



Qualidade física do solo em pomares de bananeira sob influências do uso e de intervenção mecânica

Mateus Lima SILVA ^{*1}, Leo Cassio Teixeira de MATOS ¹, André Araújo do NASCIMENTO ¹,
Alexandre Reuber Almeida da SILVA ¹, Carlos Newdmar Vieira FERNANDES ¹,
Reivany Eduardo Morais LIMA ¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Iguatu, CE, Brasil.

*E-mail: mateuslimasilva5@gmail.com

Submetido em: 05/02/2024; Aceito em 21/10/2024; Publicado em: 12/11/2024.

RESUMO: Objetivou-se avaliar os atributos indicativos da qualidade física dos solos cultivados com a bananeira, cultivar “Prata Catarina”, submetidos a manejos mecânicos através da subsolagem. As avaliações foram realizadas em dois distintos pomares, caracterizados por terem sido submetidos ao processo de subsolagem a cinco anos (área considerada não subsolada) e a sete meses (área considerada subsolada). Nas amostras de solo coletadas, determinam-se os seguintes atributos: densidade, densidade dos sólidos, porosidade total e a densidade relativa. Em campo, determinou-se a resistência mecânica à penetração radicular, através de um penetrômetro com anel dinamométrico até 0,50 m de profundidade. Constatou-se que a operação de subsolagem foi capaz de reduzir a densidade do solo e a densidade relativa em 9,83 e 15,84%, respectivamente, gerando incrementos na porosidade total do solo da ordem de 24,84%. Já a resistência mecânica à penetração radicular foi crescente com a profundidade, independentemente do manejo mecânico empregado. A subsolagem resultou em reduções significativas na resistência mecânica à penetração radicular a partir da profundidade de 0,125 m, e, portanto, denota-se que a prática da subsolagem pode ser considerada como efetiva na melhoria da qualidade física dos solos em plantações perenes ou semiperenes (como pomares de espécies frutíferas).

Palavras-chave: degradação do solo; subsolagem; restrição radicular.

Physical quality of the soil in banana orchards under the influence of use and mechanical intervention

ABSTRACT: The objective was to evaluate the attributes indicative of the physical quality of soils cultivated with the banana tree cultivar “Prata Catarina”, subjected to mechanical management through subsoiling. The evaluations were carried out in two different orchards, subjected to the subsoiling process for five years (area considered not subsoiled) and seven months (area considered subsoiled). In the soil samples collected, the following attributes are determined: density, solids density, total porosity and relative density. The mechanical resistance to root penetration was determined using a penetrometer with a dynamometric ring up to a depth of 0.50 m. It was found that the subsoiling operation reduced soil density and relative density by approximately 9.83 and 15.84%, respectively, generating increases in total soil porosity of 24.84%. Mechanical resistance to root penetration increased with depth, regardless of the mechanical management. Subsoiling resulted in significant reductions in the mechanical resistance to root penetration from a depth of 0.125 m, and, therefore, it is clear that the practice of subsoiling can be considered effective in improving the physical quality of soils in perennial or semi-evergreen plantations (such as fruit orchards).

Keywords: soil degradation; subsoiling; root restriction.

1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem sido reconhecida como uma séria ameaça ao funcionamento normal dos solos agrícolas (GONÇALVES et al., 2017; VALADÃO JUNIOR et al., 2022). Devido à adoção do sistema de preparo convencional e operações frequentes com máquinas e ferramentas agrícolas pesadas nos solos agricultáveis, a compactação do solo é atualmente um problema mundial, que envolve todos os níveis do solo e da agricultura e pode causar enormes perdas econômicas (MILEUSNÍĆ et al., 2022). Dentre os efeitos adversos acarretados por esse processo, pode-se resumir o aumento da densidade do solo e a resistência do solo à

penetração radicular, comprometendo o acesso das raízes das plantas à água, ao ar e aos nutrientes, já que, diminui a porosidade e a taxa de infiltração de água. Consequentemente, solos compactados ao restringir a capacidade de enraizamento das plantas reduzem os rendimentos agrônômicos das culturas (OHLAND et al., 2014).

O rompimento dessas camadas de impedimentos físicos característicos da compactação é prevalentemente realizado em campo através da técnica da subsolagem, também conhecida como escarificação mecânica profunda, procedimento que pode ser empregado, quando necessário,

ao longo das operações de preparo periódico do solo (MACHADO et al., 2023).

Durante a subsolagem, o solo é solto e levantado do perfil, sem realização de inversão ou mistura. O levantamento da massa de solo leva a distúrbios frágeis e/ou de tração, caracterizados, respectivamente, pela fratura do solo em unidades menores e pela formação de rachaduras de tensão quando a massa de solo levantada se dobra sobre o topo do pé do dente da haste do subsolador, respectivamente (SEIDEL et al., 2018).

A subsolagem tem demonstrado exercer um impacto positivo no rendimento das culturas, em uma ampla variedade de espécies vegetais e tipos de solo, por ajustar mecanicamente a proporção das fases sólida, líquida e gasosa do solo. Além disso, fornece um ambiente adequado para as raízes e para os micro-organismos benéficos, auxiliando na qualidade física, química e biológica do solo (FARHATE et al., 2022).

Todavia, particularmente, em cultivos agrícolas perenes ou semiperenes, a compactação do solo pode se tornar também um problema permanente ou semipermanente, por comumente exibirem camadas restritivas ao desenvolvimento radicular, ao longo das profundidades efetivas características das culturas. Esse problema não pode ser facilmente contornado em função da impossibilidade de realização de práticas mecânicas aliviadoras da compactação sem a necessidade de retirada da cultura que está estabelecida naquele respectivo solo (CAVALCANTI et al., 2019; NING et al., 2022). Adicionalmente, tem se constatado que, ao longo do tempo, mesmo os solos anteriormente subsolados, apresentam potenciais riscos de recompactação. Assim, devido a essa vulnerabilidade temporal e o próprio caráter dinâmico da estrutura do solo, sugere-se que a eficiência da técnica da subsolagem deve ser monitorada ao longo do tempo, por meio do acompanhamento de atributos físicos do solo que permitam diagnosticar o seu atual estado de compactação e que possam subsidiar as tomadas de decisões em nível de propriedade rural (LIMA et al., 2017).

Outro fator a ser considerado no manejo mecânico do solo é a cultura a ser utilizada. Especificamente, tem se constatado que a bananeira é sensível aos fatores de crescimento edáficos relativos às características físicas do solo, como aeração, densidade do solo, retenção de água e resistência mecânica ao crescimento das raízes, além de ser uma planta altamente exigente em água e nutrientes. Fatos que sugerem que o aprimoramento do sistema de produção da cultura deve levar em consideração a avaliação da qualidade física dos solos, bem como a necessidade de realizações de intervenções mecânicas, quando os atributos sinalizarem essa necessidade (ALVES et al., 2015).

Nesse contexto, objetivou-se avaliar os atributos indicativos da qualidade física dos solos cultivados com a bananeira, cultivar “Prata Catarina”, submetidos a manejos mecânicos através da subsolagem no curto e no médio prazo, na espessura de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular característica da cultura, com vistas a investigar a eficiência da técnica da subsolagem ou a ocorrência do fenômeno da recompactação do solo ao longo do tempo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área estudada

O estudo foi realizado no cinturão produtivo das várzeas do Rio Jaguaribe, localizado na localidade de Penha, situada

na região de planejamento Centro-sul do estado do Ceará, no município de Iguatu, cujas coordenadas geográficas são 6°25'2.23" de latitude sul e 39°18'51.56" de longitude oeste (Figura 1).

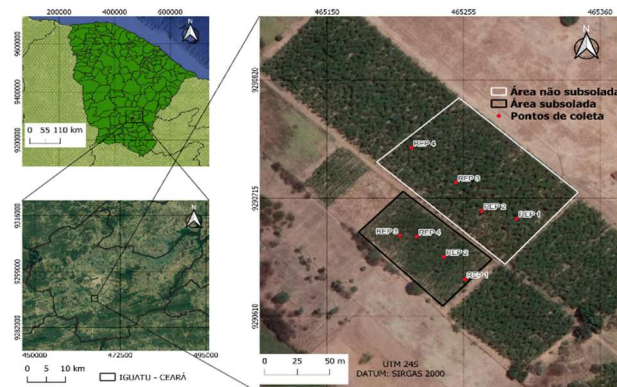


Figura 1. Mapa de localização da área estudada. Iguatu, Ceará, 2023.
Figure 1. Location map of the studied area. Iguatu, Ceará, 2023.

O clima da região é classificado como BSh (semiárido quente), de acordo com a classificação climática de Köppen. A temperatura média é de 28 °C variando entre 22,4 °C para as mínimas e 33,5 °C para as máximas. A evapotranspiração potencial (ETP) excede a precipitação, a média da evapotranspiração potencial é de 1.902,5 mm ano⁻¹ ± 117,8 mm ano⁻¹, com as maiores taxas entre agosto e janeiro (CAMPOS, ANDRADE, 2021). O solo em estudo pertence a ordem dos Neossolos, cuja classe textural classifica-se como franco-arenosa até a profundidade de 0,50 m (Tabela 1).

As avaliações foram realizadas ao longo do mês de julho de 2022, em dois distintos pomares, caracterizados por terem sido submetidos ao processo de subsolagem a cinco anos (área considerada não subsolada) e a sete meses (área considerada subsolada).

Em uma das áreas, a cultura se encontrava, por ocasião da coleta dos dados, no seu 10º ciclo de produção, onde as operações de preparo primário do solo (subsolagem a 50 cm, aração e gradagens cruzadas), ocorreram entre os meses de abril e julho de 2017, mantendo-se, desde então, sem exposição a qualquer prática exógena de alteração estrutural (área não mobilizada), sendo que a operação de subsolagem foi então realizada neste pomar há aproximadamente 5 anos, contabilizados a partir da realização da operação, até a data de avaliação, sendo essa a área então denominada no presente estudo por “não subsolada”.

Por outro lado, o pomar remanescente também se encontrava submetido as mesmas práticas de manejo até meados de dezembro de 2021, ocasião, na qual, realizaram-se as operações de renovação do bananal na área por ele ocupada, justamente por essa apresentar comprometimento no desempenho agrônomo das plantas, supostamente decorrentes dos problemas acarretados pela compactação do solo.

Nessa área, o bananal foi então renovado mediante às operações de subsolagem, aração e gradagens cruzadas, sendo que a operação de subsolagem a 50 cm foi então realizada neste pomar há aproximadamente sete meses, contabilizados da realização da operação até a data de avaliação, sendo essa denominada no presente estudo por “área subsolada”. Nesse pomar, a cultura se encontrava, por ocasião da coleta dos dados, no seu 1º ciclo de produção.

Tabela 1. Composição granulométrica e teores de carbono orgânico dos solos de pomares de bananeira sob influências do manejo de intervenções mecânicas, avaliados ao longo de diferentes subcamadas de solo, na profundidade efetiva de crescimento radicular da cultura. Table 1. Granulometric composition and organic carbon content of banana orchard soils under mechanical intervention management, evaluated along different soil sublayers, at the effective depth of root growth of the crop.

Sistemas de manejos	Subcamadas (m)	Composição granulométrica				Carbono orgânico total	Classe textural
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		
		(g kg ⁻¹)					
Solo não subsolado	0,00 – 0,125	89	589	226	96	9,95	Franco-arenosa
	0,125 – 0,250	73	568	235	125	9,95	Franco-arenosa
	0,250 – 0,500	61	474	280	168	7,34	Franco-arenosa
Solo subsolado	0,00 – 0,125	98	511	264	127	9,72	Franco-arenosa
	0,125 – 0,250	106	517	263	113	9,72	Franco-arenosa
	0,250 – 0,500	75	447	310	168	5,35	Franco-arenosa

2.2. Análises executadas

Amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas nas profundidades de 0 - 0,125, 0,125 - 0,250 e 0,250 - 0,500 m. Nessas profundidades, anéis volumétricos (5 cm de altura por 5 cm de diâmetro) foram utilizados para coleta de amostras indeformadas (mantendo a estrutura do solo), inseridos no solo com o auxílio do amostrador Uhland. A coleta de anéis foi realizada em cada área, nas 3 profundidades, em quatro posições (repetições), perfazendo o total de 24 amostras (12 amostras por pomar).

Nas amostras indeformadas coletadas, determinaram-se, em laboratório, os seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo, densidade dos sólidos do solo, porosidade total e a densidade relativa; mediante a relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo, obtida por meio do ensaio de Proctor normal.

Para a determinação da densidade do solo inicial foram utilizadas amostras indeformadas, retiradas por meio de anel, posteriormente secas em estufa a 105 °C até massa constante, para a obtenção do peso seco que, dividido pelo volume do anel, determinou a densidade do solo. A densidade dos sólidos do solo foi determinada pelo método do balão volumétrico e a porosidade total do solo foi estimada pela relação entre a densidade do solo e a densidade dos sólidos do solo. Todas essas análises foram executadas seguindo as metodologias propostas por Teixeira et al. (2017).

Subamostras compostas de solo com estrutura deformada, para cada tipo de manejo mecânico do solo e camada avaliada (nesse caso, o perfil foi subdividido em apenas duas subcamadas: 0 – 0,250 m e 0,250 – 0,500 m), foram homogeneizadas, secas ao ar e peneiradas em peneira 4,76 mm, formando uma amostra composta.

As amostras foram peneiradas em peneira em malha de 4,76 mm para a obtenção da curva de compactação por meio do ensaio de Proctor normal (560 kPa de energia) com o objetivo de determinar a densidade máxima do solo para cada solo e profundidade. Esse ensaio consiste em compactar o solo em três camadas de 4 cm de espessura num cilindro de 1.000 cm³, utilizando um soquete com massa de 2,5 kg, em 25 golpes por camada, numa altura de queda de 30 cm. A partir dos pares de dados, da densidade do solo em função do teor de água do solo (em base de massa), fez-se o ajuste de equação polinomial de 2º grau. A primeira derivada da função permite estimar a umidade crítica e a segunda, a densidade máxima do solo. A densidade relativa foi determinada pelo quociente entre a densidade do solo avaliada por subcamada e a densidade máxima obtida como resultado do ensaio de Proctor normal (BROCH; KLEIN, 2017).

Nessas mesmas posições e profundidades (0 - 0,125 m, 0,125 - 0,250 m e 0,250 – 0,500 m) obtiveram-se os valores de resistência mecânica à penetração radicular, através de um penetrômetro com anel dinamométrico, conforme a metodologia proposta por Beutler et al. (2007).

Nesta ocasião, coletaram-se também amostras deformadas de solo, visando a determinação da umidade gravimétrica atual do solo (por ocasião da avaliação da resistência mecânica à penetração).

Para tanto, as amostras foram coletadas nas mesmas posições e profundidades, armazenadas em recipientes adequados para reduzir as perdas de água por evaporação e, logo em seguida, os valores de massa foram aferidos.

As amostras foram levadas a estufa com circulação de ar a 105 °C, por 48 horas. Após a estabilização do peso, foi realizado o cálculo da umidade gravimétrica.

2.3. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 1% e 5% de probabilidade, conforme os pressupostos de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), no arranjo fatorial 2 x 3, sendo que os sistemas de manejo mecânico do solo (solo não subsolado e subsolado) constituíram o fator principal; e as profundidades de amostragem (0 – 0,125 m; 0,125 – 0,250 e 0,250 – 0,500 m) compuseram o secundário.

Quando verificado efeito significativo na análise de variância, as médias obtidas nos diferentes tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5 % de probabilidade, utilizando-se o programa computacional para análises estatísticas ASSISTAT da Universidade Federal da Paraíba.

3. RESULTADOS

3.1. Densidade do solo (g cm⁻³), densidade dos sólidos do solo (g cm⁻³) e porosidade total do solo (%)

Houve efeito significativo para o fator principal manejo mecânico do solo (manejos) para os atributos físicos densidade do solo e porosidade total do solo. Por outro lado, os atributos físicos densidade do solo, densidade dos sólidos do solo e porosidade total do solo não apresentaram quaisquer efeitos estatisticamente significativos frente ao fator secundário profundidades de amostragens dos solos (subcamadas), o que evidencia a provável uniformidade vertical dos atributos físicos dos solos em estudo até a profundidade avaliada, tal como o que foi também evidenciado para a composição granulométrica (0,50 m). Vale salientar que a densidade dos sólidos do solo não foi influenciada pelo manejo mecânico do solo e tampouco

apresentou variação estatisticamente significativa ao longo das profundidades de solo estudadas (Tabela 2).

Em termos gerais, denota-se que a densidade do solo diferiu estatisticamente entre os manejos mecânicos empregados aos bananais, onde o solo recentemente subsolado exibiu, por ocasião da avaliação realizada, o menor valor médio de densidade do solo ($1,46 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto no solo não subsolado registrou-se a maior média de valor para o atributo densidade ($1,62 \text{ g cm}^{-3}$), ao longo da profundidade de 0 – 0,50 m (Figura 2), acarretando uma variação percentual

da ordem de aproximadamente 9,87% na densidade (Figura 2A).

A porosidade total do solo (Figura 2B), ao contrário da densidade do solo, exibiu maiores valores no solo da área na qual a subsolagem tinha sido mais recentemente realizada (39,04%), o qual é estatisticamente superior aos denotados na área não subsolada (31,28%). Assim, ao compararmos os referidos valores, pode-se prever que a operação da subsolagem foi capaz de elevar a porosidade total do solo em aproximadamente 24,81%.

Tabela 2. Resumo das análises das variâncias para os dados de densidades dos solos – D_{Solo} (g cm^{-3}), densidades dos sólidos dos solos – $D_{\text{Sólidos}}$ (g cm^{-3}), porosidades totais dos solos – α (%), densidades relativas dos solos – DR (adimensional), umidades gravimétricas – Ug, (g g^{-1}) e resistências mecânicas às penetrações radiculares – RMPR (MPa) dos solos de pomares de bananeira sob influências do manejo de intervenções mecânicas.

Table 2. Summary of variance analyses for soil densities data – D_{Solo} (g cm^{-3}), soil solids densities – $D_{\text{Sólidos}}$ (g cm^{-3}), total soil porosities – α (%), relative densities of soils – DR (dimensionless), gravimetric moisture – Ug, (g g^{-1}) and mechanical resistance to root penetrations – RMPR (MPa) of banana orchard soils under influences of mechanical intervention management.

Fontes de variação	GL	Quadrados médios					
		D_{Solo}	$D_{\text{Sólidos}}$	α	DR	Ug	RMPR
Manejos (M)	1	0,15222**	0,01023 ^{ns}	362,21774**	0,13694**	0,00884*	6,91976**
Subcamadas (S)	2	0,01053 ^{ns}	0,00672 ^{ns}	25,54129 ^{ns}	0,00008*	0,0020 ^{ns}	18,86834**
M x S	2	0,00077 ^{ns}	0,00400 ^{ns}	2,40505 ^{ns}	0,00308 ^{ns}	0,00052 ^{ns}	4,11466**
Tratamentos	5	0,03497*	0,00633 ^{ns}	83,62209*	0,02866**	0,00279 ^{ns}	10,57715**
Resíduo	18	0,01114	0,00382	24,53852	0,00343	0,00151	0,08493
Total	23	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	6,85	2,60	14,09	6,66	29,03	17,81

F.V.: fontes de variação; G.L.: graus de liberdade; C.V.: coeficientes de variação; **: significativo a 1% de probabilidade; *: significativo a 5% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste F.

F.V.: sources of variation; G.L.: degrees of freedom; C.V.: coefficients of variation; **: significant at 1% probability; *: significant at 5% probability; ns: not significant by the F test.

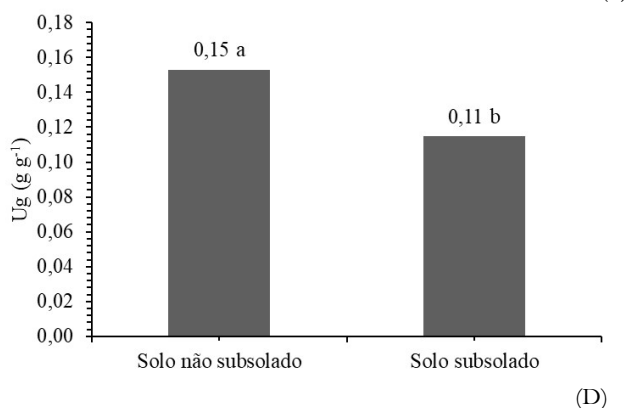
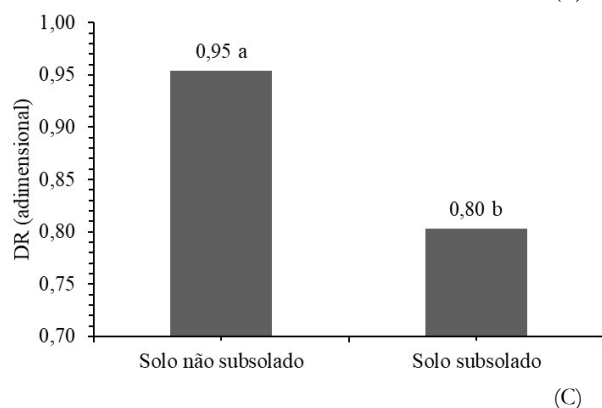
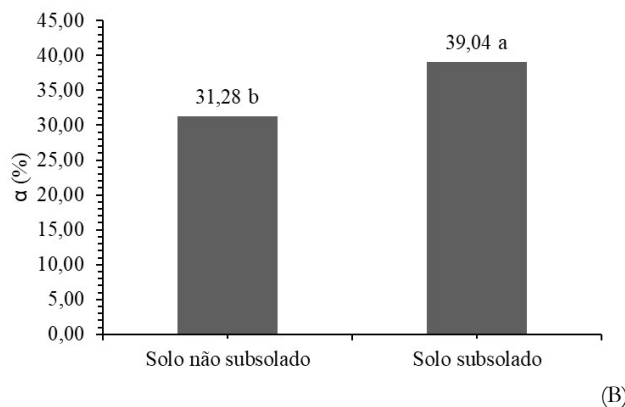
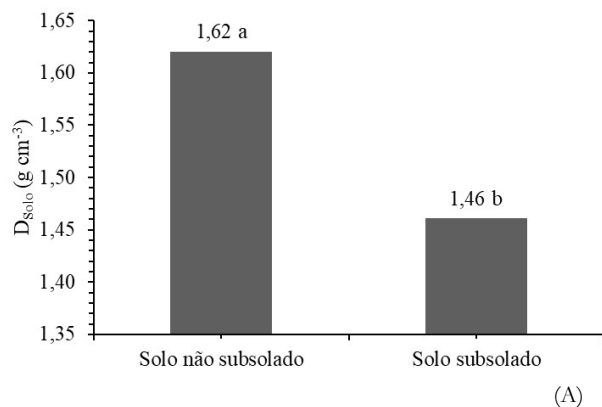


Figura 2. Densidades dos solos – D_{Solo} (g cm^{-3} ; A), porosidades totais – α (%; B), Densidades relativas – DR (adimensional; C) e umidades gravimétricas – Ug (g g^{-1} ; D) dos solos de pomares de bananeira sob influências do manejo de intervenções mecânicas. As médias seguidas por letras diferentes, diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Figure 2. Soil densities – D_{Solo} (g cm^{-3} ; A), total porosities – α (%; B), relative densities – DR (dimensionless; C) and gravimetric humidity – Ug (g g^{-1} ; D) of Banana orchard soils under the influence of mechanical intervention management. The means followed by different letters differ statistically, using the Tukey test at a 5% probability level.

3.2. Umidade crítica de compactação (%) e densidade do solo máxima (g cm^{-3})

A partir das curvas de compactação, a umidade crítica de compactação e a densidade do solo máxima foram obtidas (Tabela 3). Esses valores, para os diferentes sistemas de manejos mecânicos e profundidades avaliadas evidenciam que o nível crítico para densidade do solo varia de acordo com o solo e com a profundidade, reforçando a ideia de que não existe consenso sobre um valor específico para o valor da densidade crítica, o que reveste o ensaio de Proctor normal de singular importância para a estimativa real desse parâmetro de referência, capaz de prever o grau de compactação do solo, por meio da estimativa da densidade relativa (densidade do solo / densidade do solo máxima).

Tabela 3. Umidade crítica de compactação (U_{crit}) e densidade do solo máxima ($D_{\text{Smáx}}$) considerando o sistema de manejo do solo e a profundidade de amostragem.

Table 3. Critical compaction moisture (U_{crit}) and maximum soil density ($D_{\text{Smáx}}$) considering the soil management system and sampling depth.

Sistemas de manejo	Prof. (m)	U_{crit} (%)	$D_{\text{Smáx}}$ (g cm^{-3})
Solo não subsolado	0,00 – 0,25	18,00	1,66
	0,25 – 0,50	15,05	1,78
Solo subsolado	0,00 – 0,25	14,34	1,81
	0,25 – 0,50	13,78	1,84

Cumprir destacar que independentemente do manejo mecânico empregado, os maiores valores de densidade do solo máxima foram obtidos na camada de 0,25 – 0,50 m, o que pode ser justificado pelo incremento de argila em profundidade detectado para ambas as áreas em estudo (Tabela 1), ao passo que os maiores valores para esse parâmetro foram obtidos para o solo subsolado, independente da profundidade, o que pode relacionar-se com os menores valores médios de carbono orgânico averiguados no solo subsolado, quando comparados aos obtidos no solo não subsolado (Tabela 1).

3.3. Densidade relativa do solo, umidade gravimétrica atual e resistência mecânica à penetração radicular

De acordo com os resultados, verificou-se que os efeitos principais manejo mecânico dos solos (manejos) e profundidades de amostragem (subcamadas) variaram independentemente, e influenciaram significativamente o atributo densidade relativa do solo, ao passo que, para essa variável, nenhuma das interações mostrou-se estatisticamente significativa (Tabela 2). A umidade gravimétrica atual do solo, mensurada por ocasião da avaliação da resistência mecânica à penetração radicular, mostrou-se estaticamente influenciável apenas para o fator principal manejo mecânico dos solos (manejos), ao passo que as profundidades de amostragem (subcamadas) e as suas respectivas interações com manejo mecânico dos solos (manejos) não foram estaticamente influenciadas, conforme o teste F (Tabela 2).

Para o atributo resistência mecânica à penetração radicular, verificou-se significância estatística para os efeitos principais manejo mecânico dos solos (manejos) e profundidades de amostragem (subcamadas) e para os efeitos das interações manejos x subcamadas, indicando dependência entre os fatores destas interações (Tabela 2).

O grau de compactação do solo, mensurado a partir da densidade relativa nos diferentes tratamentos de manejos

mecânicos, variou de 0,80 a 0,95 (Figura 2C). Dos resultados, evidencia-se que os sistemas de manejos mecânicos influenciaram decisivamente e estatisticamente o comportamento das áreas em estudo. Assim, verifica-se que o manejo que apresentou a maior média para esse atributo foi o não subsolado (0,95), superior em 18,75% em relação à área subsolada (0,80). Com relação às profundidades amostradas, os valores de densidade relativa foram menores na profundidade de 0,250 – 0,500 m, cujo valor foi da ordem de 0,8753; enquanto a camada que mostrou maior grau de compactação mediante a estimativa da densidade relativa foi a de 0,125 – 0,250 m, cujo valor foi da ordem de 0,8817.

Contudo, embora a análise de variância tenha detectado efeito significativo para o fator isolado profundidade de amostragem para a variável em questão (Tabela 2), denota-se que as comparações das médias, através do teste de Tukey, não detectaram quaisquer diferenças estatisticamente significativas para essa variável frente às profundidades amostradas (Figura 3A).

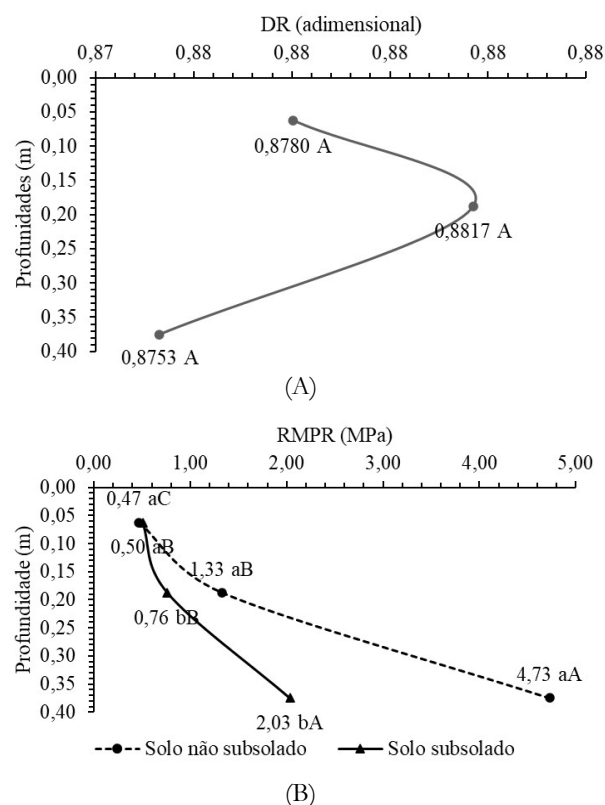


Figura 3. Densidades relativas – DR (adimensional; A) e resistências mecânicas às penetrações radiculares – RMPR (MPa; B) dos solos de pomares de bananeira ao longo de diferentes subcamadas de solo, na profundidade efetiva de crescimento radicular da cultura. As médias seguidas de letras iguais minúsculas para os diferentes manejos de intervenções mecânicas e maiúsculas para as diferentes subcamadas de solo não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Figure 3. Relative densities – DR (dimensionless; A) and mechanical resistance to root penetrations – RMPR (MPa; B) of banana orchard soils along different soil sublayers at the effective depth of root growth of the crop. The means followed by equal lowercase letters for the different management of mechanical interventions and capital letters for the different soil sublayers do not differ statistically using the Tukey test at a 5% probability level.

A umidade gravimétrica atual do solo, mensurada por ocasião da avaliação da resistência mecânica à penetração

radicular, exibiu o maior dos valores médios no solo não subsolado ($0,15 \text{ g g}^{-1}$), cujo valor mostrou-se estatisticamente superior ao denotado na área subsolada ($0,11 \text{ g g}^{-1}$), com o incremento de umidade entre ambos da ordem de aproximadamente 36 %, independentemente da profundidade de solo amostrada (Figura 2D).

A Figura 3B apresenta os dados de resistência mecânica do solo à penetração radicular nos diferentes sistemas de manejo mecânico estudados, ao longo das subcamadas de solos avaliadas. Esses dados mostram que na profundidade de 0,125 m ambos os sistemas de manejo mecânico (subsolado e não subsolado) exibiram os menores valores de resistência mecânica à penetração radicular, cujos valores assemelham-se estatisticamente quando comparados entre si.

Já na profundidade de 0,125 até 0,250 m, o solo não subsolado apresentou o maior valor de resistência mecânica à penetração radicular (1,33 Mpa), estatisticamente diferente do obtido para o solo recentemente subsolado para essa mesma subcamada de solo (0,76 Mpa). Comparando-se os sistemas de manejo avaliados nessa profundidade, notou-se que a prática da subsolagem foi capaz de reduzir a resistência mecânica à penetração radicular em aproximadamente 75%.

Para a profundidade 0,25 a 0,50 m os sistemas de manejos mecânicos avaliados também apresentaram diferenças significativas, obtendo-se os menores dos valores de resistência à penetração no solo recentemente subsolado; com valores em torno de 2,03 MPa, ao passo que no solo não subsolado, nessa mesma profundidade, os valores foram da ordem de 4,73 MPa, cujo incremento em resistência à penetração radicular foi da ordem de 133%, quando equiparados.

No geral, comprova-se que a resistência mecânica à penetração radicular se mostrou crescente com a profundidade, independentemente do manejo mecânico empregado, com valores estatisticamente diferentes quando comparados entre si. Todavia, a subsolagem resultou em expressivas reduções nesta variável a partir da profundidade de 0,125 m.

4. DISCUSSÃO

4.1. Densidade do solo, densidade dos sólidos do solo e porosidade total do solo

A densidade dos sólidos do solo não foi influenciada pelo manejo mecânico do solo e tampouco apresentou variação estatisticamente significativa ao longo das profundidades de solo estudadas (Tabela 2), o que corrobora com as informações reportadas por Dantas et al. (2012), ao relatarem que, tipicamente, a densidade dos sólidos do solo não é alterada por mudanças nos manejos dos mesmos, estando este atributo mais diretamente relacionado com a própria composição mineralógica predominante no solo e/ou com o seu respectivo teor de matéria orgânica. Contudo, registra-se que o valor médio detectado para esse atributo foi da ordem de $2,38 \text{ g cm}^{-3}$.

Comparando-se os valores limites de densidade do solo estabelecidos por Andrade e Stone (2009) para a classe textural a qual pertence os solos em estudo (franco-arenosa), para a qual os referidos autores reportam um limite inferior de densidade de $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ e um limite superior de $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ para esse mesmo atributo, infere-se que o valor médio evidenciado no solo não subsolado ($1,62 \text{ g cm}^{-3}$) situa-se ligeiramente acima do máximo admissível para a classe textural em questão, o que pressupõe que o referido solo

apresenta características físicas tipicamente associadas ao processo de compactação (Figura 2A). Enquanto o enquadramento do valor obtido para o solo subsolado ($1,46 \text{ g cm}^{-3}$) nas imediações do valor médio do referido intervalo ($1,45 \text{ g cm}^{-3}$) é capaz de evidenciar a eficiência da intervenção mecânica subsolagem que tinha sido executada no intervalo de sete meses nessa respectiva área (Figura 2A).

Para Bernardo et al. (2019), solos enquadrados na classe textural franco-arenosa devem exibir valores de densidades dentre $1,40$ e $1,60 \text{ g cm}^{-3}$, estando, portanto, os valores de densidade mensurados no solo não recentemente subsolado acima daquilo que é estabelecido por esses autores como valores normais para a sua classe textural, estando ainda esse valor ($1,63 \text{ g cm}^{-3}$), o qual situa-se numericamente próximo ao limite crítico de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$, preconizado por Reinert e Reichardt (1999) para os solos que possuem um quantitativo de argila em sua composição inferiores a 200 g kg^{-1} , tal como o averiguado junto aos solos estudados (Tabela 1).

Segundo Ribelatto et al. (2017), a densidade do solo pode ser corriqueiramente correlacionada ao crescimento do sistema radicular das culturas agrícolas. Para o referido autor, cada solo caracteriza-se por um determinado valor de densidade considerado “crítico”, a partir do qual a resistência mecânica à penetração radicular torna-se tão expressiva, ao ponto de ela restringir ou até mesmo impossibilitar o crescimento e o funcionamento radicular. Esses tais valores de densidades críticas dos solos dependem, sobretudo, de suas respectivas classes texturais. Nesse sentido, Al-Shammari et al. (2018) propuseram os seguintes intervalos de densidades dos solos críticas para algumas das classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40$ a $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-arenosos.

Embora não exista um consenso na literatura acerca do nível crítico da densidade do solo, tendo por base os referidos valores característicos para os solos pertencentes à classe textura franco-arenosa, na qual ambos os solos do presente estudo são enquadrados, ao longo das profundidades avaliadas, denota-se que, em termos numéricos, os dois manejos das intervenções mecânicas avaliados exibiram valores médios inferiores aos preconizados pelos referidos autores como restritivos ao desenvolvimento radicular (valores $< 1,70 \text{ g cm}^{-3}$). Todavia, é oportuno destacar a proximidade numérica do valor médio de densidade do solo denotado no solo não sublocado ($1,62 \text{ g cm}^{-3}$) com o limite inferior do intervalo em questão ($1,70 \text{ g cm}^{-3}$), o que sinaliza a suscetibilidade das plantas estabelecidas nesse sistema de manejo mecânico aos prováveis efeitos deletérios da compactação dos solos.

O fato do valor da densidade do solo não subsolado não ter sido ainda mais elevado e/ou invariável com a profundidade de amostragem, provavelmente deve-se ao fato do cultivo da bananeira ser semi-perene, caracterizado por menor revolvimento do solo e maior retorno de resíduos ao mesmo (DANTAS et al., 2012).

Por outro lado, é cabível mencionar que no solo subsolado o valor de densidade ($1,46 \text{ g cm}^{-3}$) situou-se bem distante do limite inferior característico do processo de compactação ($< 1,70 \text{ g cm}^{-3}$), denotado, mais uma evidência da eficiência da referida prática no processo de descompactação dos solos.

Nesse contexto, pode-se considerar que os resultados obtidos para a densidade do solo subsolado indicam uma

provável melhoria da condição estrutural do solo até a profundidade de 0,50 m, devido ao impacto positivo da própria subsolagem, que acaba por colaborar com o processo de estruturação do solo.

Embora os valores obtidos para o atributo porosidade total do solo (Figura 2B), independentemente do manejo mecânico a qual tenham sido previamente submetidos, enquadrem-se dentro do intervalo de 30 a 60%, preconizado por Negro et al. (2018) como característicos para a maioria dos solos, constata-se, ainda, que em ambos os manejos os valores observados situaram-se abaixo do que se espera para um solo franco-arenoso, haja vista que para Bernardo et al. (2019), a porosidade total dos solos pertencentes à essa classe referida textural deve situar-se entre 40 e 47%, enquanto para Andrade e Stone (2009), o limite superior de porosidade total para essa mesma classe textural é da ordem de 49%. Contudo, é importante destacar a proximidade numérica do valor de porosidade total averiguado no solo que tinha sido recentemente subsolado (39,04%) com aquele estabelecido como limite inferior para essa classe textural (40%), conforme os autores supracitados, o que é capaz de evidenciar a eficiência da subsolagem na descompactação e, consequentemente, na elevação da porosidade total do solo.

Como a porosidade total do solo é estimada pela relação entre as densidades do solo e dos sólidos e considerando que não houve diferenças para os tratamentos em estudo na determinação da densidade dos sólidos, pode-se inferir que os valores dessa porosidade acompanharam, de forma inversa, os valores observados para a densidade do solo, corroborando com os resultados obtidos por Carvalho et al. (2014).

Analisando-se conjuntamente os dados de densidade do solo e de porosidade total do solo, infere-se que as operações de subsolagem diminuíram os valores de densidade do solo e aumentaram os de porosidade total do solo, tornando mais adequada a relação ar/água e favorecendo o potencial de desenvolvimento radicular da bananeira, até a profundidade de 0,50 m, tal como o observado também por Vanderhasselt et al. (2024).

Quanto aos valores observados para o solo não subsolado, para esses mesmos atributos em análise, pode-se considerar que a pressão mecânica desempenhada sobre os agregados pela compactação deve ter incitado a sua ruptura, promovendo o ajuntamento das partículas, cuja implicação direta foi a elevação da densidade e a redução da porosidade total, pela provável diminuição dos poros maiores e com algum imaginável aumento no número de poros menores (NING et al., 2022).

4.2. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima

Os resultados obtidos neste trabalho para os dados de umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima (Tabela 3) corroboram com as informações fornecidas por Yu et al. (2024), ao relatarem que solos mais argilosos exibem agregação das partículas de argila, que possuem porosidade intra-agregados, aumentando o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido, o que explica o maior valor potencial de densidade do solo máxima para o solo subsolado.

Ainda conforme os referidos autores, a redução da densidade do solo máxima com o aumento no teor de matéria orgânica no solo decorre do efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, associado ao fato de o material orgânico

apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos minerais do sol, o que explica o menor valor potencial de densidade do solo máxima para o solo não subsolado.

Segundo Woldeyohannis et al. (2024), as variações na concentração de argila e no carbono orgânico impactam diretamente as propriedades físicas do solo, sendo que solos com maior teor de argila tendem a ser mais suscetíveis à compactação. Esse comportamento é evidenciado pelos maiores valores de densidade máxima em profundidade, reflexo da relação linear positiva entre o teor de argila e o grau de compactação do solo. Além disso, o aumento da fração argilosa contribui para uma maior capacidade de troca catiônica e maior acúmulo de matéria orgânica, o que pode aumentar o risco de compactação, conforme o que também foi observado neste estudo.

4.3. Densidade relativa do solo, umidade gravimétrica atual e resistência mecânica à penetração radicular

Segundo Blanco-Canqui et al. (2022), a densidade relativa (ou grau de compactação) tem sido empregada para driblar a difícil comparação de resultados de densidade entre solos que exibem disparidades mineralógicas, texturais, de matéria orgânica e estruturais.

Nesse contexto, ao comparar os valores de densidade relativa observados para os diferentes manejos mecânicos avaliados com os valores de referências preconizados pela literatura, infere-se que o solo não subsolado (0,95) enquadra-se no intervalo de 0,90 – 0,95; preconizado por Reinert et al. (2008) como parâmetro indicativo de um solo compactado, caracterizado pela ocorrência de restrição radicular, com efeitos averiguados através de deformações na morfologia das raízes em grau qualificado como médio (Figura 2C).

Ao passo que os valores constatados no solo subsolado (0,80) está localizado dentro do intervalo de 0,80 – 0,90, coincidindo exatamente com o limite inferior do referido intervalo que foi indicado pelos aludidos autores como característicos de solos não compactados, sendo essa a faixa de densidade relativa considerada por eles como não restritiva aos vegetais e, portanto, desejável para os solos agrícolas.

Ainda no que se relaciona às profundidades amostradas, infere-se que, independentemente da subcamada de solo avaliada, os valores de densidade relativa situaram-se entre 0,80 e 0,90; estabelecidos por Reinert et al. (2008) como característicos para os solos não compactados. Em contrapartida, tendo por referência os limites de densidade relativa estabelecidos por Lindstrom e Voorhess (1994), que consideram que valores superiores a 0,86 são prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento das culturas, observa-se que, para todas as profundidades amostradas, os valores ficaram ligeiramente acima do limite considerado crítico para esses autores, independentemente do manejo mecânico empregado ao solo.

Em conformidade com os autores supracitados, valores de densidades relativas superiores ao limite crítico podem afetar negativamente o desempenho agrônomo de certas culturas. Nessa perspectiva, segundo Naderi-Boldaji e Keller (2016), o grau de compactação, mensurado a partir da densidade relativa, embora não seja suficientemente capaz de diagnosticar o efeito dos atributos físicos do solo sobre o desempenho agrônomo das plantas, considera-se que esse parâmetro pode ser interpretado como um indicador das prováveis limitações ao desenvolvimento vegetal impostas pelos efeitos inerentes à compactação sobre os vegetais.

Cumprе salientar que independentemente do manejo mecânico empregado aos solos, a partir da profundidade de 0,250 – 0,500 m, a resistência do solo à penetração ultrapassou o limite crítico para o desenvolvimento de raízes de plantas, considerado como sendo 2,0 MPa (KUMI et al., 2023). Contudo, é oportuno destacar a similaridade numérica do valor obtido no solo subsolado (2,03 MPa) com esse referido limite considerado crítico, o que evidencia que mesmo em profundidade, a subsolagem mostrou-se potencialmente capaz de aliviar a resistência mecânica à penetração radicular, embora, supostamente, a eficiência desta técnica de manejo mecânico seja reduzida em profundidade.

Embora classicamente a literatura considere que o valor crítico de resistência mecânica à penetração radicular seja da ordem de 2,0 MPa, outros estudos consideram que valores de resistência mecânica à penetração já superiores a 1 MPa reduzem o crescimento de raízes que são severamente prejudicadas mediante valores próximos a 5 MPa (KUMI et al., 2023). Nesse caso, pode-se considerar que os valores de resistência mecânica à penetração radicular obtidos no solo não subsolado o tornam mais limitante ao desenvolvimento das raízes das plantas a partir da profundidade de 0,125 – 0,250 m e que no solo subsolado as limitações são detectadas a partir dos 0,250 m.

Todavia, denota-se que os valores de resistência do solo à penetração, obtidos para os dois sistemas de manejo mecânico estudados, ao longo das subcamadas avaliadas indicam o aparecimento de volumes de solo compactados, especialmente para o solo não subsolado e para a camada mais subsuperficial do solo subsolado, com valores acima dos admissíveis citados na literatura a partir da profundidade de 0,125 – 0,250 m (KUMI et al., 2023).

Ainda conforme os referidos autores, embora tenham-se averiguado valores de resistência de solo à penetração superiores aos descritos na literatura como limitativos à atividade radicular, caso houver estruturas que admitam a difusão de oxigênio, condições químicas e de umidade do solo favoráveis, as raízes buscarão locais que oferecem menores resistências para o seu desenvolvimento, embora se submetam a alterações morfológicas. Contudo, não se pode também deixar de considerar o fato de que a resistência real exercida pelo solo à penetração radicular é normalmente inferior àquela resistência verificada pelo penetrômetro.

Quanto aos efeitos dos diferentes manejos mecânicos avaliados, infere-se que os presentes resultados corroboram com os obtidos por Rosa et al. (2011), que também averiguaram que prática da subsolagem reduziu a resistência mecânica à penetração radicular, haja vista que, para os referidos autores, a subsolagem gera uma série de tensões de ruptura as quais são transmitidas para as camadas do solo subsolado, reduzindo a resistência mecânica à penetração radicular até mesmo para camadas abaixo do solo subsolado, especialmente, em solos franco - arenosos, tais como os verificados no presente estudo (Tabela 1), na qual a haste do subsolador não é capaz de gerar compactação abaixo da profundidade de trabalho.

Resultados similares foram também os obtidos por o Girardello et al. (2014), ao averiguarem que, após a prática da subsolagem, observou-se decréscimo dos valores de resistência mecânica à penetração radicular em relação à testemunha (não subsolada).

Traçando-se um paralelo entre os valores das umidades gravimétricas atuais dos solos estudadas, mensuradas por ocasiões das avaliações das resistências mecânica à penetração radicular, com os respectivos dados obtidos para essa última variável, infere-se que os resultados alcançados contrariam as informações reportadas por Yu et al. (2024), ao observarem que a medida que diminui o teor de água, ocorre aumento significativo na resistência mecânica à penetração radicular, haja vista que, em termos gerais, os maiores valores averiguados para esse atributo foram detectados justamente no solo não subsolado, cujos valores de umidade gravimétrica média foram exatamente superiores aos obtidos para o solo subsolado, que, por sua vez, exibiu menores valores de resistência à penetração radicular.

Fatos que, no presente estudo, podem tornar o efeito da umidade atual do solo praticamente desprezível frente à resistência mecânica à penetração radicular, o que supostamente associa-se à classe textural na qual ambos os solos foram enquadrados (franco-arenoso), haja vista que os reduzidos teores de argila ora detectados para ambos os solos, ao longo das subcamadas avaliadas ($\leq 168 \text{ g Kg}^{-1}$), conforme o exposto na Tabela 1, exerceram diminuta influência nas forças de coesão e de adesão existentes entre os sólidos do solo e os seus respectivos teores de água (MORAES et al., 2020).

5. CONCLUSÕES

A subsolagem gera melhorias das condições físicas do solo, ao longo da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da bananeira.

Os solos onde se encontram as condições de manejo sem a prática da subsolagem sofrem degradação através da compactação, haja vista o valor do grau de compactação exibido por esses, mediante a estimativa da densidade relativa, mostrar-se superior ao valor crítico de referência.

A redução da porosidade total do solo, devido à elevação da densidade, ocasiona aumento na resistência mecânica do solo à penetração radicular.

A subsolagem pode ser utilizada como medida física para amenizar os efeitos nocivos da compactação do solo, por reduzir a sua resistência mecânica à penetração radicular, com maiores efeitos nas camadas mais superficiais do solo. Contudo, os seus efeitos são aparentemente transitórios.

6. REFERÊNCIAS

- AL-SHAMMARY, A. A. G.; KOUZANI, A. Z.; KAYNAK, A.; KHOO, S. Y.; NORTON, M.; GATES, W. Soil bulk density estimation methods: A review. **Pedosphere**, v. 28, n. 4, p. 581-596, 2018. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60034-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60034-7)
- ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F.; ARAÚJO, E. D. Soil physical attributes in chemigated banana plantation with wastewater. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 998-1008, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-443Eng.Agric.v35n6p998-1008/2015>
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>

- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9 ed. Viçosa: UFV, 2019. 545p.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 146-151, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100008>
- BLANCO-CANQUI, H.; HASSIM, R.; SHAPIRO, C.; JASA, P.; KLOPP, H. How does no-till affect soil-profile compactibility in the long term? **Goderma**, v. 425, e116016, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116016>
- BROCH, D. T.; KLEIN, V. A. Maximum soil density of Entisols as a function of silt content. **Ciência Rural**, v. 47, e20160762, 2017. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160762>
- CAMPOS, D. A.; ANDRADE, E. M. Seasonal trend of climate variables in an area of the Caatinga phytogeographic domain. **Agro@mbiente On-line**, v. 15, p. 1-18, 2021. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v15i0.6833>
- CARVALHO, M. A. de.; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M. da.; PASSOS, R. R.; ARAUJO, C. A. S. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1010-1016, 2014. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v18n10p1010-1016>
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 140-147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.006>
- DANTAS, J. D'A. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado de Jaguaribe/Apodi, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 18-26, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100003>
- FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. D.; JÚNNYOR, W. D. S. G.; JUNIOR, N. L. S. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e02210123, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210123>
- GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1234-1244, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020>
- GONÇALVES, S. B.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; STAHL, J. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, n. 3, p. 224-229, 2017. <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i3.4109>
- KUMI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E.; MOORE, S. E.; ASARE, P. A.; ASIEDU, J.; ADU, M. O. Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration resistance, from different crop plants and soil types. **Soil and Tillage Research**, v. 233, e105811, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105811>
- LIMA, R. P.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F.; DA SILVA, A. R.; ROLIM, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, v. 162, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.002>
- LINDSTROM, M. J.; VOORHEES, W. B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van (eds.). **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. Cap.12, p. 265-286.
- MACHADO, T. A.; MENDES, Í.N.M.; MORAES, E.R.; SOUSA, E.D.T. S. Modification of soil physical attributes as a function of subsoiling operations under different managements. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 293-299, 2023. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n4p293-299>
- MILEUSNIĆ, Z. I.; SALJNIKOV, E.; RADOJEVIĆ, R. L.; PETROVIĆ, D. V. Soil compaction due to agricultural machinery impact. **Journal of Terramechanics**, v. 100, p. 51-60, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, e104611, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>
- NADERI-BOLDAJI, M.; KELLER, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 41-46, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.010>
- NEGRO, S. R. L.; PEREIRA, D. D. S.; MONTANARI, R.; DALCHIAVON, F. C.; OLIVEIRA, C. F. Correlations of soybean yield with soil porosity and bulk density of an Oxisol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 476-485, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v48i52654>
- NING, T.; LIU, Z.; HU, H.; LI, G.; KUZYAKOV, Y. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 223, e105490, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>
- OHLAND, T.; LANA, M. do C.; FRANDOLOSO, J. F.; RAMPIM, L.; BERGMANN, J. R.; CABREIRA, D. T. (2014). Influência da densidade do solo no desenvolvimento inicial do pinhão-mansão cultivado em Latossolo Vermelho eutroférrico. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 622-630, 2014. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461050004>
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. 574p.
- 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, n. 5, p. 1805-1816, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. In:

Siembra Directa: Una Herramienta Para La Agricultura Conservacionista, 1999, Florianópolis. Anais. Florianópolis: Empasc, 1999. 1 CD-ROM.

RIBELATTO, C. P. J.; TAUBINGER, L.; BEN, T. J.; VICENSI, M.; POTT, C. A. Caracterização da densidade máxima do solo da região centro oeste do Paraná. **Investigación agrária**, v. 19, n. 1, p. 49-55, 2017. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2017.junio.49-55>

ROSA, D. P. da.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; BARROS, C. A. P.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A. Cultivo mínimo: efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1199-1205, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001100014>

SEIDEL, E. P.; SCHNEIDER, A. P. H.; SUSTAKOWSKI, M. C.; MATTÉ, L. M.; MOTTIN, M. C.; SILVA, J. H. Soybean yield, soil porosity and soil penetration resistance under mechanical scarification in No-Tillage System. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 4, e268, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p268>

VALADÃO JUNIOR, D. D.; JACOWBOSKY, A.; VALADÃO, F. C. A.; GUIMARÃES, L. D. D. Desenvolvimento da mamona em solo compactado. **Nativa**, v. 10, n. 1, p. 138-141, 2023. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i1.12658>

VANDERHASSELT, A.; STEINWIDDER, L.; D'HOSE, T.; CORNELIS, W. Opening up the subsoil: Subsoiling and bio-subsoilers to remediate subsoil compaction in three fodder crop rotations on a sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 237, e105956, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105956>

WOLDEYOHANNIS, Y. S.; HIREMATH, S. S.; TOLA, S.; WAKO, A. Influence of soil physical and chemical characteristics on soil compaction in farm field. **Heliyon**, v. 10, n. 3, e25140, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25140>

YU, C.; MAWODZA, T.; ATKINSON, B. S.; ATKINSON, J. A.; STURROCK, C. J.; WHALLEY, R.; MOONEY, S. J. The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. **Rhizosphere**, v. 29, e100838, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100838>

Agradecimentos: À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa de pesquisa e ao grupo de pesquisa e extensão Água, Solo, Planta e Atmosfera no Semiárido (ASPAS) pelo apoio.

Contribuição dos autores: M.L.S.: metodologia, conceitualização, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (original), redação (revisão e edição); L.C.T.M.: metodologia, investigação ou coleta de dados, redação (original), redação (revisão e edição); A.A.N.: investigação ou coleta de dados, redação (revisão e edição); A.R.A.S.: metodologia, conceitualização, análise estatística, administração ou supervisão, aquisição de financiamento, redação (revisão e edição); C.N.V.F.: metodologia, análise estatística, redação (revisão e edição); R.E.M.L.: metodologia, análise estatística, redação (revisão e edição).

Financiamento: Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), através de bolsa de iniciação científica para os autores 1 e 3.

Revisão por comitê institucional: Não aplicável.

Comitê de Ética: Não aplicável.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.