

Impacto de Sistemas de Cultivo Comercial na Estrutura Física do Solo em Comparação com a Mata Nativa

Eduardo Silva dos Santos; José Orlando Nunes da Silva; João Valério de Souza Neto; Carlos Augusto Maciel Silva; Francisca Ingrid Ferreira Cardoso; Daiane Fossatti Dall'oglio; Luiz Guilherme Medeiros Pessoa; Marcos Vinícius da Silva; Kamila Cunha de Meneses; Maria Beatriz Ferreira



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n5p609-624>

Artigo recebido em 14 de Maio e publicado em 14 de Julho de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas compromete a produtividade agrícola. Este trabalho objetivou avaliar a resistência à penetração (RP), a umidade (U), a densidade (DS) e a porosidade total (PT) do solo sob diferentes manejos no cultivo de soja. O experimento foi conduzido em Chapadinha-MA, em delineamento em blocos casualizados, com parcelas subdivididas: as parcelas consistiram em quatro manejos - Subsolado + Braquiária (SB), Subsolado (S), Não Subsolado (NS) e Mata Nativa (M) -, e as subparcelas em quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm), com cinco repetições. A RP foi medida com penetrômetro de impacto, a umidade pelo método gravimétrico e a DS pelo método do anel volumétrico. Houve interação significativa entre tratamentos e profundidades para RP e U. A camada de 0-10 cm não diferiu entre os manejos quanto à RP. A partir de 10-20 cm, o manejo SB apresentou a maior RP (16,03 MPa), inversamente correlacionada aos menores teores de umidade (0,02 a 0,05 g g⁻¹) no momento da coleta. O manejo SB também apresentou o maior estado de compactação, com o maior DS (1,56 g cm⁻³) e o menor PT (41,21%). A Mata Nativa preservou a qualidade física estrutural, com menor DS (1,34 g cm⁻³) e maior PT (49,31%). Conclui-se que o tráfego mecânico e o histórico de cultivo alteraram a estrutura física do solo, e a resistência mecânica foi severamente acentuada pela redução da umidade, o que posicionou o sistema integrado com braquiária sob maior compactação ao longo do tempo.

Palavras-chave: Física do solo, Compactação do solo, Sistema de plantio direto.

ABSTRACT

Soil compaction caused by machinery traffic compromises agricultural productivity. This study aimed to evaluate soil resistance to penetration (PR), moisture (M), bulk density (BD), and total porosity (TP) under different management systems in a soybean crop. The experiment was conducted in Chapadinha-MA, using a randomized complete block design in a split-plot arrangement: plots consisted of four management systems — Subsoiled + Brachiaria (SB), Subsoiled (S), Non-Subsoiled (NS), and Native Forest (M) —, and split-plots consisted of four depths (0-10, 10-20, 20-30, and 30-40 cm), with five replications. PR was measured using an impact penetrometer, moisture by the gravimetric method, and BD by the volumetric ring method. A significant interaction was observed between treatments and depths for PR and M. The 0-10 cm layer showed no difference in PR among systems. From 10-20 cm downwards, the SB system presented the highest PR (16.03 MPa), inversely correlated with the lowest moisture contents (0.02 to 0.05 g g⁻¹) during sampling. The SB management also showed the highest compaction state, with the highest BD (1.56 g cm⁻³) and the lowest TP (41,21%). The Native Forest preserved the structural physical quality, showing the lowest BD (1,34 g cm⁻³) and the highest TP (49,31%). In conclusion, machinery traffic and cultivation history altered soil physical structure, with mechanical resistance severely heightened by decreased moisture, which positioned the integrated system with brachiaria under higher compaction over time.

Keywords: Soil physics, Soil compaction, No-tillage system.

Instituição afiliada – Eduardo Silva dos Santos

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
santos.eduardo@ufma.br

José Orlando Nunes da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Agrônomo, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.
joseorlando.silva@ufrpe.br

João Valério de Souza Neto

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
joao.valerio@ufma.br

Carlos Augusto Maciel Silva

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Discente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
maciel.carlos@discente.ufma.br

Francisca Ingrid Ferreira Cardoso

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Discente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
francisca.ingrid@discente.ufma.br

Daiane Fossatti Dall’oglio

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
daiane.fossatti@ufma.br

Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Docente, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil
luiz.pessoa@ufrpe.br

Marcos Vinícius da Silva

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
marcos.vinicius9@ufma.br

Kamila Cunha de Meneses

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
Meneses.kamila@ufma.br

Maria Beatriz Ferreira

Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Docente, Centro de Ciências de Chapadinha, Maranhão, Brasil
mb.ferreira@ufma.br

Autor correspondente: *José Orlando Nunes da Silva*

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola, devido ao intenso tráfego de tratores e implementos na lavoura, resulta na compactação do solo, definida como a diminuição do seu volume não saturado decorrente da compressão exercida pelo peso de máquinas e implementos (ZHANG et al., 2024). Essa compressão provoca a expulsão do ar do solo, o rearranjo das partículas (areia, silte e argila) e, como consequência, o aumento da densidade do solo (MACHADO, 2003; SORACCO et al., 2015).

Os solos mais compactados apresentam maior resistência à penetração (RP), devido à maior proximidade entre as partículas, o que confere menor índice de vazios (volume de poros/volume de sólidos) e maior densidade do solo (LONG et al., 2024). Pode-se diagnosticar a compactação por meio de métodos científicos ou práticos; os primeiros requerem aparelhos específicos e são de grande confiabilidade, como a densidade e a porosidade do solo, enquanto os métodos práticos fornecem resultados mais rápidos, como os penetrômetros (SOUZA et al., 2014).

A resistência do solo à penetração varia com a densidade e a umidade do solo. A densidade é uma propriedade condicionada pelo manejo do solo e, normalmente, pouco variável ao longo do ciclo de uma cultura. No entanto, a umidade depende da capacidade do solo de reter água e da distribuição da precipitação ao longo do tempo e, portanto, está sujeita a grandes flutuações ao longo do ciclo das culturas (MARTÍNEZ-VIDAURRE et al., 2024). Nestas condições, cada sistema de manejo pode limitar a resistência ao crescimento radicular em diferentes períodos (SHAHEB; VENKATESH; SHEARER, 2021).

Os sistemas de manejo são operações importantes que influenciam as características físicas do solo e estão associadas à compactação do solo. Esses sistemas podem ser divididos em convencional, reduzido e plantio direto. O sistema convencional é uma técnica que consiste na inversão das camadas utilizando arado e/ou grades (FLEMING; SPENCER; KRUTZ, 2025). O sistema reduzido consiste na redução de uma ou mais operações do preparo do solo ou na diminuição de 30% da cobertura vegetal sobre a superfície do solo, sendo o escarificador o equipamento mais utilizado (COOPER et al., 2016). Um dos requisitos para o sucesso do plantio direto é a adequada cobertura do solo, pois utiliza-se um sistema de semeadura que coloca a semente diretamente no solo não revolvido, por meio de máquinas especiais (CARR; GRAMIG; LIEBIG, 2013).

Segundo RICHART et al. (2005), na literatura, vários autores têm adotado valores distintos para o limite crítico de resistência à penetração. Esses valores de resistência à penetração variam de acordo com a classe e a espécie cultivadas, mas, de modo geral, o valor de 2,0 MPa é o mais frequentemente utilizado como critério para o crescimento das plantas e das raízes.

O conhecimento da variabilidade espaço-temporal das propriedades físicas do solo pode contribuir para a definição de melhores estratégias de manejo sustentável do solo (SCHAFFRATH et al., 2008). Nesse sentido, torna-se relevante estudar os indicadores de qualidade física dos solos. Segundo Bottega et al. (2011), tais indicadores devem se relacionar diretamente à produção das culturas e ser suficientemente potentes para medir a capacidade do solo de fornecer aeração adequada e quantidade

de água para o crescimento e a expansão do sistema radicular. Da mesma forma, devem mensurar a magnitude com que a matriz do solo resiste à deformação. Entre os principais fatores, destaca-se a resistência do solo à penetração.

A RP tem sido adotada como indicativo da compactação do solo, por apresentar relações diretas com o desenvolvimento das plantas e por ser mais eficiente na identificação dos estados de compactação do que a densidade do solo (KLONOWSKI et al., 2024).

Dessa forma, a avaliação e o monitoramento de impedimentos mecânicos do solo ao desenvolvimento radicular tornam-se ferramentas importantes para caracterizar a evolução de sistemas agrícolas e também para servir de subsídio indispensável ao planejamento e ao direcionamento das práticas de cultivo empregadas na atividade agrícola.

Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a resistência à penetração, a umidade e a densidade do solo em áreas subsoladas com braquiária, em áreas subsoladas e não subsoladas destinadas ao cultivo comercial de soja e em áreas de mata nativa.

2 METODOLOGIA

2.1. Áreas de estudo

O experimento (Figura 1) foi conduzido em área de produção agrícola comercial, em uma fazenda no município de Chapadinha-MA, localizada nas coordenadas geográficas 03°38'41''S de latitude e 43°23'21''W de longitude e com altitude média de 108 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical quente e úmido (Aw), com temperatura média anual superior a 27 °C e precipitação pluvial média anual de 1835 mm, com períodos de chuva entre janeiro e junho e de seca entre julho e dezembro (PASSOS et al., 2016).

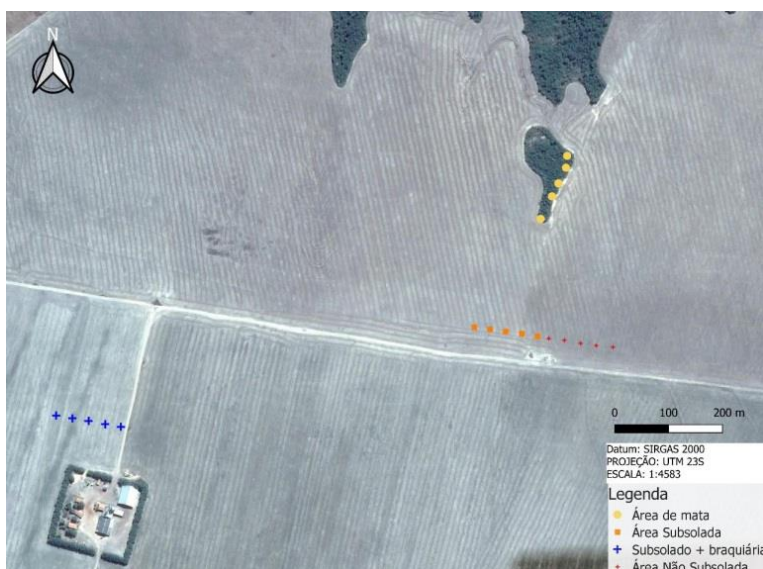


Figura 1. Croqui de localização da área experimental.

2.2 Avaliações da resistência, umidade e densidade do solo

Para a avaliação da resistência mecânica à penetração (RP), da umidade e da densidade do solo, foram escolhidos 4 manejos do solo destinados ao plantio direto da soja: subsolado com cultura de braquiária (SB); subsolado (S); não subsolado (NS); e mata nativa (M) (Figura 2). As avaliações ocorreram mediante a caracterização de um transecto em cada uso do solo, com 5 pontos amostrais com equidistância de 30 m de cada ponto, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm e totalizando 20 pontos por transecto. As avaliações ocorreram nos dias 07/11/21 para o manejo SB; 09/11/21 para NS e S; e 11/11/2021 para M.

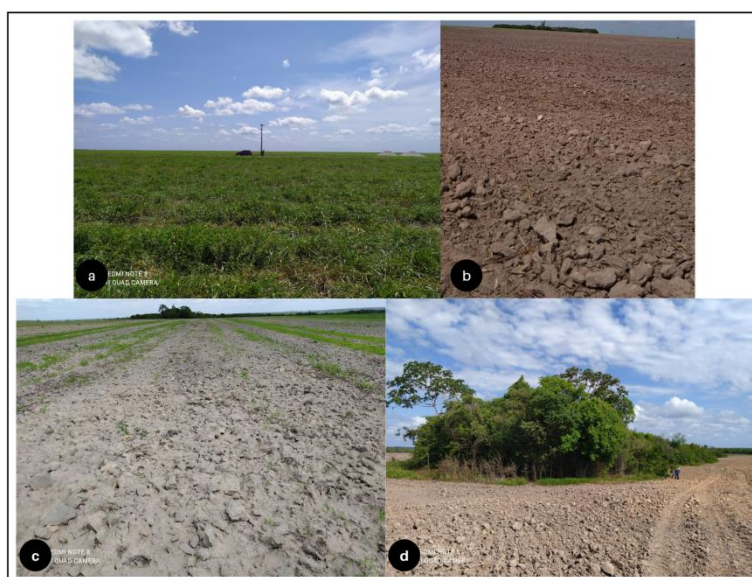


Figura 2. Locais das referidas áreas de avaliação na área sob manejo de subsolagem + braquiária (a), na área subsolada (b), na área não subsolada (c) e na área de mata nativa (d).

A resistência mecânica do solo à penetração foi medida com um penetrômetro de impacto modelo Stolf reduzido (STOLF, 1991) e quantificada pela contagem de impactos até a profundidade de 40 cm, utilizando um programa computacional de dados no Excel-VBA (STOLF et al., 2014). Para o cálculo da resistência em razão da penetração por impacto, utilizou-se a equação 1:

$$RP_{MPa} = 0,56 + 0,689 \times N \quad (1)$$

Onde: N (Impactos/dm) = $10 \times n^\circ$ de impactos/penetração (cm)

Para a interpretação dos dados de penetrometria, foram empregados os critérios descritos por Soil Survey Staff (1993), que adotam as seguintes classes de resistência mecânica do solo à penetração: baixa, de 0,1 a 1,0 MPa; moderada, de 1,0 a 2,0 MPa; alta, de 2,0 a 4,0 MPa; muito alta, de 4,0 a 8,0 MPa; e extremamente alta, acima de 8,0 MPa.

Para avaliação da umidade, amostras de solo foram coletadas de forma

deformada, em camadas de 10 cm, até a profundidade de 40 cm. Essas amostras foram inicialmente colocadas em sacos plásticos para não perderem a sua umidade original. A determinação do teor de umidade foi realizada no laboratório do FINEP, na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Inicialmente, as amostras foram pesadas em balança de precisão para determinar a massa do solo úmido e, em seguida, levadas à estufa a 105 °C por 24 h para determinar a massa do solo seco. Os teores de umidade foram determinados pelo método gravimétrico de acordo com a equação 2 (EMBRAPA, 1997).

$$U = \frac{MSU - MSS}{MSS} \quad 2$$

Onde: U = umidade do solo (g g⁻¹); MSU = Massa do solo úmida (g); MSS = Massa do solo seca (g).

Na avaliação da densidade do solo, adotou-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2017). Sendo utilizado um amostrador de Ulhand, com volume de 98,12 cm³ dos anéis, para a coleta de amostras indeformadas. A porosidade foi estimada a partir da relação entre densidade do solo (Ds) e densidade de partículas (Dp) com volume adotado de 2,65 cm³/cm³, conforme equação 3:

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp} \times 100 \quad 3$$

2.3 Delineamento estatístico

O trabalho foi avaliado em delineamento em blocos casualizados em parcelas subdivididas, sendo as parcelas os manejos do solo (M, S, SB e NS) e as subparcelas as profundidades (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm). As variáveis foram submetidas à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 encontra a análise de variância dos resultados médios da resistência a penetração (RP) e umidade do solo (U). Observou-se que houve diferenças significativas nas fontes de variação de tratamento, profundidade e efeito da interação, ao nível de 0,1% a 5% de probabilidade, para as variáveis RP e U. Isso indica que houve influência dos tratamentos tanto sobre a resistência à penetração e a umidade do solo quanto entre as profundidades do solo.

Tabela 1. Análise de Variância da resistência do solo à penetração (RP) e da umidade do solo (U) em função dos diferentes tipos de uso do solo (tratamentos) e das profundidades.

Fontes de variação	GL	Quadrados médios	
		RP (MPa)	U (g g ⁻¹)
Tratamento A	3	406, 11**	0,0179**
Bloco	4	7,53 ^{NS}	0,0013 ^{NS}
Resíduo (a)	12	53,56	0,0009
Profundidade B	3	241,40***	0,0007*

A x B	9	25,25**	0,0006**
Resíduo (b)	48	8,52	0,0001
Total	79		
CV A (%)		77,97	37,26
CV B (%)		31,11	16,00
Média geral		9,38	0,083

* significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; NS – Não significativo; CV – coeficiente de variação

Com relação à RP, verifica-se, na Tabela 2, o desdobramento dos tratamentos no fator profundidade e o desdobramento da profundidade no fator tratamento. Na profundidade de 0-10 cm não houve diferença entre os tratamentos. A partir das camadas de 10-20 a 30-40 cm, observa-se que não houve diferença entre os tratamentos com solo S e NS. Entretanto, a RP no tratamento SB, a partir da camada de 10-20 cm, apresenta valor mais elevado (16,03 MPa) em comparação com os tratamentos nas condições de solo S (8,13 MPa) e NS (5,6 MPa). A RP máxima de 16,03 MPa no manejo SB superou drasticamente os picos de 4,11 MPa (SILVA et al., 2020) e 2,47 MPa (MILLA et al., 2020), bem como as médias de 1,73 MPa (CORTEZ et al., 2021) obtidas em solos cultivados sob plantio direto e sucessão com soja. Essa marcante amplitude numérica evidencia que o estresse hídrico severo (0,02 a 0,05 g g⁻¹) potencializou a coesão das partículas no Cerrado Maranhense a patamares muito superiores aos observados em áreas agrícolas consolidadas. Embora Colet, Sverzut e Weirich Neto, (2008) associem restrições de até 3,69 MPa ao adensamento por pisoteio em pastagens, Sartor et al. (2020) demonstram que a integração vegetal perene tende a estabilizar a RP em 2,34 MPa a longo prazo. Esse contraste indica que o tráfego mecânico recente na lavoura sobrepôs-se ao efeito descompactador biológico do sistema radicular da braquiária, ratificando que a atividade biológica isolada é insuficiente para mitigar de forma imediata o estresse estrutural imposto.

Entre os tratamentos estudados somente o NS não houve diferença significativa, sendo esse tratamento o que apresentou menores valores de RP (2,23; 5,6; 6,03; 6,21 MPa) em todas as profundidades. No entanto, o tratamento S na camada de 0-10 cm diferiu das camadas de 10-20 e de 30-40 cm. A RP máxima de 16,03 MPa no manejo SB supera significativamente os picos de 3,43 MPa observados por Ribeiro et al. (2021) em sistemas cultivados sob baixa umidade. Essa discrepância numérica acentua o estado severo de restrição mecânica no Cerrado Maranhense, embora ambos os estudos confirmem o papel do tráfego de máquinas no rearranjo deletério das partículas do solo. Comparando o tratamento SB na camada de 0-10, verifica-se diferença significativa nas demais camadas. Já para o tratamento M, pôde observar que, na primeira (0-10) e na segunda camada (10-20), as médias dessas duas profundidades foram significativas.

Considerando a classificação de SOIL SURVEY STAFF (1993), o solo da camada de 0-10 cm, em todos os tratamentos, apresentou valores de RP considerados altos e muito altos. Vários autores (CANARACHE, 1990; BEUTLER et al., 2006; FREDDI et al., 2006) verificaram que valores de RP inferiores a 2 MPa (RP baixa a moderada) não são restritivos ao desenvolvimento radicular. Entretanto, Suzuki et al. (2022) indicam que, na cultura da soja, a restrição ao crescimento das raízes ocorre em valores entre 1,5 e 2,0 Mpa de resistência à penetração em solos franco-arenosos, enquanto, em solos

argilosos, esse limite pode variar de 2,0 a 3,5 Mpa. Tormena et al. (2002) ressaltam que a resistência do solo à penetração é modificada pelos sistemas de preparo do solo.

TABELA 2. Médias de resistência à penetração (RP) e de umidade do solo (U) sob os diferentes tratamentos.

Tratamento	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
RP (MPa)				
S	2,57aA	8,13abB	7,27aB	5,94aAB
NS	2,23aA	5,6aA	6,03aA	6,21aA
SB	6,17aA	16,03cB	15,49bB	14,64bB
M	5,95aA	12,14bcB	18,19bC	17,54bC
U (g g ⁻¹)				
S	0,09bA	0,06bB	0,09bcB	0,10bB
NS	0,09bA	0,08bA	0,08bA	0,09bA
SB	0,02aA	0,04aBC	0,04aAB	0,05aC
M	0,11bA	0,11cA	0,10cA	0,11bA

Médias de tratamentos seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

A umidade (U) também é uma importante propriedade física do solo, mostrando-se inversamente proporcional à resistência à penetração (RP), em que valores mais elevados de RP podem estar associados a um teor de umidade do solo mais baixo no momento da coleta das amostras. Com relação ao teor de umidade (Tabela 2), verifica-se que o tratamento sob o manejo SB, apresentou o menor teor de umidade (0,02; 0,04; 0,04; 0,05 g g⁻¹) para todas as camadas de solo, estatisticamente diferente dos demais, porém, comparando-se os tratamentos S e NS, notou-se não serem diferentes significativamente em todas as profundidades.

Os maiores valores de RP foram encontrados no tratamento SB (6,17; 16,03; 15,49; 14,64 MPa), comparado ao S (2,57; 8,13; 7,27; 5,94 MPa) e NS (2,23; 5,6; 6,03; 6,21 MPa), o aumento desses valores estão correlacionados com a diminuição da umidade. Já na mata, pôde-se notar valores de umidade mais altos, que, de acordo com Oliveira et al. (2015), relacionam-se ao maior sombreamento e ao acúmulo de serrapilheira observados nesta condição de mata nativa (M). Pesquisas realizadas por Iori et al. (2012) obtiveram resultados semelhantes quando comparado diversos usos da terra (cultivo de banana, pastagem degradada, sistema silvipastoril e mata nativa), em que a mata nativa

se sobressaiu no quesito umidade dos demais usos, tais autores também relatam que o nível de sombreamento influencia diretamente na umidade do solo.

Segundo Carvalho et al. (2014), a umidade do solo pode ser utilizada como indicador do tipo e da qualidade do solo. A umidade nas camadas do solo apresenta variabilidade significativa nos domínios espacial e temporal, o que pode levar a manejos inadequados da água do solo (YIN et al., 2023). De acordo com Fu et al. (2026), a umidade influencia processos importantes no solo e na planta, tais como o movimento de água, a compactação do solo, a aeração do solo e o desenvolvimento radicular.

Na Tabela 3, apresenta-se a análise de variância dos resultados médios de densidade do solo (DS) e de porosidade total (PT). Observou-se que houve diferenças significativas apenas na fonte de variação tratamento, ao nível de 5% de probabilidade. Indicando que houve influência dos tratamentos sobre a DS e a PT do solo.

Tabela 3. Análise de variância da densidade (DS) e da porosidade total (PT) do solo em função dos diferentes tipos de uso do solo (tratamentos) e das profundidades.

Fontes de variação	GL	Quadrados médios	
		DS (g cm ⁻³)	PT (%)
Tratamento A	3	0,099*	142,14*
Bloco	2	0,018 ^{NS}	26,21 ^{NS}
Resíduo (a)	6	0,0153	21,81
Profundidade B	3	0,0156 ^{NS}	22,32 ^{NS}
A x B	9	0,0106 ^{NS}	15,13 ^{NS}
Resíduo (b)	24	0,007	10,01
Total	47		
CV A (%)		8,54	8,53
CV B (%)		5,79	5,58
Média geral		1,45	54,71

* significativo ao nível de 5%, NS – Não significativo; CV – coeficiente de variação.

Na Tabela 4, verificam-se as médias dos tratamentos para as variáveis em diferentes manejos de solo estudados. Esses dados mostram, na média de DS, que o tratamento NS não apresentou diferença significativa em comparação ao M. O tratamento SB apresentou a maior densidade; entretanto, os aumentos desses valores estão positivamente correlacionados com o aumento da RP.

Observou-se também que a Mata nativa (M) apresentou a menor densidade (1,34 g cm⁻³). A diferença de densidade em relação a solos cultivados pode ser atribuída principalmente ao uso e ao manejo do solo. Densidades entre 1,30 g cm⁻³ e 1,50 g cm⁻³ são consideradas bons indicadores de permeabilidade dos solos. Densidades acima de 1,85 g cm⁻³ podem limitar o desenvolvimento das raízes e o crescimento (REINERT et al., 2008).

Tabela 4. Média dos tratamentos para as variáveis densidade do solo (DS) e porosidade total do solo (PT).

Tratamento	DS	PT
------------	----	----

	(g cm ⁻³)	(%)
S	1,48ab	46,47ab
NS	1,42ab	44,13ab
SB	1,56b	41,21b
M	1,34a	49,31a

Médias de tratamentos seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

De acordo com Hill & Meza-Montalvo (1990), o tráfego de máquinas aumenta os valores de densidade do solo e a resistência à penetração em até 50% em comparação com áreas não trafegadas. Isso se deve principalmente ao peso das máquinas agrícolas, que contribui para o rearranjo das partículas do solo, com diminuição da porosidade e aumento da densidade (ZHANG et al., 2024). Comparando os manejos SB e S com a mata nativa (M), que diferiram estatisticamente, houve um aumento na densidade do solo de 15,67% para SB e de 10,45% para S em relação a M. O valor de DS de 1,56 g cm⁻³ obtido no manejo SB converge com os achados de Borba et al. (2020), que constataram DS de 1,52 g cm⁻³ em áreas sob pastagem antrópica, divergindo dos 1,25 g cm⁻³ encontrados na mata nativa adjacente. Esse padrão quantitativo assemelha-se ao decréscimo estrutural observado no solo do Cerrado quando comparado à testemunha florestal estável (1,34 g cm⁻³). O aumento expressivo da densidade no tratamento manejado, em relação à mata nativa, corrobora os achados de Ribeiro et al. (2021), que registraram densidades de até 1,55 g cm⁻³ em solos sob cultivo intensivo, em contraste com áreas florestais preservadas. Isso confirma a vulnerabilidade da estrutura física do solo diante dos sistemas agrícolas contínuos.

Para a porosidade total (Tabela 4), o tratamento SB diferiu estatisticamente dos tratamentos S e M, enquanto não houve diferença significativa em relação ao tratamento NS. A porosidade total no tratamento M foi a maior (49,31%), enquanto o tratamento SB apresentou o menor índice de vazios (41,21%). A redução no espaço poroso do manejo SB valida o comportamento descrito por Ribeiro et al. (2021), que constataram reduções severas na porosidade total (alcançando médias de 41,0%) em áreas antropizadas. Esse decréscimo reflete a compactação decorrente da perda de macroporos, enquanto a mata preservada mantém dos índices ideais de vazios. Esse comportamento reflete diretamente o princípio físico de que solos sob intenso manejo e tráfego de máquinas tendem a se compactar, o que resulta no aumento da densidade e na consequente redução do espaço poroso. Para a porosidade (Tabela 4) o tratamento SB diferiu estatisticamente dos tratamentos S e M, enquanto que não houve diferença para o tratamento NS. A porosidade no tratamento SB foi a que apresentou o maior valor. Entretanto, no tratamento em que a PT apresentou os valores mais baixos, foi o M, com cerca de 50%.

4 CONCLUSÃO

A resistência mecânica do solo à penetração foi inversamente proporcional ao teor de umidade gravimétrica. O manejo Subsulado + Braquiária (SB) apresentou as maiores restrições físicas (RP atingindo até 16,03 MPa) em todas as camadas subsuperficiais, o que foi severamente acentuado pelos menores teores de umidade (0,02 a 0,05 g g⁻¹) registrados no momento da amostragem.

O tráfego de maquinário e o histórico de cultivo alteraram significativamente a estrutura física do solo em comparação com a Mata Nativa (M). O manejo Subsulado + Braquiária (SB) resultou no maior estado de compactação, evidenciado pelo aumento de 15,67% na densidade do solo ($1,56 \text{ g cm}^{-3}$) e pela consequente redução da porosidade total (41,21%) , aproximando-se dos limites críticos para o desenvolvimento radicular.

A área de Mata Nativa (M) confirmou a manutenção da qualidade física ideal do solo, apresentando a menor densidade ($1,34 \text{ g cm}^{-3}$) e a maior porosidade total (49,31%) entre todos os tratamentos avaliados. Esse comportamento é justificado pela ausência de tráfego agrícola , pelo maior sombreamento e pelo aporte contínuo de serrapilheira, que auxiliam na retenção hídrica.

5 REFERÊNCIAS

- BORBA, J. O. M.; OLIVEIRA, F. P.; SILVA, P. L. F.; MARTINHS, A. F.; TAVARES, D. D.; CAMPOS, M. C. C. Qualidade física de um Latossolo Amarelo sob gramíneas e mata nativa no Brejo da Paraíba. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7522.
- BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011. DOI: 10.5039/agraria.v6i2a882.
- CARR, P. M.; GRAMIG, G. G.; LIEBIG, M. A. Impacts of organic zero tillage systems on crops, weeds, and soil quality. **Sustainability**, v. 5, n. 7, p. 3172-3201, 2013. DOI: 10.3390/su5073172.
- CARVALHO, A. P. V.; DIAS, H. C. T.; PAIVA, H. N.; TONELLO, K. C. Resistência mecânica do solo à penetração na bacia hidrográfica do Riacho Fundo, Felixlândia-MG. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1091-1098, 2012. DOI: 10.1590/S0100-67622012000600010.
- COLET, M. J.; SVERZUT, C. B.; WEIRICH NETO, P. H. Efeito da escarificação na resistência à penetração de um solo sob pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 2, n. 2, p. 119-128, 2008. DOI: 10.18011/bioeng2008v2n2p119-128.
- COOPER, J.; BARANSKI, M.; STEWART, G.; NOBILI, M.; JONES, S.; PETERSEN, P.; MEAD, A.; BURGESS, P. J. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 1, 2016. DOI: 10.1007/s13593-016-0354-1.
- CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCINIO FILHO, A. P.; SOUZA, E. B.; NAGAHAMA, H. J. Soybean establishment and soil penetration resistance under soil tillage systems and sowing speed in two seasons. **Energia na Agricultura**, v. 36, n. 3, p. 324-334, 2021. DOI: 10.17224/EnergAgric.2021v36n3p324-334.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001
- FLEMING, D. E.; SPENCER, G. D.; KRUTZ, L. J. Pesticide runoff from conventional tillage, minimum tillage, and no-tillage cropping systems: meta-analysis of published North American data. **Journal of Environmental Quality**, v. 54, n. 5, p. 913-924, 2025. DOI: 10.1002/jeq2.70011.
- FU, Y.; SI, Z.; MA, S.; CHENG, Y.; LIU, Z.; GAO, Y. Impact of soil compaction degree modulated by initial water content on maize root phenotype and hydraulic properties. **Frontiers in Plant Science**, v. 17, 2026. DOI: 10.3389/fpls.2026.1764502.
- HILL, R. L.; MEZA-MONTALVO, M. Long-term wheel traffic effects on soil physical properties and corn yield. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 5, p. 1604–1610, 1990. DOI:10.2136/SSSAJ1990.03615995005400030042X.
- IORI, P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 185-195, 2012.
- KLONOWSKI, J.; KOBUSZEWSKI, M.; NASKRĘT, K.; SZULC, P.; RATAJCZAK, J.; KANIEWSKI, R.; KOWALCZYK, Z. The usefulness of soil penetration resistance measurements for improving the efficiency of cultivation technologies. **Sustainability**, v. 16, n. 16, 2024. DOI: 10.3390/su16166962.
- LONG, Z.; WANG, Y.; SUN, B.; TANG, X.; JIN, K. Impact of mechanical compaction on crop growth and sustainable agriculture. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 243-252, 2024. DOI: 10.15302/J-FASE-2024566.
- MACHADO, P. L. O. A. **Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.
- MARTÍNEZ-VIDAURRE, J. M.; PÉREZ-ÁLVAREZ, E. P.; GARCÍA-ESCUADERO, E.; RAMOS, M. C.; PEREGRINA, F. Differences in Soil Water Holding Capacity and Available Soil Water along Growing Cycle Can Explain Differences in Vigour, Yield, and Quality of Must and Wine in the DOCa Rioja. **Horticulturae**, v. 10, n. 320, 2024. DOI: 10.3390/horticulturae10040320.
- MILLA, F.; RAMPIM, L.; HARMATIUKA, P. H.; REGIANI, A. L. M.; MULLER, M. M. L.; FARIA, V. O.; PACHECO, A. A.; OLANIK, C.; BINI, P. E. C. Furrow opener and plant density on canola crop, penetration resistance and subsequent soybean crop. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i10.8679.
- OLIVEIRA, B.; CARVALHO, M. A.; LANGE, A.; DALLACORT, R.; SILVA, V. Resistência do solo à penetração em áreas sob o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na região amazônica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, 2015. DOI: 10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2015_255.
- PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico e classificação climática para uma determinada região de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, p. 758-766, 2016. DOI: 10.7127/rbai.v10n400402.

- REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000500002.
- RIBEIRO, J. C.; ALMEIDA, J. C. P.; ALMEIDA, A. A. S.; GADIOLI, L. L.; PEREIRA, M. G. Atributos físicos de um Latossolo sob sistemas de uso e manejo no médio Vale do Paraíba Paulista. **Revista Cultura Agronômica**, v. 30, n. 2, p. 190-205, 2021. DOI: 10.32929/2446-8355.2021v30n2p190-203.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- SARTOR, L. R.; RAMÃO, J.; SILVA, V. P.; CASSOL, L. S.; BRUN, E. J. Resistência mecânica do solo à penetração em sistema silvipastoril após onze anos de implantação. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 231-241, 2020. DOI: 10.5902/1980509831205.
- SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1369-1377, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400001.
- SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 271-286, 2021. DOI: 10.1007/s42853-021-00117-7.
- SILVA, L. I.; CAMPOS, M. C. C.; WADT, P. G. S.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; FREITAS, L.; SANTOS, E. A. N.; BRITO FILHO, E. B. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 40, p. 40-48, 2020. DOI: 10.11606/rdg.v40i0.162486.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1993. (USDA Handbook, 18).
- SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR.; CALLAZO, D. J.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R.R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 408-415, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20140359.
- SOUZA, E. B.; PATROCINIO FILHO, A. P.; PIMENTA, W. A.; NAGAHAMA, H. J.; CORTEZ, J. W. Nota técnica: resistência mecânica do solo à penetração em função da sua umidade e do tipo de penetrômetro. **Engenharia na Agricultura**, v. 22, n. 1, p. 67-76, 2014.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; ALVES, M. C.; REICHERT, J. M. Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. **Sustainability**, V. 14, 2022. DOI: 10.3390/su14052958.



TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002. DOI: 10.1590/S0103-90162002000400026.

YIN, D.; SONG, X.; ZHU, X.; GUO, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y. Spatiotemporal Analysis of Soil Moisture Variability and Its Driving Factor. **Remote Sens**, v. 15, 2023. DOI: 10.3390/rs15245768.

ZHANG, B.; JIA, Y.; FAN, H.; GUO, C.; FU, J.; LI, S.; LI, E.; LIU, B.; MA, R. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 10, 2024. DOI: 10.1002/ldr.5144.