



COMPACTAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSBORDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Palavras-Chave: Densidade do solo, grau de compactação, condutividade hidráulica saturada.

Autores:

ELIAS SAMUEL MOZAMBANI OSPINA (FEAGRI/UNICAMP)

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (orientador) (FEAGRI/UNICAMP)

Me. DIEGO ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN (Coorientador) (FEAGRI/UNICAMP)

Me. MAYARA GERMANA DOS SANTOS GOMES (FEAGRI-UNICAMP)

INTRODUÇÃO:

Com a adoção da colheita mecanizada, no sistema de manejo da cana-de-açúcar, surge a preocupação com a compactação do solo e seus efeitos sobre os atributos físicos do solo e a intensidade do tráfego de máquinas causa degradação física do solo dificultando o desenvolvimento do sistema radicular, aumento da compactação, pisoteio das soqueiras e a estagnação na produtividade de colmos (BOLONHEZI et al., 2019; ESTEBAN et al., 2019). O problema da compactação é agravado devido ao aumento peso do maquinário agrícola observado nas últimas décadas, que tem contribuído para o aumento das cargas das rodas e, portanto, o risco de compactação (KELLER et al., 2019).

De todas as operações de maquinário, a colheita anual da safra de cana-de-açúcar tem sido apontada como principal fonte de compactação do solo em campos de cana-de-açúcar, devido às altas tensões induzidas pelos tratores, caminhões e reboques, que são veículos de campo típicos usados para corte de colmo, carregamento e transporte (BRAUNBECK e MAGALHÃES, 2014; SILVA et al., 2018; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). Dessa forma, estratégias de controle de tráfego devem ser adotadas durante as operações de maquinários para melhorar a qualidade do solo visando maior sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar no Brasil (CASTIONI et al., 2021). Portanto, o objetivo geral desta pesquisa foi quantificar a compactação do solo na operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar com diferentes sistemas de transbordo e avaliar seus efeitos na condutividade hidráulica no primeiro ciclo de produção da cultura.

MATERIAIS E MÉTODO:

O experimento foi conduzido em área experimental nas dependências da Usina Cerradão, no município de Frutal estado de Minas Gerais, no primeiro ciclo de produção da cana-de-açúcar na safra 2020/2021. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018) de textura média com 63% de areia, 29% de argila e 8% de silte. O delineamento experimental usado foi de blocos ao acaso com 4 tratamentos e 3 repetições, totalizando 12 parcelas experimentais, com dimensões de 50 m de comprimento por 30 m de largura (1.500 m²) (Figura 1). Nas parcelas experimentais, foram plantadas 20 linhas de cana-de-açúcar em sentido paralelo ao comprimento da parcela e com espaçamento de 1,5 m entre as linhas de plantio.

Os tratamentos adotados correspondem a diferentes configurações de transbordo da cana-de-açúcar (Figura 1): **1T/21** - conjunto trator com 185 cv + transbordo com capacidade de 21 toneladas: trator VALTRA - BH180, com potência nominal/máxima de 185 cv, bitola de 2,10 m, massa aproximada de 10,5 toneladas. Transporte da cana-de-açúcar em transbordo ANTONIOSI - ATA 21500, capacidade de 21 toneladas de cana, massa aproximada de 6,5 toneladas e bitola de 3,00 m; **2T/10** - conjunto trator com 185 cv + transbordo com capacidade de 10 toneladas: utiliza o mesmo trator do 1T/21. Transporte da cana-de-açúcar em dois transbordos ANTONIOSI - ATA 10500, com capacidade individual 10 toneladas de cana, massa aproximada de 7,3 toneladas cada, bitola de 3,00 m e pneus 600/50-22,5; **1T/30** - conjunto trator 230 cv + transbordo com capacidade de 30 toneladas: trator VALTRA - BH180, com potência nominal/máxima de 230 cv, bitola de 2,10 m, pneus dianteiros 600/65R28 e pneus traseiros 710/7R38 e massa aproximada de 10,5 toneladas. Transporte da cana-de-açúcar em transbordo VTX 6030, com capacidade para transportar 30 toneladas de cana, massa aproximada de 16,9 toneladas, bitola de 3,00 m e pneus 600/50-22,5; **1C/21** - conjunto caminhão + transbordo com capacidade de 21 toneladas: caminhão Mercedes Benz modelo Axxor 3131, com potência nominal/máxima de 230 cv, bitola de 3,0 m, pneus dianteiros 400/70R20, pneus traseiros 560/60R-22,5 e massa de 10,5 toneladas.

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e nos locais correspondentes à linha de plantio (LP) e à entrelinha (EL), utilizando cilindros de aço inoxidável de 8 cm diâmetro e 5 cm de altura (volume de 250 cm³) para determinação da condutividade hidráulica saturada e densidade do solo. Nos

mesmos locais, foram coletadas amostras de solos deformadas para determinação do grau de compactação. No total, foram coletadas 72 amostras deformadas e indeformadas.

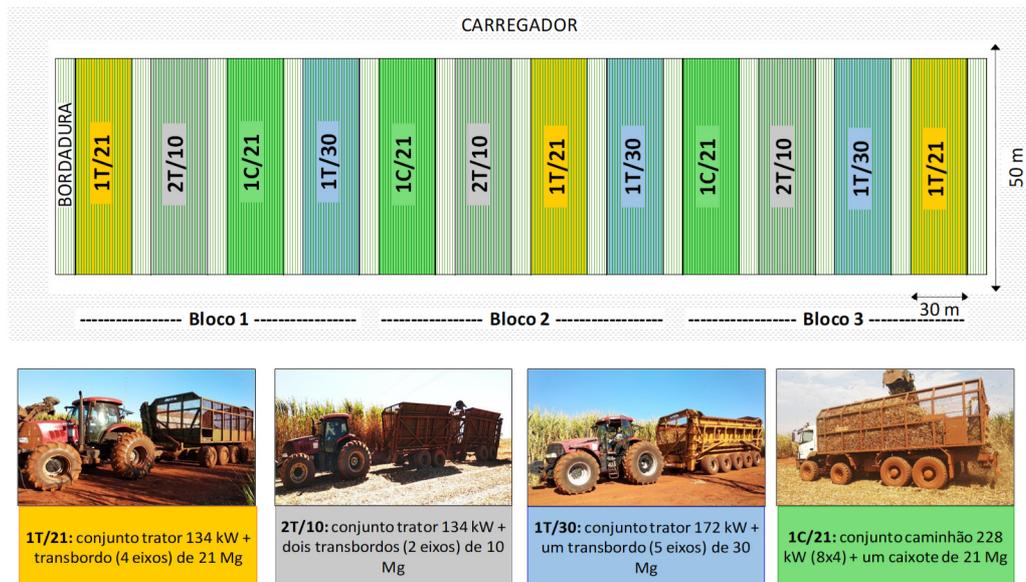


Figura 1. Delineamento experimental com uso de diferentes sistemas de transbordo na colheita de cana-de-açúcar no município de Frutal, estado de Minas Gerais.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada pelo método da carga constante usando o sistema de medição automatizado KSAT (UMS GmbH, Munique, Alemanha). A determinação do grau de compactação (Gc) foi calculado como a razão entre a Ds e a densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) (REICHERT et al., 2009). A $D_{s_{máx}}$ foi determinada a partir das amostras deformadas de solo coletadas em cada camada a partir da curva de compactação do solo conforme Beutler et al. (2005) obtida pelo ensaio de Proctor normal de acordo com a norma atualizada NBR 7182 (ABNT, 2016).

A análise dos dados foi realizada por meio de análise de variância para determinar se os sistemas de transbordo da cana-de-açúcar induziram diferenças nos atributos avaliados e quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A análise estatística foi feita no software estatístico R Studio (1.1.463, R Foundation for Statistical Computing).

RESULTADOS:

O uso de diferentes sistemas de transbordo na colheita mecanizada de cana-de-açúcar promoveu alterações dos indicadores físicos do solo nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (Figuras 2, 3 e 4). Nessas duas camadas a Ds apresentou diferenças significativas entre os tratamentos e locais de avaliação, sendo que na camada de 0,00-0,10 m as diferenças entre tratamentos aconteceram somente no local da linha de plantio (LP), onde o valor da Ds no tratamento 1C/21 ($1,37 \text{ kg dm}^{-3}$) foi significativamente maior quando comparado com os outros três tratamentos. Na camada de 0,10-0,20 m as diferenças na Ds entre os tratamentos aconteceram no local da EL, sendo que o tratamento 1T/30 apresentou o menor valor de Ds ($1,31 \text{ kg dm}^{-3}$) e o tratamento 2T/10 apresentou o maior valor ($1,48 \text{ kg dm}^{-3}$).

Na camada 0,10-0,20 m as diferenças no Gc entre tratamentos foram obtidas na EL, sendo que o menor Gc aconteceu no tratamento 1T/30 (71,31%) e o maior Gc em 2T/10 (80,57%). Com relação aos locais de avaliação, os tratamentos 1T/21 e 1T/30 apresentaram maior Gc na EL do que na LP. Os dois tratamentos restantes, 2T/10 e 1C/21, não apresentaram diferenças no Gc entre locais de amostragem para essa camada de solo. A condutividade hidráulica saturada na camada de 0,00-0,10 m apresentou diferenças significativas entre os tratamentos 2T/10 e 1C/21, na linha de plantio, sendo que o tratamento 2T/10 teve maior valor de $\text{Log}(K_s)$ ($2,87 \text{ cm dia}^{-1}$) e o tratamento 1C/21 apresentou o menor valor ($2,22 \text{ cm dia}^{-1}$).

DISCUSSÃO:

O uso de diferentes sistemas de transbordo na colheita mecanizada de cana-de-açúcar promoveu alterações na densidade do solo, grau de compactação e na condutividade hidráulica saturada principalmente nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Esse fato corrobora os comentários de Jimenez et al. (2021) sobre a relevância de detalhar as propriedades compressivas dos solos ao invés de considerar o perfil do solo como homogêneo. Nessas camadas de solo menores valores de Ds e Gc e maiores valores de $\text{Log}(K_s)$ na LP do que na EL, são resultado do uso do controle de tráfego na operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar com auxílio do piloto automático embarcado em todas as máquinas usadas nos diferentes tratamentos. Quando corretamente utilizado, o controle de tráfego agrícola destina o tráfego das máquinas sempre na mesma linha de rodado (EL) concentrando a compactação do solo nessa região e possibilitando melhores condições físicas (menor Ds e resistência do solo à penetração e maior macroporosidade) na região da soqueira da cultura,

permitindo assim um melhor desenvolvimento radicular (ROQUE et al., 2010; SOUZA et al., 2014; ESTEBAN et al., 2019).

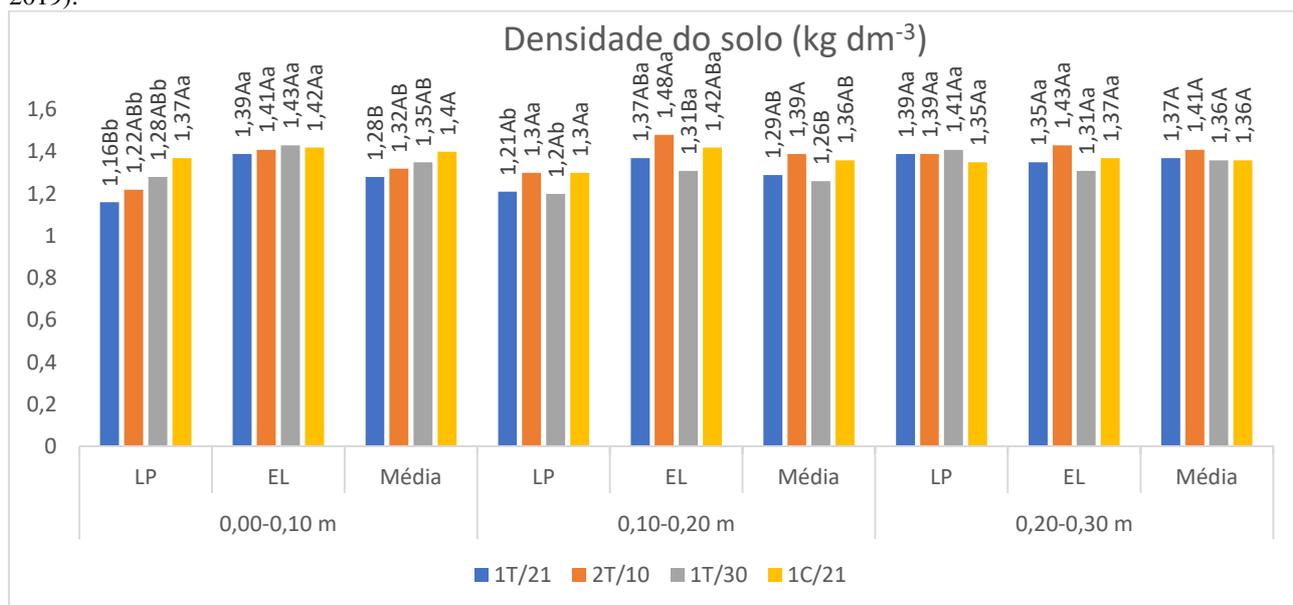


Figura 2. Densidade do solo para um Latossolo Vermelho em área de cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de transbordo na operação de colheita mecanizada. 1T/21 = conjunto trator 185 cv + transbordo de 21 toneladas; 2T/10 = conjunto trator 185 cv + dois transbordos de 10 toneladas; 1T/30 = conjunto trator 230 cv + transbordo de 30 toneladas; 1C/21 = conjunto caminhão + transbordo de 21 toneladas; LP = linha de plantio; EL = entrelinha; Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo local e letras minúsculas comparam os locais dentro do mesmo tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

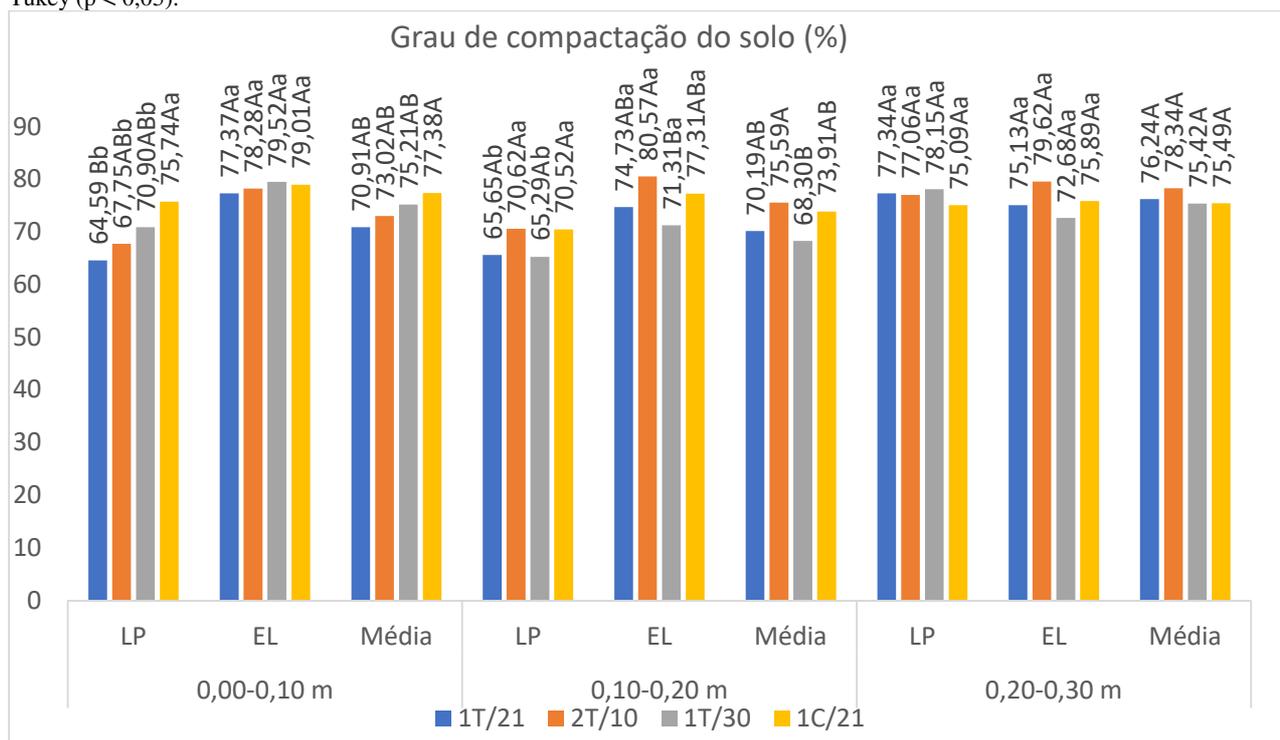


Figura 3. Grau de compactação (%) para um Latossolo Vermelho em área de cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de transbordo na colheita mecanizada. LP = linha de plantio; EL = entrelinha; 1T/21 = conjunto trator 185 cv + transbordo de 21 toneladas; 2T/10 = conjunto trator 185 cv + dois transbordos de 10 toneladas; 1T/30 = conjunto trator 230 cv + transbordo de 30 toneladas; 1C/21 = conjunto caminhão + transbordo de 21 toneladas.

De acordo com Ball et al. (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e consequente diminuição da condutividade hidráulica, fato ocorrido nessa pesquisa nas entrelinhas das duas primeiras camadas de solo. Segundo Horn et al. (2003) o incremento da pressão aplicada por máquinas agrícolas reduz os valores de condutividade hidráulica saturada de solo. Contudo, na camada superficial de 0,00-0,10 m, mesmo com uso de controle de tráfego, o tratamento 1C/21 não diferiu na D_s , G_c e $\log(K_s)$ entre a LP e a EL. No entanto, na camada superficial de 0,00-0,10 m, mesmo com uso de controle de tráfego, o tratamento 1C/21 não diferiu na D_s , G_c e $\log(K_s)$ entre a LP e a EL. Esse resultado, pode ser devido à maior pressão de contato pneu-solo que

pode estar sendo aplicado por cada roda do conjunto caminhão + transbordo consequência da maior carga na roda (4,81 Mg), maior pressão de inflação dos pneus e menor tamanho dos mesmos quando comparados com as máquinas que compõem os outros tratamentos. Esse fato, leva a que maiores cargas sejam transmitidas na superfície do solo com diminuição da qualidade física do solo como demonstrado por Pereira et al. (2015), indicando que embora o maquinário passe na entrelinha, o tratamento 1C/21 foi o que mais comprometeu a qualidade física do solo na linha de plantio.

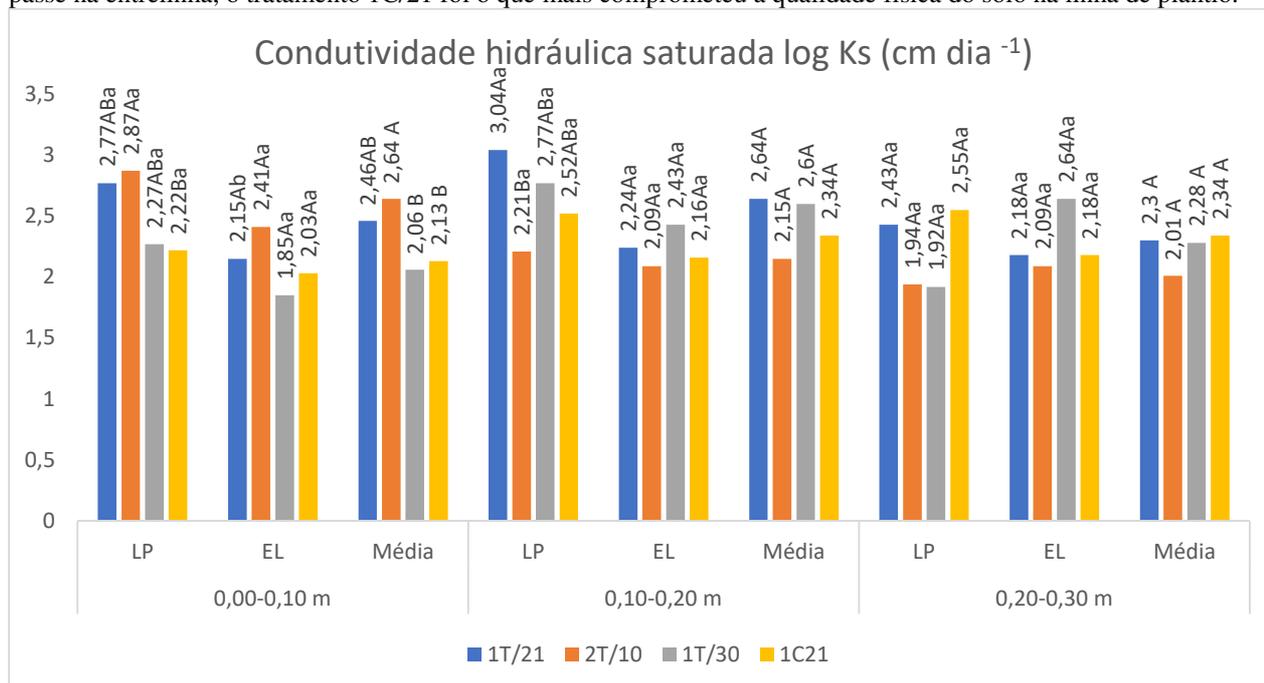


Figura 4. Condutividade hidráulica saturada (Log (Ks), cm dia⁻¹) para um Latossolo Vermelho em área de cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de transbordo na colheita mecanizada. LP = linha de plantio; EL = entrelinha; 1T/21 = conjunto trator 185 cv + transbordo de 21 toneladas; 2T/10 = conjunto trator 185 cv + dois transbordos de 10 toneladas; 1T/30 = conjunto trator 230 cv + transbordo de 30 toneladas; 1C/21 = conjunto caminhão + transbordo de 21 toneladas.

A ausência de diferença significativa entre tratamentos e locais na camada de 0,20-0,30 m corrobora com os resultados obtidos por Jimenez et al. (2021), que revelaram variabilidade na compactação do solo em função da magnitude das tensões transmitidas, bem como da heterogeneidade das propriedades mecânicas ao longo do perfil do solo. Kim et al. (2010), verificaram não ter diferença na densidade do solo em camadas abaixo de 0,20 m de profundidade. Na entrelinha o grau de compactação foi maior que na linha de plantio nas duas primeiras camadas avaliadas, em função da concentração do tráfego das máquinas nesse local, como demonstrado por Silva et al. (2003) ao verificar que o maior estado de compactação gerou reduções de quase três vezes a condutividade hidráulica saturada em relação a um baixo estado de compactação.

Houve diferença na condutividade hidráulica saturada entre os tratamentos 1T/21 e 2T/10, para a linha de plantio e a entrelinha, e na média de todos os tratamentos. Os dados obtidos na camada superficial de 0,00-0,10 m, apresentou as maiores diferenças de condutividade hidráulica estando de acordo com os resultados obtidos por Rosa et al. (2008) ao constatar que o manejo do solo altera a condutividade hidráulica saturada nas camadas superficiais do solo. De modo geral, na camada superficial o grau de impacto do tráfego das máquinas pelos diferentes sistemas de transbordo nos indicadores físicos avaliados decresceu na sequência 2T/10, 1T/21, 1T/30 e 1C/21, concordando com Pereira (2014), em que o caminhão transbordo causou maior impacto nos atributos físicos do solo. Sendo que 2T/10 foi o tratamento que apresentou menor densidade do solo e grau de compactação e maior condutividade hidráulica saturada. Para a camada de 0,10-0,20 m essa ordem muda para 1T/30, 1T/21, 1C/21 e 2T/10.

CONCLUSÕES:

As diferentes combinações de máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar no canavial resultaram em diferente grau de compactação nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, com reflexos na densidade do solo e na condutividade hidráulica saturada. Na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos 1C/21 e 1T/21 tiveram respectivamente o maior e menor valor de densidade do solo e grau de compactação na linha de plantio. Na camada de 0,10-0,20 m os tratamentos 2T/10 e 1T/30 tiveram o maior e menor valor desses indicadores na entrelinha, respectivamente.

Na camada de 0,00-0,10 m, os tratamentos 2T/10 e 1C/21 tiveram, respectivamente, a maior e menor condutividade hidráulica saturada. Na camada de 0,10-0,20 m o maior e menor valor desta propriedade física do solo foi obtida na linha de plantio nos tratamentos 1T/21 e 2T/10, respectivamente. O tratamento 1C/21 na camada de 0,00-0,10 m, foi o que mais comprometeu a qualidade física do solo na linha de plantio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.6, p.843-849, 2005.

BOLONHEZI, D.; VISCHI FILHO, O.J.; IVO, M.P.M.; VITTI, A.C.; BOLONHEZI, A.C.; BRANCALIANO, S.R. **Manejo e conservação do solo em cana-de-açúcar**. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I.C.; SOUZA, L.S. (Eds.). *Manejo e conservação do solo e da água*. 1 Ed. Viçosa: SBCS, p.1028-1080, 2019.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES P.S.G. **Technological evaluation of sugarcane mechanization**. In: CORTEZ, L.A.B. (Coord.). *Sugarcane bioethanol - R&D for productivity and sustainability*, São Paulo: Editora Edgard Blücher, p.465-476, 2014.

CASTIONI, G.A.F.; LIMA, R.P.; CHERUBIN, M.R.; BORDONAL, R.O.; ROLIM, M.M.; CARVALHO, J.L.N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v.213, 105122, 2021.

ESTEBAN, D.A.A.; SOUZA, Z.M.; TORMENA, C.A.; LOVERA, L.H.; LIMA, E.S.; OLIVEIRA, I.N.; RIBEIRO, N.P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I.C.; ARAUJO-JUNIOR, C.F.; FARHATE, C.V.V.; DE SOUZA, Z.M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019.

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil and Tillage Research**, v.73, n.1-2, p.101-106, 2003.

JIMENEZ, K.J.; ROLIM, M.M.; GOMES, I.F.; LIMA, R.P.; BERRÍO, L.L.A.; ORTIZ, P.F.S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, 104847, 2021.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, 104293, 2019.

KIM, H.; ANDERSON, S.H.; MOTAVALLI, P.P.; GANTZER, C.J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v.160, n.2, p.244-251, 2010.

PEREIRA, A.H.F. **Atributos físicos do solo sob tipos de transbordos em colheita mecanizada de cana crua**. 2014, 55 p. Monografia (Trabalho de Graduação em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados Mato Grosso do Sul.

PEREIRA, A.H.F.; VITORINO, A.C.T.; PRADO, E.A.F.; BERGAMIN, A.C.A.; MAUAD, M.; ARANTES, H.P. Least limiting water range and load bearing capacity of soil under types of tractor-trailers for mechanical harvesting of green sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.6, p.1603-1610, 2015.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

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**, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

ROSA, V.T.; ROSA, D.P.; SATTLER, A.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J. **Alteração da condutividade hidráulica saturada do solo em áreas com diferentes níveis de tráfego de máquinas e prazos de adoção do sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: *Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais*, p.1-4, 2008.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018. 353p.

SILVA, R.B.; DIAS Jr.; M.S., SILVA, F.A.M.; FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.27, n.6, p.973-983, 2003.

SILVA, R.P.; ROLIM, M.M.; GOMES, I.F.; PEDROSA, E.M.; TAVARES, U.E.; SANTOS, A.N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element. **Soil and Tillage Research** v.181, p.1-10, 2018.

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

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica (PIBIC/UNICAMP), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de iniciação científica e à Usina Cerradão por conceder a área para realizar o projeto. Esse projeto de pesquisa recebe apoio financeiro da Fundação Agrisus - Agricultura Sustentável, por meio do Processo N° PA 3054/21 e financiamento do “*Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia*” mediante apoio para a realização do projeto de tese do doutorando Diego Alexander Aguilera Esteban.