

Alteração da densidade do solo por operações agrícolas mecanizadas: interação entre ambiente e equipamentos

Change in soil bulk density by mechanized agricultural operations: effects of the environment and equipment

Cambios en la densidad del suelo debidos a las operaciones agrícolas mecanizadas: interacción entre el medio ambiente y el equipo

DOI: 10.34188/bjaerv7n2-017

Submetido: 19/01/2024

Aprovado: 01/03/2024

Vinícius Grillo

Graduado em Engenharia Agrônômica pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Instituição: REHAGRO

Endereço: R. Santa Fé, 100 - Sion, Belo Horizonte - MG, 30320-130

E-mail: vinicius.grillo@rehagro.edu.br

Alessandro Alvarenga Pereira da Silva

Doutorando em Engenharia de Biossistemas pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Instituição: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Endereço: Av. Pádua Dias, 11 – Agronomia, Piracicaba – SP, 13418-900

E-mail: alessandro.alvarenga@usp.br

Matheus Gabriel Acorsi

Mestre em Engenharia de Biossistemas pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Instituição: Corteva Agriscience

Endereço: Anel Viário Paulo Campos, Km 07 Anel Viário GO-174 e BR-060; Km 07 Zona Rural, Rio Verde - GO, 75904-840

E-mail: matheus.acorsi@corteva.com

Leandro Maria Gimenez

Docente do Departamento de Engenharia de Biossistemas pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Instituição: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP

Endereço: Av. Pádua Dias, 11 – Agronomia, Piracicaba – SP, 13418-900

E-mail: lmgimenez@usp.br

RESUMO

O uso intensivo das áreas agrícolas usualmente requer operações mecanizadas mais rápidas com elevação da potência e consequente aplicação de maiores cargas sobre o solo. O aumento da densidade do solo, compactação, restringe a produtividade dos cultivos. A correta seleção dos equipamentos e o uso em condições satisfatórias de umidade do solo permite minimizar os danos. Modelos para predição da capacidade dos solos em suportar cargas e dos efeitos das cargas sobre suas características estão disponíveis, mas vem sendo usualmente empregados sem considerar a

variabilidade do solo. Neste trabalho levantatou-se as principais características de tratores de rodas representativos de três faixas de potência, 73 kW, 183 kW e 320 kW (classes II, IV e V respectivamente) e de semeadoras empregados no Brasil. Simulou-se os efeitos do tráfego em gleba de solo com variabilidade em sua composição granulométrica. Os resultados demonstraram que as pressões aplicadas pelos rodados dianteiros oscilaram entre 244 e 320 kPa e para os traseiros entre 264 e 327 kPa. Os efeitos na densidade do solo oscilaram em função da granulometria do solo, com intensidades e profundidades de alterações variando espacialmente. O trator da maior faixa de potência provocou alteração na densidade do solo até a profundidade de 0,30 m. O trator da classe II, apresentou maior percentual de área pisoteada por rodados, entretanto com danos na estrutura do solo restritos à camada até 0,10 m. A regionalização das porções mais suscetíveis e a compreensão do tipo de dano são relevantes no planejamento das operações visando minimizar os efeitos e também à sua correção de modo localizado.

Palavras-chave: compactação, capacidade de suporte do solo, simulação

ABSTRACT

The intensive use of agricultural areas usually requires the intensification of mechanized operations, demanding more powerful equipment which ultimately lead to heavier load traffic. As a result, soil density tends to increase due to soil compaction, reducing crop yield. The correct selection of equipment and adoption of traffic limitations imposed by soil moisture conditions are key to minimize soil damages. Models for predicting soil load capacity and the effect of different loads on soil physical properties are available, but they are usually used without considering soil spatial variability. In this work, we considered the main characteristics of wheeled tractors represented by three engine power classes, 73 kW, 183 kW and 320 kW (classes II, IV and V respectively) along with seeders used in Brazil. Traffic effects were simulated considering soils with different granulometric composition. The results showed that the pressures applied by the front wheels varied from 244 to 320 kPa, and for the rear wheels between 264 and 327 kPa. The effects on soil density fluctuated as a function of granulometry, with intensities and depths of structural alterations varying spatially. The tractor with the highest engine power caused a change in soil density up to a depth of 0.30 m. The class II tractor showed the highest percentage of trampled area by wheels, however with damage to the soil structure restricted to the layer up to 0.10 m. The delineation of the most susceptible portions of the field and the understanding of the type of damage are relevant in operations planning in order to minimize the effects and also to correct them implementing site specific management practices.

Keywords: compaction, soil load capacity, simulation model

RESUMEN

El uso intensivo de las zonas agrícolas suele requerir la intensificación de las operaciones mecanizadas, exigiendo equipos más potentes que, en última instancia, conllevan un tráfico de cargas más pesado. Como consecuencia, la densidad del suelo tiende a aumentar debido a su compactación, lo que reduce el rendimiento de los cultivos. La correcta selección de los equipos y la adopción de las limitaciones de tráfico impuestas por las condiciones de humedad del suelo son claves para minimizar los daños al suelo. Existen modelos para predecir la capacidad de carga del suelo y el efecto de diferentes cargas sobre sus propiedades físicas, pero normalmente se utilizan sin tener en cuenta la variabilidad espacial del suelo. En este trabajo, consideramos las principales características de tractores de ruedas representados por tres clases de potencia de motor, 73 kW, 183 kW y 320 kW (clases II, IV y V respectivamente) junto con sembradoras utilizadas en Brasil. Los efectos del tráfico se simularon considerando suelos con diferente composición granulométrica. Los resultados mostraron que las presiones aplicadas por las ruedas delanteras variaban entre 244 y 320 kPa, y para las ruedas traseras entre 264 y 327 kPa. Los efectos sobre la densidad del suelo

fluctuaron en función de la granulometría, variando espacialmente las intensidades y profundidades de las alteraciones estructurales. El tractor con la mayor potencia de motor causó un cambio en la densidad del suelo hasta una profundidad de 0,30 m. El tractor de clase II mostró el mayor porcentaje de área pisoteada por las ruedas, sin embargo con daños en la estructura del suelo restringidos a la capa hasta 0,10 m. La delimitación de las porciones más susceptibles del campo y la comprensión del tipo de daño son relevantes en la planificación de las operaciones con el fin de minimizar los efectos y también para corregirlos implementando prácticas de gestión específicas para el sitio.

Palabras clave: compactación, capacidad de carga del suelo, modelo de simulación

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna e intensiva requer o emprego da mecanização. A compactação do solo é uma consequência do uso de máquinas sendo enfrentada em diversos sistemas de produção e estima-se que cerca de 680.000 km² de solos ao redor do planeta estejam com este problema (Dias, 2016). A necessidade de aumentar a produtividade das culturas e eficiência de trabalho, requer intensificação da mecanização com elevação do tamanho dos maquinários utilizados nas operações, os quais estão cada vez mais pesados e mais potentes (Mcphee et al., 2020).

A compactação do solo limita o desenvolvimento das raízes das plantas (Bengough et al., 2006) devido à maior densidade aparente do solo, resistência à penetração das raízes e menor permeabilidade ao ar e à água (Hamza; Anderson, 2005). A aeração, a dinâmica hídrica, a ciclagem de nutrientes e a produtividade das culturas, tendem a estabilizarem em platô ou diminuir pelo menor volume do solo explorado devido ao impedimento físico para o desenvolvimento radicular (Keller et al., 2019). Além disso, a compactação provoca o aumento do escoamento superficial em razão da menor porosidade e taxa de infiltração. Em casos mais severos, o risco de erosão hídrica e eólica é aumentado (Horn et al., 1995).

Há maneiras de mitigar esta perturbação mecânica do solo em sistemas de cultivo por meio da minimização, que consiste em evitar ou reduzir o tráfego quando o solo está mais suscetível à compactação; pelo uso de equipamentos mais adequados como pneus de baixa pressão ou esteiras, a fim de reduzir os impactos; outra alternativa é a remediação, baseada no uso de culturas com sistema radicular agressivo para aliviar os efeitos da compactação, sendo esta técnica antiga e muito pesquisada nos dias atuais; também pode ser adotada a estratégia do confinamento, com uso de tráfego controlado, de modo que as passadas das máquinas ocorram sempre no mesmo local, isolando a compactação e preservando maior proporção de solo não impactado pelo trânsito (Mcphee et al., 2020).

Com o avanço da agricultura de precisão, uso de sistemas de direcionamento de máquinas, aplicação de ferramentas de sensoriamento e com a modelagem da compactação abrem-se

oportunidades para quantificar as distribuições espaciais e temporais da compactação do solo e seu manejo visando a otimização dos sistema solo-máquina-sistema de produção (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021).

Este trabalho busca trazer uma contribuição no entendimento do fenômeno da compactação em áreas agrícolas com variabilidade do solo, considerando os principais tipos de equipamentos utilizados em uma operação muito relevante para a agricultura Brasileira. Por meio do levantamento dos equipamentos utilizados e da simulação do emprego dos mesmos em uma área representativa buscou-se verificar seu efeito como o montante de área pisoteada, as cargas aplicadas e alterações na densidade do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

Em uma gleba cujo solo é classificado como Latossolo Vermelho, com textura franco arenosa, situada no município de Rondonópolis, estado de Mato Grosso, foi estabelecida uma malha com 90 pontos espaçados em 30 m, definindo uma forma retangular com 15 pontos em sua maior dimensão e seis pontos na menor, apresentado na Figura 1. Para determinação da composição granulométrica foram coletadas amostras deformadas nas camadas entre 0 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m; três subamostras para compor uma amostra foram coletadas em cada ponto e camada. Para determinação da granulometria foi utilizado o método do densímetro de (Camargo et al., 2009), obtendo as frações areia 0,05 a 2,0 mm, silte 0,002 a 0,005 e argila $< 0,002$ mm.

Densidade do solo

Por meio do uso de uma função de pedotransferência (Benites et al., 2007), e utilizando os resultados das análises nos pontos coletados obteve-se a desidade do solo (Ds), com base no teor de argila, Equação 1.

$$Ds = 1,5224 - 0,0005*(Arg) \quad (1)$$

onde:

Ds: Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

Arg: Teor de argila ($g\ kg^{-1}$);

Para caracterização da Ds nas regiões delimitadas utilizou-se a média dos teores de argila na camada de 0 a 0,4 m. A consolidação das duas camadas foi adotada pois a função de pedotransferência demonstra melhor desempenho na camada de 0,1 a 0,3 m (Boschi et al., 2018).

Dimensionamento dos conjuntos trator-semeadora

Foi realizado uma sistematização dos modelos de tratores comercializados no país com base em Quevedo (2021), e escolhido um exemplar representativo para três classes de tratores II, IV e V, de acordo com classificação apresentada por (Quevedo, 2021). Tomou-se além da potência as informações referentes aos pneus (Alapa, 2021), e peso dos tratores considerando-se como distribuição de peso 40% do seu peso no eixo dianteiro e 60% do seu peso no eixo traseiro (Senar, 2017), dentro de cada categoria para então selecionar os modelos. A classe II engloba os tratores com potência do motor de 37 até 73 kW de potência, sendo representada pelo modelo Massey Ferguson 4709 com 73 kW de potência. A classe IV refere-se a tratores com potência entre 110 e 183 kW e o modelo selecionado foi o Case IH Puma 230 com 177 kW de potência. Na classe V estão tratores com potência acima de 184 kW, sendo representada pelo modelo Case IH Magnum 400 com 320 kW de potência no motor. Para o dimensionamento das semeadoras, calculou-se a potência disponível na barra de tração dos três equipamentos, seguindo a metodologia expressa em ASAE, (2000) e a partir da potência definiu-se o número de unidades de semeadura considerando duas opções de mecanismos sulcadores para fertilizantes, discos duplos e haste. O número de unidades foi obtido pelo quociente entre a potência disponível na barra e aquela requerida para cada tipo de sulcador, obtendo-se portanto 6 combinações. A largura das semeadoras foi obtida multiplicando-se o número de unidades pela distância entre unidades, considerada como 0,5 m.

Projeção das linhas de tráfego

A projeção das linhas de tráfego foi realizada por meio do uso de um sistema de informações geográficas (QGIS.ORG, 2022) e utilizando os dados de largura de trabalho da semeadora. Simulou-se passadas laterais para cada combinação de fonte de potência e semeadora e calculou-se o comprimento total percorrido. A partir dos dados de largura dos pneus de cada fonte de potência calculou-se a área pisoteada e portanto sob influencia do tráfego dos conjuntos.

Simulações da compactação do solo utilizando *soilphysics*

Para a simulação da compactação do solo foi utilizado um modelo computacional implementado com um conjunto de funções do Software R CORE TEAM (2021), pacote *soilphysics*, com a finalidade de simular a variação da densidade do solo (De Lima; Da Silva; Da

Silva, 2021). Foi utilizada a função *stressTraffic*, para calcular a área de contato, distribuição de tensões e propagação de tensões com base no modelo *SoilFlex*, (Keller et al., 2007). A distribuição das tensões sobre a área de contato, assumida como o limite superior, foi modelada a partir da carga da roda e das características do pneu usando o modelo proposto por Keller, (2005). A propagação da tensão até uma profundidade de 0,4 m foi simulada de acordo com Söhne (1953) usando um fator e concentração de 3 (Frohlich, 1934), seguindo recomendação de Keller et al., (2014). Os parâmetros de máquinas exigidos pelo *stressTraffic* para calcular a área de contato, tensão sobre a área de contato e a propagação estão listados na Tabela 2. Foi considerada apenas a carga aplicada pelo trator não levando em consideração a carga dinâmica ou as cargas aplicadas pelos rodados da semeadora.

Foi utilizada a função *soilDeformation*, para calcular a variação da Ds em função da tensão normal média aplicada usando a teoria do estado crítico (O'Sullivan; Robertson, 1996). Os parâmetros mecânicos de entrada necessários, N (volume específico em $P = 1$ kPa), λ_n (índice de compressão) e k (índice de recompressão) foram obtidos aplicando as funções de pedotransferência desenvolvidas por Lima et al. (2018), usando como entrada a Ds média e considerando o potencial matricial de 100 hPa (correspondente à capacidade de campo). O modelo de O'Sullivan; Robertson (1996) também requer o valor do parâmetro k' , que é a inclinação da linha de recompressão mais íngreme, e m , que é a separação entre a linha de ruptura e a linha de compressão virgem (O'Sullivan; Robertson, 1996). Utilizou-se $k' = (\lambda_n k)^{0.5}$ e $m = 1,3$, de acordo com (O'Sullivan; Robertson, 1996; Keller et al., 2007). Calculou-se a variação da Ds nas profundidades de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30 e 0,40 m.

Análise estatística

Análises descritivas foram realizadas para os atributos granulométricos (argila, silte e areia) e Ds, afim de representar as características do conjunto de dados obtidos no processo de amostragem. Foram obtidas média, mediana, mínimo, máximo, amplitude, quartil inferior e superior, assimetria curtose, desvio padrão e coeficiente de variação. O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para avaliar se os dados apresentavam distribuição normal.

Modelagem e predição espacial

Para a representação espacial dos atributos argila e Ds, foi realizada a interpolação do conjunto de dados utilizando o software QGIS.ORG (2022). Análise geoestatística foi utilizada para caracterização da presença de dependência espacial e para geração de modelos de semavariograma. A fim de se obter os mapas interpolados do teor de argila e da Ds, conforme mostra a Figura 1, os

atributos foram interpolados individualmente, utilizando o complemento Smart-Map (Pereira et al., 2022). A rotina de análise pressupõe o ajuste do semivariograma ao conjunto de dados, sendo a escolha do modelo baseada em resultados de validação cruzada, priorizando o menor valor de resíduo junto ao maior coeficiente de determinação (R^2). Utilizando-se as superfícies de argila de Ds, determinaram-se regiões por meio de análise de agrupamento não supervisionado com modelo nebuloso tomando o índice de performance fuzzy (FPI) e de entropia de classificação normalizada (NCE) para a definição do número de classes. A partir da delimitação das regiões foram atribuídos os valores médios da Ds em cada uma das regiões para a simulação da alteração da Ds.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva, Tabela 1, demonstraram que a participação da fração argila oscilou entre 169 e 407 g kg⁻¹, apresentando uma ampla faixa de composição granulométrica. A variabilidade no teor de argila e silte, expressas pelo coeficiente de variação (CV), estiveram acima de 20%, valor alto de acordo com (Pimentel-Gomes, 2009). Conforme se observa na Figura 1 a área de estudo apresentou um gradiente de granulometria do solo, com maior teor de argila na região norte.

Para os valores de Ds calculados houve baixa dispersão, oscilando entre 1,32 e 1,44 Mg m⁻³, na área de estudo os maiores valores de Ds estiveram na região sul, ou seja na porção com maior participação da fração areia.

Os modelos dos semivariogramas para os atributos argila e Ds foram lineares. O efeito pepita apresentou valor de semivariância nulo para os modelos ajustados. Obteve-se um valor de alcance de 260,61 m para argila e 390,12 m para Ds. Ambos atributos apresentaram coeficiente de determinação de 0,98 na validação cruzada.

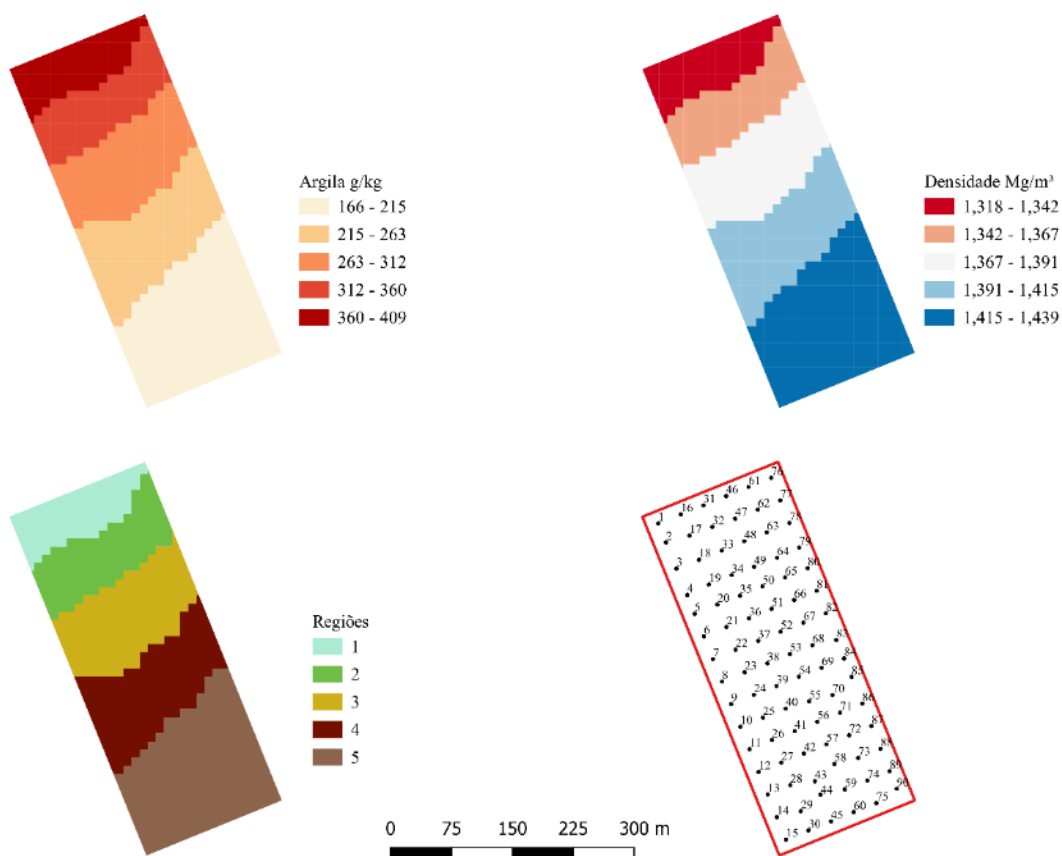
Na Figura 1, também são apresentadas as delimitações das regiões. As regiões 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam áreas de 0,93; 1,26; 1,66; 1,70 e 2,55 ha respectivamente.

Tabela 1. Estatística descritiva da caracterização física do solo na camada de 0 a 0,4 m. Descriptive statistics of the physical characterization of the soil in the 0 to 0.4 m layer.

Momentos estatísticos	Argila	Silte	Areia	Ds
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³
Média	263	20	717	1,39
Mediana	251	20	726	1,40
Mínimo	169	12	572	1,32
Máximo	407	44	812	1,44
Amplitude	238	33	240	0,12
Q.Inferior	201	17	669	1,37
Q.Superior	312	23	778	1,42
Desvio Padrão	68	5	69	0,03
Assimetria	0,45	1,32	-0,47	-0,45
Curtose	-0,88	4,95	-0,87	-0,88
CV (%)*	26,04	24,51	9,54	2,46
Número	90	90	90	90
Prob. <W*	0,000394	0,00005703	0,0002741	0,000394

*Probabilidade de erro ao afirmar que a distribuição não é normal, valores maiores indicam distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk; Ds – densidade do solo.

Figura 1. Mapas de argila, densidade do solo, região de manejo e pontos amostrais. Clay maps, soil density, management region and sampling points.



Nas Tabelas 2 e 3, são apresentadas as características dimensionais dos tratores e semeadoras. O trator da classe II apresentou o menor valor de carga sobre o pneu, sendo de 1045 kg em cada pneu dianteiro e 1568 kg em cada pneu traseiro. O trator da classe IV, apresentou os maiores

valores de carga sobre o pneu, tanto dianteiro como traseiro. O trator da classe V, apresentou valores de 1868 kg no pneu dianteiro e 2802 kg no pneu traseiro, vale ressaltar que para este caso foi considerado o uso de rodado duplo nos rodados dianteiros e traseiros.

Ao avaliar a relação peso-potência, Tabela 2, nota-se que o trator da classe IV apresentou o maior valor de 73,45 kg kW⁻¹. Conforme Francetto et al. (2011), tratores da classe II e IV, apresentam valores médios da relação peso-potência de 68,18 e 60,97 kg kW⁻¹, respectivamente. A relação de peso-potência dos tratores na classe II e IV utilizados na simulação foram 4,98 e 20,46% superiores respectivamente, para classe II e IV.

Tabela 2. Características e parâmetros de entrada dos tratores das classes II, IV e V utilizados para simular a tensão de contato e deformação do solo com o modelo *soilphysics*. Input parameters of class II, IV and V tractors used to simulate soil contact stress and deformation with the *soilphysics* model.

Classe	Potência do motor (kW)	Peso/Potência (kg/kW)	Eixo	Modelo do Pneu	Pressão do pneu (kPa)	Largura do pneu (m)	Diâmetro do pneu (m)	Área de contato do pneu (m²)	Carga no pneu (kg)
II	73	71,58	Dianteiro	11,2-28 R1	179	0,28	1,21	0,14	1045,00
			Traseiro	13,6-38 R1	193	0,35	1,57	0,22	1568,00
IV	177	73,45	Dianteiro	600/65 R28 A8 R1W	159	0,60	1,49	0,39	2600,00
			Traseiro	710/70R38 A8 R1W	241	0,71	1,96	0,61	3900,00
V	320	58,37	Dianteiro	480/70R34 R1W DUAL	241	0,48	1,54	0,31	1868,00
			Traseiro	800/70R38 R1W DUAL	241	0,80	2,09	0,74	2802,00

A classe II obteve as menores larguras efetiva de trabalho de 3,00 e 2,50 m, para os mecanismos sulcarores do tipo disco duplo e haste sulcadora respectivamente. A classe IV apresentou como largura efetiva de trabalho 8,00 e 6,50 m, para mecanismos sulcadores do tipo disco duplo e haste sulcadora. A classe V obteve as maiores larguras efetivas de trabalho com 15,00 e 11,00 m, para os mecanismos sulcadores do tipo disco duplo e haste sulcadora respectivamente. Essa diferença se dá pelo fato da potência demandada na barra de tração pelos diferentes tipos de mecanismo sulcador, sendo que o de haste sulcadora demanda maior potência e como consequência permine menor número de linhas e largura de trabalho, Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros das semeadoras com mecanismo sulcador de fertilizantes do tipo disco duplo e haste sulcadora. Parameters of seeders with double disc fertilizer furrower mechanism and furrower rod.

Classe	Nº de linhas	Distância entre linhas (m)	Mecanismo sulcador	Largura de trabalho (m)
II	6	0,5	Disco duplo	3,00
	5	0,5	Haste sulcadora	2,50
IV	16	0,5	Disco duplo	8,00
	13	0,5	Haste sulcadora	6,50
V	30	0,5	Disco duplo	15,00
	22	0,5	Haste sulcadora	11,00

Na Tabela 4, são apresentados o comprimento total das linhas de trabalho para cada uma das regiões A região 5, menos argilosa, apresentou maior comprimento das linhas de trabalho. A região 1, mais argilosa, apresentou menor comprimento das linhas de tráfego. Em contrapartida a região 5, mais argilosa, apresentou maior comprimento das linhas de tráfego.

Tabela 4. Comprimento das linhas de trabalho delimitado pelas regiões 1, 2, 3, 4 e 5 para as classes de tratores II, IV e V. Length of working lines delimited by regions 1, 2, 3, 4 and 5 for tractor classes II, IV and V.

Classe	Nº de linhas da semeadora	Largura de trabalho (m)	Soma do comprimento linhas passadas por pneu em cada região (m)				
			1	2	3	4	5
II	6	3,00	6164	8426	11061	11328	17032
	5	2,50	7399	10113	13271	13595	20394
IV	16	8,00	2309	3157	4155	4242	6301
	13	6,50	2839	3898	5098	5228	7782
V	30	15,00	1250	1664	2192	2262	3434
	22	11,00	1679	2303	3013	3091	4677

Na Tabela 5, são apresentados os percentuais de pisoteio para os pneus dianteiros e traseiros em cada região. Os valores oscilaram entre 17,54 e 46,81% demonstrando como o tipo de equipamento e a variabilidade espacial podem levar a intensidades bastante distintas de tráfego. O mecanismo sulcador o tipo haste sulcadora foi o que apresentou maior porcentagem da área pisoteada pelos pneus dianteiros e traseiros, nas classes II, IV e V.

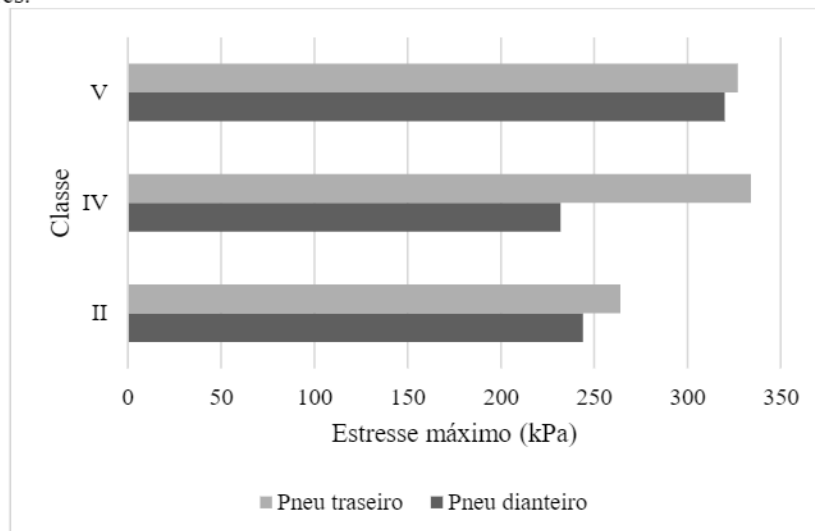
Tabela 5. Percentual de pisoteio para os pneus dianteiros e traseiros para as regiões 1, 2, 3, 4, e 5 para as classes de tratores II, IV e V. Trample percentage for front and rear tires for regions 1, 2, 3, 4, and 5 for tractor classes II, IV e V.

Classe	Mecanismo sulcador	Área pisoteada pelo pneu dianteiro em cada região (%)					Área pisoteada pelo pneu traseiro em cada região (%)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
II	Disco duplo	37,12	37,45	37,31	37,31	37,40	46,40	46,81	46,64	46,64	46,75
	Haste sulcadora	44,55	44,95	44,77	44,78	44,79	27,85	28,09	27,98	27,99	27,99
IV	Disco duplo	29,79	30,07	30,04	29,94	29,65	17,63	17,79	17,77	17,72	17,54
	Haste sulcadora	36,64	37,12	36,85	36,91	36,62	21,68	21,96	21,80	21,84	21,67
V	Disco duplo	25,81	25,35	25,35	25,55	25,86	21,51	21,12	21,13	21,29	21,55
	Haste sulcadora	34,65	35,10	34,85	34,91	35,22	28,88	29,25	29,04	29,09	29,35

Na Figura 2, é apresentado o estresse máximo aplicado pelo pneus dianteiros e traseiros das classes II, IV e V. Para os pneus dianteiros o estresse máximo foi de 244, 232 e 320 kPa, para as classes II, IV e V, respectivamente. Para os pneus traseiros o estresse máximo foi de 264, 334 e 327 kPa, para as classes II, IV e V, respectivamente. Segundo Severiano et al. (2013), a pressão de preconsolidação máxima para latossolos no potencial mátrico de 100 hPa, com teores de argila variando entre 209 e 263 g kg⁻¹ é de 166 kPa. Como podemos observar tanto para os pneus dianteiros como para os pneus traseiros nas classes II, IV e V o estresse máximo induzido ao solo foi superior

a este limite crítico. A classe IV apresenta a maior discrepância entre a pressão aplicada pelo pneus dianteiros e traseiros, uma diferença de 43,97%.

Figura 2. Estresse máximo aplicado ao solo pelos pneus dianteiros e traseiros. Maximum stress applied to the soil by the front and rear tires.



Nas Tabelas 6 e 7, são apresentadas a Ds após a passagem simulada dos tratores. Para a classe II os pneus dianteiros provocariam incremento na Ds do solo, até a profundidade de 0,05 m, entretanto para a região 1 que possui média de 386 g kg^{-1} de argila a alteração na Ds ocorreria até a profundidade de 0,10 m. Para este mesmo modelo de trator os pneus traseiros provocariam incremento na Ds do solo até a profundidade de 0,10 m em todas as regiões.

Na classe V os pneus dianteiros provocariam incremento na Ds do solo nas camadas entre 0,05 a 0,15 m de profundidade. Nas regiões 1 e 2 que apresentam teores médios de argila de 386 e 334 g kg^{-1} , respectivamente, é possível observar que haveria incremento na Ds do solo até a profundidade de 0,20 m. Para o pneu traseiro, haveria incremento na Ds do solo entre as camadas de 0,05 a 0,20 m. Para os pneus dianteiros o mesmo acontece e nas regiões 1 e 2, mais argilosas, houve incremento na Ds do solo até a profundidade de 0,30 m.

Alterações na Ds do solo na camada de 0,05 a 0,15 m, também foram observadas por Collares et al. (2008), em um Latossolo Vermelho argiloso, corroborando os resultados obtidos por meio da simulação. Segundo Voorhees; Senst; Nelson (1978) e Voorhees; Nelson; Randall (1986), máquinas agrícolas com carga por eixo superior a 4,5 Mg proporcionam aumento da Ds do solo em profundidades até maiores que 0,30 m. A compactação abaixo da profundidade de 0,30 m é função da carga total por eixo e a compactação em superfície é função da pressão de inflação dos pneus (Salire; Hammel; Hardcastle, 1994).

Para a classe IV, haveria incremento na Ds do solo nas camadas entre 0,05 e 0,15 para os pneus dianteiros, e entre as camadas de 0,05 a 0,20 m para os pneus traseiros. Na região 1 para o pneu traseiro haveria incremento entre as profundidades de 0,05 a 0,30 m.

Nas regiões 3, 4 e 5 com teores médios de argila de 280, 236 e 188 g kg⁻¹, para a classe II e pneus dianteiros alterações ocorreriam até a profundidade de 0,05 m. No caso dos pneus traseiros alterações ocorreriam até 0,10 m de profundidade e os valores da Ds foram superiores a 1,40 Mg m⁻³. Para as classes IV e V, nas regiões 3, 4 e 5, para os pneus dianteiros entre as profundidades de 0,05 a 0,15 m, e para os pneus traseiros entre as profundidades de 0,05 e 0,20 m, os valores da Ds do solo foram superiores a 1,40 Mg m⁻³.

Silva et al. (2009) considerou como Ds crítica dos Latossolos o valor de 1,40 Mg m⁻³ pelo método do intervalo hídrico ótimo.

Tabela 6. Densidade do solo e variação na densidade do solo após passada do pneu dianteiro. Soil density and variation in soil density after passing the front tire.

Classe do Trator	Prof. (m)	Ds após a passada do pneu em cada região (Mg m ⁻³)					Incremento na Ds em cada região (%)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
II	0,05	1,37	1,40	1,41	1,43	1,46	2,95	2,60	2,42	2,28	2,13
	0,10	1,34	1,36	1,38	1,40	1,43	0,57	0,27	0,12	0,00	0,00
	0,15	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,20	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,30	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IV	0,05	1,38	1,40	1,42	1,44	1,47	3,66	3,30	3,11	2,95	2,79
	0,10	1,36	1,39	1,40	1,42	1,45	2,26	1,93	1,75	1,61	1,48
	0,15	1,34	1,37	1,39	1,41	1,43	0,95	0,65	0,49	0,37	0,26
	0,20	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,30	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,05	1,40	1,43	1,44	1,46	1,49	5,20	4,81	4,59	4,41	4,22
	0,10	1,38	1,40	1,42	1,44	1,47	3,57	3,21	3,01	2,86	2,71
	0,15	1,36	1,38	1,40	1,42	1,45	2,05	1,72	1,54	1,41	1,29
	0,20	1,34	1,37	1,38	1,40	1,43	0,68	0,38	0,22	0,11	0,01
	0,30	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 7. Densidade do solo e variação na densidade do solo após passada do pneu traseiro. Soil density and variation in soil density after passing the rear tire.

Classe do Trator	Prof. (m)	Ds após a passada do pneu em cada região (Mg m ⁻³)					Incremento na Ds em cada região (%)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
II	0,05	1,38	1,41	1,43	1,45	1,47	3,94	3,57	3,38	3,21	3,05
	0,10	1,36	1,38	1,40	1,42	1,45	1,96	1,63	1,46	1,33	1,20
	0,15	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,20	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,30	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IV	0,05	1,41	1,43	1,45	1,47	1,50	5,79	5,38	5,16	4,98	4,78
	0,10	1,39	1,42	1,43	1,45	1,48	4,57	4,18	3,98	3,81	3,64
	0,15	1,38	1,40	1,42	1,44	1,47	3,44	3,08	2,89	2,74	2,58
	0,20	1,36	1,39	1,41	1,42	1,45	2,38	2,04	1,87	1,73	1,59
	0,30	1,34	1,36	1,38	1,40	1,43	0,46	0,15	0,01	0,00	0,00
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,05	1,41	1,43	1,45	1,47	1,50	5,81	5,40	5,18	5,00	4,80
	0,10	1,39	1,42	1,44	1,45	1,48	4,68	4,29	4,08	3,91	3,73
	0,15	1,38	1,40	1,42	1,44	1,47	3,60	3,24	3,04	2,89	2,73
	0,20	1,36	1,39	1,41	1,43	1,46	2,62	2,28	2,09	1,96	1,82
	0,30	1,34	1,37	1,38	1,40	1,43	0,80	0,49	0,33	0,21	0,11
	0,40	1,33	1,36	1,38	1,40	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4 CONCLUSÃO

Os modelos preditivos da compactação do solo mostraram que a operação de semeadura da soja utilizando trator da classe V provocou alteração na densidade do solo até a profundidade de 0,30 m. O trator da classe II, apresentou maior área sob influência dos rodados dianteiros e traseiros, entretanto, apresentou danos na estrutura do solo na camada de 0,05 m para os pneus dianteiros e nas camadas de 0,05 e 0,10 m para os pneus traseiros. A intensidade e profundidade de alteração da estrutura do solo oscilaram espacialmente demonstrando que o efeito da aplicação de uma mesma carga tende a causar efeitos distintos ao longo das áreas que apresentam variabilidade na composição granulométrica do solo. O estresse máximo gerado ao solo e a densidade do solo após a passada dos pneus ficaram acima do limite crítico na maior parte das vezes, representando risco potencial de compactação do solo.

REFERÊNCIAS

ALAPA. **Manual de Normas Técnicas - 2019/2020/2021**. [s.l: s.n.]

ASAE, A. S. of Ag. E. The American Society of Agricultural Engineers. In: **ASAE Standards**. [s.l: s.n.]p. 343–349.

BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2 SPEC. ISS., p. 437–447, 2006.

BENITES, V. M. et al. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1–2, p. 90–97, 2007.

BOSCHI, R. S. et al. How accurate are pedotransfer functions for bulk density for brazilian soils? **Scientia Agrícola**, v. 75, n. 1, p. 70–78, 2018.

CAMARGO, O. A. de et al. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. [s.l: s.n.]v. 106

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933–942, 2008.

DA SILVA, V. R. et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1097–1104, 2009.

DE LIMA, R. P. et al. Impact of initial bulk density and matric suction on compressive properties of two Oxisols under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 168–177, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.003>>.

DE LIMA, R. P.; DA SILVA, A. R.; DA SILVA, Á. P. soilphysics: An R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 206, n. March 2020, 2021.

DIAS, C. **Estudo revela que 30% dos solos do mundo estão degradados**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/14343883/estudo-revela-que-30-dos-solos-do-mundo-estao-degradados>>. Acesso em: 12 abr. 2022.

FRANCETTO, T. R. et al. Avaliação da relação peso/potência de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (TDA) conforme as suas respectivas classes de potência. In: XL Congresso brasileiro de engenharia agrícola - CONBEA, July, **Anais...**2011.

FROHLICH, O. K. **Druckverteilungim Baugrunde (Pressure Distribution in Soil Foundation)**. Wien: Springer, 1934.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n. 1–2, p. 23–36, 1995.

KELLER, T. A Model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 1, p. 85–96, 2005.

KELLER, T. et al. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 2, p. 391–411, 2007.

KELLER, T. et al. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 106–117, 2014.

KELLER, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. May, p. 104293, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>>.

MCPHEE, J. E. et al. Managing soil compaction – A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? **Biosystems Engineering**, v. 195, p. 227–241, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.006>>.

O’SULLIVAN, M. F.; ROBERTSON, E. A. G. Critical state parameters from intact samples of two agricultural topsoils. **Soil and Tillage Research**, v. 39, n. 3–4, p. 161–173, 1996.

PEREIRA, G. W. et al. Soil mapping for precision agriculture using support vector machines combined with inverse distance weighting. **Precision Agriculture**, n. 0123456789, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-022-09880-9>>.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009.

QGIS.ORG. **QGIS Geographic Information System**. Disponível em: <<http://www.qgis.org>>.

QUEVEDO, G. Anuário de Tratores Agrícolas 2021/22. **Cultivar Máquinas**, p. 108, ago. 2021.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Disponível em: <www.R-project.org/>.

SALIRE, E. V.; HAMMEL, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v. 31, n. 2–3, p. 235–248, 1994.

SENAR. **Operação de tratores agrícolas**. [s.l: s.n.]

SEVERIANO, E. D. C. et al. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 193–202, 2013.

SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 46, n. 4, p. 417–439, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>>.

SÖHNE, W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. **Grundlagen der Landtechnik - Konstrukteurhefte**, n. 5, p. 49–63, 1953. Disponível em: <<http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Konstrukteur/article/view/1721>>.

VOORHEES, W. B.; NELSON, W. W.; RANDALL, G. W. Extent and Persistence of Subsoil Compaction Caused by Heavy Axle Loads. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 2, p. 428–433, 1986.

VOORHEES, W. B.; SENST, C. G.; NELSON, W. W. Compaction and Soil Structure Modification by Wheel Traffic in the Northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 2, p. 344–349, 1978.