

AValiação da Resistência do Solo à Penetração Após Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar sob Diferentes Ciclos de Produção

**IGOR Q. M. VALENTE¹, ZIGOMAR M. DE SOUZA², GAMAL C. SOARES³,
MAYARA G. DOS SANTOS¹**

¹Eng. Agrônomo, Doutorando (a) em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP, valente.igm@gmail.com

²Eng. Agrônomo, Professor Titular, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP

³Eng. Agrônomo, Mestrando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: Pelos benefícios e eficiência, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada no Brasil. Todavia, devido a sua trafegabilidade contínua, ocorre uma tendência nos campos a apresentarem uma grave compactação do solo no final dos ciclos. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar se a trafegabilidade em áreas de cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita afeta abruptamente a resistência do solo à penetração. O estudo foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar da Usina Cerradão, Município de Frutal, estado de Minas Gerais. Foram avaliados quatro tratamentos, correspondendo diferentes ciclos de colheita (cana planta, 1º soca, 2º soca e 3º soca). Após a colheita mecanizada, foi avaliada a RSP nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m nos locais correspondentes à linha de plantio (LP) e linha do rodado (LR). O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração com menores valores no T1 em relação ao T4. Além disso, a adoção de controle de tráfego resultou em menores RSP na linha de plantio (LP) promovendo condições mais favoráveis a planta.

PALAVRAS-CHAVE: tráfego controlado, degradação do solo, compactação do solo

EVALUATION OF SOIL RESISTANCE TO PENETRATION AFTER MECHANIZED HARVESTING OF SUGARCANE UNDER DIFFERENT PRODUCTION CYCLES

ABSTRACT: Due to its benefits and efficiency, mechanized sugarcane harvesting is a widely used practice in Brazil. However, due to its continuous trafficability, there is a tendency in the fields to present severe soil compaction at the end of the cycles. Thus, the objective of this work was to evaluate whether the trafficability in sugarcane areas in different harvest cycles abruptly affects soil resistance to penetration. The study was carried out in a commercial area of sugarcane at Usina Cerradão, Municipality of Frutal, state of Minas Gerais. Four treatments were evaluated, corresponding to different harvest cycles (cane plant, 1st ratoon, 2nd ratoon and 3rd ratoon). After mechanized harvesting, the RSP was evaluated at depths of 0.00-0.05 m, 0.05-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.40 m in the locations corresponding to the planting line (LP) and wheelset line (LR). The effect of trafficability in the cultivation of sugarcane in different harvest cycles promoted changes in soil resistance to penetration with lower values in T1 compared to T4. In addition, the adoption of traffic control resulted in lower RSP in the planting line (LP) promoting more favorable conditions for the plant.

KEYWORDS: controlled traffic, soil degradation, soil compaction

INTRODUÇÃO: Um dos principais impulsionadores da degradação do solo é a mudança no uso da terra (CHERUBIN et al., 2021), um exemplo comum de mudança do uso da terra no Brasil e a conversão das pastagens em áreas de cana-de-açúcar (CHERUBIN et al., 2021). De acordo com Adami et al. (2012) a expansão da cana-de-açúcar tem pouco ou nenhum papel como impulsionador do desmatamento direto no Brasil. Sendo que a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é considerada uma das grandes alternativas para a economia mundial, seja ela no setor de energias renováveis através da produção de etanol e/ou cogeração de eletricidade, e do açúcar utilizado para exportação. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada para a safra 2022/23 de 598,3 milhões de toneladas em 8,2 milhões de hectares, tendo a região Sudeste como o maior produtor canavieiro com 63,7% da produção (CONAB, 2022). A mecanização da colheita da cana-de-açúcar permitiu melhorar o desempenho operacional, atendendo os cronogramas de produção das usinas, reduzindo custos e emissões de gases de efeito estufa com impacto positivo na saúde humana das populações de áreas canavieiras (BORDONAL et al., 2018). Pelos benefícios e eficiência na redução de custos, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada e consolidada em grande parte do Brasil (CONAB, 2021). Todavia, por se tratar de uma cultura que demanda em todas as etapas de produção o uso intensivo de máquinas agrícolas, que na sua maioria apresentam diferentes configurações como tamanhos, pesos e funções (KELLER et al., 2019), problemas envolvendo a compactação do solo se torna prejudicial para cultura. Por serem máquinas exigentes (pesadas e grandes) e devido a sua trafegabilidade contínua ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, favorecem de forma sucessiva a degradação da estrutura do solo devido as tensões induzidas (KELLER et al., 2019), o que leva a uma tendência nos campos a apresentarem uma grave compactação do solo no final dos ciclos (SOUZA et al., 2014; ESTEBAN et al., 2020). É possível definir a compactação do solo como uma diminuição do volume ocupado por uma massa de solo, o que leva a uma redução dos espaços porosos, principalmente aqueles com poros relativamente maiores (STOESSEL et al., 2018). Propriedades físicas como resistência do solo à penetração (RSP) têm sido comumente utilizados na avaliação dos impactos dos sistemas de produção da cana-de-açúcar (CAVALCANTI et al., 2019; LUZ et al., 2022). A resistência do solo à penetração afeta o crescimento da cana-de-açúcar, dificultando a penetração das raízes, consequentemente a absorção de água e nutrientes. A adoção de práticas de manejo adequadas e a avaliação da resistência do solo à penetração são essenciais para minimizar os efeitos negativos, promover o desenvolvimento saudável das raízes e melhorar o rendimento da cultura, tendo em vista que o sucesso do canavial está relacionado com a rebrota das soqueiras (ESTEBAN et al., 2019). Desta forma, compreender os efeitos da RSP causados ao solo é importante para auxiliar no planejamento adequado para o manejo nas áreas de cana-de-açúcar. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar se a trafegabilidade em áreas de cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita afeta de forma abrupta a resistência do solo à penetração (RSP).

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar da Usina Cerradão, Município de Frutal, estado de Minas Gerais, região sudeste do país (19°47,7'20" de latitude sul e 49°25,5'80" de longitude oeste, 534 m de altitude) (Figura 1). O relevo do município de Frutal-MG é caracterizado, segundo Pinheiro et al. (2018) como plano ou suavemente ondulado, assentado sobre a Bacia Sedimentar do Paraná, onde suas altitudes variam entre 500 e 600 metros, apresenta relevo residual de chapadões e morros testemunhos da Formação Marília. Na bacia é predominantemente Formação Vale do Rio do Peixe com ocorrências ao Norte da Bacia de Formação Marília e no Sul da bacia Formação Serra Geral. Possui solos classificados em Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo. Os

expressam de acordo com os autores supracitados, proporções de ferro variantes, com textura arenosa e areno-argilosa.

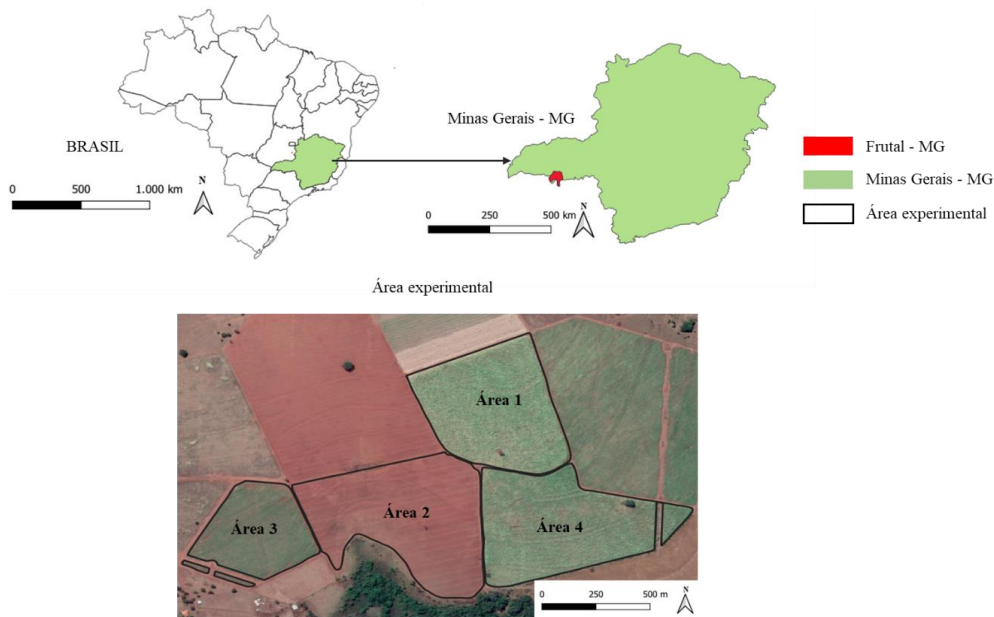


Figura 1. Localização da área experimental na Usina Cerradão em Frutal, Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

Os tratamentos avaliados foram: T1 = colheita da cana-de-açúcar correspondendo ao primeiro ciclo de cana planta (área 1); T2 = colheita da cana-de-açúcar correspondendo ao seu primeiro ciclo de cana soca (área 2); T3 = colheita da cana-de-açúcar correspondendo ao seu segundo ciclo de cana soca (área 3) e T4 = colheita da cana-de-açúcar correspondente ao seu terceiro ciclo de cana soca (área 4). Para todos os tratamentos, foi adotado um espaçamento simples de 1,50 m entrelinhas. Após a colheita mecanizada dos quatro tratamentos, foi avaliada a resistência do solo à penetração do solo (RSP) nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nos locais correspondentes à linha de plantio (LP), local correspondente à região de touceira; e na linha do rodado (LR), correspondente à entrelinha, estabelecida a 0,75 m da LP (Figura 2), para posteriormente quantificar a resistência do solo à penetração no laboratório a partir das amostras indeformadas de solo equilibradas no potencial de -10 kPa com o auxílio de um penetrômetro eletrônico de bancada da marca MARCONI modelo MA 933 (MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹. As medidas de RSP foram obtidas em 3 repetições para cada amostra de solo, excluindo as leituras do segmento superior e inferior (1 cm) de todas as amostras utilizando o método de bancada proposto por Otto et al. (2011). Em cada local de amostragem (LP e/ou LR) foram coletadas quatro amostras de solo, correspondentes a uma amostra das camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m. Para cada tratamento foram retiradas 40 amostras indeformadas, totalizando 160 amostras para todos os tratamentos. O delineamento experimental utilizado é em blocos ao acaso com quatro tratamentos, cinco repetições, dois locais de amostragem e quatro profundidades, totalizando vinte parcelas experimentais. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio®. Para avaliar os efeitos dos tratamentos no atributo em estudo e nos locais de amostragem, foi utilizado uma análise fatorial tripla com tratamentos (quatro ciclos diferentes), camadas (quatro profundidades), local de amostragem (LP e LR) e suas respectivas interações. Os dados foram submetidos a análise de variância

ANOVA, e quando foi significativa, fez-se a comparação de médias pelo teste t a 5% de probabilidade de erro.

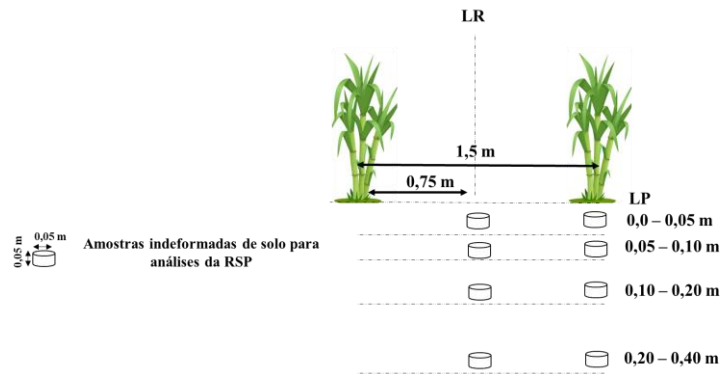


FIGURA 2. Representação esquemática para avaliação da RSP do solo em área de cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos (ciclos da cultura da cana-de-açúcar). LP = linha de plantio; LR = linha do rodado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração (RSP) (Figura 3).

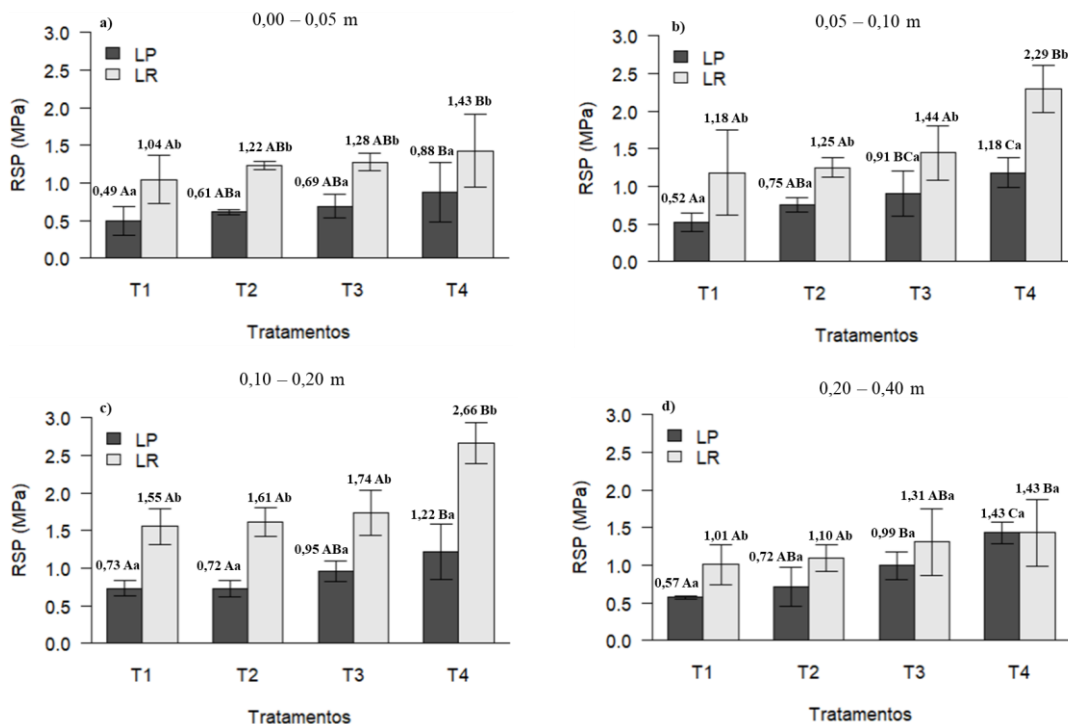


Figura 3. Resistência do solo à penetração (RSP) após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar sob diferentes tratamentos. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula (comparando tratamentos no mesmo local), minúscula (comparando os locais no mesmo tratamento) não diferem entre si (teste t, $p < 0,05$). LR = linha do rodado; LP = linha de plantio.

Independentemente dos tratamentos, a RSP aumentou em comparação com o T1 (primeiro ciclo de cana planta), principalmente nos locais da linha do rodado (LR) e da linha de plantio (LP) (Figura 3). Posterior a primeira (T1) e quarta colheita (T4) de cana-de-açúcar, a RSP

variou de 0,49 MPa (Figura 3a) a 2,66 MPa (Figura 3b), apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos e locais nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Para todos os tratamentos, houve diferença significativa entre os locais de amostragem e camadas de solo. Os valores de RSP foram menores na LP em relação a LR para todos os tratamentos e camadas, com exceção do T4 para a camada 0,20-0,40 m onde essas obtiveram RSP equivalentes (1,43 MPa) (Figura 3d). Na camada superficial 0,00-0,05 m foram obtidos os menores valores de RSP, variando de 0,49 MPa a 1,43 MPa tanto na LR quanto na LP (Figura 3a), porém, na camada seguinte 0,05-0,10 m e principalmente na camada 0,10-0,20 m estes valores aumentaram, com variação de 0,52 MPa a 2,29 MPa (Figura 3b) e 0,73 MPa a 2,66 MPa (Figura 3c) tanto na LP quanto na LR, respectivamente, ficando evidente que na camada 0,10-0,20 m ocorreram os maiores valores de RSP, principalmente na LR. De fato, a trafegabilidade ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar intensificou os níveis de RSP principalmente na LR, concordando com os resultados obtidos por Guimarães Júnnyor et al. (2022). Segundo Luz et al. (2022) devido a frequência de tráfego de máquinas agrícolas para o cultivo e colheita, torna a compactação do solo mais crítica próximo à renovação do canavial. Todavia, a adoção do sistema de tráfego controlado pela usina apresentou menor RSP na LP, evitando assim degradação física na linha de plantio (ESTEBAN et al., 2019; LUZ et al., 2023). No entanto, maiores valores de RSP na LP estão concentrados na camada compactada de 0,10-0,20 m, pois, além, da trafegabilidade das máquinas, as tensões impostas pelos transbordos carregados induzem maiores pressões no solo tanto na vertical como na horizontal, podendo ocasionar compactação na linha de plantio (GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). A adoção do sistema de tráfego controlado beneficia a qualidade física do solo, podendo se aperfeiçoar com o tempo (LATSCH; ANKEN, 2019), principalmente na LP (LUZ et al., 2023). Por outro lado, o estado do solo na LR pode ser beneficiado com a adoção de práticas adicionais, como plantio direto ou reduzido (LUZ et al., 2023; TWEDDLE et al., 2021) e cultivo de plantas de coberturas na renovação do canavial (FARHATE et al., 2022). De acordo com Silva et al. (2016) e Guimarães Júnnyor et al. (2019) a colheita é a etapa que promove os maiores níveis de compactação em áreas de cana-de-açúcar. Portanto, a adoção do tráfego controlado resulta em condições físicas mais favorável a planta, preservando a região da soqueira. Adotando o valor de 2,0 MPa como resistência do solo à penetração crítica ao desenvolvimento radicular na consistência friável (TORRES; SARAIVA, 1999), os resultados indicam que nas áreas com os diferentes tratamentos estudados, nas profundidades de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, apresentam valores superiores no tratamento T4 na LR, indicando possíveis restrições à penetração de raízes, em períodos de déficit hídrico a 2 MPa. Arshad et al. (1996) afirmam que valores entre 2,0 e 4,0 MPa dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Segundo Grant e Lafond (1993) valores compreendidos entre 1,5 e 3,0 MPa são considerados críticos e dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Dexter (1987) afirmou que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superior a 4,0 MPa. Segundo e Hakansson e Voorhees (1997), sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas podem promover compactação em subsuperfície.

CONCLUSÕES: O efeito da trafegabilidade no cultivo da cana-de-açúcar em diferentes ciclos de colheita promoveu alteração na resistência do solo à penetração com menores valores no T1 em relação ao T4. Além disso, a adoção de controle de tráfego resultou em menores RSP na linha de plantio (LP) promovendo condições mais favorável para a planta.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processo2021/09077-2), a Fundação Agrisus (processo 3054/21)

pelo apoio financeiro e a Usina Cerradão pela disponibilidade do espaço para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS:

- ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v.4, n.4, p.574-585, 2012.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special publication, 49).
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.13, p.1-23, 2018.
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.189, n.1, p.140-147, 2019.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v.10, p.1-24, 2021.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. SAFRA 2021/22, v.8, n.3. Terceiro levantamento, p.63, 2021.
- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana-de-açúcar**. Boletim Safra-Terceiro levantamento 2022/23, [S. l.], v. 9, n. 3, p.1-60, 2022.
- DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v.98, n.3, p.303-312, 1987.
- 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.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; DA SILVA, R. B.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v.362, p.1-11, 2020.
- FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; LA SCALA JUNIOR, N. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, p.1-24, 2022.
- 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**, v.73, n.2, p.223-232, 1993.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; 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.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DISERENS, E.; SEVERIANO, E. C. O.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Conservation systems change soil resistance to compaction caused by mechanised harvesting. **Industrial Crops and Products**, v.177, p.1-8, 2022.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

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, p.1-12, 2019.

LATSCH, A.; ANKEN, T. Soil and crop responses to a “light” version of controlled traffic farming in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-10, 2019.

LUZ, F. B.; CASTIONI, G. A. F.; TORMENA, C. A.; FREITAS, R. S.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-9, 2022.

LUZ, F. B.; GONZAGA, L. C.; CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields. **Geoderma**, v.432, p.1-10, 2023.

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

PINHEIRO, L. S.; CAETANO, J. S.; PEREIRA, T. T. C. **Mapeamento geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Frutal (Frutal-MG)**. In: XII SINAGEO - SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, Crato-CE, 2018. Paisagem e geodiversidade: A valorização do patrimônio geomorfológico brasileiro - CE: UGB - União da Geomorfologia Brasileira, 2018.

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

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, n.1, p.135-146, 2014.

STOESSEL, F.; SONDEREGGER, T.; BAYER, P.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. **Science of the Total Environment**, v.630, p.913-921, 2018.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular técnica, 23).

TWEDDLE, P. B.; LYNE, P. W. L.; van ANTWERPEN, R.; LAGERWALL, G. L. A review and synthesis of sugarcane losses attributed to infield traffic. **Advances in Agronomy**, v.166, p.197-250, 2021.