

O IMPACTO DO TRÁFEGO DE MÁQUINAS NA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRASIL

Haroldo Humberto Lobo **Cardoso Neto**¹, Andreccelly Guimarães **da Silva**², Amiel Johnson **Cardoso Pimenta**³, Letícia Bentes **Soares**⁴

(1 – Universidade Federal Rural da Amazônia, haroldocardosoneto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7636-5837>; 2 – Universidade Federal Rural da Amazônia, andreccelly@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9364-948Xv>; 3 – Universidade Federal Rural da Amazônia, amieljohnson58@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9156-3016>; 4 – Universidade Federal Rural da Amazônia, bentesagro@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5176-7568>)

Resumo: A compactação ocorre quando forças externas rearranjam as partículas do solo, reduzindo o volume poroso e aumentando a densidade. Isso prejudica o enraizamento, a movimentação de água e nutrientes, afetando a produtividade e a sustentabilidade agrícola. Neste estudo, avaliaram-se os efeitos da colheita mecanizada sobre os atributos físicos do solo em um cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) em Ribeirão Preto, São Paulo, em três profundidades (0 – 0,10, 0,11 – 0,20 e 0,21 – 0,30 m). Para tal, estabeleceu-se um delineamento em blocos ao acaso com dez repetições, comparando a colheita manual (T1) com a colheita mecanizada (T2). O T2 resultou em maiores médias de densidade do solo na profundidade de 0,21 – 0,30 m e maior resistência mecânica do solo à penetração de 0 – 0,30 m. Essas variáveis apresentaram médias iguais ou superiores aos limites críticos estabelecidos pela literatura, indicando a compactação do solo. Contudo, a macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo não foram afetadas pelo tráfego de máquinas. Portanto, recomendam-se estudos futuros para analisar a variabilidade espacial e avaliar a influência da compactação na produtividade da cana-de-açúcar para elucidar os padrões e embasar a tomada de decisão.

Palavras-chave: Física do solo. Atributos físicos. Compactação.

THE IMPACT OF MACHINERY TRAFFIC ON THE PHYSICAL QUALITY OF A LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO CULTIVATED WITH SUGARCANE IN RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRAZIL

Abstract: Soil compaction occurs when external forces rearrange particles, reducing pore volume and increasing density. This hinders root growth, water and nutrient movement, affecting agricultural productivity and sustainability. In this study, we evaluated the effects of mechanized harvesting on soil physical attributes in a sugarcane crop (*Saccharum officinarum L.*) in Ribeirão Preto, São Paulo, at three depths (0 – 0.10, 0.11 – 0.20 and 0.21 – 0.30 m). A randomized block design with ten replicates was employed, comparing manual harvesting (T1) with mechanized harvesting (T2). T2 resulted in higher average soil density at a depth of 0.21 – 0.30 m and increased soil penetration resistance within 0 – 0.30 m. These variables exhibited means equal to or above the critical limits established in the literature, indicating soil compaction. However, macroporosity, microporosity, and total soil porosity were not affected by machinery traffic. Therefore, future studies are recommended to analyze spatial variability and assess the impact of compaction on sugarcane productivity in order to elucidate patterns and inform decision-making.

Keywords: Soil physics. Physical attributes. Compaction.

L'IMPACT DE LA CIRCULATION DES MACHINES SUR LA QUALITÉ PHYSIQUE D'UN LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO CULTIVÉ AVEC DE LA CANNE À SUCRE À RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO, BRÉSIL

Résumé: La compactation est le réarrangement des particules du sol, ce qui augmente la densité et réduit la porosité, l'enracinement, la circulation de l'eau et des nutriments, la productivité et la durabilité agricole. Dans cette étude, les effets de la récolte mécanisée sur les attributs physiques du sol ont été évalués dans une culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum L.*) à Ribeirão Preto, São Paulo, à trois profondeurs (0 – 0,10, 0,11 – 0,20 et 0,21 – 0,30 m). Un plan en blocs aléatoires avec dix répétitions a été établi, comparant la récolte manuelle (T1) à la récolte mécanisée (T2). Le T2 a obtenu des moyennes de densité du sol plus élevées à la profondeur de 0,21 – 0,30 m et une résistance mécanique du sol à la pénétration plus élevée de 0 – 0,30 m. Ces variables étaient

proches des limites critiques. La macroporosité, la microporosité et la porosité totale du sol n'ont pas été affectées. Des études futures sont recommandées pour analyser la variabilité spatiale et l'influence de la compactation sur la productivité de la canne à sucre.

Mots-clés: Physique du sol. Attributs physiques. Compactage.

Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma gramínea semiperene que possui relevância para o setor agrícola e industrial, tendo o açúcar e o etanol como principais produtos. No Brasil, a Resolução n. 807 (2020) exige que pelo menos 27% de etanol anidro seja misturado a gasolina, visando a redução dos impactos ambientais, já que os biocombustíveis podem diminuir as emissões de CO₂ em até 78% em comparação aos derivados do petróleo (Nery et al., 2019).

O Brasil lidera a produção mundial do complexo sucroalcooleiro, com um faturamento anual de R\$ 95,9 bilhões e uma produção de 715,65 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2021 (Governo do Estado de São Paulo, 2020; Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA, 2022; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2022; Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2023). Nesse contexto, o Estado de São Paulo, responsável por mais de 54% da produção nacional (CONAB, 2021), se destaca nesse cenário, com 95,3% da colheita mecanizada (Governo do Estado de São Paulo, 2020) em uma área plantada de 521,59 milhões de hectares (IBGE, 2022), concentrando um parque sucroalcooleiro altamente tecnificado e com grande capacidade operacional (Paulino et al., 2004).

Por ser semiperene, a cana-de-açúcar proporciona diversos ciclos de colheita sem o revolvimento do solo. Recentemente, os agricultores têm encurtado o período da entressafra e prolongado a colheita até a estação chuvosa (Severiano et al., 2010), o que prejudica a trafegabilidade devido aos teores de umidade do solo próximos ou acima do limite de plasticidade (Petry et al., 2016).

Nessas condições, a pressão das máquinas pode superar a capacidade de suporte do solo, provocando a deformação plástica da sua estrutura e, conseqüentemente, a compactação (Otto et al., 2011; Souza et al., 2015). Esse evento é influenciado por fatores inerentes ao solo (como a densidade inicial, a textura e a umidade), ao maquinário (como a intensidade do tráfego, a carga

por eixo, a potência e a capacidade de tração) (Bulgakov et al., 2019; Kim et al., 2021) e ao sistema de manejo (como o emprego da rotação de culturas e a cobertura do solo) (Secco et al., 2009).

A compactação é um fenômeno físico de densificação que ocorre quando forças externas atuam sobre o solo, resultando no rearranjo das suas partículas, na redução do volume poroso e no aumento da densidade do solo (Ds) e da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP). Outros efeitos incluem a alteração do fluxo de calor (Melo et al., 2021) e da permeabilidade do solo (Stone et al., 2002), culminando na redução da aeração e da infiltração e capacidade de retenção da água (Fernandes et al., 2022).

Em resposta à compactação, as raízes adventícias se ramificam superficialmente (Silva & Rosolem, 2002), reduzindo a taxa de exploração do solo, o que contribui para a deficiência nutricional e hídrica das plantas (Yang et al., 2018; Pluer et al., 2020). Sendo assim, a compactação compromete a qualidade do solo, o rendimento agrícola e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Błaszczewicz, 2019; Keller et al., 2019; Pott et al., 2019; Šimečková et al., 2021).

A qualidade do solo refere-se a sua capacidade em fornecer um meio favorável ao crescimento e desenvolvimento das plantas, através de processos físicos, químicos e biológicos (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Em geral, os atributos mais apropriados para mensurar a qualidade física do solo são aqueles mais sensíveis, fáceis de analisar e aplicáveis em diferentes escalas, fornecendo respostas em curto e médio prazo (Doran et al., 1998).

Para avaliar a compactação do solo, a densidade (Ds) é comumente empregada, mas não é suficiente por si só (Silva et al., 2009; Stolf et al., 2011; Montanarella & Panagos, 2021). Para uma análise abrangente, outros parâmetros físicos devem ser considerados. A porosidade total do solo (Pt), por exemplo, descreve a quantidade e distribuição dos espaços vazios, influenciando a capacidade de aeração, infiltração de água e desenvolvimento das raízes. A RMSP, por outro lado, é um indicador diagnóstico da dificuldade que as raízes encontram durante a sua expansão (Cardoso Neto et al., 2022).

Dessa maneira, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da colheita mecanizada sobre os atributos físicos do solo em um cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) em Ribeirão Preto, São Paulo, em três profundidades (0 – 0,10, 0,11 – 0,20 e 0,21 – 0,30 m).

Material e Métodos

Este experimento foi instalado nos meses de outubro e novembro de 2021 em um lote localizado no município de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, nas coordenadas geográficas de latitude 21°12S, longitude 47°53W e altitude de 531 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Tropical de Savana (Aw), caracterizado por invernos secos e verões chuvosos, com médias de temperatura de 19°C no inverno e 25°C no verão. A precipitação média anual é de 1 426,80 mm (Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto, 2019). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), com textura franco argilo arenosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo – SiBCS (Santos et al., 2018) e a caracterização física do solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Estatística descritiva da densidade de partícula (Dp), umidade gravimétrica (Ug), areia, silte e argila do Latossolo Vermelho distroférico na área experimental do presente estudo em Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Table 1 – Descriptive statistics of particle density, gravimetric water content, sand, silt and clay of the Latossolo Vermelho distroférico in the experimental area of this research in Ribeirão Preto, SP, Brazil.

Camada (m)	Densidade de Partícula (Mg m ⁻³)	Umidade Gravimétrica (kg kg ⁻¹)	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)
0 - 0,10	2,73 ± 0,02	0,24 ± 0,04	512 ± 46	183 ± 15	305 ± 39
0,11 - 0,20	2,72 ± 0,02	0,25 ± 0,04	518 ± 49	176 ± 10	306 ± 42
0,21 - 0,30	2,72 ± 0,03	0,27 ± 0,04	518 ± 52	174 ± 19	308 ± 34
Média	2,72 ± 0,03	0,25 ± 0,04	518 ± 49	176 ± 15	306 ± 38
Desvio Padrão	0,03	0,03	53,46	21,73	41,53
Coeficiente de Variação (%)	1,1	12	10,32	12,35	13,57

Fonte: Autores (2023)

Source: Authors (2023)

Para a aquisição dos dados experimentais, empregou-se o delineamento de blocos ao acaso, com dois tratamentos: colheita manual (T1) e colheita mecanizada (T2). Dois talhões de 12 hectares cada foram demarcados e, em cada talhão, foram estabelecidas duas parcelas com cinco repetições.

As parcelas eram compostas por cinco linhas de 10 m de comprimento com espaçamento de 1,40 m entre si, cultivadas com a variedade de cana-de-açúcar RB966928.

A colheita mecanizada foi realizada com um conjunto de máquinas composto por uma colheitadeira John Deere[®], modelo CH 570, com massa de 21 Mg; um trator Valtra[®], modelo BM 110, com massa de 5,2 Mg; e um transbordo Antoniosi[®], modelo ATA 12000, com massa de 8 Mg e capacidade de carga de 12,5 Mg. A velocidade média do maquinário durante o experimento foi igual a 2 m s⁻¹.

A RMSP foi mensurada com um penetrômetro de campo Falker[®], modelo PenetroLOG 2040. Foram retiradas três amostras indeformadas e deformadas por camada, localizadas no centro das entrelinhas, a uma distância de 0,7 m das linhas de cana-de-açúcar. As amostras de solo indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de aço inoxidável com 0,047 m de diâmetro e 0,03 m de altura.

Posteriormente, as amostras deformadas foram destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm de diâmetro e, em seguida, submetidas à estufa a uma temperatura de 105 °C para obtenção da terra fina seca em estufa (TFSE). Dessa forma, os valores de umidade gravimétrica (Ug) foram computados por meio da diferença entre a massa de solo úmido e a massa de solo seco em estufa.

A densidade de partícula (Dp) foi determinada utilizando o método do picnômetro, assim como indicado por Blake (1965). A composição granulométrica foi analisada por meio da dispersão em água e NaOH a 0,1 mol L⁻¹, utilizando o método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A Ds foi avaliada pelo método do anel volumétrico, da mesma forma que Forsythe (1975). A Pt foi quantificada indiretamente, consoante a expressão proposta por Teixeira et al. (2017), de acordo com a Equação 1.

Eq. 1:

$$Pt = \frac{Dp - Ds}{Dp}$$

Onde Pt = Porosidade total, Ds = Densidade do solo e Dp = Densidade de partícula.

A Micro foi determinada por meio da secagem em câmaras de pressão de Richards com placas porosas, tal como o método descrito por Klute (1986), e a macroporosidade (Macro) foi

calculada pela diferença entre a Pt e a microporosidade (Micro), conforme orientações da EMBRAPA (1997).

Os dados foram expressos pela média das três repetições. Através dos softwares R e Excel, a normalidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade pelo teste de Levene. Em sequência, a comparação das médias foi realizada usando a análise de variância – ANOVA, seguida pelo teste t de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados e Discussões

Foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para as variáveis RMSP e Ds, exceto para a Ds na profundidade de 0,21 – 0,30 m (Tabela 2). A RMSP, na profundidade de 0 – 0,10 m, foi 1,40 vezes maior no T2, em comparação ao T1. Em concordância com os dados mensurados em um Latossolo vermelho de textura muito argilosa (Compagnon et al., 2020); em um Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo, Neossolo Quartzarênico (Filho et al., 2016) e em um Latossolo Vermelho eutroférico (Filho & Ribon, 2008), a RMSP obteve altos valores de coeficiente de variação ($> 20\%$) e médias próximas ou superiores ao limite crítico de 2 MPa, o que contribui para a formação de um ambiente desfavorável ao crescimento das raízes e da parte aérea das plantas, impactando o seu rendimento agrícola (Silva et al., 2010).

Assim como notado por Pereira et al. (2002) em um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de cultivo, houve um acréscimo nos valores de RMSP com a profundidade, o que foi atribuído pelos mesmos autores ao alto teor de argila. Solos argilosos são muito compressíveis e tem altas propriedades de adesão. Assim, quando submetidos a uma pressão, sua reversibilidade é menor do que outros solos (Seehusen et al., 2021).

É bem estabelecido que a RMSP é influenciada pela Ug de diferentes maneiras. Por um lado, a redução da Ug incrementa na RMSP, pois minora a lubrificação entre as partículas (Shah et al., 2017). Por outro, o aumento da Ug pode também elevar na RMSP, uma vez que solos úmidos tendem a plasticidade e, portanto, são mais suscetíveis à compactação (Petry et al., 2016). Neste estudo, foi constatada uma pouca diferença estatística entre as médias de Ug e, quanto a sua interação com a RMSP, a análise de regressão linear indicou uma correlação positiva forte no T1 ($R^2 = 0,85$) e no T2 ($R^2 = 0,87$). Esse ocorrido também foi detectado nas pesquisas realizadas por Bertolo et al. (2019), Ferreira et al. (2019) e Silveira et al. (2022).

Tabela 2 – Estatística descritiva da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), densidade do solo (Dp), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) do Latossolo Vermelho distroférico na área experimental do presente estudo em Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Table 2 – Descriptive statistics of soil mechanical resistance to penetration, soil density, total porosity, macroporosity and microporosity of the Latossolo Vermelho distroférico in the experimental area of this research in Ribeirão Preto, SP, Brazil.

Camada (m)	----- T1 -----			----- T2 -----		
	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)						
0 - 0,10	1 927 ± 500 a	0,45	23,44	2 365 ± 633 bc	0,56	23,63
0,11 - 0,20	1 916 ± 531 a	0,47	24,61	2 587 ± 622 b	0,55	21,24
0,21 - 0,30	2 105 ± 746 c	0,66	31,43	2 706 ± 950 d	0,84	31
Densidade do solo (Mg m⁻³)						
0 - 0,10	1,37 ± 0,06 a	0,06	4,38	1,43 ± 0,07 b	0,07	4,90
0,11 - 0,20	1,38 ± 0,07 ab	0,07	5,07	1,48 ± 0,04 c	0,04	2,70
0,21 - 0,30	1,41 ± 0,07 b	0,07	4,96	1,44 ± 0,09 b	0,08	5,56
Porosidade total (m³ m⁻³)						
0 - 0,10	0,483 ± 0,080 a	0,071	14,70	0,460 ± 0,100 a	0,089	19,35
0,11 - 0,20	0,479 ± 0,098 a	0,087	18,16	0,441 ± 0,095 a	0,084	19,00
0,21 - 0,30	0,463 ± 0,097 a	0,086	18,53	0,452 ± 0,086 a	0,076	16,81
Macroporosidade (m³ m⁻³)						
0 - 0,10	0,204 ± 0,019 a	0,017	8,33	0,152 ± 0,015 a	0,014	9,21
0,11 - 0,20	0,166 ± 0,013 a	0,012	7,23	0,134 ± 0,011 a	0,010	7,46
0,21 - 0,30	0,124 ± 0,010 a	0,009	7,26	0,153 ± 0,014 a	0,013	8,50
Microporosidade (m³ m⁻³)						
0 - 0,10	0,279 ± 0,023 a	0,021	7,53	0,308 ± 0,030 a	0,027	8,77
0,11 - 0,20	0,313 ± 0,031 a	0,028	8,95	0,307 ± 0,028 a	0,025	8,14

Fonte: Autores (2023)

Source: Authors (2023)

A pressão aplicada sobre o solo promoveu o aumento da Ds até 0,20 m, indicado que uma passagem do trator tem efeito significativo apenas no solo superficial, refletindo o fato de que a compactação subsuperficial ocorre progressivamente ao longo do tempo (Munro et al., 2020; Moinfar et al., 2022). Além disso, a literatura indica que, em condições de alta umidade, a colheita mecanizada é apontada como causa importante da compactação do solo nos primeiros 0,30 m de profundidade (Severiano et al., 2010), mas não excede os 0,50 m, independentemente das características do solo e do maquinário (Daniel & Maretti, 1990). Nesse contexto, foram obtidos valores de Ug acima dos considerados ideais, equivalentes a 2/3 da Micro. A correlação linear entre Ug e Ds foi moderada e positiva no T1 ($R^2 = 0,48$) e no T2 ($R^2 = 0,42$).

Reichert et al. (2007) propuseram que a densidade do solo crítica (D_{sc}) é igual a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$. No presente estudo, a menor e a maior média de Ds foram encontradas, respectivamente, nas profundidades de 0 – 0,10 m do T1 ($1,37 \pm 0,06 \text{ Mg m}^{-3}$) e 0,11 – 0,20 m do T2 ($1,48 \pm 0,04 \text{ Mg m}^{-3}$) (Tabela 2). Com base nesses valores, é possível deduzir a existência da compactação nos dois tratamentos. Embora tenha um sistema radicular profundo, a cana-de-açúcar concentra cerca de 50% das raízes na profundidade de 0 – 0,20 m (Smith et al., 2005). Dessa forma, as médias de RMSP e Ds indicam a existência de uma barreira física no solo que, potencialmente, pode prejudicar o pleno desenvolvimento da cultura.

Entretanto, não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos e profundidades para Pt, Macro e Micro (Tabela 2). O decréscimo da Pt é um dos primeiros sinais da compactação (Stone et al., 2002) e a Macro e a Micro são atributos que sofrem grande interferência do cultivo contínuo de cana-de-açúcar, indicando o estado da estrutura do solo (Stolf et al., 2011). De igual maneira, Baretta Junior (2018) também não detectaram diferenças significativas para essas variáveis, mesmo após 20 passagens de trator sobre os pontos de amostragem em um Latossolo Bruno distrófico com textura muito argilosa.

Houve uma leve tendência de redução da Macro e de aumento da Micro com a profundidade no T1, porém não o suficiente para indicar significância. . A Macro é uma parte da Pt e refere-se

aos poros com diâmetros maiores, que permitem o crescimento das raízes, o movimento da água e as trocas gasosas. Esses poros são esmagados ao passo que as partículas do solo são comprimidas, minimizando a Macro). A Micro, por sua vez, é outra parte da Pt e refere-se aos poros com diâmetros menores. Esses poros são fundamentais para a capacidade de retenção e armazenamento de água no solo. Embora a compactação possa reduzir esses poros, em alguns casos, ela também pode elevá-los. Isso ocorre porque o tráfego repetido de máquinas pesadas desenvolve uma estrutura de solo densa com agregados mais estáveis e com mais poros menores entre as partículas.

Evidentemente, o tráfego de máquinas agrícolas é uma atividade essencial na agricultura moderna, mas pode causar impactos significativos na qualidade do solo. As operações de subsolagem e escarificação (Filho et al., 2016) são amplamente utilizadas em cultivos de cana-de-açúcar para reverter a compactação (Bianchini et al., 2014). No entanto, é possível reduzir de forma mais eficiente os danos ao solo causados pelo tráfego de máquinas através de práticas preventivas que atenuem a interação solo-máquina (Burgrever et al., 2019), tais como o controle do tráfego, a redução da carga e da pressão dos pneus, a rotação de culturas e a cobertura do solo.

O controle do tráfego de máquinas é uma estratégia que visa preservar as condições ideais para o crescimento das culturas. Compreende a delimitação de faixas de tráfego permanentes no campo, onde as máquinas concentram a maior parte da carga e operam de maneira consistente em períodos determinados. Isso evita a compactação do solo ao longo das linhas de cultivo. A compactação pode ser superficial (causada pela pressão dos pneus) ou subsuperficial (causada pela carga dos eixos), portanto, o ajuste da pressão dos pneus e da distribuição da carga dos eixos é crucial para evitar o afundamento excessivo e minimizar a compactação localizada.

A cobertura do solo consiste em manter o solo protegido por meio de resíduos vegetais ou plantas de cobertura, o que contribui para a formação de agregados estáveis. Essa prática reduz a compactação, uma vez que protege a superfície do solo do impacto direto causado pelo tráfego das máquinas, distribuindo melhor a pressão exercida sobre o solo (Fell et al., 2018). A rotação de culturas, por fim, envolve o cultivo alternado de diferentes espécies de plantas na mesma área ao longo do tempo, melhorando a estrutura do solo e aumentando a porosidade, pois o crescimento radicular de plantas com diferentes arquiteturas e padrões de exploração do solo pode romper as camadas compactadas (Marshall et al., 2016).

Conclusão

- A colheita mecanizada da cana-de-açúcar influenciou negativamente as médias da densidade do solo (Ds) na profundidade de 0 – 0,20 m e da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) na profundidade de 0 – 0,30 m, onde os valores foram iguais ou superiores aos limites críticos. Entretanto, a passagem das máquinas não afetou a macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Pt) do solo. Portanto, para garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, é essencial adotar medidas de manejo que evitem ou minimizem a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas. Desse modo, recomenda-se a condução de pesquisas futuras que avaliem a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e estabeleçam uma relação entre a produtividade da cana-de-açúcar e a compactação, com o intuito de embasar a tomada de decisão no campo e adaptar as práticas de manejo conforme as diferentes condições encontradas em uma determinada área.

Referências bibliográficas

- Bareta Junior, E. (2018). *Qualidade física do solo e limites críticos de atributos físicos de Latossolo Bruno distrófico em função da produtividade das culturas de milho e aveia* (Dissertação de Mestrado Produção Vegetal). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, Brasil. Recuperado em 20 de março de 2023, de https://www.unicentroagronomia.com/imagens/noticias/dissertacao_final_eloj_bareta.pdf
- Bertollo, G. M., Schlosser, J. F., Bertinatto, R. B., Farias, M. S., Martini, A. T., & Santos, G. O. (2019). Tráfego Controlado de Máquinas em Comparação ao Aleatório no Desempenho de Trator em Semeadura. *Revista Agrarian*, 12(46), 479-486. <http://dx.doi.org/10.30612/agrarian.v12i46.9961>
- Bianchini, A., Valadão Junior, D. D., Rosa, R. P., Colhado, F., & Daros, R. F. (2014). Soil chiseling and fertilizer location in sugarcane ratoon cultivation. *Engenharia Agrícola*, 34(1), 57-65. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100007>
- Blake, G. R. (1965). Bulk density. In Black, C. A. (Ed.), *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling* (pp. 374-390). Madison, WI: American Society of Agronomy.

- Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Ivanovs, S., & Pylypaka, S. (2019). A theoretical study of the limit path of the movement of a layer of soil along the plough mouldboard. *Soil & Tillage Research*, 195(1), 104406. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104406>
- Burgrever, J. C., Freitas, F. F., Fistarol, T. A. F., Araújo, F. B., & Júnior, G. D. F. S. (2019). Propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo sob sistemas de manejo - Alta Floresta. *Revista Científica Rural*, 21(2), 93-104. <https://doi.org/10.30945/rcr-v21i2.361>
- Býaszkiwicz, Z. (2019). Identification and quantification of selected factors determining soil compression by tractors of weights with single wheels and dual wheels. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 64(1), 4-12. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-e623094d-a477-470a-9941-26b166cf3020>
- Cardoso Neto, H. H. L., de Souza, P. R., de Souza, I. V., & de Lima, H. V. (2022). Resistência Mecânica do Solo à Penetração e Crescimento Radicular em Cultivo de Palma de Óleo no Pará. In *Anais do II conecta UFRA: bioeconomia*. (p. 95). Belém, PA: UFRA. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7689594>
- Compagnon, A. M., Guilherme, I. H., Filho, W. J. P., Rodovalho, R. S., & Arriel, F. H. (2020). Variabilidade Espacial da Resistência Mecânica do Solo à Penetração na Colheita Mecanizada e Milho para Silagem. 8(2), 1-12. <http://dx.doi.org/10.29247/2358-260X.2020v7i2.4542>
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. (2021). *Série Histórica das Safras*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. (2023). *Boletim da safra de cana-de-açúcar*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.
- Daniel, L. A., & Maretti, H. J. (1990). Avaliação de camada de solo compactado e análise de crescimento de plantas. In: Silveira, G. M. (Ed.), *Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola* (pp. 22-23). Campinas, SP: Fundação Cargill.
- Doran, J. W., Sarrantonio, M., & Liebig, M. A. (1996). Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy*, 56(1), 1-54. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60178-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60178-9)
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. (1997). *Manual de métodos de análise de solos* (2nd. ed.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa.

- Fell, V., Matter, A., Keller, T., & Boivin, P. (2018). Patterns and factors of soil structure recovery as revealed from a tillage and cover-crop experiment in a compacted orchard. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 134. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00134>
- Fernandes, B. B., Marasca, I., Martins, M. B., Sandi, J., Silva, K. G. P., & Lanças, K. P. (2022). Efeito do Tráfego Agrícola na Infiltração de Água no Solo. *Irriga*, 27(2), 343-356. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2022v27n2p343-356>
- Ferreira, R. L. C., Sato, M. K., Rodrigues, S., Lima, H. V., & Teixeira, O. M. M. (2019). Tráfego de máquinas agrícolas em cultivo de palma de óleo: implicações na qualidade física do solo. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 62(1), 1-7. <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.2979>
- Filho, J. T., & Ribon, A. A. (2008). Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(2), 487-494. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200003>
- Filho, F. X. O., Miranda, N. O., Medeiros, J. F., Silva, P. C. M., Mesquita, F. O., & Costa, T. K. G. (2016). Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. *Revista Ceres*, 63(5), 715-723. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663050017>
- Forsythe, W. (1997). *Física de suelos: Manual de laboratório*. San José, Costa Rica: IICA.
- Governo do Estado de São Paulo. (2020). *Colheita Mecanizada da Cana-de-açúcar Atinge 95,3% das Áreas Produtivas do Estado de São Paulo na Safra Agrícola 2018/19*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=14825>.
- Governo do Estado de São Paulo. (2020). *Balança Comercial dos Agronegócios Paulista e Brasileiro de 2019*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14751>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2022). *Produção Agrícola Municipal*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194(1), 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>

- Kim, W. S., Kim, Y. J., Park, S. U., & Kim, Y. S. (2021). Influence of soil moisture content on the traction performance of a 78-kW agricultural tractor during plow tillage. *Soil & Tillage Research*, 207(1), 104851. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104851>
- Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory methods. In Black, C. A. (Ed.), *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods* (pp. 635-62). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Marshall, M. W., Williams, P., Nafchi, A. M., Maja, J. M., Payero, J., Mueller, J., & Khalilian, A. (2016). Influence of tillage and deep-rooted cool season cover crops on soil properties, pests, and yield responses in cotton. *Open Journal of Soil Science*, 6(10), 149-158. <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2016.610015>
- Melo, L. B. B., Silva, B. M., Peixoto, D. S., Chiarini, T. P. A., Oliveira, G. C., & Curi, N. (2021). Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 208(1), 104876. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104876>
- Ministério da Agricultura e Pecuária - MAPA. (2022). *VBP para 2022 é estimado em R\$ 1,179 trilhão*. Recuperado em 20 de março de 2023, de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/vbp-para-2022-e-estimado-em-r-1-179-trilhao>.
- Moinfar, A., Shahgholi, G., Gilandeh, Y. A., Kaveh, M., & Szymanek, M. (2022). Investigating the effect of the tractor driving system type on soil compaction using different methods of ANN, ANFIS and step wise regression. *Soil and Tillage Research*, 222, 105444. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105444>
- Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). Soil Security for the European Union. *Soil Security*, 4(1), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100009>
- Munro, P., Forge, T. A., Jones, M. D., & Nelson, L. M. (2020). Soil biota from newly established orchards are more beneficial to early growth of cherry trees than biota from older orchards. *Applied Soil Ecology*, 155(795), 103658. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103658>
- Nery, M. C., Pimenta, J. A., & Sousa, M. K. M. (2019). O cultivo de palma de óleo para a produção de biodiesel em áreas degradadas na Amazônia: Uma Revisão. In *IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*. (p. 9). Ponta Grossa, PR: APREPRO.

- Otto, R., Silva, A. P., Franco, H. C. J., Oliveira, E. C. A., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005>
- Pereira, J. O., Siqueira, J. A. C., Uribe-Opazo, M. A., & Silva, S. L. (2002). Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(1), 171-174. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000100030>
- Petry, H. B., Mazurana, M., Marodin, G. A. B., Levien, R., Anghinoni, I., Gianello, C., & Schwarz, C. F. (2016). Root Distribution of Peach Rootstocks Affected by Soil Compaction and Acidity. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40(1), 0150135. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150135>
- Puer, E. G. M., Schneider, R. L., Morreale, S. J., Liebig, M. A., Li, J., Li, C. X., & Walter, M. T. (2020). Returning degraded soils to productivity: an examination of the potential of coarse woody amendments for improved water retention and nutrient holding capacity. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4380-x>
- Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto – SP. (2019). *Revisão da lei de parcelamento, uso e ocupação do solo*. São Paulo, SP: Secretaria do Planejamento e Gestão Pública.
- Pott, L. P., Amado, T. J. C., Leal, O. A., & Ciampitti, I. A. (2019). Mitigation of soil compaction for boosting crop productivity at varying yield environments in southern Brazil. *European Journal of Soil Science*, 71(6), 1157-1172. <https://doi.org/10.1111/ejss.12880>
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In Cereta, C. A, Silva, L. S., & Reichert, J. M. (Eds.), *Tópicos em ciência do solo* (pp. 49-134). Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Silveira, A. R., Rocha, W. W., Leite, Â. M. P., Santos, J. J., & Dias Júnior, M. S. (2022). Capacidade de suporte de cargas de um Latossolo submetido a duas alternativas de uso do solo e sob Floresta Nativa. *Scientia Forestalis*, 50, e3731. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.05>
- Resolução n. 807, de 23 de janeiro de 2020* (2020). Estabelece a especificação da gasolina de uso automotivo e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializarem o produto em todo o território nacional. Brasília. 2020.

Recuperado em 10 abril de 2023, de <https://in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-807-de-23-de-janeiro-de-2020-239635261>

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. (5a. ed.). Brasília, DF: Embrapa.

Secco, D., Reinert, D. S., Reichert, J. M., & Silva, V. R. (2009). Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural*, 39(1), 58-64. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010>

Seehusen, T., Mordhorst, A., Riggert, R., Fleige, H., Horn, R., & Riley, H. (2021). Subsoil compaction of a clay soil in South-East Norway and its amelioration after 5 years. *International Agrophysics*, 35(2), 145-157. <http://dx.doi.org/10.31545/intagr/135513>

Severiano, E. C., de Oliveira, G., Júnior, M. S. D., de Castro, M. B., de Oliveira, L. F. C., & Costa, K. A. P. (2010). 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*, 30(3), 414-423. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000300006>

Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Alli, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017). Soil Compaction Effects on Soil Health and Crop Productivity: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(11). 10056-10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>

Silva, A. P., Tormena, A. C., Dias Junior, M. S., Imhoff, S., & Klein, V. A. (2010). Indicadores de qualidade física do solo. In van Lier, Q. J. (Eds.), *Física do solo* (pp. 241-281). Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Silva, R. H., & Rosolem, C. A. (2002). Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(1), 855- 860. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600015>

Silva, V. R., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Bortoluzzi, E. C. (2009) Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(5), 1097-1104. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500003>

- Šimečková, J., Polcar, A., Hammerová, A., Votava, J., & Kumbár, V. (2021). Changes to the physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor. *International Agrophysics*, 35(1), 97-105. <https://doi.org/10.31545/intagr/133752>
- Smith, D. M., Inman-Bamber, N. G., & Thorburn, P. J. (2005). Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, 92(2), 169-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.017>
- Souza, G. S., de Souza, Z. M., Cooper, M., & Tormena, C. A. (2015). Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, 72(3), 270-277. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0078>
- Stolf, R., Thurler, A. M., Bacchi, O. O. S., & Reichardt, K. (2011). Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 447-459. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200014>
- Stone, L. F., Guimarães, C. M., & Moreira, J. A. A. (2002). Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(2), 207-212. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000200004>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3th. ed.). Brasília, DF: Embrapa.
- Vezzani, F. M., & Mielniczuk, J. (2009). Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(1), 743-755. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>
- Yang, X., Fan, J., & Jones, S. B. (2018). Effect of soil texture on estimates of soil-column carbon dioxide flux comparing chamber and gradient methods. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-9. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2018.05.0112>.