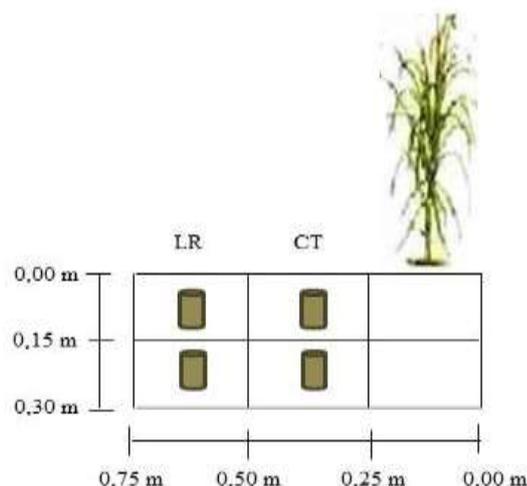


Figura 17. Esquema da trincheira utilizada para a realização da coleta de amostras indeformadas de solo, utilizadas na determinação do intervalo hídrico ótimo.

No laboratório, as amostras foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir 2/3 da altura dos anéis. Em seguida, as amostras foram submetidas a diferentes tensões (2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1.500 kPa), em câmaras de Richards com placas porosas (SILVA et al., 1994). Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e submetidas à análise de resistência do solo à penetração (RSP).

A RSP foi realizada em laboratório, com três repetições por anel, utilizando, para isso, um penetrômetro eletrônico de bancada da marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade constante de $1,0 \text{ cm min}^{-1}$. O aparelho é equipado com uma célula de carga de 200 N, uma haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° . Conta ainda com receptor e interface acoplado a um microcomputador utilizado para o registro das leituras.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105° C até atingirem um valor de massa constante. O teor de água no solo, em base volumétrica, foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra, em cada tensão e, o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação entre a massa de solo seco e volume do cilindro (EMBRAPA, 2011).

Os dados de resistência do solo à penetração (RSP) foram ajustados em função da densidade do solo e da umidade volumétrica (Equação 4), usando o modelo não linear recomendado por Busscher (1990) e Leão et al. (2006).

$$RSP = a * D_S^b * \theta^c \quad (4)$$

em que: RSP é a resistência do solo à penetração (MPa); D_S é a densidade do solo (kg m^{-3}); θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); a , b e c são os coeficientes do modelo. Determinou-se o teor de água no solo para cada densidade na qual se atingiu a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (SILVA et al., 1994).

A curva de retenção de água no solo, que relaciona o potencial matricial, a umidade volumétrica e a densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena et al. (1998) e Leão et al. (2006), conforme Equação 5:

$$\theta = \exp(a + b * D_S) * \psi^c \quad (5)$$

em que: θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ψ é o potencial matricial (MPa); D_S é a densidade do solo (kg m^{-3}); a , b e c são os coeficientes de ajuste do modelo.

Por meio da Equação 6, determinou-se a variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na tensão de 0,01 MPa (HAISE et al., 1955), e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996) em função da D_S . A porosidade de aeração (PA) mínima adotada foi de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerando que esse é o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA (θ_{PA}) foi calculado pela Equação 6:

$$\theta_{PA} = \left[1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad (6)$$

em que: θ_{PA} é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), considerando uma porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; D_P e D_S são a densidade de partículas (kg m^{-3}) e do solo (kg m^{-3}), respectivamente. A densidade de partícula foi medida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011).

Para determinar o IHO, utilizou-se o método descrito por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Os valores de θ_{RSP} , θ_{PA} , θ_{CC} e θ_{PMP} foram linearizados, utilizando a transformação logarítmica, considerando como limites superiores a θ_{CC} e a θ_{PA} e, como limites inferiores o θ_{PMP} e a θ_{RP} . A densidade do solo tida como crítica ao crescimento e

desenvolvimento das plantas (D_{SC}) foi considerada como sendo aquela em que o IHO foi igual a zero.

2.1.2 Curva de retenção

A curva de retenção foi realizada em panelas de Richards nos pontos correspondentes a 2, 6, 8, 10, 33 e 100 kPa (KLUTE, 1986). Para a determinação da capacidade de retenção de água no solo submetidos às tensões de 500 e de 1500 kPa, utilizou-se o aparelho WP4, que constitui-se num sistema com uma entrada do tipo gaveta, que conduz a amostra de solo úmida e deformada para dentro de uma câmara com fechamento hermético.

Dentro da câmara ocorre um equilíbrio da umidade com o potencial da água na matriz, que foi calculado pela temperatura do solo e do ar, no ponto de orvalho. Antes de serem levadas ao aparelho, as amostras foram umedecidas até atingirem, por tentativas, uma ampla faixa de variação de teor de água no solo.

As amostras foram submetidas a uma variação de potencial entre 500 e 1500 kPa, visto que, para obter pressões menores, é necessário um teor de água mais elevado nas amostras, o que reduz a eficiência do aparelho. Além disso, pelo fato de se utilizarem amostras de solo deformadas, não recomenda-se o emprego dessa metodologia para substituir as pressões menores que 100 kPa, pois a estrutura do solo apresenta-se como importante variável de retenção nessa faixa de pressão. Após a obtenção da curva de retenção, ajustou-se uma equação para obter a umidade gravimétrica do solo para outros potenciais.

2.2 Capacidade de suporte de carga do solo

2.2.1 Coleta de solo

Nos mesmos pontos de coleta e camadas utilizadas na amostragem de solo para o IHO, foram coletadas quinze amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos de aço inoxidável com dimensões de 0,060 x 0,025 m. As amostras de estrutura preservada foram saturadas e depois secas ao ar para se obter uma ampla faixa de umidade variando de solo seco a saturado, simulando condições extremas de umidade do campo (DIAS JÚNIOR, 1994; SILVA et al., 2009). Nesse estudo adotou-se as umidades de 5%, 10%, 15%, 20% e solo saturado.

A pressão de pré-consolidação foi quantificada por meio do ensaio de compressão uniaxial, aplicando cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa nas amostras indeformadas (DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995). Cada pressão foi aplicada até a amostra atingir 90% da deformação máxima (TAYLOR, 1971).

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em consolidômetro automático, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, acionado pelo software Linker® (SILVA et al., 2007). As medidas de deformação das amostras para cada pressão aplicada durante o ensaio foram realizadas por meio de um transdutor de deslocamento vertical e registradas por meio de um sensor com aquisição automatizada de dados.

Após o ensaio de compressão, as amostras foram secas em estufa a 105° C até adquirirem massa constante para determinação da densidade do solo (EMBRAPA, 2011). A partir da curva de compressão (densidade do solo x pressão), estimou-se a pressão de pré-consolidação, conforme Dias Júnior (1994) e Dias Júnior e Pierce (1995). As Curvas de compressão foram obtidas para as amostras em diferentes teores de água, permitindo construir o modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo proposto por Dias Júnior (1994) (Equação 7).

$$\sigma_p = 10^{(a+b*U)} \quad (7)$$

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

2.3 Análise granulométrica e Carbono orgânico total

Foram determinadas as frações de areia, silte e argila pelo método da pipeta, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) a 0,10 mol L⁻¹, como agente dispersante (CAMARGO et al., 1986). O carbono orgânico total foi determinado por oxidação, empregando, para isso, solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,167 mol L⁻¹ em meio fortemente ácido e com fonte externa de calor (YEOMANS; BREMNER, 1988).

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey (p<0,05), utilizando o sistema computacional Sisvar, versão 5.1 Build 72 (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Intervalo hídrico ótimo

Não foi verificada diferença entre os valores de umidade (p<0,05) dos distintos pontos de coleta. Isso permitiu que uma única curva, para cada tratamento, fosse capaz de

explicar o comportamento da retenção de água do solo nas diferentes pressões, utilizando, o método de Van Genuchten (1980).

Tais comportamentos traduzem uma distribuição igualitária da microporosidade do solo nos diferentes sistemas de manejo, o que proporcionou um volume de água disponível (AD) semelhante entre os diferentes tratamentos estudados (Figura 18).

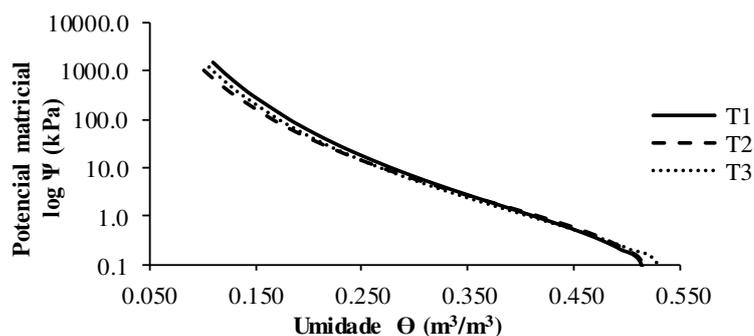


Figura 18. Curva de retenção de água do solo de um Neossolo Quartzarênico. T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,50 m e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,50 m e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado de 1,5 x 0,90 m e manejada com piloto automático.

Na Tabela 34 encontram-se descritos os parâmetros de ajuste da curva de retenção do Neossolo Quartzarênico para os três tratamentos estudados, pelo método de Van Genuchten (1980).

Tabela 34. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água pelo método de van Genuchten para os solos cultivados com cana de açúcar.

Manejo	Parâmetros de ajuste de curva				
	A	m	n	θ S	θ R
T1	0,0431	0,8968	0,2903	0,587	0,153
T2	0,1022	0,5982	0,4381	0,563	0,137
T3	0,1119	0,4890	0,4841	0,527	0,143

T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,5 m e manejada sem piloto automático, T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,5 m e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento de 1,5 x 0,90 m e manejada com piloto automático.

Com a continuidade do tráfego de máquinas, nos ciclos seguintes, espera-se que haja uma redistribuição da porosidade do solo nos diferentes pontos de coleta e, por consequência disso, uma mudança no comportamento da curva de retenção. Esse resultado é esperado, sobretudo, nos locais situados próximos da linha do rodado, que estão mais sujeitos ao aumento da microporosidade decorrente da redução de poros maiores. Essa hipótese

baseia-se em resultados encontrados por alguns autores que verificaram maior capacidade de retenção de água no solo em áreas submetidas ao tráfego de máquinas (SOUZA, 2012; ROQUE, 2010).

As maiores diferenças apresentadas nas curvas ocorreram basicamente nas menores tensões e são atribuídas, especialmente, à estrutura do solo, no que se refere a distribuição dos poros. Isso se justifica pela menor interferência da estrutura no processo de retenção, quando o solo encontra-se submetido a elevadas pressões, tornando o teor de matéria orgânica e a textura, os atributos que mais influenciam no processo de retenção, em especial, pelo teor de argila. A Tabela 35 apresenta o teor de argila verificada entre os tratamentos, nos distintos pontos de coleta e camadas estudadas.

Tabela 35. Teor de argila de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Argila (g kg ⁻¹)							
Cana planta							
T1	110,0 Aa	105,7 Aa	107,5 Aa	111,6 Aa	103,5 Aa	100,2 Aa	105,1 A
T2	106,1 Aa	105,0 Aa	101,2 Aa	102,5 Aa	105,2 Aa	106,0 Aa	104,5 A
T3	105,2 Aa	102,2 Aa	108,0 Aa	107,2 Aa	103,5 Aa	101,2 Aa	103,96 A
Média	107,1 A	104,3	105,5	107,1	105,5	104,3	
CV%				4,89			
Cana soca							
T1	100,5 Aa	110,1 Aa	110,3 Aa	113,5 Aa	98,0 Aa	110,0 Aa	107,0 A
T2	110,5 Aa	107,6 Aa	117,5 Aa	108,8 Aa	109,8 Aa	117,0 Aa	111,8 A
T3	111,8 Aa	118,3 Aa	116,5 Aa	113,8 Aa	117,8 Aa	115,0 A	115,5 A
Média	107,6 a	112,0 a	114,7 a	112,0 a	108,5 a	114,0 a	
CV (%)				11,0			

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = Espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = Espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

A Tabela 36 apresenta o teor de carbono orgânico total verificado entre os diferentes tratamentos, nos distintos pontos de coleta e camadas avaliadas. A análise dessa variável fez-se necessária em função da influência que a matéria orgânica possui no processo de retenção de água no solo.

Tabela 36. Teor de carbono orgânico de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Carbono (g.dm ⁻³)							
Cana planta							
T1	12,00 Aa	15,25 Aa	14,25 Aa	13,00 Aa	14,00 Aa	14,00 Aa	13,83 A
T2	15,00 Aa	14,75 Aa	13,25 Aa	13,50 Aa	15,00 Aa	14,00 Aa	13,50 A
T3	13,75 Aa	13,75 Aa	13,25 Aa	10,84 Aa	10,45 Aa	10,40 Aa	14,41 A
Média	13,58 a	14,58	13,58 a	13,58 a	14,58 a	13,58 a	
CV%	17,49						
Cana soca							
T1	14,66 Aa	14,66 Aa	15,60 Aa	14,66 Aa	15,00 Aa	15,20 Aa	14,95 A
T2	13,66 Aa	14,33 Aa	14,33 Aa	15,33 Aa	13,66 Aa	13,31 Aa	14,10 A
T3	13,66 Aa	14,30 Aa	14,33 Aa	15,33 Aa	13,00 Aa	14,00 Aa	14,11 A
Média	13,99 a	14,43 a	14,75 a	15,10 a	13,88 a	14,17 a	
CV (%)	15,22						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = Espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Como não houve diferença entre as curvas de retenção de água no solo, para os diferentes tratamentos, nem entre os atributos de granulometria e carbono, construiu-se apenas um único modelo para explicar a disponibilidade de água do solo, nos dois anos de estudo.

Desta forma, o IHO ficou condicionado apenas à variação da estrutura, ou seja, pela densidade do solo, visto que as outras variáveis que influenciam na retenção de água, apresentaram-se estatisticamente iguais durante os dois anos de estudo (Tabelas 35 e 36).

O modelo de resistência do solo à penetração, em função da densidade e do conteúdo de água do solo, explicou 67% da variabilidade dos dados (Tabela 37). A resistência do solo à penetração apresentou relação positiva com a densidade e negativa com a umidade, corroborando com Tormena et al. (1998), Leão et al. (2004) e Freddi et al. (2009).

Tabela 37. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para resistência do solo à penetração (RP = MPa) em função do conteúdo de água no solo ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo (Ds = Mg m⁻³): $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$.

	Parâmetros	Erro padrão	T	Probabilidade
A	-0,75133	0,263003	-2,85627	<0,0001
B	-0,58315	0,104007	5,35009	<0,0001
C	-2,77597	0,518864	5.65505	<0,0001
R ²				67%

O R^2 da análise de regressão utilizado no ajuste dos valores da curva de retenção, com base na densidade do solo e no potencial matricial, apresentou valor significativo de 79% (Tabela 38). Esse valor foi menor do que os observados por Tormena et al. (2007) num Latossolo sob plantio direto com rotação e escarificação ($R^2 = 91\%$) e apenas com rotação ($R^2 = 93\%$) (Tabela 30). Calonego et al. (2011) também verificaram R^2 acima de 80% para um Nitossolo cultivado com milho e braquiária.

Tabela 38. Estimadores dos parâmetros da regressão linear para conteúdo de água do solo ($\theta = m^3 m^{-3}$) em função da densidade do solo ($Ds = Mg m^{-3}$) e do potencial matricial do solo ($\theta = kPa$): $\ln \theta = d + e Ds + f \ln \theta$.

	Parâmetros	Erro padrão	T	Probabilidade
<i>D</i>	-0,42	0,14726	-2,90913	<0,0001
<i>E</i>	1,51	0,26831	5,65055	<0,0001
<i>F</i>	-0,55	0,06470	-8,60290	<0,0001
R^2				79%

Por meio dos coeficientes estimados que encontram-se descritos nas Tabelas 37 e 38, construiu-se um modelo para estimativa da resistência do solo à penetração e do conteúdo de água no solo, utilizando as equações 8 e 9, respectivamente.

$$RSP = \exp^a * \theta^b * Ds^c \quad (8)$$

$$\Theta = (RP / (\exp^a * Ds^c))^{1/b} \quad (9)$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração (MPa); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($m^3 m^{-3}$).

Para a estimativa do conteúdo de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, a partir da densidade do solo, utilizou a Equação 10.

$$\Theta = \exp^{(d+e*DS)*\psi^f} \quad (10)$$

em que: θ é o conteúdo de água do solo ($m^3 m^{-3}$); Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e ψ é o potencial matricial com valor de 1,5 kPa para o PMP e 0,01 para a CC (kPa).

Os coeficientes demonstraram que o conteúdo de água variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com o potencial matricial, concordando com Tormena et al. (1998), Leão et al. (2004), Freddi et al. (2009) e Silva et al. (2011) (Tabela 38). Roque et al. (2011) ao avaliarem o comportamento do IHO de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego, verificaram que o gráfico do tratamento sem controle apresentou os

menores valores de IHO, indicando que o tráfego controlado permitiu reduzir os efeitos adversos ao solo proporcionados pelo trânsito do maquinário.

Verificou-se médias de RSP acima dos valores considerados como críticos para a maioria dos vegetais (< 2,00 MPa), especialmente na cana soca (Tabela 39), o que justificou a construção de gráficos com diferentes valores limitantes de resistência do solo à penetração.

Tabela 39. Resistência do solo à penetração (RSP) de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar e manejado com controle de tráfego e diferentes espaçamentos em cana planta e soca.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)			Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
Resistência do solo à penetração (MPa)							
Cana planta							
T1	2,32 Aa	2,20 Aa	1,80 Aa	2,10 Aa	2,20 Aa	2,00 Aa	2,10A
T2	2,51 Aa	2,20 Aa	1,90 Aa	2,30 Aa	2,20 Aa	2,10 Aa	2,20A
T3	2,30 Aa	2,00 Aa	1,60 Aa	2,10 Aa	1,90 Aa	1,90 Aa	1,96A
Média	2,35 a	2,13 a	1,76 a	2,16 a	2,10 a	2,00 a	
CV (%)	15,51						
Cana soca							
T1	3,29Aa	2,81Aa	2,45Aa	3,77Aa	2,68Aa	2,10Aa	2,85A
T2	3,52Aa	2,74Aa	2,45Aa	3,92Aa	2,79Aa	1,99Aa	2,56AB
T3	2,47Aa	2,20Aa	2,10Aa	2,95Aa	2,05Aa	1,76Aa	2,25B
Média	3,09 a	2,58 ab	2,33 b	3,55 a	2,51b	1,95 b	
CV (%)	14,12						

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = lspaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = spaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

O IHO, representado pela área hachurada, mostra a variação de umidade do solo em que as limitações para o desenvolvimento das plantas aparecem como mínimas e máximas, utilizando a RSP limitante entre os valores de 2,00 e 4,50 MPa (Figura 19).

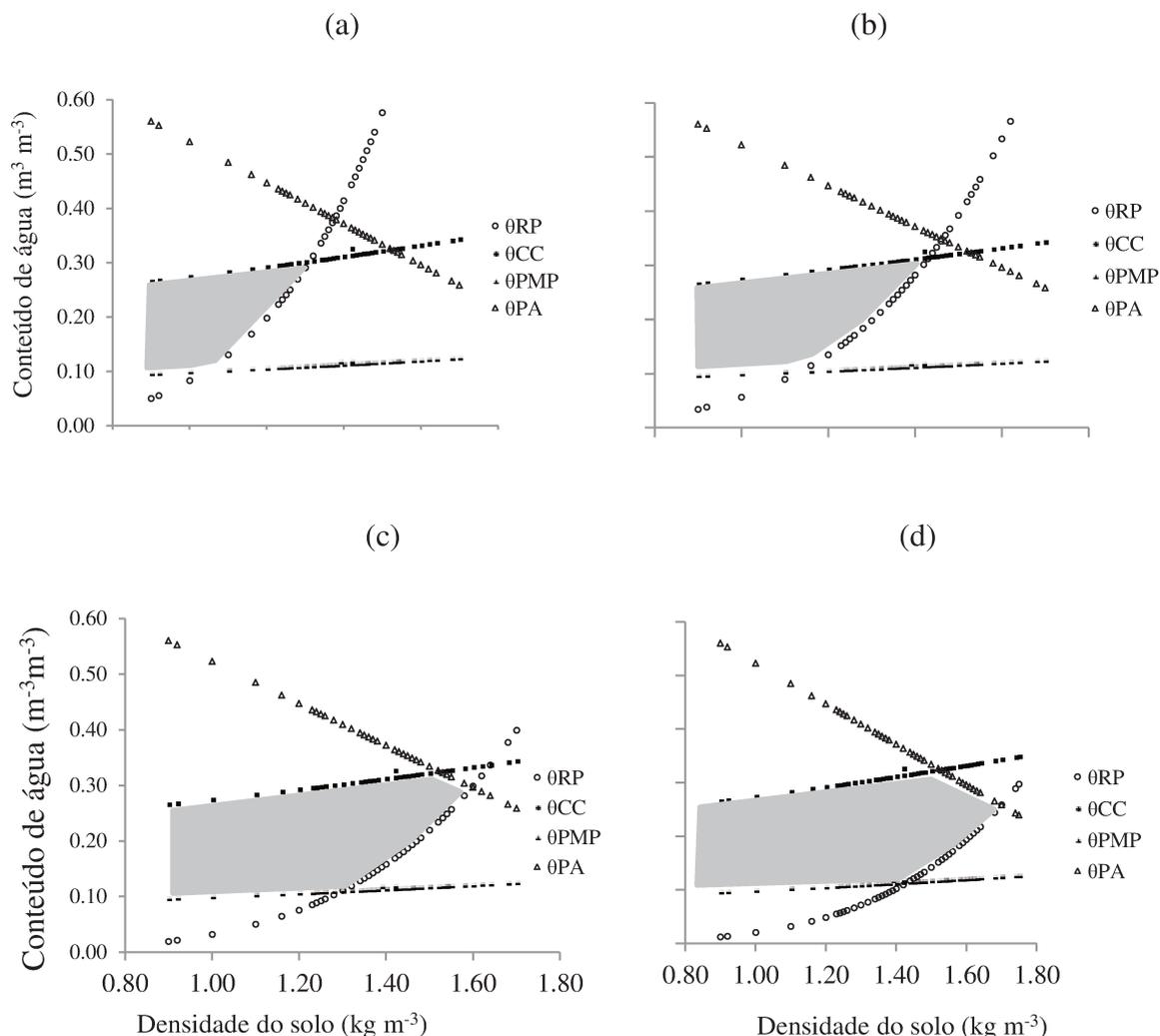


Figura 19. Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo de um Neossolo Quartzarênico nos níveis críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração limitante (RSP) de 2,00 (a), 2,50 (b), 3,50 e 4,50 MPa (d).

Ao analisar os gráficos, observou-se que a densidade do solo apresentou uma relação negativa com a porosidade de aeração (PA), considerando, nesse trabalho, o valor mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, para que haja condições adequadas de circulação de gases na matriz do solo (SILVA et al., 1994). Esse resultado é explicado pela redução do tamanho dos poros, sobretudo dos macroporos, que pode ter contribuído para o aumento da capacidade de campo, dessa forma, justificando a relação positiva dessa variável com a densidade do solo, corroborando com Viana et al. (2011) e Roque et al. (2011).

O limite inferior do IHO foi limitado pelo ponto de murcha (PMP), até a densidade do solo de 1,05; 1,16; 1,30 e 1,45 Mg m^{-3} , para as condições em que a resistência à

penetração limitante foi de 2,00; 2,50; 3,50 e 4,50 MPa, respectivamente (Figura 19). A partir desses valores, em todas as situações, as restrições do limite inferior do IHO foram geridas pela resistência do solo à penetração (RSP). Com relação ao limite superior, a capacidade de campo (CC) foi à única variável limitante para as situações em que as resistências do solo assumiram os valores de 2,00 e 2,50 MPa.

Nas condições em que as resistências limitantes foram de 3,50 e 4,50 MPa, observaram-se dois limites superiores para o IHO (Figura 20c e 20d). Nessas situações, o limite superior até então restringido apenas pela CC, limitou-se também à PA, a partir da densidade e $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$, para as duas situações.

O aumento dos limites de resistência, também proporcionou um aumento nos valores de densidade do solo consideradas como críticas (Figura 20). Para os limites de 2,00; 2,50; 3,50 e 4,50 MPa, os valores de densidade do solo em que os limites superiores e inferiores igualaram-se, e que, portanto, o IHO apresentou valor zero, foram 1,37; 1,47; 1,60 e $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$, nessa ordem. Souza (2012) também verificou um aumento nos valores de densidade crítica com o aumento dos limites de RSP.

Determinou-se a densidade do solo em que o IHO apresentou maior amplitude, e que por isso foi considerada como sendo a densidade ótima (Figura 20). Para os limites de RSP de 2,00; 2,50; 3,50 e 4,50 MPa, os valores de densidade ótima (DO) encontrados foram de 0,92; 1,16; 1,30 e $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente. Correspondente a esses valores, verificou-se uma amplitude de 0,17 e $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^3$, respectivamente, para os limites de RSP de 2,00 e 2,50 MPa, enquanto as resistências de 3,50 e 4,50 MPa apresentaram o mesmo valor de amplitude, $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

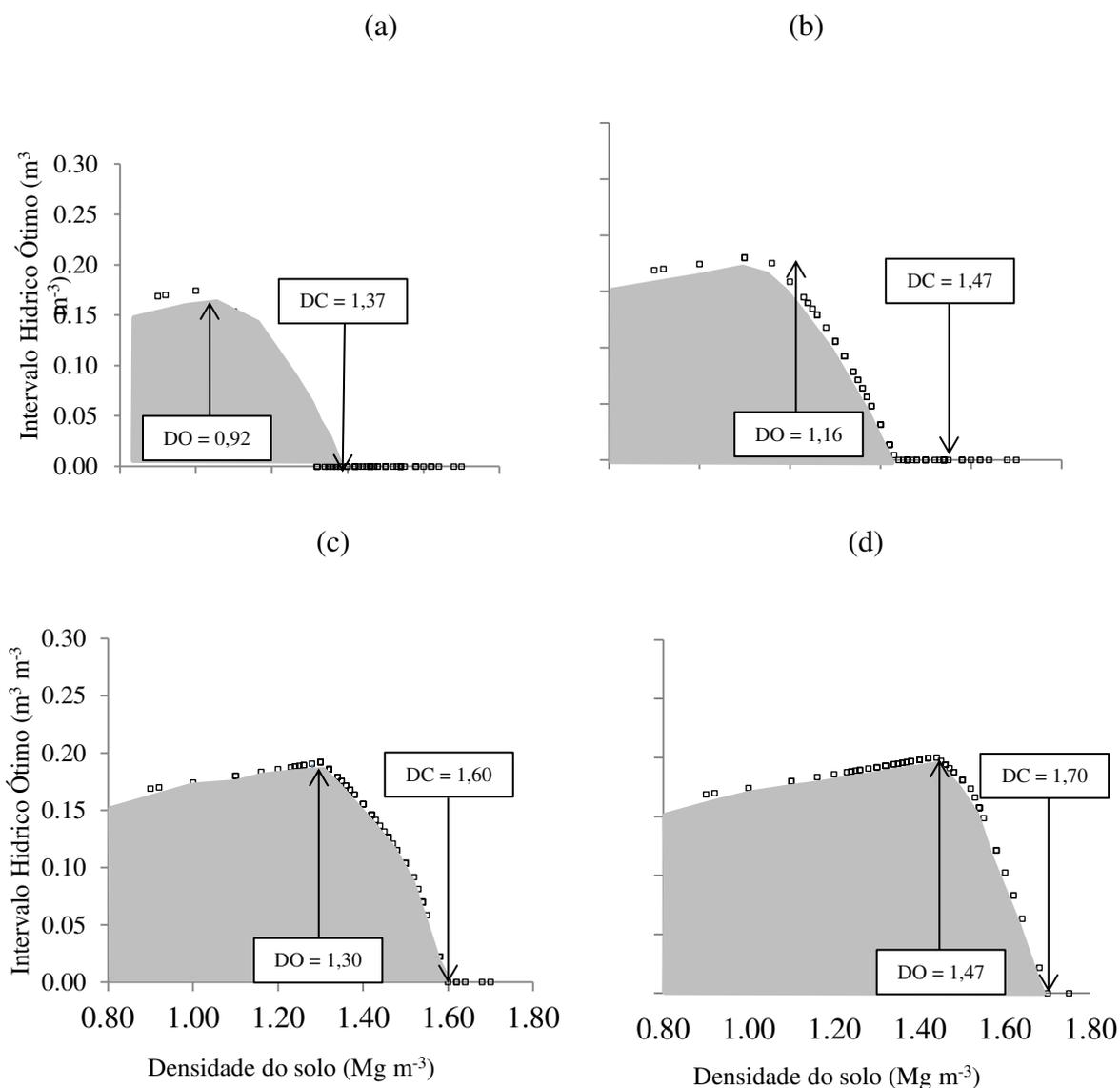


Figura 20. Variação do intervalo hídrico ótimo de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar em função da densidade do solo com resistência limitante de 2,00 (a), 2,50 (b), 3,50 (c) e 4,50 MPa (d). DO= densidade ótima e DC = Densidade crítica.

Verificou-se, que o aumento da densidade do solo variou o comportamento do IHO de forma crescente, até atingir a DO (Figura 20). Após isso, observou-se decréscimo na amplitude do intervalo, tornando-o igual à zero na densidade crítica (DC). Cavalieri et al. (2011) verificaram redução do IHO em dois Latossolos, sendo um argiloso e outro de textura média e, também num Argissolo Vermelho Amarelo, ambos submetidos ao cultivo mecanizado de cana-de-açúcar no Mato Grosso do Sul.

Não houve diferença entre o IHO dos diferentes tratamentos dentro dos pontos de coleta estudados nos dois anos de pesquisa (Figura 21). Observou-se, no período

correspondente a cana soca, aumento dos valores de IHO, especialmente nos tratamentos T2 e T3, quando comparados aos valores obtidos no primeiro ano. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato das médias de densidade do primeiro ano, terem apresentado valores abaixo da DO, seguido de um aumento no ciclo seguinte, devido ao tráfego de máquinas. Tal evento pode ter contribuído para que as densidades observadas no segundo ano atingissem valores próximos, ou iguais a DO, e que, portanto, proporcionaram um maior IHO.

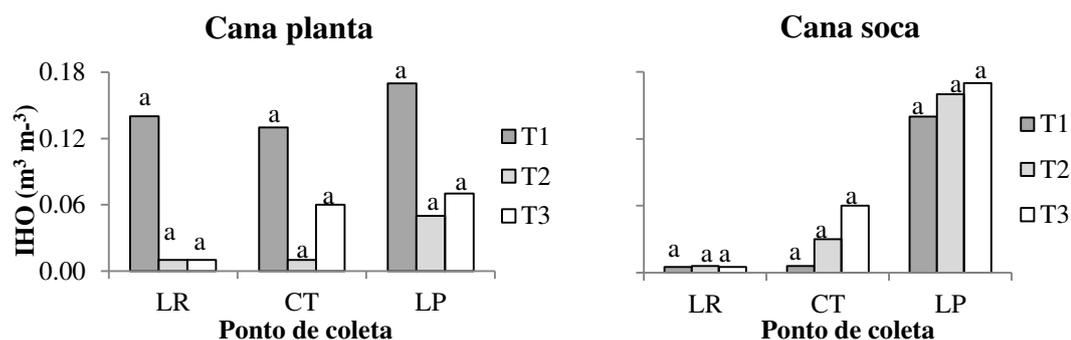


Figura 21. Intervalo hídrico ótimo de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana de açúcar sob diferentes manejos. LR = linha do rodado; CT = canteiro; LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m), com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m), com piloto automático.

No segundo ano, a LR, nos três tratamentos estudados, apresentou os menores valores de IHO, quando comparado aos demais pontos de coleta (Figura 21). Esse comportamento indica sérias restrições ao crescimento da planta na linha do rodado, podendo intensificar-se nos próximos anos devido à passagem das máquinas e a ausência do revolvimento do solo. Em consonância, é esperado para os anos seguintes, uma redução do IHO no sentido LP > CT > LR.

Essa justificativa se reafirma com os resultados encontrados por Araújo et al. (2013), ao estudarem a espacialização do IHO em um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar, no qual verificaram que nas áreas com intensa movimentação de máquinas ocorre redução da disponibilidade de água, quando comparada a áreas com menor intensidade de tráfego.

3.2 Capacidade de suporte de carga do solo (CSC)

Observou-se redução da CSC do solo em função do aumento da umidade do solo em todos os pontos de coleta e camadas estudadas (Tabela 40). O aumento da umidade relaciona-se de forma direta com a redução do atrito entre as partículas do solo, que por sua vez, facilita a acomodação dos sólidos e resulta na diminuição do espaço poroso (PACHECO; CANTALICE, 2011; SOUZA et al., 2012; VISCH FILHO et al., 2015).

Tabela 40. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos e uso piloto automático, por dois ciclos.

-----Tratamentos-----			Modelo	R ²
Cana soca				
T1	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,19-0,61U)}$	0,83*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(3,02-0,53U)}$	0,84*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,16-0,59U)}$	0,73*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,98-0,55U)}$	0,56*
T2	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,16-0,51U)}$	0,98*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,86-0,35U)}$	0,89*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,14-0,51U)}$	0,87*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,95-0,41U)}$	0,95*
T3	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(2,99-0,44U)}$	0,83*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,89-0,41U)}$	0,83*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,13-0,51U)}$	0,73*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,89-0,38U)}$	0,67ns
Cana soca				
T1	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,22-0,54U)}$	0,86*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(3,11-0,52U)}$	0,98*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,24-0,55U)}$	0,77*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(3,07-0,45U)}$	0,78*
T2	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,15-0,52U)}$	0,84*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,98-0,44U)}$	0,79*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,13-0,43U)}$	0,95*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(2,90-0,32U)}$	0,86*
T3	CT	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,09-0,46U)}$	0,85*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(3,17-0,57U)}$	0,74*
	LP	0,00 – 0,15	$\sigma_p=10^{(3,13-0,50U)}$	0,86*
		0,15 – 0,30	$\sigma_p=10^{(3,08-0,54U)}$	0,79*

*= modelo significativo ($p>0,05$); Ns = modelo não significativo ($p>0,05$).

O acomodamento das partículas do solo é facilitado pelo efeito lubrificante proporcionado pelo filme de água envolto dos sólidos do solo, responsável por diminuir a coesão entre os corpos, que, por consequência, reduz a CSC. Dessa forma, o aumento da umidade torna o solo mais vulnerável à compactação, especialmente nos pontos situados próximos das zonas de tráfego e, com menor influência na linha do canteiro (Figuras 22 e 23).

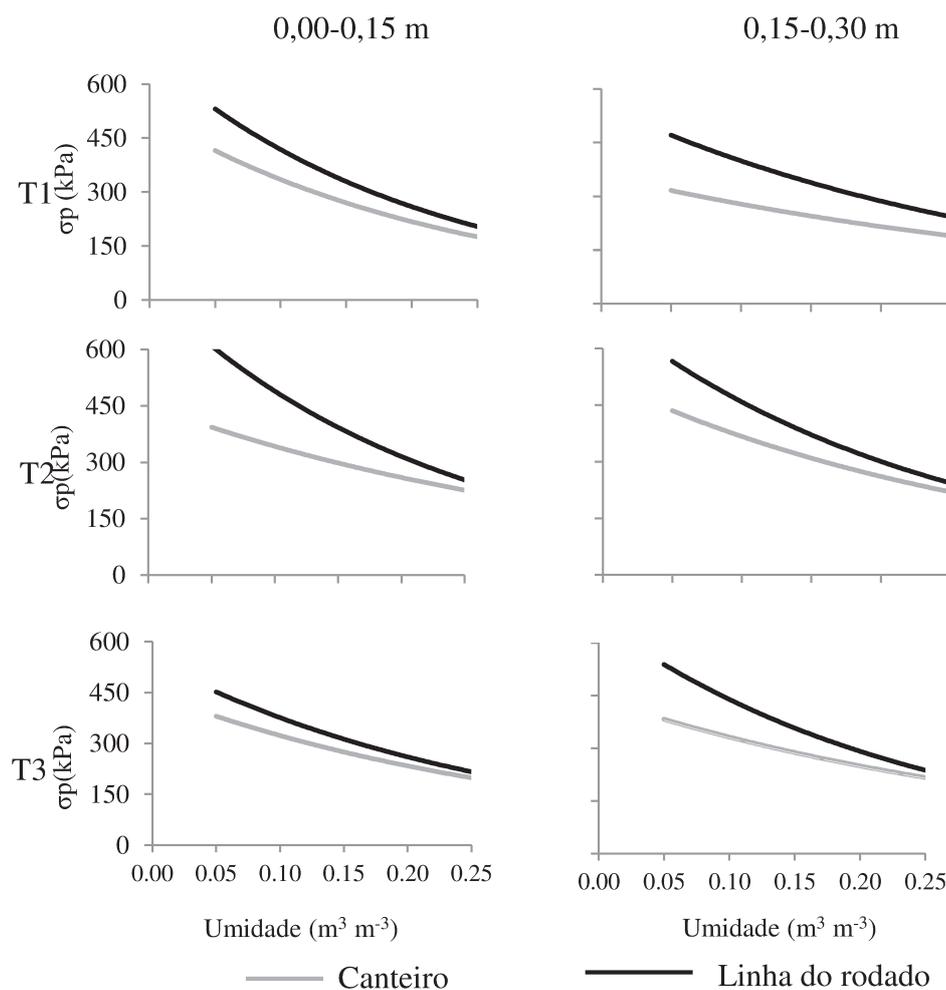


Figura 22. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar (cana planta). T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m sem piloto automático T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples de 1,50 m com piloto automático ; e T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo de 1,50 x 0,90 m com piloto automático.

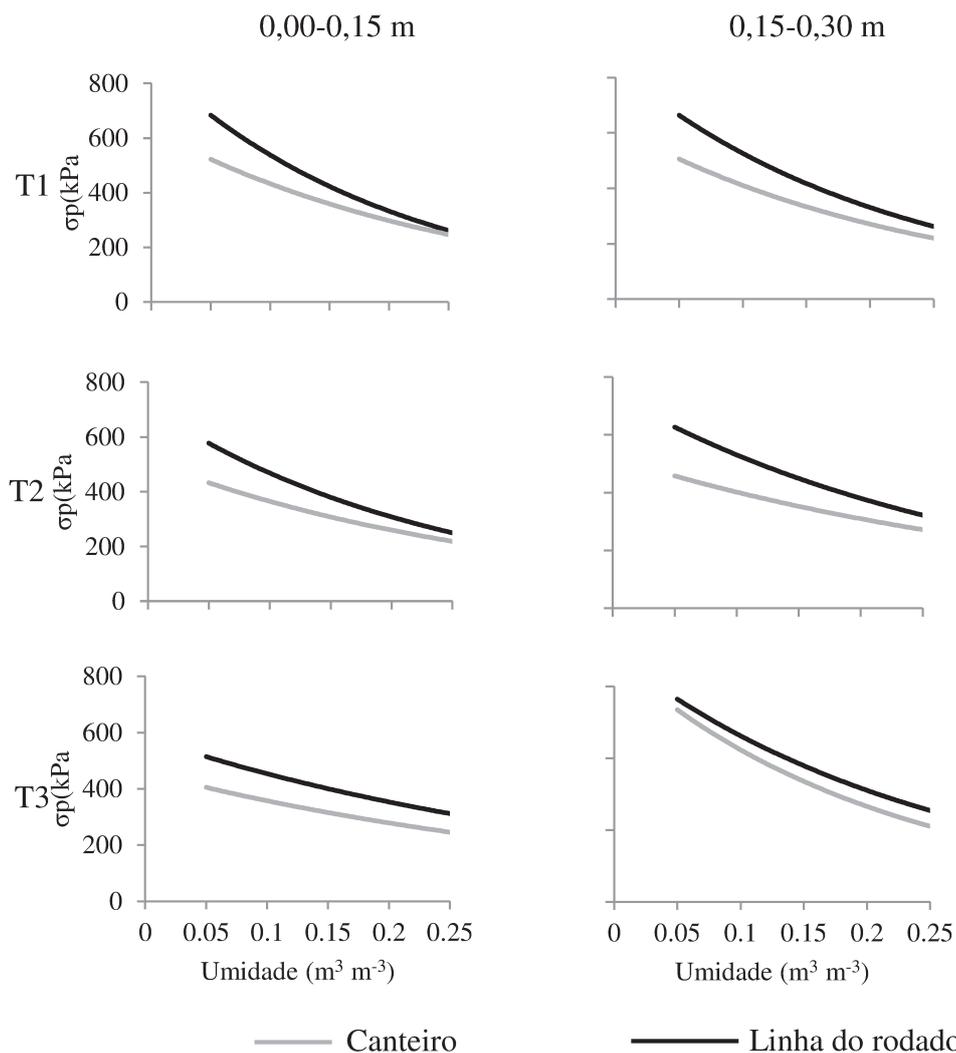


Figura 23. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Neossolo Quartzarênico cultivado com cana-de-açúcar (cana soca). T1 = cana-de-açúcar cultivada com espaçamento simples de 1,50 m sem piloto automático T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples de 1,50 m com piloto automático; e T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo de 1,50 x 0,90 m com piloto automático.

Em todos os tratamentos estudados, o canteiro apresentou menor CSC em comparação a linha do rodado, que é justificado pela menor pressão do tráfego exercida sobre esse ponto (Figuras 22 e 23). Os modelos matemáticos encontrados não apresentaram diferença estatística entre si pelo teste F de Snedecor e Cochran (1989), a 5% de significância, para os dois anos de pesquisa.

Dessa forma, qualquer modelo adotado entre os tratamentos no primeiro e no segundo ano, separadamente, poderá explicar o comportamento da CSC do solo em função da umidade (Tabela 41). De acordo com Silva et al. (2006), a etapa de preparo do solo, procedida de igual maneira em todos os tratamentos, e caracterizada pelo intenso revolvimento, pode ter proporcionado a homogeneização da CSC entre as camadas estudadas. Associado a isso, o tempo de adoção dos tratamentos foi insuficiente para promover mudanças significativas, entre os valores encontrados.

Tabela 41. Teste de significância comparando os modelos de suporte de carga do solo entre pontos de coleta em áreas com diferentes sistemas de manejo de cana.

Comparações entre manejos ⁽¹⁾	Ponto de coleta	Estatística		
		F	a	b
T1 x T2	LR 0,00-0,15	ns	ns	ns
	CT 0,00-0,15	ns	ns	ns
	LR 0,15-0,30	ns	ns	ns
	CT 0,15-0,30	ns	ns	ns
T1 x T3	LR 0,00-0,15	ns	ns	ns
	CT 0,00-0,15	ns	ns	ns
	LR 0,15-0,30	ns	ns	ns
	CT 0,15-0,30	ns	ns	ns
T2 x T3	LR 0,00-0,15	ns	ns	ns
	CT 0,00-0,15	ns	ns	ns
	LR 0,15-0,30	ns	ns	ns
	CT 0,15-0,30	ns	ns	ns

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

O T3 proporciona a existência de uma maior área com menores valores de CSC, visto que, o arranjo das linhas de plantio proporcionado por esse tratamento, aumentou o número de soqueiras e, em consonância, de canteiros não trafegados entre as fileiras duplas.

Na pesquisa de Souza et al. (2012), os autores verificaram que o controle de tráfego de máquinas em área de cana-de-açúcar reduziu a CSC de um Latossolo Vermelho na região da linha de plantio, nas camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m. Pacheco e Cantalice (2011), afirmam que, com o decorrer dos ciclos, em área de cana-de-açúcar, ocorre degradação do solo com aumentos nos valores de CSC e, recomendam o uso desta análise no planejamento de plantio e para o diagnóstico de compactação do solo.

Para os próximos ciclos espera-se que ocorra em todos os tratamentos, um aumento nos valores de CSC na região do canteiro, por estar localizado mais próximo das linhas de tráfego, especialmente do tratamento que não utiliza a orientação do piloto automático. Essa expectativa baseia-se nos resultados encontrados por Visch Filho et al.

(2015), ao verificarem maiores valores de CSC num Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar mecanizada por três anos, em comparação a uma área com apenas um ciclo.

4. CONCLUSÕES

Observou-se aumento no intervalo hídrico ótimo dos tratamentos que utilizaram piloto automático no segundo ano de pesquisa, especialmente na linha de plantio e no canteiro. Houve redução nos valores de intervalo hídrico ótimo do tratamento que não utilizou o piloto automático, do primeiro para o segundo ano de coleta.

Os modelos matemáticos para a capacidade de suporte de carga do solo dos três tratamentos estudados não apresentaram diferença entre si.

O maior número de linhas plantadas devido a adoção do espaçamento duplo reduziu as áreas com maiores valores de capacidade de suporte de carga.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JUNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, n.1, p. 122-127, 2009.

ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S.; Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistema de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 651-660, 2013.

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

BEUTLER, A. N.; CENTURION J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, n.4, p. 519-524, 1990.

CALONEGO, J. C.; BORGHI E.; CRSCIOL, C. A. C.; Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 211-219, 2011.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p.

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.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p. 199-238, 1988.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Tese de Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J.A. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curve. **Soil Technology**, Cremligen, v.8, n.2, p. 139-151, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011, 230 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II – Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 805-818, 2009.

HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moistures tudies of some great plains soils.II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15–26-atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.34, n.1, p. 20-25, 1955.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-662.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p. 415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n.1-2, p. 279-285, 2006.

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.

ROQUE, A. A. O. Controle de tráfego em área cultivada com cana-de-açúcar. 2010. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p. 1536-1542, 2011.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; BLAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p. 844-851, 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, T. G.; ARAÚJO JUNIOR, C. F.; Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 30, n. 2, p. 207-216. 2006.

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

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

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; 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 JUNIOR, 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. 376-3789, 2010.

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

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

SOUSA, G. S. Controle de tráfego Agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar. 2012. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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.

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

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p. 573-581, 1998.

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

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

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.

VISCHI-FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; SILVA, R. B. ET AL. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.4, p. 322-332, 2015.

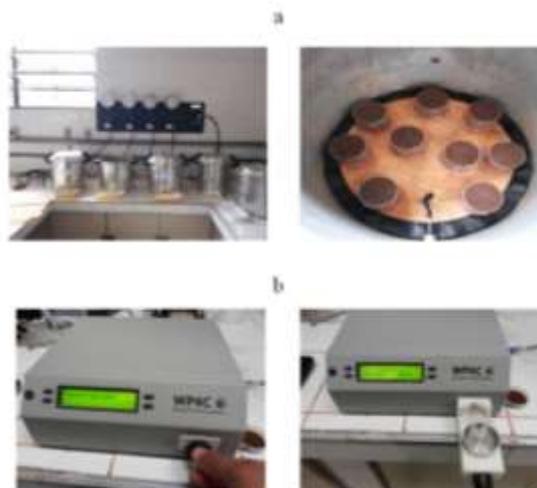
VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T.; Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2015-2011.

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

ANEXO



Penetrômetro eletrônico da marca Marconi, modelo MA-933, utilizado para a determinação da resistência do solo a penetração.



(a) Painéis de Richard e (b) aparelho WP4 utilizados para a análise da curva de retenção.



Coleta de amostras indeformada de solo para análise de pressão de pré-consolidação.

CAPÍTULO V

BIOMETRIA E ANÁLISE ECONÔMICA DE CANA-DE-AÇÚCAR MANEJADA COM TRÁFEGO CONTROLADO

RESUMO – A mecanização da colheita da cana-de-açúcar remete o interesse por técnicas de controle de tráfego que visam reduzir os efeitos da compactação sobre o solo e na cultura. No entanto, são escassos na literatura trabalhos que reportam sobre a viabilidade econômica do emprego dessas tecnologias. Esse trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade econômica do controle de tráfego de máquinas em cultivo de cana-de-açúcar e a qualidade tecnológica e biométrica da cultura, por dois anos consecutivos. O experimento foi realizado num Neossolo Quartzarênico, no município de Nova Europa – SP, numa área experimental pertencente a usina Santa Fé. Adotou-se o delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições e com três tratamentos, baseados no uso de piloto automático e diferentes espaçamentos de plantio. Os tratamentos estudados foram: T1 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada sem piloto automático; T2 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento simples (1,50 m), e manejada com piloto automático; T3 = cana-de-açúcar plantada com espaçamento duplo combinado (1,5 x 0,90 m), e manejada com piloto automático. Foram avaliadas as variáveis biométricas de diâmetro, altura de plantas, produtividade, raiz e as variáveis tecnológicas de sacarose presente no caldo (PC), fibra, açúcares redutores (AR), açúcar total recuperável (ATR), pol da cana, brix e pureza. Realizou-se uma avaliação econômica entre os tratamentos, com base nas variáveis de custo operacional total (COT), receita bruta (RB), fluxo de caixa líquido (FCL), fluxo de caixa acumulado (FCA), valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). Os atributos de diâmetro do colmo, comprimento de plantas, produtividade e de qualidade tecnológica apresentaram-se iguais entre os diferentes tratamentos. O sistema radicular também apresentou área e comprimento estatisticamente iguais entre os manejos. Entre os pontos de coleta, a linha do rodado apresentou menor comprimento de raiz. Os três tratamentos apresentaram VPL negativo, e apenas o T3 obteve uma TIR positiva.

Palavras-Chave: Espaçamento duplo combinado, controle de tráfego de máquinas e viabilidade econômica.

CHAPTER V

BIOMETRY AND ECONOMIC ANALYSIS OF SUGARCANE MANAGED WITH CONTROLLED TRAFFIC

ABSTRACT – The mechanization of sugarcane harvest has augmented an interest for traffic control techniques geared towards reducing the effects of compaction on soil and cultivation. However, studies that report on the economic viability of the use of these technologies are scarce in the literature available. This study had as its objective the evaluation of the economic viability of traffic control of machinery used in the cultivation of sugarcane, as well as of the technological quality and biometry of the cultivation, for two consecutive years. The experiment was carried on the Typic Quartzipissamento, out in the city of Nova Europa – SP, in an experimental area of the Santa Fé mill. The experiment was conducted in a randomized block design, with four replicates and three treatments, based on the use of autopilot and different crop spacing. The treatments used included: T1 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed without autopilot; T2 = sugarcane planted with simple spacing (1.50 m), and managed with autopilot; T3 = sugarcane planted with combined double row spacing (1.5 x 0.90 m), and managed with autopilot. The biometric variables evaluated included diameter, plant height, productivity, root, as well as the technological variables of sucrose present in the juice (PJ), fiber, reducing sugar (RS), total recoverable sugar (TRS), pol, brix and pureness. An economic evaluation of the treatments was conducted, based on the variables total operating costs (TOC), gross income (GI), net cash flow (NCF), cumulative cash flow (CCF), net present value (NPV) and internal rate of return (IRR). The attributes of stem diameter, plant length, productivity and technological quality presented no differences among the treatments. The root system also presented no statistical variance in area and length within the different treatments. Among the collection sites, the wheel row presented smaller root length. The three treatments presented negative NPV, and only T3 obtained a positive IRR.

Keywords: Combined double row spacing, traffic control of machinery and economic viability.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção de 588,91 milhões de toneladas, numa área de 8,95 milhões de hectares. Desse total, o estado de São Paulo apresenta-se como o responsável pela produção de 53% da área total colhida, o que lhe confere o título de maior produtor, seguido dos estados de Goiás, Minas Gerais e Paraná, que participam com 10,81%; 8,14% e 6,97%, respectivamente (CONAB, 2015).

Para a safra 2015/16 a produção total de cana-de-açúcar está estimada em 655,16 milhões de toneladas, correspondente a um crescimento de 3,20% em relação à safra 2014/15. Na região centro-sul, é esperada uma produção de aproximadamente 590 milhões de toneladas, enquanto que para as regiões norte e nordeste, estimam-se que serão produzidas 59,38 e 61,20 mil toneladas (CONAB, 2015).

Além das condições geográficas de solo e clima favoráveis à produção de cana-de-açúcar no Brasil, os investimentos realizados em pesquisas, que buscam o aperfeiçoamento técnico das áreas de produção, têm contribuído para o aumento dos rendimentos da cultura (NICOLOSI et al., 2012).

Dentre essas inovações, o controle de tráfego de máquinas, por meio do uso do piloto automático, constitui-se numa tecnologia promissora para o desenvolvimento da atividade canavieira e, para a mitigação dos impactos negativos causados sobre os atributos físicos do solo. Isso, porque minimiza os efeitos da compactação do solo sobre a produtividade, uma vez que essa técnica pré-determina os locais a serem trafegados e, reduzem os riscos de compactação nos pontos em que há crescimento de plantas (ROQUE et al., 2011; SOUZA et al., 2012).

Associado ao piloto automático, a determinação do espaçamento de plantio mais adequado à cultura, é de grande interesse para o aumento da produção, pois favorece a otimização de atividades realizadas durante o processo produtivo, a exemplo, o uso de máquinas. Além disso, contribui para o favorecimento da captação de alguns recursos necessário à produção, como a luminosidade, a disponibilidade hídrica e a temperatura (EMBRAPA, 2013).

Contudo, são escassos na literatura, trabalhos que reportam sobre os impactos econômicos gerados pela adoção das tecnologias agrícolas supracitadas, e que dessa forma, possam recomendá-las como alternativas rentáveis, ou não, ao setor canavieiro.

Assim, esse trabalho teve por objetivo avaliar a biometria da cultura da cana-de-açúcar plantada em diferentes espaçamentos, e manejada com e sem controle de tráfego e,

responder por meios de cálculos econômicos, o seguinte questionamento: Qual o impacto econômico gerado na atividade canavieira em função da adoção do piloto automático e diferentes espaçamentos de plantio num Neossolo Quartzarênico situado no município de Nova Europa, São Paulo, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do Experimento

O trabalho foi realizado numa área experimental cultivada com cana-de-açúcar, instalada nas dependências da Usina Santa Fé, pertencente ao grupo Itaquerê, situada no município de Nova Europa – SP, com coordenadas 48° 34' 41,76" de longitude oeste e 21°53' 44,89" de latitude sul. O clima da região é classificado como tropical com estação seca (Aw), segundo a classificação climática de Köppen, com inverno frio e seco, e verão quente e chuvoso.

A variedade de cana utilizada foi a RB 86-7515, com o plantio realizado à 0,30 m de profundidade e uma densidade de 18 gemas por metro linear. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico, com aproximadamente 85% de areia.

No estudo foram avaliados três tratamentos com base no uso de piloto automático e na adoção de diferentes espaçamentos, são eles: T1 = cana-de-açúcar manejada sem piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T2 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento de 1,50 m. T3 = cana-de-açúcar manejada com piloto automático e plantada com espaçamento duplo combinado de 1,50 x 0,90 m.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso (DBC), com três tratamentos e quatro repetições, totalizando doze unidades experimentais. Cada parcela possuía dimensões de 30 x 50 m, 20 linhas de plantio nos tratamentos que utilizou o espaçamento de 1,50 m e, 12 linhas duplas nos tratamento com espaçamento combinado de 1,50 x 0,90 m.

O plantio foi realizado por meio do uso de 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. Na ocasião do plantio, aplicou-se 0,45 Mg ha⁻¹ do formulado 05-25-23 + 1,5% de zinco + 0,4% de boro, 0,25 kg ha⁻¹ de Regente 800 WG e 0,5 L ha⁻¹ de Comente. Ressalta-se que as áreas já encontravam-se com o pH corrigido, tendo sido realizada a aplicação de 1,4 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico em 24/04/2011 e, que não houve aplicação de torta ou vinhaça.

A colheita da cana-de-açúcar, tanto para o espaçamento simples como para o espaçamento duplo, foi procedida por uma colhedora da marca CASE, modelo 800. O transporte da cana picada para o plantio e, o da cana-de-açúcar colhida, foram realizados num transbordo da linha de implementos ANTONIOSI, modelo 8000-D, com capacidade para transportar 8,50 t num volume de 20 m³.

O piloto automático utilizado é da Topson, modelo System 150, 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. O piloto conta com um receptor integrado com direcionamento oriundo da constelação de satélites GNSS, com 2,00 cm de precisão em tempo real.

2.2 Avaliações biométricas

2.2.1 Produtividade

A produtividade da cana-de-açúcar, em cada tratamento, foi determinada levando-se em consideração a produção ocorrida numa área de 1200 m², localizada na região central de cada parcela. Para isso, foram colhidas 16 linhas simples e 10 linhas duplas nos tratamentos com espaçamento simples e duplo combinado, respectivamente, ambas com 50 m de comprimento.

Cada conjunto de transbordo utilizado no ensaio foi inicialmente pesado vazio, para a obtenção da tara. Após ser preenchido com a cana-de-açúcar, o implemento foi novamente pesado em uma balança específica para pesagem de veículos.

2.1.2 Avaliação do sistema radicular

O sistema radicular foi estudado no final de cada ciclo por meio da avaliação de imagens obtidas pelo CI-600 (Bio Science), um equipamento portátil que permite a visualização das raízes de forma não restritiva, com rápida obtenção dos resultados e em tempo real. O aparelho constitui-se de uma sonda visualizadora tipo scanner, acoplada a um tubo de acrílico que funcionou como canal de acesso para a obtenção das imagens de raiz.

Para a instalação dos tubos, utilizou-se um perfurador de solo semi-mecanizado da marca Kawashima, modelo ED-43, com 42,7 cm³ de cilindrada e broca de diâmetro de 42,7 cm. Os tubos foram instalados de tal forma que permitiu-se uma folga de aproximadamente 5 mm entre a parede externa do tubo e o solo (CID BIO-SCIENCE, 2011). Os locais de instalação dos tubos corresponderam aos pontos da linha de plantio (LP), canteiro (CT) e na linha do rodado (LR), obedecendo um ângulo de 90° em relação a superfície do solo (Figura 24).



Figura 24. Abertura dos canais de acesso para a instalação dos tubos de acrílico utilizados na avaliação do sistema radicular.

Os tubos de acrílico utilizados apresentavam a base inferior vedada, e a extremidade superior fechada com tampa rosqueada, para que dessa forma fossem evitados a entrada de água e raios solares que por ventura poderiam comprometer a qualidade das leituras. Em cada parcela, instalaram-se 3 tubos de acrílico transparente, com dimensões de 0,064 m de diâmetro interno, 70 mm de diâmetro externo e comprimento de 1,05 m.

As imagens foram capturadas nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, e em seguida, foram tratadas no sistema computacional CI-960 RootSnap (CID Bio-Science, Inc., Camas, Washington, EUA), para a determinação do comprimento e da área de raiz.

2.1.3 Avaliações biométricas da cultura da cana-de-açúcar

Com o auxílio de um paquímetro digital, foram medidos os diâmetros inferiores, medianos e superiores de 10 plantas por unidade experimental. As mesmas plantas utilizadas para a avaliação dos diâmetros tiveram sua altura determinada por meio do uso de uma fita métrica, com a qual mediu-se o comprimento existente entre a base da planta e a folha "+1".

Foram contados o número de internós das plantas a partir da base do colmo até o início da ponteira. As plantas que tiverem os diâmetros e suas alturas determinadas foram

enfardadas, após a retirada das ponteiras e encaminhadas ao laboratório da Usina Santa Fé para a realização das análises tecnológicas de qualidade industrial.

2.1.4 Análises tecnológicas de qualidade industrial da cana-de-açúcar

As variáveis tecnológicas estudadas encontram-se descritas na Tabela 42, e foram procedidas conforme as normas estabelecidas pela Consecana (2006).

Tabela 42. Indicadores de qualidade tecnológica da cultura da cana-de-açúcar.

Variáveis	Definição
Pc	Teor de sacarose absoluto presente, no caldo, por cento de cana
Fibra	Parte lenhosa da cana, insolúvel em água
Ar	Teor de açúcares redutores, por cento, em peso de caldo
Atr	Somatório das diversas formas de açúcares (sacarose, frutose e glicose)
Pol	Porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares
Brix	Teor de sólidos solúveis contidos numa solução pura de sacarose
Pureza	Porcentagem de Pol em relação ao Brix

Pcc = pol do caldo da cana-de-açúcar, Ar = açúcares redutores, Atr = açúcares totais redutores; Pol = pol da cana-de-açúcar.

Pc- O teor de sacarose absoluto presente no caldo, por cento de cana, foi calculado pela Equação 11.

$$Pcc = LPb (0,2605 - 0,0009882 \times B) \quad (11)$$

em que: "LPb" = leitura sacarimétrica equivalente ao do subacetato de chumbo e "B" = determinação do brix do caldo.

Fibra (B) - A fibra da cana (F) foi calculada pela Equação 12.

$$F = 0,08 \times PBU + 0,876 \quad (12)$$

em que: PBU = peso do bagaço úmido da prensa, em gramas.

AR- Os açúcares redutores foram determinados pela Equação 13.

$$AR \% \text{ caldo} = 3,641 - 0,0343 \times Q \quad (13)$$

em que: Q = pureza aparente do caldo, expressa em porcentagem.

ATR - O açúcar total recuperável foi calculado pela equação 14.

$$ATR = 9,5263 \times PC + 9,05 \times ARC \quad (14)$$

em que: ARC = Açúcares redutores por tonelada de cana e PC = O teor de sacarose absoluto presente no caldo, por cento de cana

Pol - A porcentagem de massa de sacarose aparente foi determinada conforme a Equação 15.

$$Pol = 0,26 * LPb / (m.e) \quad (15)$$

em que LPb = leitura sacarimétrica equivalente a de subacetato de chumbo e "m.e" massa específica do caldo.

Brix - A determinação do brix foi procedida em refratômetro digital de leitura automática, com correção de temperatura, saída para impressora, resolução máxima de 0,1° Brix (um décimo de grau brix), e o valor final ser expresso à 20° C.

Pureza = Porcentagem de Pol em relação ao Brix, conforme a Equação 16.

$$Pureza = (Pol/Brix) * 100 \quad (16)$$

2.2 Avaliação econômica

As avaliações foram realizadas por dois anos consecutivos, sendo o primeiro correspondente ao ciclo da cana-planta, safra 2012/13, e o segundo correspondente ao ciclo da primeira soca, safra 2013/14. Os dados requeridos para a elaboração da análise econômica foram cedidos pelo setor administrativo da Usina Santa Fé, e corresponderam ao período de estudo realizado.

Para o cálculo do custo de produção utilizou-se a estrutura do custo operacional total adotada pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA-SP), proposta por Matsunaga et al. (1976). Os preços médios foram coletados na região em unidade de Real (R\$), referentes as safras 2012/13 e 2013/14.

Os indicadores de lucratividade estudados foram os considerados por Martin et al. (1998), sendo eles: receita bruta (RB), resultado da multiplicação da produção de cana-de-açúcar colhida pelo preço médio pago aos produtores; o fluxo de caixa líquido (FCL), obtido pela diferença entre a RB e os custos totais, medindo os lucros do investimento em curto prazo e, o fluxo de caixa acumulado (FCA), resumindo-se na receita bruta que foi representada pelos recursos disponíveis, após a cobertura do COT.

Além desses índices foi calculado, o valor presente líquido (VPL), considerando uma taxa de retorno de 10% ao ano e, a taxa interna de retorno (TIR), que corresponde ao valor presente do fluxo líquido igual a zero, calculada de acordo com a Equação 13.

$$\sum_{t=0}^n Lt (L + i^*)^{-t} = 0 \quad (13)$$

Em que: i^* = TIR; Lt = Fluxos líquidos de caixa; e t = Período de produção da cultura, variando de zero até n .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação biométrica e do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar

As médias de diâmetro do colmo, altura de plantas e produtividade da cultura da cana-de-açúcar manejada com e sem controle de tráfego de máquinas em diferentes espaçamentos de plantio encontram-se descritas na Tabela 43.

Tabela 43. Variáveis biométricas de cana-de-açúcar plantada num Neossolo Quartzarênico em diferentes espaçamentos com tráfego de máquinas controlado por piloto automático.

Manejo	Diâmetro (cm)			Altura de planta (m)	Produtividade (t ha ⁻¹)
	Inferior	mediano	superior		
Cana planta					
T1	27,58 a	24,34 a	23,23 a	3,00 a	91,06 a
T2	28,17 a	25,43 a	25,04 a	2,95 a	91,40 a
T3	26,30 a	23,53 a	25,04 a	2,93 a	90,60 a
CV (%)	4,19	7,77	27,78	5,12	7,81
Cana soca					
T1	27,49 a	24,96 a	21,51 a	1,87 a	84,13 a
T2	26,79 a	24,91 a	21,53 a	1,93 a	85,83 a
T3	28,57 a	25,34 a	21,69 a	1,97 a	88,86 a
CV (%)	4,93	3,08	7,91	10,21	12,27

T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2= espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Não houve diferença entre as médias de diâmetro inferior, médio e superior das plantas avaliadas nos diferentes tratamentos (Tabela 43). O comprimento de plantas, também apresentou médias estatisticamente iguais entre os tratamentos estudados, e por isso,

discordam de Paula (2012), ao avaliar a influência do trânsito de máquinas sobre a linha da soqueira, simulado uma situação sem controle de tráfego. Esse autor verificou uma redução na altura das plantas nas áreas com maior intensificação de passadas.

De acordo com o levantamento realizado pela Conab (2015), os três tratamentos estudados apresentaram produtividades maiores que a média prevista para o país no ano safra 2012/13, que foi de 73,85 Mg ha⁻¹, e maiores que a média do estado de São Paulo no ano safra 2013/14 que apresentou o valor de 80,48 Mg ha⁻¹.

Embora no tratamento T3 tenha sido plantado um maior número de plantas, acredita-se que a maior competição por luz, nutrientes e água, em função da redução do espaçamento, tenham sido os responsáveis pela limitação da produtividade, o que proporcionou valores de produção semelhantes aos dos tratamentos plantados com espaçamento simples. Esse resultado discorda de Muraro et al., (2011), que verificaram um aumento da produção de biomassa em função da redução do espaçamento de plantio.

Provavelmente, a influência do tráfego, em especial nos tratamentos sem piloto automático, seja verificada nos anos seguintes, visto que o efeito do trânsito de máquinas tende a aumentar a compactação do solo por apresentar caráter acumulativo (SILVA JUNIOR, et al., 2013, SOUZA et al., 2014).

Essa afirmação se baseia nos resultados encontrados por Souza (2012), ao avaliar a eficiência do uso do piloto automático sobre a produção de cana-de-açúcar. O autor verificou um aumento nos rendimentos da cultura, em comparação a uma área sem controle de tráfego. Em sua pesquisa, ainda comparou um tratamento que utilizou o controle de tráfego apenas com o aumento da bitola do trator, sem o uso de piloto automático, e que também proporcionou um aumento na produção. Esses resultados também corroboram com Araújo et al. (2013), ao observarem maior produção de cana-de-açúcar em área não trafegada, em comparação a uma área transitada por máquina. Roque et al. (2010), ao estudarem o efeito do tráfego de máquinas por meio de piloto automático e aumento da bitola na cultura da cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,50 m, também não observaram diferença entre as médias de produtividade.

3.2 Sistema radicular

Não verificou-se diferença nas médias dos tratamentos para as variáveis de comprimento e área de raiz, entre o canteiro e linha de plantio, nas diferentes camadas estudadas para os ciclos de cana planta e soca (Tabela 44). Apenas o T3 apresentou diferença entre as camadas para a variável comprimento de raiz, em que a camada de 0,00-0,20 m

mostrou-se maior que a de 0,20-0,40 m. Na cana soca, para a variável de comprimento, também foi observada diferença apenas entre as camadas. Na camada de 0,00-0,20 m os tratamentos T2 e T3 apresentaram-se iguais e maiores que o T1.

Tabela 44. Área (cm²) e comprimento de raiz (cm) de cana-de-açúcar cultivada em Neossolo Quartzarênico e manejada com controle de tráfego em diferentes espaçamentos em cana planta e soca.

Manejo	Pontos de coleta			Camadas (m)		Média
	LR ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	LP ⁽³⁾	0,00-0,20	0,20-0,40	
Comprimento de raiz (cm)						
Cana planta						
T1	11,84 Aa	12,30 Aa	14,36 Aa	14,27 Aa	11,39 Aa	12,83 A
T2	17,73 Aa	17,02 Aa	25,00 Aa	24,38 Aa	15,44 Aa	19,91 A
T3	17,66 Aa	24,10 Aa	26,06 Aa	29,31 Aa	15,89 Ab	22,60 A
Média	15,77 a	17,80 a	21,80 a	22,65 a	14,24 a	
CV (%)	33,25					
Cana soca						
T1	7,11 Aa	18,77 Aa	22,75 Aa	15,28 Ba	17,14 Aa	16,21 A
T2	19,25 Aa	25,00 Aa	27,22 Aa	32,24 Aa	14,21 Ab	23,22 A
T3	13,65 Aa	23,65 Aa	26,99 Aa	33,43 Aa	10,62 Ab	23,71 A
Média	13,33 b	22,47 a	25,65 a	26,98 a	13,99 a	
CV (%)	30,12					
Área de raiz (cm²)						
Cana planta						
T1	4,91 Aa	5,61 Aa	9,25 Aa	14,83 Aa	4,83 Aa	9,85 Aa
T2	6,81 Aa	5,71 Aa	8,03 Aa	14,73 Aa	5,97 Aa	10,30 Aa
T3	10,35 Aa	7,85 Aa	6,35 Aa	16,21 Aa	8,32 Aa	12,27 Aa
Média	7,35 a	6,39 a	7,87 a	15,25 a	6,37 a	
CV (%)	37,81					
Cana soca						
T1	6,61 Aa	4,98 Aa	5,85 Aa	5,83 Aa	5,76 Aa	5,80 Aa
T2	5,60 Aa	4,22 Aa	4,20 Aa	5,58 Aa	3,76 Aa	4,67 Aa
T3	3,78 Aa	5,36 Aa	7,25 Aa	5,33 Aa	5,60 Aa	5,46 Aa
Média	5,33 a	4,85 a	5,76 a	5,58 a	5,70 a	
CV (%)	32,37					

⁽¹⁾LR = linha do rodado; ⁽²⁾CT = canteiro; ⁽³⁾LP = linha de plantio; T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras maiúsculas na coluna e letras minúsculas na linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Entre as médias gerais, apenas no ciclo correspondente a cana soca, o comprimento de raiz apresentou diferença entre os pontos de coleta (Tabela 44). Na linha de plantio (LP) e no canteiro (CT), observou-se médias iguais e maiores que a linha do rodado (LR).

Esses dados corroboram com Souza et al. (2012), que também verificaram redução do crescimento radicular causada pelo tráfego de máquinas, devido a pressão do rodado que é exercida sobre o solo.

Esperava-se um decréscimo das médias de comprimento e área de raiz, no sentido LP>CT>LR, especialmente no período referente a cana soca, pois correspondeu a dois anos de tráfego (Tabela 44). No entanto, o tempo de adoção dos tratamentos mostrou-se insuficiente para surtir efeito sobre o crescimento do sistema radicular.

O efeito do tráfego sobre o crescimento da raiz também foi constatado por Vasconcelos et al. (2003), ao verificarem uma redução de 18,67% no comprimento de raízes de cana-de-açúcar de uma área transitada por máquinas, quando comparado com uma área de colheita manual.

Outra explicação para a ocorrência de médias iguais para o sistema radicular da cana-de-açúcar diz respeito a metodologia adotada para a avaliação do sistema radicular nessa pesquisa. O método utilizado mostra-se eficiente na captura de imagens do sistema radicular que encontra-se aderido à parede do tudo. Porém, não é eficiente para diferenciar as raízes que são efetivamente ativas, pois de acordo com Bacchi (1993), a cada ciclo a cana-de-açúcar emite um novo sistema radicular, portanto, nem todas as raízes quantificadas, correspondem às que são efetivas no ciclo em estudo.

Em função do corte e do manejo dado à cultura, o sistema radicular da cana-de-açúcar apresenta um menor crescimento em relação ao ciclo anterior. No entanto, esse comportamento não foi verificado, especialmente na cana soca, pois o método pode ter contabilizado raízes correspondentes ao ciclo da cana planta, que corresponde ao período em que a cultura apresenta um sistema radicular mais vigoroso.

De acordo com Luchessi (2001), as raízes emitidas pelas soqueiras são mais superficiais que o sistema radicular da cana de primeiro ano, e com o passar dos anos, esse comportamento se intensifica. Essa teoria justifica a maior concentração de área de raízes verificadas na primeira camada dos tratamentos T2 e T3, podendo, ainda, apresentar-se mais expressiva com o decorrer dos ciclos em todos os tratamentos.

Na pesquisa de Souza et al. (2012), os autores verificaram uma maior concentração de raízes de cana-de-açúcar nos tratamentos que utilizaram controle de tráfego de máquinas em comparação ao tratamento sem controle. Os autores avaliaram o terceiro ciclo da cultura (segunda soca) e, talvez, por isso, tenham encontrado diferença entre as médias, visto o maior tempo de imposição dos tratamentos, quando comparado com o período de estudo da presente pesquisa. Além disso, os referidos autores utilizaram o método do

monólito com posterior lavagem de raízes, que pode ter contribuído para a seleção de raízes ativas, que por sua vez, são mais vigorosas e resistentes ao processo de lavagem.

3.4 Qualidade industrial da cana-de-açúcar

Não houve diferença entre as médias das variáveis de qualidade industrial estudadas para os dois anos de estudo (Tabela 45). A produção da cana-de-açúcar, para ser economicamente viável, deve fornecer matéria-prima de tal forma que haja o aproveitamento econômico e ecológico do material e sem desperdício de energia. Portanto, deve ter sua qualidade tecnológica estimada, com a finalidade de proporcionar maiores rendimento à indústria. Além disso, garantir a qualidade do produto destinado à industrialização, fornecendo uma matéria-prima fresca e com elevada pureza, podendo resultar num aumento de produção e numa maior eficiência no processo de industrialização (FIGUEIREDO et al., 2008). Nesse trabalho, não houve diferença entre as médias das variáveis de qualidade estudadas para os dois anos de estudo (Tabela 45).

Tabela 45. Variáveis de qualidade tecnológica da cultura da cana-de-açúcar plantada num Neossolo Quartzarênico em diferentes espaçamentos com tráfego de máquinas controlado por piloto automático em cana planta e soca.

Manejo	PC ⁽¹⁾	Fibra ⁽²⁾	AR ⁽³⁾	ATR ⁽³⁾	Pol ⁽⁴⁾	Brix ⁽⁵⁾	Pureza
	(%)						
Cana planta							
T1	15,26 a	15,14 a	0,42 a	150,12 a	20,06 a	21,12 a	90,15 a
T2	15,28 a	15,31 a	0,47 a	150,69 a	20,44 a	20,97 a	90,80 a
T3	15,21 a	14,87 a	0,45 a	153,70 a	20,32 a	21,32 a	72,76 a
CV (%)	2,51	2,76	22,15	2,40	24,58	2,15	24,58
Cana soca							
T1	14,84 a	16,62 a	0,74 a	140,71 a	18,69 a	16,00 a	87,29 a
T2	14,95 a	16,02 a	0,74 a	141,46 a	18,69 a	20,00 a	87,12 a
T3	14,69 a	16,43 a	0,66 a	146,98 a	18,35 a	19,66 a	88,18 a
CV (%)	3,37	3,97	14,91	8,52	3,53	28,72	0,99

Pc = sacarose presente no caldo; AR = açúcares redutores, ATR = açúcar total recuperável, Pol = porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares, Brix (teor de sólidos solúveis contidos numa solução pura de sacarose); T1 = espaçamento simples (1,5 m), sem piloto automático; T2= espaçamento simples (1,5 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (0,90 x 1,50 m) com piloto automático. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

De acordo com Lavanholi (2008), as médias de PC registradas encontram-se de acordo com os valores estabelecidos pela literatura, compreendidos entre 14 e 24% (Tabelas 45). Os valores médios de porcentagem de fibra apresentaram-se maiores do que os propostos pelo referido autor, cujo valor mínimo e máximo são 8% e 14%, nessa ordem.

As médias de Brix e Pol, de todos os tratamentos, apresentaram-se acima dos valores utilizados como critério do estágio de maturação, que segundo Rodrigues (1995), possuem valores mínimos de 18,00% e 15,30%, para as respectivas variáveis.

Os valores de Brix encontrados foram menores que os verificados por Oliveira et al., (2014), ao avaliarem a qualidade de diferentes variedades de cana-de-açúcar irrigada, o que pode ter contribuído para a verificação desses elevados valores, visto que na presente pesquisa o cultivo se deu sem irrigação. Porém, os referidos autores verificaram um Pol em torno de 17,60%, inferior à média geral desse trabalho, que foi de 19,84%.

Os valores de ATR encontrados estão acima da média nacional esperada para a safra 2015/2016, que foi de 134,70 kg Mg⁻¹ (CONAB, 2015), o que indica alto potencial dos tratamentos para a indústria canavieira. Somente o tratamento T3, na cana planta, apresentou porcentagem de pureza inferior ao critério de Rodrigues (1995), que deve ser superior a 85%. No entanto, os tratamentos mostraram-se iguais entre si, com médias variando entre 72,76 e 90,80.

3.5 Avaliação econômica

Na Tabela 46 encontram-se os dados dos custos obtidos durante os dois primeiros ciclos da cultura da cana-de-açúcar, correspondentes às safras 2012/13 e 2013/14, com as descrições de suas respectivas atividades. O custo operacional obtido na etapa de preparo do solo de R\$ 1347,48 correspondeu aos tratamentos T1, T2 e T3 o percentual de 14,48%, 14,88% e 14,92% do custo operacional total (COT), respectivamente. A operação de plantio obteve participação, na mesma ordem em que os tratamentos foram citados anteriormente de 39,35%, 38,51% e 41,42%.

Os investimentos realizados nos tratos culturais para a cana soca foram de 22,16% para os tratamentos T1 e T2 e de 15,80% para o T3 (Tabela 46). Essa representatividade foi maior em comparação a cana planta, uma vez que os custos obtidos com o preparo do solo e com o plantio, não foram utilizados para o cálculo do COT do segundo ciclo, no qual considerou-se como sendo integrantes dessa variável, apenas os tratos culturais e a colheita.

Tabela 46. Estimativa do custo operacional de preparo, plantio, tratos culturais e colheita em 1,0 ha de cana-de-açúcar planta com espaçamento simples (1,5 m) e duplo combinado (15 x 0,90 m) manejado com e sem piloto automático.

		Custo (R\$)
Operação de preparo		
Aplicação de herbicidas	L	135,73
Aplicação de herbicidas catação	L	108,17
Aplicação de calcário	T	294,21
Transporte de calcário/Gesso	Km	55,51
Carregamento de calcário/Gesso	Hd	47,65
Terraceamento - curva de nível	Hm	306,61
Subsolagem	Hm	281,07
Gradagem leve	Hm	118,53
Subtotal (A)	–	1.347,48
Operação de plantio		
Tração plantadeiras-mecânica (DMB)	L	968,93
Transporte de adubo/reabastecimento de insumo	T	638,12
Plantio (plantadeira) (Espaçamento de 1,50 m)	H	427,55
Plantio (plantadeira) (Espaçamento de 1,5 x 0,90 m)	H	256,53
Fertilizantes (Espaçamento de 1,50 m)	T	1.250,00
Fertilizantes (Espaçamento de 1,50 x 0,90 m)	T	1.500,00
Recobrição manual	H	329,36
Qualidade plantio	H	46,12
Subtotal (B) (Espaçamento de 1,50 m)	–	3.660,08
Subtotal (B) (Espaçamento de 1,5 x 0,90 m)	–	3.739,06
Tratos culturais (cana planta)		
Subtotal (C) (Espaçamento de 1,50 m)	–	980,69
Subtotal (C) (Espaçamento de 1,5 x 0,90 m)	–	588,41
Tratos culturais (cana soca)		
Subtotal (C) (Espaçamento de 1,50 m)	–	894,72
Subtotal (C) (Espaçamento de 1,5 x 0,90 m)	–	536,83
Colheita (custo da atividade por tonelada de cana colhida)		
Colheita mecanizada (Espaçamento de 1,50 m)	Hm	738,25
Colheita mecanizada (Espaçamento de 1,50 m x 0,90 m)	Hm	442,95
Transporte de cana (Espaçamento de 1,50 m)	Km	445,50
Transporte de cana (Espaçamento de 1,50 m x 0,90 m)	Km	445,50
Tração de transbordos (Espaçamento de 1,50 m)	Km	516,73
Tração de transbordos (Espaçamento de 1,50 m x 0,90 m)	Km	310,03
Subtotal (D) (Espaçamento de 1,50 m)	–	1.700,48
Subtotal (D) (Espaçamento de 1,5 x 0,90 m)	–	1.198,48
Custo do uso do piloto automático por hectare	–	195,00
Outras despesas para os tratamentos com espaçamento 1,5 m s/piloto		429,17
Outras despesas para os tratamentos com espaçamento 1,5 m c/piloto		438,92
Outras despesas para os tratamentos com espaçamento 1,5 m c/piloto		380,26

*HM - hora máquina, hD - Hora/dia. O item outras despesas corresponde a 5% do COT.

Dentro da operação de plantio, o investimento realizado com o uso de fertilizantes foi o mais representativo (Tabela 46). Para os tratamentos plantados com espaçamento de 1,50 m, essa atividade correspondeu a 34,15% da operação de plantio, valor esse menor do que o verificado no tratamento plantado com espaçamento duplo combinado, que foi de 40,11%. Isso, devido ao maior número de linhas proporcionado por esse arranjo.

Esses resultados corroboram com Kaneko et al. (2009), ao verificarem maior participação dos fertilizantes no COT requerido para a implantação de uma área de cana-de-açúcar, plantada com espaçamento de 1,40 m, sem controle de tráfego. Os autores verificaram uma participação desse insumo em torno de 26,55%. Com relação aos tratos culturais, os tratamentos T1 e T2, corresponderam a 10,31% e 10,54%, respectivamente, e 6,51% para o tratamento T3 (Tabela 46).

O menor valor dos custos obtidos nos tratos culturais do tratamento com espaçamento duplo, em comparação aos demais, justifica-se pelo menor número de ruas destinadas ao tráfego, proporcionado pelo adensamento de plantio. Em consonância, esse arranjo reduziu o número de horas/máquina trabalhadas, juntamente com outros custos, como, por exemplo, combustível e horas de trabalho pagas ao tratorista (Tabela 46).

Para exemplificar, num área de 10000 m², a adoção do espaçamento 1,50 x 0,90 m, destinou ao tráfego de máquinas aproximadamente 41,66 ruas, enquanto que, para uma área de mesmo tamanho, porém, com plantas sendo cultivadas num espaçamento de 1,50 m, esse número aumentou cerca de 60%, e resultou no total 66,66 ruas.

Na etapa da colheita, na cana planta e soca, os custos operacionais nos tratamentos com espaçamento simples, T1 e T2, representaram 18,28% e 17,85% nessa ordem, e 13,27% para o tratamento T3, (Tabela 46).

Na Tabela 47 são apresentados os dados referentes aos valores utilizados para o cálculo da receita bruta (RB), com base no valor pago pelo kg de açúcares totais recuperáveis (ATR), para os períodos de colheitas referentes às safras de 2012/13 e 2013/14.

Tabela 47. Açúcares totais recuperáveis (ATR), valor pago pela ATR, produtividade de cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) e valor pago pela ATR total produzida por hectare no Neossolo Quartzarênico com cana planta e soca.

Manejo	Valor pela ATR (R\$)	ATR (kg t)	Produtividade de cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$)	Valor pago por hectare (R\$)
Cana planta (2012/13)				
T1	0,4412	150,12 a	91,06 a	6.031,17
T2	0,4412	150,69 a	91,40 a	6.076,67
T3	0,4412	153,70 a	90,60 a	6.143,80
Cana soca (2013/14)				
T1	0,4498	139,30 a	84,13 a	5.271,34
T2	0,4498	139,30 a	85,83 a	5.377,86
T3	0,4498	137,56 a	88,86 a	5.498,16

T1 = espaçamento simples (1,50 m), sem piloto automático; T2 = espaçamento simples (1,50 m) com piloto automático; T3 = espaçamento duplo combinado (1,50 x 0,90 m) com piloto automático. Médias seguidas por letras minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Não houve diferença entre as médias de ATR e entre produtividade de cana-de-açúcar colhida nos diferentes tratamentos, nos dois anos de realização do estudo. O valor pago em real (R\$) por hectare, que correspondeu à receita bruta (RB), apresentou-se tendencialmente maior, nos dois ciclos, no tratamento T3. Porém, como esse cálculo foi feito com base num valor fixo pago pela ATR, e não houve diferença estatística entre os tratamentos para esta variável e para a produtividade, os valores da RB encontrados também foram considerados iguais (Tabela 47).

Com base nos resultados referentes aos custos e aos valores recebidos pela produção dos diferentes tratamentos, para o ano safra 2012/13 e 2013/14, realizou-se o cálculo do fluxo de caixa líquido (FCL), do fluxo de caixa acumulado (FCA), do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR) (Tabela 48).

Tabela 48. Fluxo de caixa líquido/ha, fluxo de caixa acumulado, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR), para as duas primeiras colheitas da cultura da cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos de plantio no Neossolo Quartzarênico.

ITENS		Implantação	1º Corte	2º Corte
		R\$		
Tratamentos com espaçamento de 1,5 m e manejo sem piloto automático				
Saídas	COT (Preparo ao plantio)	5.257,93	–	–
	COT (Tratos culturais/colheita)	–	2.815,22	4.037,46
	Receita Bruta	0,00	6.031,17	5.271,34
Entradas	Fluxo de caixa líquido	-5.257,93	3.215,95	1.233,88
	Fluxo de caixa acumulado	-5.257,93	-2.041,98	-808,10
TIR				-5,00%
VPL				-2.271,26
Tratamentos com espaçamento de 1,5 m e manejo com piloto automático				
Saídas	COT (Preparo ao plantio)	5.462,68	–	–
	COT (Tratos culturais/colheita)	–	2.815,22	4.037,46
	Receita Bruta	0,00	6.076,67	5.377,86
Entradas	Fluxo de caixa líquido	-5.462,68	2.361,45	1.340,40
	Fluxo de caixa acumulado	-5.462,68	-2.201,23	-860,83
TIR				-5,00%
VPL				-2.346,61
Tratamentos com espaçamento de 1,5 x 0,90 m e manejo com piloto automático				
Saídas	COT (Preparo ao plantio)	5.545,93	–	–
	COT (Tratos culturais/colheita)	–	1.876,23	3.397,08
	Receita Bruta	0,00	6.143,80	5.498,16
Entradas	Fluxo de caixa líquido	-5.545,93	4.267,57	2.101,08
	Fluxo de caixa acumulado	-5.545,93	-1.278,36	822,72
TIR				5,00%
VPL				-690,03

COT = Custo operacional total; VPL = Valor presente líquido; TIR = Taxa interna de retorno.

Nas áreas experimentais, o COT dos tratamentos plantados com espaçamento de 1,50 m, manejado sem e com o piloto automático foi de R\$ 5257,93 e 5462,68, respectivamente e para o tratamento plantado com espaçamento duplo combinado foi de R\$ 5545,93 (Tabela 48). Essa diferença de R\$ 204,75, verificada a mais no tratamento T2 em relação ao T1, correspondeu ao acréscimo do custo de investimento, por hectare, do piloto automático, que foi de R\$ 195,00 somados a 5% (R\$ 9,75) desse valor, referente aos custos administrativos calculados em todos os itens.

Todos os tratamentos, no ciclo da cana planta, apresentaram um fluxo de caixa acumulado negativo, e no ciclo da cana soca, apenas o T3 apresentou fluxo de caixa positivo (Tabela 48). Esperava-se que o T3 apresentasse maior produtividade, visto que a adoção de espaçamentos menores proporciona o plantio de um maior número de plantas e, com isso, acréscimos na produção. No entanto, esse arranjo pode ter promovido maior competição por água, luz e nutrientes resultando numa produtividade semelhante aos tratamentos plantados com espaçamento de 1,50 m (ROMANINI JUNIOR, 2007; CARVALHO, 2007).

O COT utilizado para custear os investimentos com os tratos culturais e com a colheita apresentaram valores iguais nos dois tratamentos com espaçamento simples (Tabela 48). Para a cana planta, registrou-se um COT de R\$ 2815,22 e, na cana soca, essas mesmas operações oneraram ao produtor o valor de R\$ 4037,46. O aumento registrado de um ano para o outro se deu em virtude do acréscimo do uso de fertilizante como trato cultural na cana soca, visto que na cana planta, esse item foi contabilizado na etapa do plantio.

Com relação ao valor presente líquido (VPL), aplicando-se uma taxa de 10% ao ano, os tratamentos plantados com espaçamento simples sem e com piloto automático, apresentaram valores correspondentes a R\$ -2271,26 e R\$ -2346,61, respectivamente, e que por sua vez foram menores que o valor obtido pelo tratamento plantado com espaçamento duplo, que foi de R\$ -690,03 (Tabela 48).

Todos os tratamentos plantados com espaçamento simples apresentaram taxa interna de retorno (TIR) negativa de -5%, enquanto que o T3 apresentou uma TIR positiva de 5,00% (Tabela 48). Esses resultados corroboram com Rosa (2013), ao avaliar o desempenho econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar para espaçamento duplo. O referido autor verificou redução de até 50% nos custos da colheita em comparação ao plantio com espaçamento simples, o que conferiu maior rentabilidade ao investimento com espaçamento duplo combinado.

Em análise econômica, Keneko et al. (2009) observaram baixos valores de TIR e uma VPL negativa no empreendimento de um produtor que terceirizou as operações agrícolas para a produção de cana-de-açúcar durante 5 cortes.

Embora a TIR dos tratamentos T1 e T2 não tenha apresentado resultado satisfatório para o período de avaliação, é possível que com o decorrer dos ciclos, esta variável econômica se torne satisfatória, visto que a cana-de-açúcar passa, em média, por 5 e 6 cortes, com a possibilidade de uma TIR positiva durante esse período. Dessa forma, torna-se necessário uma continuidade na avaliação dos tratamentos.

4. CONCLUSÕES

As variáveis de diâmetro, comprimento de plantas, produtividade e de qualidade tecnológica apresentaram-se iguais entre os diferentes tratamentos.

O sistema radicular apresentou área e comprimento iguais entre os tratamentos. Entre os pontos de coleta, a linha do rodado mostrou menor comprimento de raiz.

Os três tratamentos apresentaram valor presente líquido negativo, e apenas o tratamento que utilizou espaçamento duplo combinado obteve uma taxa interna de retorno positiva.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 651-660, 2013.
- BACCHI, O. O. S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação de plantas da cana de açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1993. Cap. 2, p. 24-37.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; MEGATTO, L. H.; ALVES, J. B.; WAGNER, G. P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2. p. 354-369, 2009.
- CARVALHO, I. Q. **Espaçamento entre fileiras e população de plantas em milho**. 2007. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa.
- CID BIO-SCIENCE. CI-690 RootSnap! **Operations Manual**. Washington-EUA, 2011, 24 p.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942. 2008.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, quarto levantamento, Brasília, 2015 - **Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasília: CONAB, 2015.
- CONSECANA – Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. Piracicaba: **Manual de Instruções**. 2003. 116p.
- EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: **Cana-de-açúcar**. 2013. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html> Acesso em 14 de março de 2013.
- FIGUEIREDO, I. C.; FERREIRA, M. B.; OMIR, M. M. A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool. **Nucleus**, Ituverava, edição especial, p. 82-92, 2008.
- KANEKO, F. H.; TARSITANO, M. A. A.; RAPASSI, R. M. A.; CHIODEROLI, C. A.; NAKAYAMA, F. T. Análise econômica da produção de cana-de-açúcar considerando-se a terceirização das operações agrícolas: O caso de um produtor. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 3, p. 266-270, 2009.
- LAVANHOLI, M. G. D. P. **Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação: IAC, 2008. Cap.32, p. 697 - 722

LUCCHESI, A. A. **Cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. p. 13-45.

MARTIN, N.B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M.; ANGELO, J. A.; OKAWA, H. **Sistema integrado de custos agropecuários - CUSTAGRI**. Informações Econômicas, São Paulo, v.28, n.1, p. 7-28, 1998.

MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N. **Metodologia de custo de produção utilizado pelo IEA**. Agricultura em São Paulo, v.23, n.2, p. 123-139, 1976.

MURARO, G. B.; JUNIOR, P. R.; SCHOGOR, A. L. B. Produção de biomassa de cana-de-açúcar em dois espaçamentos e duas frequências de cortes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.1, p.131-136, 2011.

NICOLOSI, P.; CARDOZO, A. C.; MARTANI, W. R.; MONACO, E. T. Risco biológico na indústria canavieira. **Revista Complexus**, São Paulo, v.3, n.5, p. 106-138, 2012.

OLIVEIRA, F. M.; AGUILAR, P. B.; TEIXEIRA, M. F. F.; ASPIAZÚ, I.; MONÇÃO, F. P.; ANTUNES, A. P. S. Características agrotecnológicas de cana-de-açúcar em diferentes épocas de supressão de irrigação e níveis de adubação. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1587-1606, 2014.

PAULA, V. R. **Avaliação dos danos causados pelo inadvertido tráfego de veículos sobre as soqueiras de cana-de-açúcar**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo/ESALQ. Piracicaba.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu, 1995, p. 99.

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.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

ROMANINI JUNIOR, A. **Influência do espaçamento de plantas no crescimento, produtividade e rendimento do amendoim rasteiro, cultivar Runner IAC886.2007**. 47 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho. Jaboticabal.

ROSA, J. H. M. **Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (saccharum spp) em espaçamento duplo alternado**. 152 p. Dissertação. (Mestrado em ciências). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

SILVA JUNIOR, C. A.; CARVALHO, L. A.; CENTURION, J. F.; OLIVEIRA, E. C. A. Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo, sob diferentes tipos de preparo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, Supplement 1,p. 1489-1500, 2013.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 38, n. 1, p. 135-146, 2014.

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.

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.

ANEXO



Operação de colheita da cultura da cana-de-açúcar nas parcelas experimentais.



Imagem da pesagem do transbordo para a obtenção da tara.



Instalação dos tubos de acrílico utilizados como acesso de scanner para a captura de imagens de raízes.



Mensuração do diâmetro inferior, mediano e superior da planta de cana-de-açúcar.



Mensuração da altura de plantas de cana-de-açúcar nas parcelas experimentais.



Contagem do número de internos nas parcelas experimentais.



Enfardamento (a), retirada das ponteiros (b) e pesagem dos fardos de cana-de-açúcar (c) nas parcelas experimentais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A realização dessa pesquisa gerou um resultado final satisfatório, tanto por conta dos resultados gerados, visto que a hipótese foi validada, assim também, pelas experiências que foram adquiridas durante o desenrolar do estudo.

Os resultados obtidos nessa pesquisa mostraram que o controle do tráfego de máquinas por meio do uso de piloto automático e pela adoção do espaçamento duplo combinado, podem contribuir para a redução da compactação do solo em área de cana-de-açúcar e, com o aumento da longevidade do canavial.

Contudo, esses resultados são primários, pois foram realizados nos dois primeiros ciclos da cultura, devendo, portanto, serem continuados os estudos nos ciclos seguintes, com finalidade de obter um banco de dados que compreendam o período de permanência da cultura da cana-de-açúcar no campo, que vai desde o plantio até a renovação do canavial.

É importante utilizar novas variáveis para o diagnóstico de compactação. Porém, é necessário dar continuidade às investigações das variáveis que foram utilizadas nessa pesquisa, no intuito de comparar, de forma mais igualitária, os resultados dos ciclos seguintes com os primeiros anos de pesquisa.