

Níveis de compactação e sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo e componentes de produção da soja

Levels of soil compactations and tillage systems on soil physical attributes and production components of soybean

Thayná Mendes Machado

Faculdade Anhanguera de Dourados

E-mail: thaynamendes62@gmail.com

OrCID: <https://orcid.org/0009-0002-9901-5108>

Cristiano Márcio Alves de Souza

Universidade Federal da Grande Dourados

E-mail: csouza@ufgd.edu.br

OrCID: <https://orcid.org/0000-0002-5347-1709>

Sálvio Napoleão Soares Arcoverde

Universidade Federal da Grande Dourados

E-mail: salvionapoleao@gmail.com

OrCID: <https://orcid.org/0000-0002-0453-4566>

Andressa Chagas

ICL América do Sul

E-mail andressachagaas4@gmail.com

OrCID: <https://orcid.org/0009-0006-5933-4330>

Nelci Olszewski

Universidade Federal do Vale do São Francisco

E-mail: nelci.olszewski@univasf.edu.br

OrCID: <https://orcid.org/0000-0002-8134-4766>

Jorge Wilson Cortez

Universidade Federal da Grande Dourados

E-mail: jorgecortez@ufgd.edu.br

OrCID: <https://orcid.org/0000-0003-1120-719X>

Data de recebimento: 28/03/2023

Data de aprovação: 16/06/2023

DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v16i56.17037>

Resumo: A compactação decorrente do tráfego de máquinas é o principal causador de degradação do solo, podendo acarretar prejuízos à sua qualidade e produtividade agrícola. Objetivou-se avaliar a compactação do solo em dois sistemas de manejo e suas relações com os atributos físicos do solo e componentes de produtividade da soja. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho Distroférico, com delineamento em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, sendo dois sistemas de manejo (preparo convencional e plantio direto) e quatro níveis de compactação induzidas do solo (zero, três, seis e nove passagens de um trator agrícola), com quatro repetições. Realizou-o teste Student-Newman-Keuls (SNK), a 5% de probabilidade, para comparar

as médias dos dados nos dois sistemas de manejo, e análise de regressão para avaliar o efeito dos níveis de compactação sobre os atributos físicos e a relação destes com os componentes de produção. O aumento do nível de compactação do solo propiciou aumento da densidade, reduções da macroporosidade e porosidade total na camada subsuperficial do solo, principalmente na área com preparo convencional. O crescimento e os componentes de produção da soja não foram influenciados pelos sistemas de preparo do solo, enquanto com o incremento dos níveis de compactação ocorreu redução da produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Glycine max* (L) Merrill. Plantio direto. Preparo convencional. Manejo conservacionista.

Abstract: Compaction resulting from machine traffic is the main cause of soil degradation, which can lead to damage to its quality and agricultural productivity. The objective was to evaluate soil compaction in two management systems and its relationships with soil physical attributes and soybean productivity components. The experiment was carried out in an Oxisol with a randomized block design in a split-plot scheme, with two management systems (conventional tillage and no-tillage) and four levels of induced soil compaction (zero, three, six and nine passes of an agricultural tractor), with four replications. The Student-Newman-Keuls (SNK) test was carried out, at 5% probability, to compare the data averages in the two management systems, and regression analysis to evaluate the effect of compaction levels on the physical attributes and their relationship with the production components. The increase in the level of soil compaction provides an increase in density, reductions in macroporosity and total porosity in the subsurface soil layer, mainly in the area with conventional tillage. Soybean growth and production components were not influenced by tillage systems, while with the increase the level of compaction there was reduction in grain yield.

Keywords: *Glycine max* (L) Merrill. No-tillage. Conventional tillage. Conservation management.

1 Introdução

O Brasil registrou a marca no ranking de maior produtor de grãos do mundo, com produção de 154.810,7 mil toneladas, apresentando incremento de 23,3% em relação à safra 2021/22, e produtividade média de 3.532,0 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023). O estado de Mato Grosso do Sul obteve recorde na safra de 2022/23 com a produtividade média de 3.722,0 kg ha⁻¹, apresentando incremento de 48,1% em relação à safra anterior (CONAB, 2023). Este destaque na produtividade é decorrente de uso de maquinários, cultivares adaptadas à região no que se refere à luminosidade, à temperatura, à precipitação e a sistemas de plantios adequados e alinhados ao tipo de manejo.

Todavia, em diferentes sistemas de manejo ocorrem modificações estruturais no solo que podem resultar em maior ou menor compactação. Frequentemente são relatados problemas de compactação nas camadas superficial e subsuperficial do solo pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas (Arcoverde, Souza, Rafull, Cortez, Orlando, 2020; Valadão *et al.*, 2015), resultando em redução do volume de macroporos e aumento da densidade do solo (Arcoverde, Souza, Suarez, Colman, Nagahama, 2019), e conseqüentemente, em redução do crescimento da parte aérea (Silva, Maia, Bianchini, 2006) e da produtividade da soja (Valadão, Weber, Valadão Júnior, Santin, Scarpinelli, 2017).

Atributos físicos do solo como densidade, porosidade e resistência à penetração influenciam diretamente no crescimento e desenvolvimento da soja, sendo indicadores de sua qualidade física (Arcoverde, Souza, Armando, Araújo, 2022). Alterações nesses

atributos podem limitar o crescimento e o volume explorado da raiz (Colombi, Torres, Water, Keller, 2018), reduzir a água e absorção de nutrientes (Valadão et al., 2017), impedir trocas gasosas, diminuir a taxa de infiltração e fluxo de água no solo (Zambrana et al., 2010), reduzir o crescimento (Kirnak, Gokalp, Dogan, Çopur, 2016) e a produção da soja (Arcoverde et al., 2022).

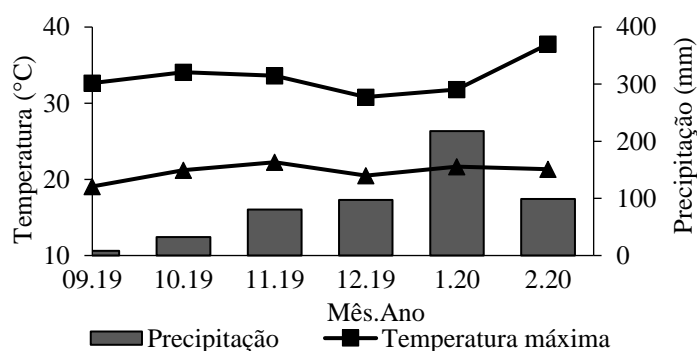
Diante da importância econômica da soja e o significativo aumento na demanda de grãos dessa cultura nos diferentes sistemas de manejo do solo, objetivou-se avaliar a influência da compactação do solo em dois sistemas de manejo e suas relações com atributos físicos do solo e componentes de produtividade da soja.

2 Material e Métodos

O estudo foi realizado na Fazenda Cedro, localizado no município de Dourados, MS, na safra 2019/2020. O local situa-se na latitude 22°16'21" e 54°55'55" de longitude com altitude de 434 m. O clima da região é do tipo Cwa, temperado e úmido com inverno seco, e precipitação média anual de 1500 mm (Fietz, Fisch, Comunello, Flumignan, 2017), e temperatura média anual de 22°C, segundo a classificação de Köppen. Na Figura 1 são apresentados os dados meteorológicos mensais, referente à precipitação acumulada e à temperatura média (mínima e máxima), obtidos durante o cultivo de soja, durante o período de setembro de 2019 a fevereiro de 2020.

Figura 1. Precipitação e temperatura mínima e máxima mensais durante o período de setembro de 2019 a fevereiro de 2020 em Dourados, MS, Brasil.

Figure 1. Precipitation and minimum and maximum temperature per month from september 2019 at february 2020 in Dourados, MS, Brazil.



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

O solo da área é um *Latossolo Vermelho Distroférico* (Embrapa, 2018), textura argilosa, tendo 56,1% de argila, 18,6% de silte e 25,3% de areia. As análises químicas do solo constam na Tabela 1. A área vem sendo conduzida em sistema de semeadura direta há mais de cinco anos com soja no verão e milho na segunda safra, em sucessão.

Tabela 1. Análise química do solo da área experimental.

Table 1. Soil chemical analysis of experimental area.

pH em água	P mg dm ⁻³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	V%	MO g dm ⁻³
		----- cm dm ⁻³ -----					
6,0	4,1	0,0	7,1	2,9	0,35	64	37

Ph: potencial hidrogeniônico, P: fósforo, Al⁺³: alumínio, Ca⁺²: cálcio, Mg⁺²: magnésio, K⁺: potássio, V%: percentagem de saturação por bases, MO: matéria orgânica. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Source: Prepared by the autor

O delineamento experimental consistiu em blocos casualizados (DBC), em esquema de parcelas subdivididas (2x4), sendo dois sistemas de preparo de solo

(preparo convencional e plantio direto) e quatro níveis crescentes de compactação induzidas (zero, três, seis e nove passagens de trator agrícola), totalizando 32 unidades experimentais. As parcelas mediam 4 m de comprimento e 5 m de largura, com área total de 20 m².

Para o preparo convencional no dia 04 de setembro de 2019, antes de induzir a compactação do solo, quando o conteúdo de água no solo (0,26 kg kg⁻¹) aproximou-se da faixa friável, iniciou-se a operação de revolvimento do solo, utilizando uma grade aradora de 28 discos de 28", massa total de 1,725 Mg, com profundidade de trabalho equivalente a 150 mm. A grade destorroadora-niveladora usada foi uma modelo Tatu ATCRL-6009. Considerando o plantio direto, foi respeitado a faixa deste tratamento, visto que, este é um manejo em que o revolvimento do solo ocorre somente na linha de semeadura.

A indução dos níveis de compactação do solo por passagens de trator (0, 3, 6 e 9) foi realizada no dia 28 de setembro de 2019, com o conteúdo de água próximo à capacidade de campo (0,28 kg kg⁻¹), na camada de 0,00 a 0,20 m (Embrapa, 2017).

Para induzir a compactação do solo foi utilizado um trator agrícola, modelo NH-T7.175, com potência no motor de 144 cv, rodado de pneus radiais, bitola traseira de 2,94 m, bitola dianteira de 1,94 m e massa de 6,8 Mg, com pressão de inflação de 83 kPa nos pneus dianteiros (14.9-26 8PR R2) e 83 kPa nos traseiros (18.4-38 10PR R2), sendo aproximadamente 40% da massa distribuída no eixo dianteiro e 60% no eixo traseiro. O deslocamento do trator foi realizado na 3ª B marcha com rotação de 1.500 rpm e velocidade de 5,3 km h⁻¹. O trator trafegou toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimiram as áreas paralelas entre si, sendo o número de vezes trafegado em função do nível de compactação (Valadão *et al.*, 2015).

A cultivar utilizada foi a MONSOY 6410 IPRO de ciclo precoce, hábito de crescimento indeterminado de porte médio. As sementes utilizadas foram previamente tratadas, a base dos ingredientes ativos Piraclostrobina, Tiofanato Metílico e Fipronil, sendo que antes da semeadura foi realizada a inoculação com a bactéria *Bradirhizobium elkanii*. A semeadura foi efetuada no mesmo dia da compactação do solo, no dia 28 de setembro de 2019, utilizando uma semeadora-adubadora com dez linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, utilizando somente o disco de corte e dosador de sementes. A semeadora foi ajustada para depositar a densidade de semeadura de 12 sementes por metro, com o espaçamento entre linhas de 0,50 m. No sulco da semeadura, foi aplicado 300 kg ha⁻¹ do adubo formulado 2-23-23.

Os tratos culturais (controle de plantas daninhas, pragas e doenças) foram realizados de acordo com as recomendações para a cultura. Para o controle de plantas daninhas, foi realizada uma aplicação em V3 de Roundup Original e Verdict® R. Quanto ao controle de pragas, quando a cultura atingiu o estágio reprodutivo, foi aplicado o inseticida Cipermetrina Nortox 250 EC e uma segunda aplicação em R5 com Engeo Pleno S. Para o controle preventivo de doenças, realizaram-se três aplicações, em três épocas, sendo a primeira aos 45 dias após a semeadura, utilizando fungicida Fox®, a segunda em 60 dias após a semeadura com fungicida Ativum® e a terceira aplicação aos 75 dias após a semeadura com fungicida Aprouch® Prima. Em relação ao controle de percevejos, realizou-se aplicação aos 45 dias após a semeadura com Orthene 750 BR (acefato).

Para as determinações da densidade (Ds), resistência do solo à penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), foram coletadas amostras de solo na entrelinha de cada parcela, com cilindros metálicos de 0,0557 m de diâmetro e 0,0441 m de altura, nas profundidades de 0,05 e 0,15 m.

A Pt foi determinada pela quantidade de água do solo saturado; e a Mi, pela água retida a uma tensão de 6 kPa, sendo os valores expressos em m³ m⁻³. A Ma é a diferença entre a porosidade total e microporosidade (Embrapa, 2017). Em seguida, foi determinada a RP conforme descrito em Arcoverde, Souza, Suarez, Colman, Nagahama (2019).

Aos 21 dias após a sementeira, foi determinado o estande de plântulas em cada tratamento, contando aquelas emergidas em 2 metros, com três repetições por unidade experimental. Para determinar o crescimento da cultura e a produção, quando as plantas atingiram a fase de maturação fisiológica (R7), determinou-se na base do caule de dez plantas aleatórias dentro da unidade experimental, o diâmetro do caule com um paquímetro digital (Kirnak et al., 2016), e com uma régua graduada, determinou-se a altura de plantas.

Aos 138 dias após a emergência (fase de maturação fisiológica) determinou-se, inicialmente, o estande final, e posteriormente, procedeu-se com a colheita manual das plantas, determinando-se o estande final e o número de vagens por planta (NVP) em 10 plantas; bem como a massa de mil grãos (MMG – g) tomando-se duas amostras (Valadão et al., 2017). O número de grãos por vagens foi determinado debulhando todas as vagens e contando todos os grãos presentes nas 10 plantas coletadas. O cálculo para a determinação da produtividade foi estimado para um hectare (Prod – kg ha⁻¹).

Os dados dos atributos físicos do solo e dos componentes de produção da soja foram submetidos à análise de variância, quando significativo o teste F, utilizou-se o teste Student-Newman-Keuls (SNK), a 5% de probabilidade, para comparar as médias dos dados obtidos nos dois sistemas de manejo do solo, assim como a análise de regressão para avaliar os níveis de compactação.

Baseado na correlação entre os atributos físicos do solo e os de crescimento e produção da soja, quando significativa ($p \leq 0,05$), aplicou-se a análise de regressão linear.

3 Resultados e Discussão

Observou-se que a macroporosidade (Tabela 2) foi influenciada pelo número de passagens do trator, isoladamente, e pela interação entre os fatores de variação, na profundidade de 0,05 m. No entanto, a microporosidade não foi influenciada pelos fatores avaliados, em ambas as profundidades.

A porosidade total, na profundidade de 0,15 m, foi influenciada de forma significativa (Tabela 2) pela interação entre os fatores de variação. Bergamin, Vitorino, Lempp, Souza, Souza (2010) relatam que, conforme o aumento da compactação do solo, ocorre redução da porosidade total e macroporosidade sem aumento na microporosidade. Salienta-se que os macroporos possuem menor resistência à deformação, em relação aos microporos, visto que em solos bem estruturados os macroporos são encontrados entre os agregados, e conseqüentemente, ficam mais suscetíveis frente a modificações estruturais por ocasião do tráfego de máquinas (Valadão et al., 2015). Por outro lado, em solos de textura fina, tem-se naturalmente tendência de maior proporção de microporos, que ocorrem predominantemente em microagregados muito estáveis devido à ação cimentante dos óxidos de ferro que ocorrem em solos argilosos altamente intemperizados, a exemplo do Latossolo Vermelho distroférico desse estudo.

Observou-se no preparo convencional diminuição da macroporosidade nas duas profundidades estudadas, o que pode ser atribuída à compactação do solo ocasionada pela ação das ferramentas de preparo, que resultam em modificações nos agregados do solo e influenciam a proporção de macroporos (Rossetti & Centurion, 2020),

Quanto à densidade do solo (Tabela 2), apenas o número de passagens do trator apresentou efeito significativo, na profundidade de 0,15 m, enquanto não houve diferença entre as densidades na profundidade superficial. Mion, Holanda, Barroso, Silva (2016) relatam que a pressão de inflação dos pneus é responsável pelas tensões e deformações transmitidas em profundidade.

Tabela 2. Valores do teste F dos atributos físicos do solo em sistemas de preparo do solo (SPS) e número de passagens do trator (NPT), para as duas profundidades amostradas.

Table 2. F test values of soil physical attributes in soil tillage systems (SPS) and number of tractor passes (NPT), for the two sampled depths.

Fatores de variação	Profundidade de 0,05 m				
	Macro	Micro	Porosidade	Densidade	RP
SPS	1,88 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,04 ^{ns}	2,76 ^{ns}
NPT	4,32 ^{**}	0,79 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,54 ^{ns}	3,60 [*]
SPS x NPT	4,02 [*]	1,32 ^{ns}	0,57 ^{ns}	2,21 ^{ns}	4,12 [*]
CV (SPS)	26,13	19,09	7,10	9,56	50,59
CV (NPT)	23,44	22,81	17,85	11,84	60,77
Profundidade de 0,15 m					
SPS	4,45 ^{ns}	0,22 ^{ns}	11,47 [*]	0,18 ^{ns}	4,32 ^{ns}
NPT	1,08 ^{ns}	1,55 ^{ns}	3,47 [*]	5,47 ^{**}	1,22 ^{ns}
SPS x NPT	0,16 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,23 ^{ns}	4,41 [*]
CV (SPS)	30,00	7,61	3,78	3,28	46,94
CV (NPT)	28,98	8,16	5,95	6,59	37,59

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de SNK. ns: não significativo ($P < 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%).

Fonte: Elaborado pelo autor. Means followed by the same letter in the column do not differ by the SNK Test. ns: not significant ($P < 0.05$); *: significant ($P \leq 0.05$); **: significant ($P \leq 0.01$); CV: coefficient of variation (% **Source:** Prepared by the autor

Para a resistência do solo à penetração foi observada interação significativa entre os fatores avaliados, em ambas as profundidades (Tabela 2), indicando influência de práticas de manejo do solo em conjunto com o tráfego de máquinas sobre a resistência à penetração, em profundidade, como verificado por Moraes, Debiassi, Carlesso, Franchini, Silva (2013) trabalhando com um Latossolo Vermelho distroférrico.

A densidade do solo (Tabela 3) foi semelhante nos dois sistemas de manejo nas duas profundidades, mas houve efeito da compactação na profundidade de 0,15 m (Tabela 2), onde seus valores aumentaram até 5 passagens do trator e a partir de 6 passagens a tendência foi de manter a densidade em $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 2). Em concordância com Arcoverde, Souza, Rafull, Cortez, Orlando (2020), que verificaram aumento na densidade conforme o incremento do tráfego de máquinas.

Tabela 3. Densidade do solo (Mg m^{-3}) em sistemas de preparo do solo nas profundidades de 0,05 e 0,15 m.

Table 3. Soil density (Mg m^{-3}) in soil tillage systems (SPS) in the depths of 0.05 (a) and 0.15 m (b).

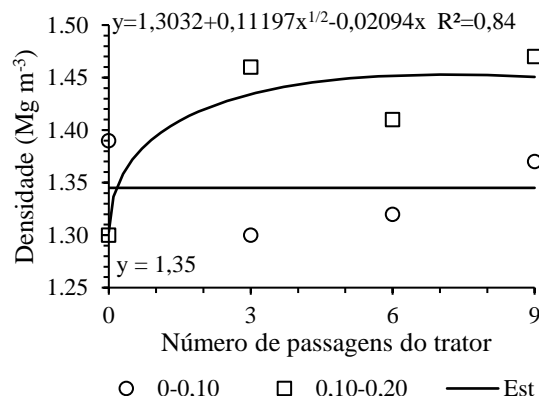
Fatores	Profundidades (m)	
	0,05	0,15
Sistemas de Preparo do Solo		
Plantio Direto	1,34 a	1,41 a
Preparo Convencional	1,35 a	1,42 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de SNK, a 5% de probabilidade. **Fonte:** Elaborado pelo autor. Means followed by the same letter in the column do not differ by the SNK Test. ns: not significant ($P < 0.05$). **Source:** Prepared by the autor

Ressalta-se que os valores de densidade nos sistemas de manejo do solo, até 0,15 m de profundidade, estão abaixo de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ considerados críticos por Sá *et al.* (2016) em Latossolos de textura argilosa, enquanto Camargo e Alleoni (1997) consideram crítico $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos franco-argilosos a argilosos.

Figura 2. Densidade do solo em função do número de passagens do trator, nas profundidades de 0,05 e 0,15 m.

Figure 2. Soil density as a function of number of tractor passes (NPT), at depths of 0.05 (a) and 0.15 m (b).



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

Para a resistência do solo à penetração (Figura 3), também houve efeito significativo da compactação do solo, entretanto, na profundidade de 0,05 m, com crescimento conforme o aumento do número de passagens do trator. Valadão *et al.* (2015) verificaram que o tráfego de máquinas propiciou aumento da densidade e resistência à penetração do solo, bem como redução da macroporosidade.

Na profundidade de 0,05 m, a resistência do solo à penetração foi distinta para os sistemas de manejo, havendo constância dos seus valores no plantio direto (0,79 MPa), enquanto em preparo convencional observou-se aumento quadrático a partir de 4 passagens do trator (Figura 3). Todavia, os valores superaram os observados para o plantio direto somente após 7 passagens. Esse resultado por ser explicado pela redução da coesão do solo sob preparo convencional. Visto que, conforme Arcoverde *et al.* (2020), a maior resistência do solo à penetração no plantio direto deve-se ao não revolvimento do solo associado às pressões pelo tráfego de máquinas e a acomodação das partículas do solo.

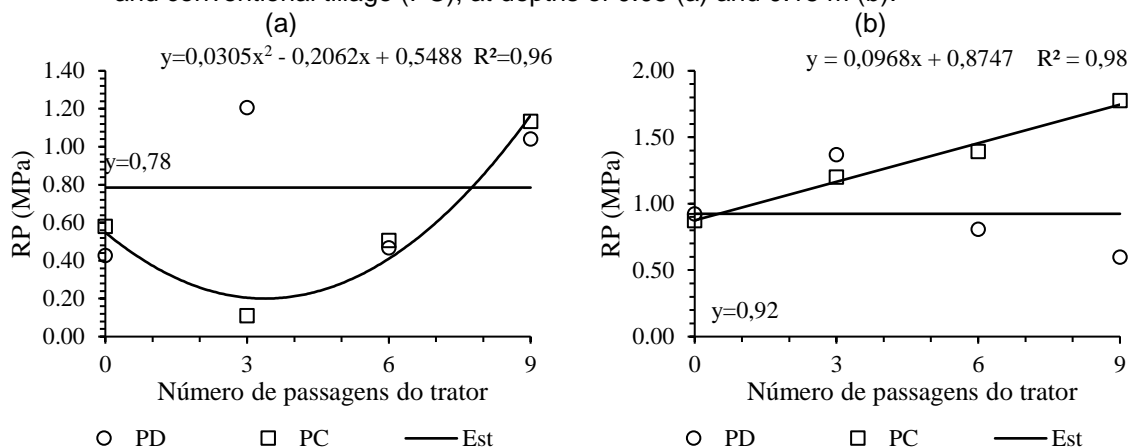
Na profundidade de 0,15 m, houve aumento linear da resistência do solo à penetração com o incremento das passagens do trator na área com preparo convencional, sendo os maiores valores observados nos maiores níveis de compactação (Figura 3). Arcoverde *et al.* (2019) citam que o preparo convencional aliado ao tráfego de máquinas tem ocasionado aumento da resistência do solo à penetração. E Moraes *et al.* (2013), trabalhando com um Latossolo Vermelho distroférico, citam que o aumento da compactação em maior profundidade tem relação direta com o incremento do número de tráfegos.

Para o plantio direto observou-se constância para a resistência do solo à penetração média de 0,92 MPa, para até 9 passagens do trator. Isso pode ser atribuído, segundo Barreto *et al.* (2009), ao plantio direto, que é responsável pela decomposição da cobertura vegetal, acumulando a matéria orgânica e aumentando o teor de C orgânico total, importante na formação e manutenção dos agregados.

Medeiros, Soares e Guimarães (2005) afirmam que o alongamento radicular só é possível quando a resistência à penetração do solo for menor do que a pressão de crescimento das raízes. Mas, apesar das tendências crescentes exibidas, os valores de resistência do solo à penetração, obtidas neste estudo, ainda se encontram abaixo dos valores de 2 MPa e 3,5 MPa, respectivamente, considerados críticos para o preparo convencional e plantio direto em Latossolo Vermelho distroférico (Moares, Debiasi, Carlesso, Franchini, Silva, 2014).

Figura 3. Resistência do solo à penetração (RP) em função do número de passagens do trator, para o plantio direto (PD) e o preparo convencional (PC), nas nas profundidades de 0,05 (a) e 0,15 m (b).

Figure 3. Penetration resistance (RP) as a function of number of tractor passes, for no-tillage (PD) and conventional tillage (PC), at depths of 0.05 (a) and 0.15 m (b).



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

A macroporosidade foi semelhante entre os sistemas de manejo, na profundidade de 0,05 m; por outro lado, na profundidade de 0,15 m, o plantio direto proporcionou maior valor (Tabela 4). Devido ao preparo convencional, ou seja, à ação dos discos da grade, estes imprimiram pressão ao solo, na maior profundidade amostrada, compactando-o e, como consequência, houve diminuição dos macroporos. O alongamento radicular também é favorecido quando há maior quantidade de macroporos, bem como menor impedância mecânica ou maior conteúdo de água no solo (Colombi et al., 2018). O valor de macroporosidade ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) é considerado crítico ao crescimento radicular das plantas de soja, como enfatizam Arcoverde *et al.* (2022).

Assim como a macroporosidade, a porosidade total (Tabela 4) foi influenciada pelos sistemas de manejo apenas na profundidade de 0,15 m. Infere-se, portanto, que a macroporosidade influenciou diretamente a porosidade total e, adicionalmente, para a microporosidade não houve efeito dos tratamentos, como encontrado por Bergamin *et al.* (2010) trabalhando em um Latossolo Vermelho distroférrico.

Tabela 4. Macroporosidade e porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em função dos sistemas de preparo do solo nas profundidades de nas profundidades de 0,05 e 0,15 m.

Table 4. Macroporosity and porosity ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) as a function of systems tillage soil, at depths of 0.05 (a) and 0.15 m (b).

Fatores	Macroporosidade		Porosidade	
	Profundidade (m)			
	0,05	0,15	0,05	0,15
Sistemas de Preparo do Solo				
Plantio Direto (PD)	0,20 a	0,17 a	0,67 a	0,66 a
Preparo Convencional (CV)	0,23 a	0,14 b	0,68 a	0,63 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de SNK, a 5% de probabilidade. **Fonte:** Elaborado pelo autor. Means followed by the same letter in the column do not differ by the SNK Test. ns: not significant ($P < 0.05$). **Source:** Prepared by the autor

Na profundidade de 0,05 m houve redução da macroporosidade no preparo convencional com o aumento de passagens do trator, enquanto a média de macroporosidade no plantio direto foi de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 4). Pode-se inferir a ocorrência de mobilização superficial do solo que favoreceu, inicialmente, a aproximação das partículas com a intensidade do tráfego de trator, reduzindo a macroporosidade a

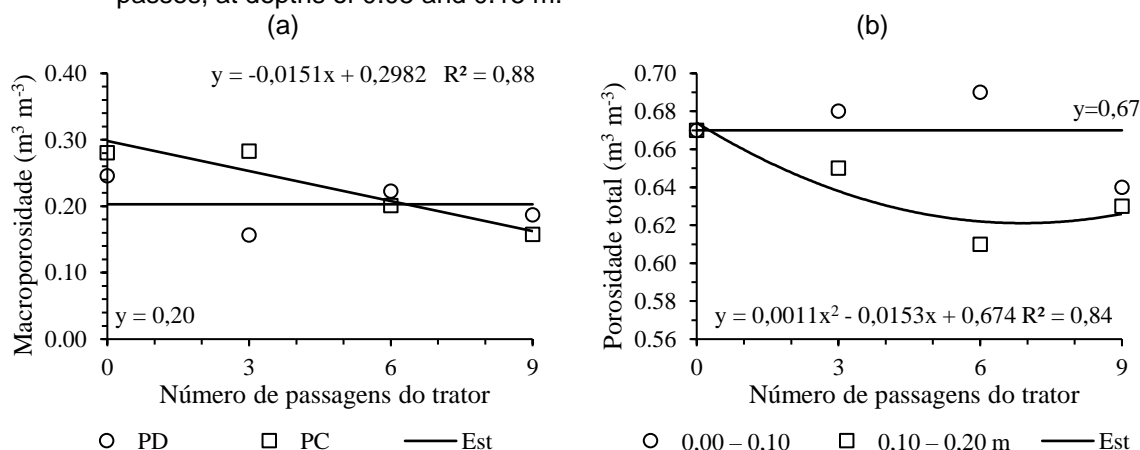
partir de 6 passagens. Rossetti e Centurion (2020) verificaram que, quando houve compactação em área com preparo convencional do solo, ocorreu decréscimo de 34,5% na sua macroporosidade, na profundidade de 0,05 m, em relação à área com preparo convencional sem compactação adicional. Possivelmente isso não ocorreu no plantio direto, devido à estruturação do solo e de sua continuidade frente ao carregamento.

Na profundidade de 0,15 m, a mínima porosidade ($0,62 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi obtida com 7 passagens do trator, quando para maiores passagens a tendência foi de estabilização (Figura 4). Ressalta-se que solos argilosos, característica inerente ao solo utilizado no estudo, tendem a ser compactados facilmente, diminuindo sua porosidade e podendo formar camadas compactadas (Bergamin, Vitorino, Lempp, Souza, Souza, 2010). Ademais, os pneus usados nas máquinas agrícolas com banda diagonal ou com altas pressões de inflação acarretam aumento da pressão e, conseqüentemente, maiores tensões e deformações no solo provocadas pela diminuição da área de contato pneu/solo (Mion, Holanda, Barroso, Silva, 2016).

De maneira esperada, a média mais baixa de porosidade total ($0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) está em concordância com o menor valor de macroporosidade ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabela 3), na profundidade de 0,15 m. Rossetti e Centurion (2020) observaram alterações nos atributos físicos do solo, com redução na macroporosidade e aumento da densidade do solo no preparo convencional.

Figura 4. Macroporosidade (a) em função do número de passagens do trator, para o plantio direto (PD) e o preparo convencional (PC), na profundidade de 0,05 m, e porosidade total (b) em função do número de passagens do trator, nas profundidades de 0,05 e 0,15 m.

Figure 4. Macroporosity (a) under number of tractor passes, for no-tillage (PD) and conventional tillage (PC) –, at depths of 0.05 m, and porosity (b) as a function of number of tractor passes, at depths of 0.05 and 0.15 m.



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

Quanto à microporosidade, não se observou influência dos fatores ou da interação entre eles (Tabela 2), não diferindo suas médias em função dos tratamentos (Tabela 5). Ressalta-se que a microporosidade é influenciado pelo teor de argila. Nesse sentido, como o solo utilizado nesse trabalho possui textura argilosa, possivelmente, ocorreu a manutenção da microporosidade nos tratamentos instaurados. Segundo Klein e Klein (2015), a fração argila reflete em maior microporosidade e, conseqüentemente, maior capacidade de retenção de água no solo. Ademais, a compactação provocada pelo uso agrícola normalmente ocasiona em redução na macroporosidade; já os microporos podem permanecer estável (Kuncoro, Koga, Satta, Muto, 2014).

Tabela 5. Microporosidade ($m^3 m^{-3}$) em sistemas de preparo do solo e número de passagens do trator, em duas profundidades de amostragem.

Table 5. Microporosity ($m^3 m^{-3}$) in soil tillage systems (SPS) and number of tractor passes (NPT), for the two sampled depths.

Fatores	Profundidade (m)	
Sistema de preparo do solo	0,05	0,15
Plantio Direto	46,61 a	48,13 a
Preparo Convencional	44,69 a	48,75 a
Número de passagens do trator		
0	40,77 a	49,32 a
3	47,53 a	50,45 a
6	47,52 a	47,17 a
9	46,78 a	46,81 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de SNK, a 5% de probabilidade. **Fonte:** Elaborado pelo autor. Means followed by the same letter in the column do not differ by the SNK Test. ns: not significant ($P < 0.05$). **Source:** Prepared by the autor

Observou-se que a altura de planta foi diferente para cada sistema de manejo, enquanto o estande inicial (EI), o estande final (EF) e o diâmetro do caule (D) foram influenciados pelo número de passagem do trator (Tabela 6). Os componentes de produtividade (NVP, NGV e MMG) não foram influenciados pelas passagens dentro de cada sistema de manejo, por estarem mais ligadas ao genótipo.

Tabela 6. Características e componentes de produção da soja em função dos sistemas de preparo do solo (SPS) e número de passagens do trator (NPT).

Table 6. Characteristics and components of soybean production as a function of soil tillage (SPS) systems and number of tractor passes (NPT).

FV	EI	EF	A	D	NVP	NGV	MMG	Prod
SPS	0,15	0,00	5,77**	3,89	2,14	0,02	0,21	0,77
NPT	3,84**	4,03**	2,04	6,24**	1,02	0,64	2,47	0,94
SPS x NPT	0,99	0,52	0,79	1,06	0,70	1,01	0,59	1,00
CV	17,15	28,5	10,2	7,85	35,6	7,13	7,68	58,3

†: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$). EI: estande inicial, EF: estande final, A: altura, D: diâmetro, NVP: número de vagens por planta, NGV: número de grãos por vagens, MMG: massa de mil grãos, Prod: produtividade de grãos, CV: coeficiente de variação. **Fonte:** Elaborado pelo autor. *: significant ($P \leq 0.05$); **: significant ($P \leq 0.01$); **Source:** Prepared by the autor

As plantas cultivadas em plantio direto tiveram maior altura do que as cultivadas em preparo convencional, sendo 0,82 m contra 0,79 m, respectivamente (Tabela 7). Houve redução do estande de plantas com o incremento do número de passagens do trator (Figura 5), indicando que a compactação dificulta não só o estabelecimento inicial da cultura, mas também pode provocar redução do estande final, ocasionado principalmente pela diminuição da oferta de água em solos mais compactos. Kirnak, Gokalp, Dogan, Çopur (2016) verificaram prejuízos ao estabelecimento da soja como consequência da compactação do solo. Embora tenha ocorrido significância no teste F (Tabela 6), não houve modelo que se ajustasse aos dados de diâmetro do caule.

Tabela 7. Médias dos estantes inicial (EI) e final (EF), altura de planta (A), diâmetro de caule (D), número de vagens por plantas (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de mil grãos (MMG) e produtividade da soja (Prod) em função dos sistemas de preparo do solo.

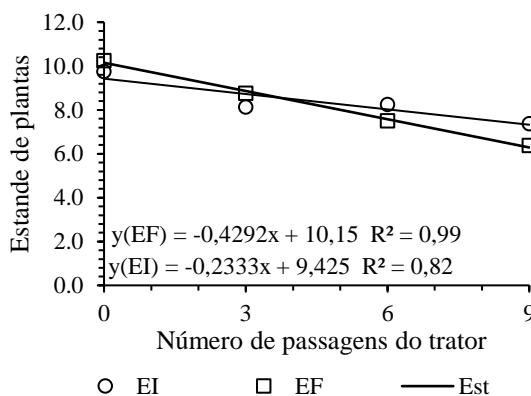
Table 7. Means stands initial (EI) and final (EF), plant height (A), stem diameter (D), number of pods per plant (NVP), number of grains per pod, thousand-grain weight (MMG) e grain yield (Prod) as a function of the soil tillage systems (SPS).

SPS	EI	EF	A	D	NVP	NGV	MMG	Prod
PD	8,56 a	8,19 a	0,82 a	10,38 a	74,9 a	2,71 a	0,155 a	4.401,1 a
PC	8,19 a	8,25 a	0,79 b	10,61 a	85,8 a	2,73 a	0,156 a	5.369,8 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo Teste de SNK ($p < 0,05$) PC: PD: Plantio direto; Preparo convencional. **Fonte:** Elaborado pelo autor. Means followed by the same letter do not differ by the SNK ($p < 0,05$) PC: conventional tillage; OS: no-tillage. **Source:** Prepared by the autor

Figura 5. Estantes inicial (EI) e final (EF) de plantas de soja em função do número de passagens do trator.

Figure 5. Stand initial (EI) e final (EF) soybean plants as a function of the number of tractor passes.



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

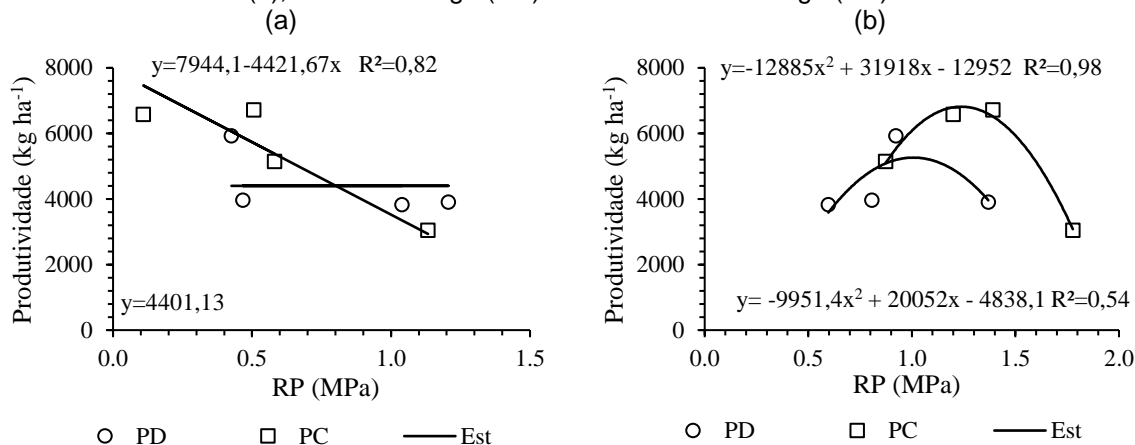
Na profundidade de 0,05 m, observou-se no preparo convencional que a produtividade da soja foi reduzida linearmente com aumento da resistência do solo à penetração, todavia, sob plantio direto, este atributo não influenciou a produtividade de grãos (Figura 6a). Na profundidade de 0,15 m (Figura 6b), a produtividade nos dois sistemas de manejo apresentou comportamento quadrático com o aumento da resistência do solo à penetração, com maior produtividade para 1,01 e 1,24 MPa, em plantio direto e preparo convencional, respectivamente. Não se verificou valores de resistência do solo à penetração maiores do que 2 MPa (Figura 6).

Girardello, Amado, Santi, Lanzasova, Tasca (2017) observaram decréscimo na produtividade da soja em razão do aumento da resistência do solo à penetração (RP) ocasionada pelo tráfego de máquinas. Por outro lado, Moraes, Levien, Trein, Bonetti, Debiasi (2018) e Arcoverde *et al.* (2022) verificaram que um grau moderado de compactação (RP máximo = 1,6 MPa e RP entre 1,5 a 2,0 MPa, respectivamente) pode beneficiar o crescimento e a produtividade da cultura do milho e da soja, respectivamente.

Ressalta-se que, muitas vezes, alguns atributos físicos do solo, por serem propriedades estáticas, não representam a dinâmica do estresse mecânico e hídrico durante a época de crescimento, e conseqüentemente, os efeitos sobre a cultura da soja (Moraes *et al.*, 2020). Isto é, com o monitoramento durante o ciclo da cultura pode-se melhor explicar as interações entre o crescimento das raízes, a resistência à penetração do solo e a absorção de água pelas plantas e seus reflexos sobre a acessibilidade da água e a produtividade (Colombi *et al.*, 2018).

Figura 6. Produtividade da soja em função da resistência do solo à penetração (RP) na profundidade de 0,05 m (a) e de 0,15 m (b), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).

Figure 6. Soybean Yield as a function of soil penetration resistance (RP) at a depth of 0.05 m (a) and 0.15 m (b), under no-tillage (PD) and conventional tillage (PC).



Fonte: Elaborado pelo autor. **Source:** Prepared by the autor

4 Conclusão

O aumento do nível de compactação do solo propiciou o aumento da densidade, reduções da macroporosidade e porosidade total na profundidade subsuperficial do solo, principalmente na área com preparo convencional.

O crescimento, os componentes de produção e a produtividade da soja não foram influenciados pelos sistemas de preparo do solo.

Com o aumento dos níveis de compactação do solo ocorreu decréscimo da produtividade da soja.

5 Referências

Arcoverde, S.N.S., Souza, C.M.A., Armando, E.J., & Araújo, A.L.F de. (2022). Soil physical attributes and agronomic characteristics relationships of soybean in no-tillage. *Revista Engenharia na Agricultura*, 30 (continua), 97-110. <https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.13469>

Arcoverde, S.N.S., Souza, C.M.A., Rafull, L.Z.L., Cortez, J.W., & Orlando, R.C. (2020). Soybean agronomic performance and soil physical attributes under tractor traffic intensities. *Engenharia Agrícola*, 40(1),113-120. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n1p113-120/2020>

Arcoverde, S.N.S., Souza, C.M.A., Suarez, A.H.T., Colman, B.A., & Nagahama, H.J. (2019). Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. *Revista de Agricultura Neotropical*, 6(1), 41-47. <http://dx.doi.org/10.32404/rean.v6i1.2761>

Barreto, R. C., Madari, B.E., Maddok, E.L., Machado, P.L.O.A., Torres, E., Franchini, J., & Costa, A.R. (2009). The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 132(3-4), 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.008>

Bergamin, A.C., Vitorino, A.C.T., Lempp, B., Souza, C.M.A., & Souza, F.R. de. (2010). Anatomia radicular de milho em solo compactado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(3), 299-305. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300010>

Camargo, O.A. & Alleoni, L.R.F. (1997). *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Colombi, T., Torres, L.C., Water A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of The Total Environment*, 626, 1026-1035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>

Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2023). *Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra brasileira de grãos: Safra 2022/23*, Brasília, DF, 10(8). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 31/05/2023.

EMBRAPA. (2017). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 3 ed. Brasília: Embrapa Solos. 547p.

EMBRAPA. (2018). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5 ed. Brasília: Embrapa Solos. 356p.

Fietz, C. R., Fisch, G. F., Comunello, E., & Flumignan, D. L. (2017). *O clima da região de Dourados, MS*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 34p. (Documentos Embrapa, n.138).

Girardello, V.C., Amado, T.J.C., Santi, A.S., Lanzasova, M.E., & Tasca, A. (2017). Resistência do solo à penetração e desenvolvimento Radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. *Revista Scientia Agraria*, 18(2),1-10. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i2.50693>

Kirnak, H., Gokalp, Z., Dogan, E., & Çopur, O. (2016). Effects of irrigation, soil compaction and fertilization treatments on physiological – vegetative characteristics and root development of soybean. *Legume Research*, 39(1), 52-60. <http://dx.doi.org/10.18805/lr.v39i1.8864>

Klein, C., Klein, V. A. (2015). Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19(1), 21-29. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117014990>

Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., & Muto, N. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 143, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.006>

Medeiros, R.D., Soares, A.A., & Guimarães, R.M. (2005). Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(5), 940 - 947. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000500004>

Mion, R.L., Holanda, A.S. de., Barroso, S.H. de., & Silva, S.A.T. (2016). Tensions from different pressures caused by farm tractor tires. *Engenharia Agrícola*, 36(1), 63-77. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p63-77/2016>

Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Franchini, J.C., Mastroberti, A.A., Levien, R., Leitner, D., Schnepf, A. (2020). Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, 20: 104611. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>

Moraes, M.T. de., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., & Silva, V.R. da. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(1), 288-298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>

Moraes, M.T. de., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., & Silva, V.R. da. (2013). Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. *Engenharia Agrícola*, 33(4), 748-757. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400014>

Moraes, M.T. de., Levien, R., Trein, C.R., Bonetti, J.A., & Debiasi, H. (2018). Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(4), 464-477. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000400008>

Rossetti, K.V., Centurion, J.F. (2020). Structural quality indicators in compacted oxisols grown with corn. *Revista de Agricultura Neotropical*, 7(4), 29-39. <http://dx.doi.org/10.32404/rean.v7i4.5092>

Sá, M.A.C., Santos Junior, J.D.G., Franz, C.A.B., & Rein, T.A. (2016). Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1610-1622. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900061>

Silva, G.J., Maia, J.C.S., & Bianchini, A. (2006). Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(1), 31-40. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100004>

Valadão, F.C.A., Weber, O.L., Valadão Júnior, D.D., Santin, M.F.M., Scapinelli, A. (2017). Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. *Revista de Ciências Agrárias*, 40(1), 183-195. <https://doi.org/10.19084/RCA15092>

Valadão, F.C.A., Weber, O.L., Valadão Júnior, D.D., Scarpinelli, A., Deina, F.R., & Bianchini, A. (2015). Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(1), 243-255. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150144>

Zambrana, M.O.D., Ruiz, H.A., Silva, T.C.A., Neves, J.C.L., Corrêa, G.F., Eraso, M.H.R. (2010). A compactação de três materiais de solo, na redução da condutividade hidráulica, porosidade do solo e matéria seca de raiz nas culturas de soja e caupi. *Revista de Ciências Agrícolas*, 27(1), 74-84.