

CAROLINE BEAL MONTIEL

IMPACTO DE NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO NOS COMPONENTES DE  
PRODUÇÃO DA CANOLA E NA UMIDADE DE UM SOLO ARGILOSO

CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2025

CAROLINE BEAL MONTIEL

IMPACTO DE NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO NOS COMPONENTES DE  
PRODUÇÃO DA CANOLA E NA UMIDADE DE UM SOLO ARGILOSO

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutora.

Orientador: Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior  
Coorientadores: Dra. Ana Paula Mourão Simonetti, Dr. Rogerio Luis Rizzi e Dra. Araceli Ciotti de Marins.

CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO – 2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Beal Montiel, Caroline

Impacto de níveis de compactação nos componentes de produção da canola e na umidade de um solo argiloso / Caroline Beal Montiel; orientador Luiz Antônio Zanão Junior; coorientador Rogerio Luis Rizzi. -- Cascavel, 2025.

54 p.

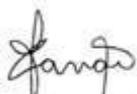
Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2025.

1. Compactação. 2. Umidade. 3. Rendimento. I. Zanão Junior, Luiz Antônio, orient. II. Rizzi, Rogerio Luis, coorient. III. Título.

## CAROLINE BEAL MONTIEL

Impacto de níveis de compactação nos componentes de produção da canola e na umidade de um solo argiloso

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Luiz Antonio Zanão Júnior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



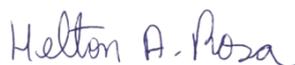
Douglas Bassegio  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Luciene Kazue Tokura  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Ellen Lemes Silva



Héilton Aparecido Rosa  
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 24 de fevereiro de 2025

*“Dedico a finalização de minha tese exclusivamente ao meu professor orientador Deonir Secco (in memoriam). Meu maior incentivador nestes longos anos de estudo, que me escolheu, me orientou, me acolheu como filha, me guiou e me deu forças nos momentos mais difíceis para que continuasse e não desistisse. Hoje, finalizando essa trajetória, só penso o quanto gostaria de tê-lo neste dia”.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço a Deus pela oportunidade de todas as realizações que tenho em minha vida.

Agradeço aos meus pais, pelo apoio e suporte em todas as etapas e dificuldades durante a minha trajetória.

Agradeço a todos os professores orientadores e coorientadores envolvidos e dispostos a desenvolver a tese proposta.

Agradeço a toda equipe LAFIS e aos colegas Eduardo, Mábia, Matheus pelo suporte, análise e condução do experimento durante esses anos.

Agradeço ao professor Rogério Luis Rizzi e ao Fabricio Michel Denes, pela condução dos dados matemáticos e suporte na coleta de informações por meio das implementações necessárias.

Agradeço ao Dr. Douglas Bassegio, pelo suporte em todo o desenvolvimento, análises, considerações e, principalmente, na finalização da tese.

Agradeço ao professor Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior, por todas as relevantes ponderações acerca da investigação desenvolvida.

Agradeço ao professor Dr. Deonir Secco (*in memoriam*), por tudo que ele realizou em todos os anos de orientação.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Comportamento capilar de uma coluna de solo em contato com a água. ....	21
<b>Figura 2.</b> Croqui com disposição dos tratamentos e blocos. ....	25
<b>Figura 3.</b> Modelo de sensor de umidade capacitivo utilizado no escopo deste projeto. ....	25
<b>Figura 4.</b> Vista aérea dos sensores nos potes para calibração. ....	26
<b>Figura 5.</b> Vista lateral dos sensores nos potes para calibração.....	26
<b>Figura 7.</b> Disposição dos sensores de umidade do solo nos vasos. ....	28
<b>Figura 8.</b> Posição do dispositivo eletrônico para aquisição e registro de dados dos sensores de umidade do solo (Datalogger).....	28
<b>Figura 9.</b> Altura de planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ....	30
<b>Figura 10.</b> Diâmetro de caule de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ....	31
<b>Figura 11.</b> Massa seca de raízes de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ....	32
<b>Figura 12.</b> Massa seca de parte aérea de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.....	33
<b>Figura 13.</b> Comprimento de raízes de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.....	34
<b>Figura 14.</b> Número de síliquas por planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.....	34
<b>Figura 15.</b> Massa de grãos por planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.....	36
<b>Figura 16.</b> Crescimento radicular da canola nos tratamentos com densidades de 1.0 e 1.5 Mg m <sup>-3</sup> . ....	38

<b>Figura 17.</b> Vista lateral do crescimento das plantas em função dos níveis de compactação.....	39
<b>Figura 18.</b> Umidade do solo em função dos níveis de compactação em 2023 (A) e 2024 (B) nos sensores 1, 2 e 3. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figura 19.</b> Correlação de Pearson entre os componentes da produção da canola e os sensores de umidade em 2023. × sobre as cores, indica que não há ( $p>0,05$ ) correlação significativa entre as variáveis. O tamanho do círculo e a tonalidade da cor representam a magnitude e a direção do valor r da análise de correlação (azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente).....	42
<b>Figura 20.</b> Correlação de Pearson entre os componentes da produção da canola e os sensores de umidade em 2024. × sobre as cores, indica que não há ( $p>0,05$ ) correlação significativa entre as variáveis. O tamanho do círculo e a tonalidade da cor representam a magnitude e a direção do valor r da análise de correlação (azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente).....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Número de grãos por síliqua (GS) e massa de mil grãos (MMG) de canola em função de níveis de compactação.....	38
--	----

MONTIEL, Caroline Beal. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro - 2025. **Impacto de níveis de compactação nos componentes de produção da canola e na umidade de um solo argiloso.** Orientador: Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior. Coorientadores: Dra. Ana Paula Mourão Simonetti, Dr. Rogerio Luis Rizzi e Dra. Araceli Ciotti de Marins.

## RESUMO

A compactação do solo pode influenciar a porosidade e o diâmetro dos poros do solo afetando a ascensão capilar da água. A canola (*Brassica napus* L.) é uma espécie com certa tolerância ao estresse hídrico, mas pouco se sabe sobre a sensibilidade da espécie à compactação do solo, bem como acerca da dinâmica da água no solo. Portanto, o objetivo do estudo foi avaliar o efeito de níveis de compactação em um solo argiloso nos componentes de produção da canola e na ascensão capilar de água. O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil. O experimento foi configurado em delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram seis níveis de compactação (1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5 Mg m<sup>-3</sup>) estabelecidos mediante a prensagem de massa de solo em vasos de PVC. A camada compactada foi estabelecida na profundidade de 10-30 cm. Para avaliar a umidade do solo, três sensores foram instalados nas profundidades de 5, 15 e 25 cm de altura. Os sensores 1 e 2 estavam localizados na camada compactada e o sensor 3 no solo descompactado. No final do ciclo da canola, foram avaliados altura das plantas (cm), diâmetro de caule (cm), massa seca de parte aérea (g), massa seca de raízes (g), massa seca total de planta (g), número de siliquas por planta, número de grãos por siliquas, peso de mil grãos (g), crescimento de raízes (cm) e massa de grãos por planta (g). Além disto, a umidade do solo foi registrada no decorrer do ciclo da canola. Os dados de componentes da produção da canola e umidade foram investigados por meio de análise de regressão e análise de correlação com nível de significância de 5%. Os níveis de compactação aumentaram a umidade do solo nos sensores 1 e 2 (camadas compactadas). No entanto, a planta não conseguiu acessar essa água, pois estava retida nos microporos. Esse fato foi confirmado pela correlação negativa do crescimento radicular, número de siliquas por planta e massa de grãos por planta com a umidade no sensor 2. Em contrapartida, foram observadas correlações positivas dos componentes da produção da canola com o sensor 3 (camada descompactada), pois quando a umidade do solo chegou no sensor 3, camada superficial do solo, os componentes da produção foram beneficiados pela umidade. A canola se mostrou muito sensível aos níveis de compactação e seus componentes de produção foram afetados negativamente com o aumento da compactação do solo.

**Palavras-chave:** *Brassica napus* L., rendimento grãos; água no solo.

MONTIEL, Caroline Beal. Western Paraná State University, February - 2025. **Impact of compaction levels on canola production components and moisture content of a clay soil.** Advisor: Dr. Luiz Antônio Zanão Junior. Co-advisors: Dra. Ana Paula Mourão Simonetti, Dr. Rogerio Luis Rizzi e Dra. Araceli Ciotti de Marins

## ABSTRACT

Soil compaction can influence soil porosity and pore diameter, affecting the capillary rise of water. Canola (*Brassica napus* L.) is a species with a certain tolerance to water stress; however, little is known about its sensitivity to soil compaction, as well as the dynamics of water in the soil. Therefore, the study aimed to evaluate the effect of compaction levels in clay soil on the production components of canola and the capillary rise of water. The experiment was conducted in a greenhouse at the Western Paraná State University, Cascavel, PR, Brazil. The experiment was set up in a randomized block design with four replications. The treatments consisted of six levels of compaction (1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, and 1.5 Mg m<sup>-3</sup>), established by pressing a mass of soil into PVC pots. The compacted layer was established at a depth of 10 to 30 cm. To assess soil moisture, three sensors were installed at depths of 5 cm, 15 cm, and 25 cm. Sensors 1 and 2 were located in the compacted layer, and sensor 3 was situated in the uncompacted soil. At the end of the canola cycle, plant height, stem diameter, aerial part dry mass, root dry mass, total plant dry mass, number of siliques per plant, number of grains per silicle, thousand-grain weight, root growth, and grain mass per plant were evaluated. Additionally, soil moisture was recorded throughout the canola growth cycle. The data on the components of canola production and moisture were investigated using regression analysis and correlation analysis with a significance level of 5%. Compaction levels increased soil moisture in sensors 1 and 2, specifically in the compacted layers. However, the plant was unable to access this water as it was retained in the micropores. The negative correlation between root growth was confirmed, as was the relationship between the number of siliques per plant, grain mass per plant, and humidity in sensor 2. On the other hand, positive correlations were observed between the components of canola production and sensor 3 (uncompacted layer), specifically when the topsoil layer, which benefited from the moisture, reached sensor 3. Canola proved to be very sensitive to compaction levels, and its production components were negatively affected as soil compaction increased.

**Key-words:** *Brassica napus* L.; grain yield; soil water.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Cultura da canola ( <i>Brassica napus</i> L.) .....	13
2.2. Compactação do solo.....	15
2.3 Ascensão capilar de água .....	18
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1 Calibração dos sensores e alocação em vasos .....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
4.1 Níveis de compactação .....	30
4.2 Umidade do solo .....	39
4.3 Análise de correlação .....	41
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L.) é a terceira oleaginosa mais produzida no mundo e possui importância econômica (Guimarães *et al.*, 2022). Representa 15% da produção de óleo vegetal comestível do mundo. Ademais, é utilizada na produção de ração para animais e biodiesel (Tomm *et al.*, 2007). A canola é opção de cultivo de inverno para rotação de culturas e de renda, devido ao seu baixo custo de produção. Tem elevada tolerância aos períodos de estiagem, baixas temperaturas e possui ciclo precoce (Tomm *et al.*, 2008).

No sistema de produção, a canola geralmente é cultivada em rotação com soja ou milho em sistema plantio direto (SPD). O SPD é reconhecido mundialmente por minimizar os impactos negativos do uso do solo, melhorar a capacidade de retenção de água e reduzir a erosão do solo (Blanco-Canqui; Ruis, 2018). No entanto, apesar dos numerosos benefícios, quando o SPD é adotado sem práticas conservacionistas como a rotação de culturas, pode compactar o solo (Ferreira *et al.*, 2021).

A compactação tornou-se um problema mundial em áreas agrícolas, pois envolve diversos efeitos negativos no funcionamento do solo desde sua interferência direta na absorção de nutrientes pelas plantas, até a redução da produtividade das culturas (Silva, 2021). Uma das grandes dificuldades encontradas no SPD é o tráfego intenso de máquinas e implementos nas áreas agrícolas que resultam em alterações na qualidade física do solo (Bareta Junior *et al.*, 2021).

Os principais efeitos negativos da compactação são: aumento da resistência mecânica ao crescimento radicular, redução da aeração, da infiltração e disponibilidade de água no solo. Vale frisar que a dinâmica da água no solo pode estar diretamente relacionada com a produção vegetal (Alves *et al.*, 2012). Neste contexto, a dinâmica de água no solo é útil para o entendimento da inter-relação do sistema água-solo-planta-atmosfera, bem como do movimento da água no perfil do solo, ajuste da curva de retenção, evapotranspiração, escoamento superficial, ascensão capilar e drenagem profunda (Reichardt; Timm, 2012).

A compactação pode limitar processos importantes nos solos, como os fluxos de ar e água (Ryken *et al.*, 2018). A compactação proporciona alterações

no tamanho, volume e continuidade dos poros do solo e, portanto, na infiltração, escoamento e transporte de nutrientes. Com o aumento do nível de compactação, as partículas do solo ficam mais próximas, resultando na diminuição da porosidade e do diâmetro dos poros; podendo, então, a altura ascendente da água capilar aumentar.

A capilaridade da água no solo devido à tensão superficial é um fenômeno comum na natureza. O fenômeno da ascensão capilar está associado à sucção matricial, componente da sucção total, e possui diferenças entre os processos de umedecimento e secagem em razão das variações no tamanho do poro capilar (Baldovino *et al.*, 2020). A capilaridade do solo é afetada por inúmeros fatores, incluindo propriedades do solo (tamanho das partículas do solo e composição mineral), densidade do solo, teor de água, composição química, e concentração de soluto da solução aquosa no solo, estrutura do solo, entre outros (Huo *et al.*, 2021).

A dinâmica de água no solo é útil para o entendimento da inter-relação do sistema água-solo-plantas (Reichardt; Timm, 2012). Britto *et al.* (2009) proferem que elevados volumes de raízes no solo, provenientes do sistema consorciado de plantas, favoreceram a ascensão capilar da água durante épocas mais secas. Chancellor (1971) observou que a compactação pelo tráfego pesado aumentou a continuidade de poros, o que gerou mais disponibilidade de água por ascensão capilar.

Apesar dos efeitos negativos da compactação do solo, as culturas possuem comportamento distinto em solos compactados, devido às diferenças morfológicas do sistema radicular de cada espécie (Bacq-Labreuil *et al.*, 2019). As plantas de raiz pivotante, como é o caso da canola, geralmente exibem melhores capacidades de penetração em camadas compactadas do solo que as plantas de raízes fasciculadas (Chen; Weil, 2011). O diâmetro das raízes é considerado a principal vantagem e fator responsável pelo crescimento radicular destas plantas em solos compactados (Chen; Weil, 2010). Vários estudos foram realizados em vasos compactados artificialmente para determinar a tolerância de espécies em relação à compactação do solo em condições controladas (Montiel *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023). No entanto, não foram encontrados trabalhos detalhados que estudaram a sensibilidade da canola em relação à compactação do solo em condições controladas.

Nesse contexto, a investigação proposta tem como hipótese a existência de um estado de compactação ótimo, que possibilita maior umidade de água, propiciando melhor rendimento de grãos da canola. O objetivo deste estudo foi avaliar implicações de níveis de compactação em um solo argiloso na ascensão capilar de água e nos componentes de produção, a fim de estabelecer o nível de densidade ótimo para o melhor rendimento de grãos e o nível crítico de densidade do solo para a cultura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cultura da canola (*Brassica napus* L.)

A canola (*Brassica napus* L.), conhecida também por colza, é uma planta resultante do melhoramento genético, principalmente da *Brassica oleraceae* e *Brassica rapa* (Ocde, 2008). O objetivo do melhoramento genético foi reduzir o teor de glucosinolatos e ácido erúxico que são danosos à saúde humana (Figueiredo *et al.*, 2003; Tomm, 2000). O termo “canola” é utilizado para cultivares que possuem 2 % ou menos de ácido erúxico no óleo e 30  $\mu\text{mol L}^{-1}$  ou menos de glucosinolatos na matéria seca da semente, conforme originalmente registrado pelo Canadian Council of Canola (Cardoso *et al.*, 1996; Canola, 2010).

No Brasil, cultiva-se apenas canola chamada de primavera. Os grãos dessa cultura possuem em torno de 24 a 27 % de proteína e de 40-46 % de óleo (Tomm, 2003). Ademais, o farelo resultante durante a obtenção de óleo pode ser utilizado na alimentação animal, devido ao alto teor de proteínas (34 a 38 %) (Tomm, 2005). No país, foi introduzida inicialmente na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul e do Paraná, visto que esta região apresenta condições climáticas adequadas ao crescimento durante o outono, inverno e início da primavera (Dalmago *et al.*, 2010).

A canola é responsável por 15 % da produção de óleo vegetal comestível do mundo, sendo também utilizada na produção de biodiesel e rações para animais (Tomm *et al.*, 2007). A espécie possui baixo custo de produção, colheita mecanizada, tolerância à períodos de estiagem e baixas temperaturas (Tomm *et al.*, 2007).

Ao cultivar canola em um sistema agrícola, agrega-se a possibilidade de produzir óleo vegetal em época do ano distinta a do cultivo da soja (Tomm *et al.*, 2009, Kruger *et al.*, 2011). Outro aspecto relevante é que o óleo de canola também apresenta características adequadas como sua fluidez, em temperatura atmosférica mais baixa do que o biodiesel produzido a partir de outras matérias-primas. Apresenta ainda índice de iodo e estabilidade que

atendem plenamente padrões estabelecidos por normativas exigentes como a europeia (De Mori, Tomm, Ferreira, 2014).

O cultivo da canola constitui alternativa econômica para os produtores, que podem se beneficiar da mesma estrutura de máquinas e equipamentos disponíveis nas propriedades, com algumas adaptações e acréscimos por meio do uso de kits nos implementos agrícolas. Outrossim, revela baixo custo com defensivos agrícolas, comparativamente às demais espécies empregadas na produção de grãos (Tomm *et al.*, 2008). Também é excelente alternativa para a diversificação de culturas e na rotação com milho, soja, trigo e feijão. Seus restos culturais podem favorecer o aumento do rendimento e da qualidade desses grãos em cultivos posteriores.

A canola foi desenvolvida, inicialmente, para regiões de clima temperado, com latitudes de 35° a 55° (Mcclinchey; Kott, 2008). No Brasil, sua produção tem se concentrado na região Sul, mas trabalhos desenvolvidos em condições de clima tropical têm apresentado resultados promissores (Tomm *et al.*, 2004). Isso tem levado à concentração de esforços para a tropicalização da canola, priorizando o cultivo em áreas com altitudes acima de 600 m, por apresentarem temperaturas mais amenas (Tomm *et al.*, 2008).

A canola, quando usada como planta de cobertura, tende a melhorar as condições físicas do solo devido ao seu sistema radicular agressivo, podendo promover a descompactação do solo (Baier; Roman, 1992). O sistema radicular é o típico das dicotiledôneas, com raiz pivotante e grande número de raízes fasciculadas secundárias (Bevilaqua *et al.*, 2008). As plantas de raiz pivotante, geralmente, exibem melhores capacidades de penetração em camadas compactadas do solo do que as plantas de raízes fasciculadas. O diâmetro das raízes é visto como a principal vantagem e fator determinante para o crescimento radicular das plantas em solos compactados (Chen; Weil, 2010).

A canola é sensível ao déficit hídrico durante as fases de floração e enchimento de grãos, diminuindo seu período vegetativo (Dogan *et al.*, 2011). Souza *et al.* (2010) concluíram que a diminuição da precipitação promove redução do desenvolvimento da planta e redução da produção, podendo chegar até a não se obter êxito na germinação. Outros estudos com diferentes níveis de déficit hídrico na cultura da canola concluíram que a produtividade de grãos foi o parâmetro que mais se mostrou sensível ao déficit (Bilibio *et al.*,

2011), podendo ter uma redução de 57% na produtividade de grãos quando não utilizada a irrigação, destacando dessa forma a importância da condição hídrica para esta cultura (Sanches *et al.*, 2014).

Durante o cultivo, é indispensável atentar para o manejo adequado de umidade do solo, pois este atua também no crescimento do sistema radicular e da área foliar, favorecendo a retenção de folhas por mais tempo (Mendonça *et al.*, 2016). A restrição hídrica atua reduzindo a velocidade dos processos fisiológicos e bioquímicos e, com isso, as plântulas de canola nas condições de baixa umidade apresentam menor desenvolvimento ocorrendo, assim, menor acúmulo de biomassa seca (Costa *et al.*, 2020).

## **2.2. Compactação do solo**

O Sistema Plantio Direto (SPD) é ponderado como uma das práticas agrícolas mais conservacionistas e ambientalmente corretas (Vezzani; Mielniczuk, 2011), sendo reconhecido mundialmente devido aos benefícios para o solo e a produtividade das culturas agrícolas (Soane *et al.*, 2012; Blanco-Canqui; Ruis, 2018).

O SPD propicia diversos fatores benéficos quanto à qualidade do solo, como o controle da erosão, aumento da fertilidade e redução da temperatura do solo (Lazia, 2012). Melhora ainda a ascensão capilar da água e reduz o carreamento de fertilizantes e agrotóxicos para os mananciais (Crusciol *et al.*, 2005; Marochi *et al.*, 2005; Braz *et al.*, 2006; Ferreira, 2012). Outra característica importante do SPD é que ele mitiga os efeitos provocados pelas emissões de gases de efeito estufa e contribui positivamente com o ciclo hidrológico (Motter *et al.*, 2015).

Contudo, se o SPD for executado de forma inadequada pode comprometer sua eficácia e o solo pode se compactar. A ausência de sucessão de culturas, pouca palhada sobre o solo e trânsito de máquinas pesadas em umidade elevada são práticas que podem gerar problemas de compactação do solo (Leite; Maciel; Araújo, 2014; Ferreira *et al.*, 2021).

A compactação é um processo pelo qual ocorre um rearranjo das partículas do solo, o que pode reduzir o espaço poroso, aumentar a densidade

do solo e a resistência a penetração das raízes das plantas (Hamza; Anderson, 2005). Esses fatores afetam a conectividade e continuidade do espaço poroso, podendo reduzir a capacidade de transporte de água e ar (Kuncoro *et al.*, 2014; Keller *et al.*, 2017).

Além do manejo empregado, a textura do solo está diretamente ligada à susceptibilidade à compactação, visto que quanto menores as partículas do solo, maior sua compressibilidade e agregação (Macedo *et al.*, 2010). Solos argilosos apresentam uma maior tendência a compactação, gerada principalmente pelo tráfego de máquinas em determinadas condições de umidade, superando a capacidade de suporte desses solos, promovendo a deformação plástica e o aumento do seu estado de compactação (Reinert, 1990; Håkansson; Voorhess, 1998).

A compactação de solo reduz o acesso água e nutrientes, o que compromete o crescimento radicular e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas (Albuquerque *et al.*, 2001; Denardin *et al.*, 2008). Os efeitos da compactação são encontrados nas camadas subsuperficiais de 7 a 15 cm, camadas nas quais geralmente se encontra grande parte do sistema radicular das culturas agrícolas (Vieira, 1981; Silva; Reinert; Reichert; 2000; Stone; Silveira, 2001). Com o impedimento físico, as raízes das plantas apresentam dificuldades em penetrar as camadas de maior resistência (Silva; Reinert; Reichert, 2000), sendo evidenciado pelo confinamento das raízes acima das camadas compactadas e na superfície do solo (Unger; Kaspar, 1994).

A presença de uma estrutura maciça e adensada nas camadas superficial e subsuperficial são comuns na maioria dos solos cultivados intensivamente, com valores de densidade mais elevados e, aeração, penetração e a proliferação de raízes também prejudicadas. Assim, a densidade pode variar consideravelmente, dependendo da textura, dos teores de matéria orgânica do solo (Curtis e Post, 1964) e da freqüência de cultivo (Hajabbasi; Jalalian; Karimzadeh, 1997).

A densidade do solo é um bom indicador de qualidade devido às correlações positivas e negativas com outros atributos físicos avaliados (Torres *et al.*, 2015). Indicadores de qualidade refletem limitações para o desenvolvimento radicular, emergência de plântulas, infiltração ou movimento de água no perfil, fatores diretamente relacionados à germinação e

desenvolvimento de plantas além de bastante ligados ao material de origem e granulometria dos solos (Oliveira, 2011; Streck *et al.*, 2008).

Os valores de densidade aparente relativa representam quão próxima a densidade aparente real do solo está em relação à densidade aparente crítica. Por exemplo, valores de densidade aparente relativa maiores que 100 % mostram que a densidade aparente do solo é maior que a crítica, ao passo que valores abaixo de 100 % representam que a densidade aparente é menor que a crítica. Além do mais, é possível determinar, de acordo com o percentual de densidade relativa do solo, algumas ações que devem ser realizadas para impedir que a densidade do solo se aproxime do crítico, realizando o manejo mecânico do solo como escarificação ou manejo vegetativo por meio de plantas de cobertura com um sistema radicular que proporciona melhora nas propriedades físicas do solo. Valores de densidade do solo superiores a 85 % poderiam, assim, ser definidos como um alerta para a tomada de decisão em relação ao manejo do solo (Suzuki *et al.*, 2022).

A compactação ocorre em implicação do intenso tráfego de máquinas agrícolas sobre o solo, em conjunto com elevada umidade no momento das operações. Por não ocorrer o revolvimento do solo no sistema de plantio direto, tornam-se maiores as chances de ocorrer compactação (Silva; Cabeda, 2006; An; Zhang; Yu, 2015). Na maioria das vezes, tem-se o predomínio da monocultura de soja/pousio ou sucessões por vários anos de soja/milho safrinha representando em torno de 90 % da área total com SPD no Brasil (Dias, 2014) refletindo em compactação superficial dos solos agrícolas (Reichert *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2018; Müller *et al.*, 2019).

Arcoverde *et al.* (2020) mostram que a maior resistência do solo à penetração no plantio direto se deve ao não revolvimento do solo associado às pressões pelo tráfego de máquinas e a acomodação das partículas dos solos. 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 *et al.*, 2016). Machado *et al.* (2023) trouxeram relatos nos quais essas deformações influenciaram diretamente nas variações de densidade do solo, gerando efeito da compactação na profundidade de 0,15 m, sendo que os níveis aumentaram até

cinco passagens do trator e a partir de seis passagens a tendência foi em manter a densidade  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Estudos conduzidos em SPD demonstraram que o solo normalmente apresenta números elevados nos quesitos densidade e resistência à penetração e menor espaço poroso, especialmente macroporos, comparado com áreas trabalhadas em preparo convencional. Isso leva à interpretação de que a compactação de solo é maior em SPD, principalmente quando se aplica o nível crítico para a resistência à penetração (RP) de 2 MPa. Deve ficar claro que as avaliações de RP precisam ser ajustadas e interpretadas em função do teor de água no solo, assim como em SPD consolidado os valores tolerados são superiores a 2 MPa.

De acordo com literatura internacional e amparado por resultados obtidos em estudos desenvolvidos na Embrapa, solos argilosos, manejados em SPD, podem apresentar valores de RP de até 3,0 MPa (obtidos no teor de água equivalente à capacidade de campo) e elevação da densidade, especialmente na camada de 10 cm a 20 cm, sem influenciar significativamente o desempenho produtivo da soja (Moraes *et al.*, 2014). Isso se deve ao fato de que o solo possui estrutura mais resistente e estável quando manejado em SPD, pela ausência de revolvimento por preparo, acúmulo das pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas e aumento do teor de matéria orgânica (Moraes *et al.*, 2017).

Moraes *et al.* (2018) e Arcoverde *et al.* (2022) salientam resultados quando verificaram que um grau moderado de compactação (RP máximo = 1,6 MPa e RP entre 1,5 e 2,0 MPa, respectivamente) pode beneficiar o crescimento e a produtividade da cultura do milho e da soja.

### **2.3 Ascensão capilar de água**

O fenômeno da capilaridade está diretamente relacionado à tensão superficial da água, resultando na ascensão da água por tubos capilares finos (Murray; Sivakumar, 2010). A ascensão capilar de água no solo é um fenômeno responsável pelo balanço hídrico de água no solo.

A capilaridade do solo é afetada por diversos fatores, incluindo propriedades do solo (tamanho das partículas do solo e composição mineral),

densidade do solo, teor de água, composição química, e concentração de soluto da solução aquosa no solo, estrutura do solo, entre outros (Huo *et al.*, 2021).

A compactação do solo possui influência direta na distribuição do tamanho de poros no perfil do solo, alterando a continuidade destes, e conseqüentemente, reduzindo o fluxo de água e gases (Moraes, 2013). A continuidade de poros é de extrema importância para o movimento tridimensional da água no solo e, em conjunto com a capilaridade, possibilita fluxos ascendentes de água, de camada mais profundas até a superfície do solo, em que poderá ser absorvida pelas plantas ou perdida por evaporação.

A estrutura do solo pode ser definida como “a forma, o tamanho e a disposição espacial das partículas individuais do solo e grupos de partículas (agregados)” ou como “a combinação de diferentes tipos de poros com partículas sólidas (agregados)”. A forma do poro, a distribuição do tamanho dos poros e o seu arranjo interferem nos processos mais importantes do solo, como armazenamento e movimento de água e gases, movimentos de soluto e facilidade do crescimento radicular, os quais possuem interferência significativa no desenvolvimento das plantas (Bertollo; Levien, 2019).

Diversos fatores podem prejudicar o arranjo das partículas: a densidade do solo, o teor de água e o preparo do solo. A variação desses fatores pode ocorrer em diferentes volumes de vazios e interações que influenciam a drenagem e a forma dos meniscos (raio de curvatura) que finalmente afetam o valor de sucção do solo (Ng; Menzies, 2007).

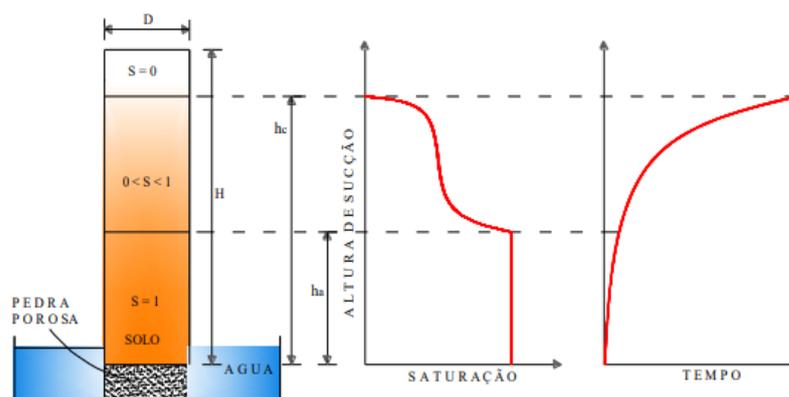
Os poros dos solos funcionam como tubos capilares convolutos que induzem a água do solo a subir acima do nível do lençol freático. Os poros mais finos resultam em água mais elevada, ou seja, de acordo com a maior curvatura do menisco. Em relação à pressão do ar, a água capilar tem uma pressão de água negativa. A magnitude da água capilar é contrariamente correspondente ao raio de curvatura do menisco. Isso significa que, quando o raio do menisco diminui, a pressão negativa da água dos poros, ou sucção matricial, está crescendo em magnitude (Scheuermann; Bieberstein, 2007; Murray; Sivakumar, 2010). Tais fenômenos de ascensão capilar levam a um aumento na saturação do solo (Li *et al.*, 2018).

Diversos estudos de ascensão capilar têm sido realizados usando tubos abertos. Baldovino *et al.* (2017) estudaram a ascensão capilar em uma areia e identificaram que esta apresenta duas zonas após a finalização do ensaio: zona saturada e zona não saturada. Para a areia estudada, o ponto de entrada de ar foi encontrado a 1/3 da altura máxima.

Baldovino *et al.* (2018a, 2018b) moldaram uma areia fina em diferentes porosidades para estudar o comportamento capilar e, assim, poder estimar a altura máxima de ascensão usando modelos matemáticos. Verificaram que as soluções analíticas de ascensão capilar podem ser empregadas em areias e sua utilização na engenharia geotécnica, bem como em solos para agricultura. Usaram modelos analíticos para estimar a curva de ascensão capilar de um silte sedimentar compactado em uma coluna de 2 m. Os autores concluíram que, comparando as soluções analíticas com os resultados obtidos em laboratório, pode-se dizer que a solução proposta por Terzaghi (1943) tem um melhor ajuste, sendo a porosidade e o coeficiente de permeabilidade saturada os principais parâmetros de controle da curva de ascensão capilar.

Observa-se o modelo conceitual para a ascensão capilar em solos, definindo o fenômeno como uma relação direta entre a sucção e o grau de saturação, isto é, a ascensão capilar está diretamente relacionada à curva característica de sucção do solo (Baldovino; Batista; Izzo, 2019; Baldovino *et al.*, 2019).

Quando se coloca uma coluna de solo seco ou semisseco em contato com água (Figura 1), a água começa a ascender rapidamente. Contudo, a velocidade de ascensão da água reduz em razão da entrada de ar e do aumento da sucção matricial. Ao final de um ensaio de ascensão capilar, observam-se 3 fases no interior do solo: uma fase na qual a saturação é 100 %, com uma altura correspondente de saturação ( $S$ ) chamada  $h_a$  (também chamada altura de entrada de ar), uma segunda fase que começa no ponto em que há entrada de ar ( $h_a$ ), onde o solo se encontra em uma saturação entre 0 e 100 % (é chamada  $h_c-h_a$ , em que a altura  $h_c$  corresponde à altura máxima de ascensão capilar) e, por último, no final da coluna de solo, a água capilar não penetra, ficando na saturação inicial do solo quando iniciado o ensaio.



Fonte: Baldovino, Batista e Izzo (2019); Baldovino *et al.* (2019).

Figura 1 Comportamento capilar de uma coluna de solo em contato com a água.

A lei de migração da água capilar está relacionada ao potencial de temperatura, potencial gravitacional e potencial de matriz. O potencial de temperatura prevalece em decorrência das mudanças de temperatura causadas pelo ambiente externo na direção de migração, altura de migração e taxa de água capilar. Potencial de gravidade significa que a autogravidade da água capilar tem diferentes efeitos na lei de migração da água capilar em diferentes direções (Zhang *et al.*, 2009; Dastjerdi *et al.*, 2014).

O potencial matricial está relacionado à influência de forças atrativas iônicas e moleculares na migração da água capilar em diferentes solos, que é causada por seus distintos componentes minerais e propriedades físicas e mecânicas (Li *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020).

A capilaridade da água no solo devido à tensão superficial é um fenômeno comum na natureza. Este fenômeno refere-se à água que existe em uma elevação superior ao nível da água subterrânea ou ao nível do lençol freático. O fenômeno da ascensão capilar está associado à sucção matricial, componente da sucção total, e possui diferenças entre os processos de umedecimento e secagem devido às variações no tamanho do poro capilar (Baldovino; Izzo, 2021).

O comportamento capilar dos solos arenosos é relatado na literatura, uma vez que apresentam alturas de elevação mais baixas que os solos argilosos e podem levar até anos para atingir a altura máxima de elevação capilar (Baldovino; Izzo, 2021). Já em solos argilosos, o comportamento capilar

é maior devido à expansão das camadas intermediárias dos argilominerais e por meio da atração eletrostática de coloides e a solvatação de íons. Essa adsorção entre as partículas do solo, da água e as forças osmóticas devido à presença de solutos em solução que podem ser componentes inorgânicos ou orgânicos, explicam a capilaridade das argilas (Geomecânica, 2016).

Para Britto *et al.* (2009), elevados volumes de raízes no solo, provenientes do sistema consorciado de plantas, favorecem a ascensão capilar da água durante épocas mais secas. Chancellor (1971) também observou que a compactação pelo tráfego pesado não influenciou o rendimento de grãos do trigo, do sorgo e do milho. Conferiu esse fato à continuidade de poros, gerada pela proximidade dos agregados do solo, o que teria melhorado a disponibilidade de água por ascensão capilar.

Pode-se atribuir tais resultados às forças de adsorção do solo sobre a água, bem como a continuidade de poros ocorrentes no solo, sendo que ambos os fatores são beneficiados pelo aumento do estado de compactação do solo. Enquanto a maior continuidade de poros promove uma melhor e mais rápida ascensão da água de camadas mais profundas para a superfície favorecendo a evaporação de água, o aumento das forças de adsorção (adesão) torna necessário mais quantidade de energia do ambiente para a retirada desta água da superfície do solo (Libardi, 2012).

Assim, níveis intermediários de compactação do solo otimizam a relação entre as forças de adesão (maior força de retenção de água do solo) e a continuidade de poros do solo (ascensão da água de camadas mais baixas para a superfície favorecendo a evaporação do solo). Libardi (2012) explica que quanto maior for a distância entre a molécula de água e a superfície do solo, menor será a atuação das forças de atração destas sobre a água, fazendo com que solos mais compactados tenham uma maior capacidade de retenção de água.

Com isso, o movimento de água e seu armazenamento no perfil são favorecidos devido à continuidade de poros verticais que atuam tanto na infiltração quanto em fluxos ascendentes de água em períodos de déficit hídrico (Moraes *et al.*, 2016). Observa-se que, no SPD, a estrutura de solo, por ser mais consolidada, o torna mais resistente e resiliente às pressões advindas dos pneus das máquinas agrícolas (Moraes *et al.*, 2019).

Tornam-se importantes estudos que associem níveis de compactação *versus* disponibilidade de água, para estabelecer limites ótimos e críticos de densidade no tocante à otimização da produção deste cultivo agrícola.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, Brasil. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distroférico típico, de textura argilosa a muito argilosa, relevo suave ondulado, substrato basalto (Embrapa, 2018), com 47, 311 e 642 g kg<sup>-1</sup> para areia, silte e argila, respectivamente. As propriedades químicas do solo foram: pH do solo 4,88 (CaCl<sub>2</sub>); 25 g dm<sup>-3</sup> MO; 5,65 mg dm<sup>-3</sup> teor de P (Mehlich<sup>-1</sup>); 0,6, 6,3, 2,18 e 8,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de teores de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e acidez total em pH 7,0 (H + Al), respectivamente e saturação por bases de 52,3%.

O solo utilizado neste experimento foi oriundo de lavoura comercial quando foram coletadas amostras na camada de 0-10 cm em separado para criar a primeira camada (10 cm de espessura) dentro dos vasos de PVC no sentido de possibilitar a boa germinação das sementes de canola em solo isento de compactação. Foi coletado solo da camada abaixo de 10 cm para configurar as densidades previstas nos tratamentos (camada com espessura de 20 cm dentro dos vasos).

O experimento foi conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições (Figura 2), sendo V0, V1, V2, V3, V4 e V5 os vasos que configuraram os tratamentos T0, T1, T2, T3, T4 e T5 com diferentes níveis de compactação do solo (Figura 2). Os tratamentos tiveram níveis de compactação que foram estabelecidos mediante a prensagem de massa de solo em vasos de PVC até atingir as densidades de: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5 Mg m<sup>-3</sup>.

Em cada vaso, sete sementes de canola foram plantadas. Após a germinação, realizou-se o desbaste deixando apenas três plantas que apresentaram melhor desenvolvimento. A irrigação das plantas foi realizada pela parte superior dos vasos de acordo com a evapotranspiração até as plantas atingirem o período de prefloração, e a partir da prefloração até o final do ciclo de cultivo da canola, a rega aconteceu somente na parte inferior, disponibilizando água nos pratos sob os vasos, sendo o estágio mais sensível à seca no desenvolvimento da canola.

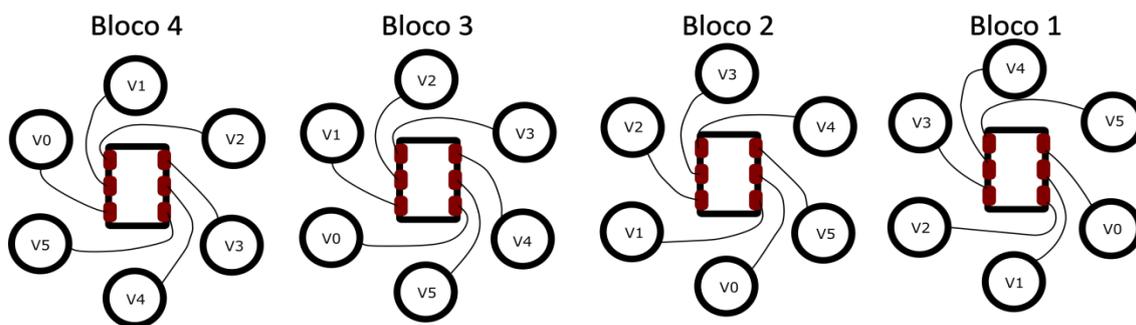


Figura 2 Croqui com disposição dos tratamentos e blocos.

Para captura dos dados de umidade do solo, foram utilizados 72 sensores capacitivos, que funcionam explorando o princípio da capacitância, ou seja, a capacidade de um objeto armazenar carga elétrica. Os sensores possuem basicamente duas placas condutoras separadas por um material isolante (dielétrico) (Figura 3).



Figura 3 Modelo de sensor de umidade capacitivo utilizado no escopo deste projeto.

Os sensores funcionam quando uma tensão elétrica é aplicada às placas, pois um campo elétrico é criado entre elas. A capacitância desse sistema é influenciada por diversos fatores como a distância entre as placas, área das placas e o material dielétrico. Quanto à distância entre as placas, quanto menor a distância, maior a capacitância. Em relação à área das placas, quanto maior a área, maior a capacitância. Já diferentes materiais dielétricos possuem diferentes constantes dielétricas, o que afeta a capacitância.

### 3.1 Calibração dos sensores e alocação em vasos

Para ter uma correspondência entre os valores de tensão lidos dos sensores e seu correspondente valor em termos de umidade do solo, foi necessário fazer uma calibração prévia dos sensores. Para esse processo, foram usados potes de vidro de 500 ml.

Nove potes de vidro contendo 500 g de solo com umidades pré-estabelecidas foram preparados, sendo as seguintes porcentagens de 0; 12,5; 25, 37,5; 50; 62,5; 75, 87,5 e 100 %.

Cada vaso recebeu dois sensores, já que os sensores devem apresentar boa correlação dos dados lidos entre eles, cuja disposição foi feita conforme ilustram as Figuras 4 e 5. Logo, ao utilizar 72 sensores, todos foram alocados em duplas nos potes, desde o solo seco até o solo saturado, até que todos tivessem leituras de umidade para, assim, determinar a curva de ajuste dos sensores (Figura 6).



Figura 4 Vista aérea dos sensores nos potes para calibração.

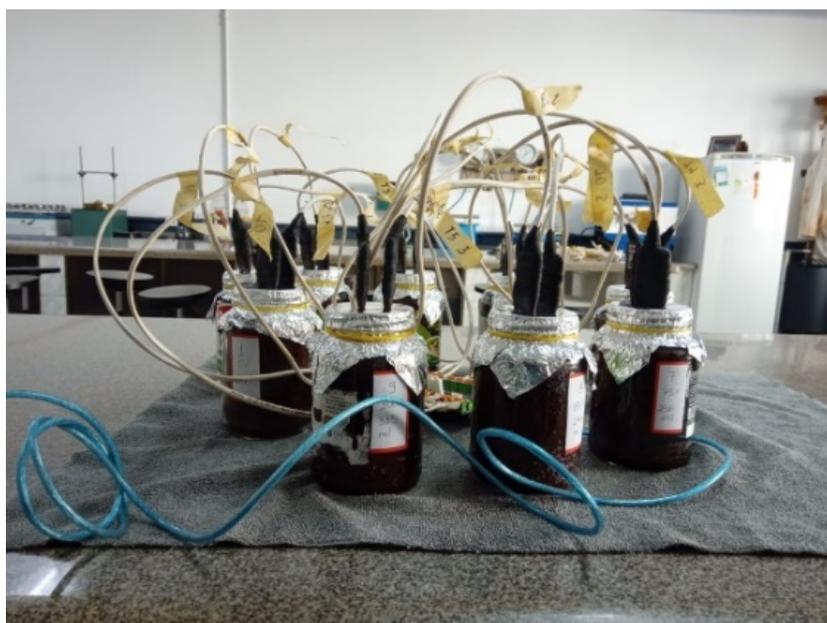


Figura 5 Vista lateral dos sensores nos potes para calibração.

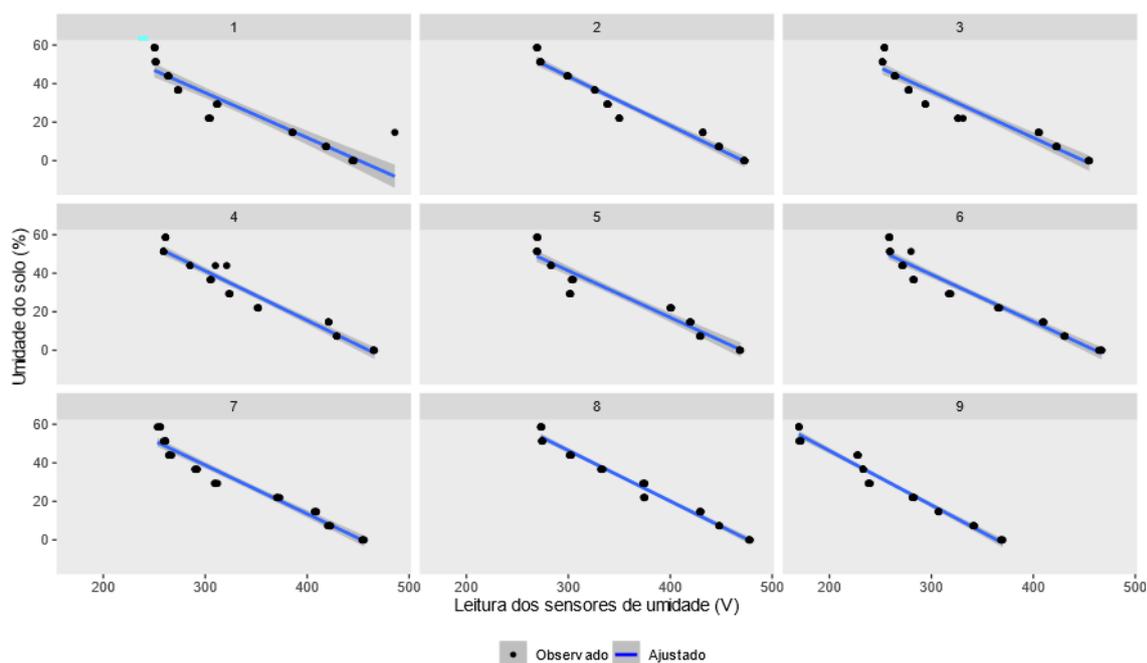


Figura 6 Exemplo de curvas de ajuste dos sensores.

Os sensores de umidade foram posicionados a 5, 15 e 25 cm de altura a partir da base dos vasos, respectivamente sensores 1, 2 e 3 (Figura 7). Com isso, os sensores 1 e 2 estavam alocados na camada compactada e o sensor 3

na camada isenta de compactação dentro dos vasos. Os sensores realizam as leituras da umidade do solo em intervalos de quinze minutos, fornecendo os dados para a realização da avaliação de ascensão capilar da água.

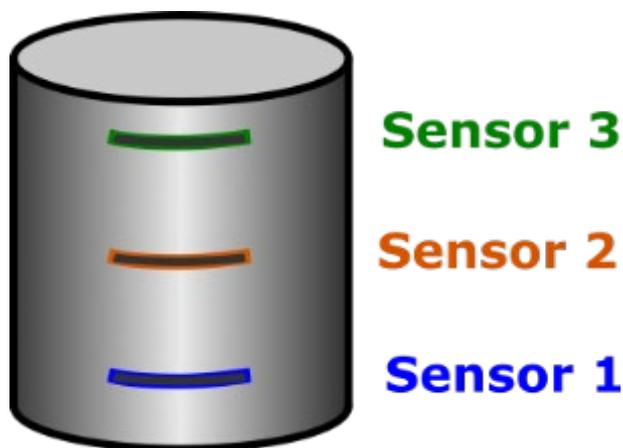


Figura 6 Disposição dos sensores de umidade do solo nos vasos.

Para registro das informações obtidas pelos sensores de umidade nos diferentes tratamentos, a partir da fase de prefloração até a fase final do ciclo da cultura da canola, foram instalados dispositivos eletrônicos para aquisição e registro de dados dos sensores de umidade (Datalogger) em cada bloco do experimento (Figura 8).

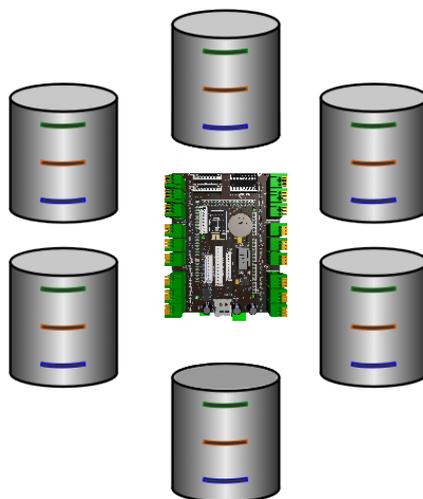


Figura 7 Posição do dispositivo eletrônico para aquisição e registro de dados dos sensores de umidade do solo (Datalogger).

No final do ciclo de cultivo da cultura, foram avaliados a altura das plantas, diâmetro de caule, massa seca de parte aérea, massa seca de raízes, massa seca total de planta, número de siliquis por planta, número de grãos

por síliquas, massa de mil grãos, crescimento de raízes e massa de grãos por planta.

O experimento foi conduzido em 2023 e repetido em 2024.

Os dados de componentes da produção da canola e umidade do solo foram analisados por meio de análise de regressão com nível de significância de 5 %, usando o software Sigma Plot 11 (Jandel Scientific, Sausalito, CA, USA). Ademais, foi realizada a análise de correlação linear de Pearson entre as variáveis avaliadas, a 5 % de probabilidade, utilizando o software estatística R (version 3.5.2).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Níveis de compactação

Os componentes de produção da altura de plantas, diâmetro do caule, massa seca de raízes, produção de massa seca de parte aérea, comprimento de raízes, número de síliquas por planta e massa de grãos por planta foram afetados significativamente ( $p < 0,05$ ) pelos níveis de compactação. Os componentes de produção foram reduzidos linearmente com o aumento dos níveis de compactação, demonstrando sensibilidade da canola em relação à compactação do solo (Figura 9 e 10).

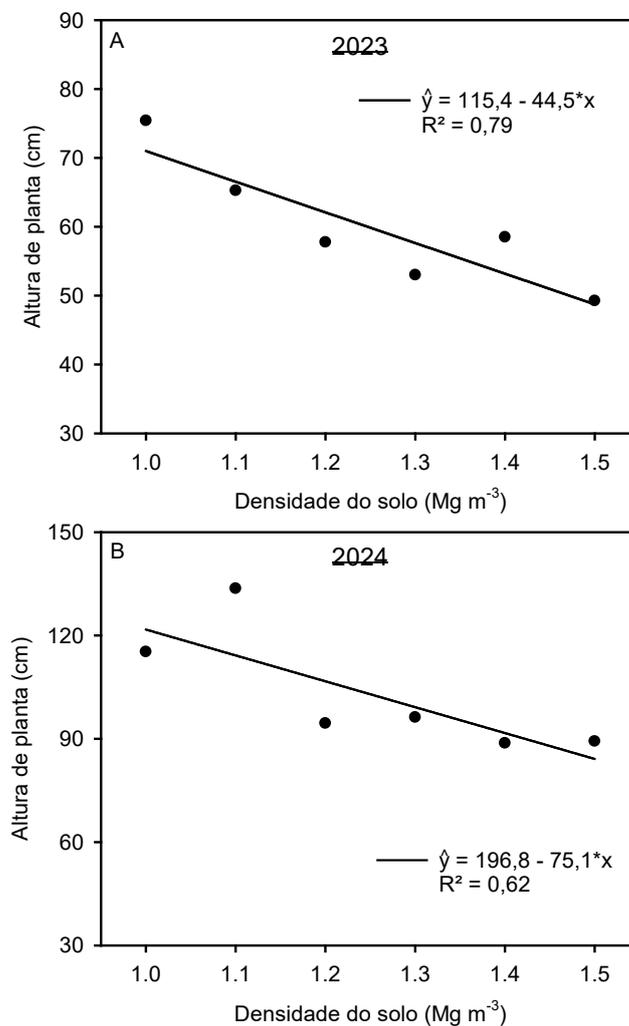


Figura 8 Altura de planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

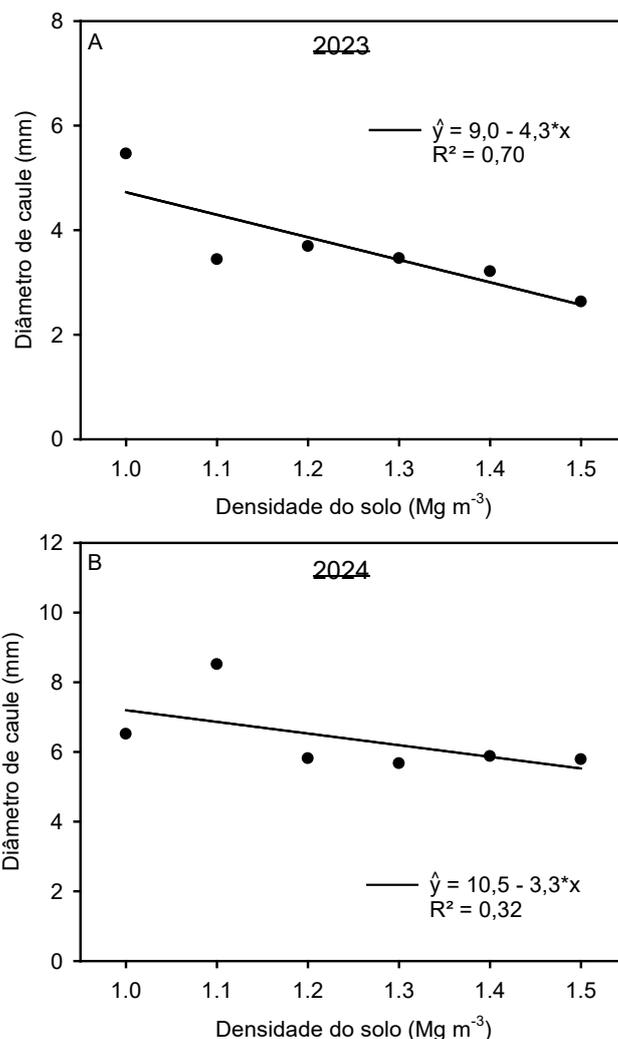


Figura 9 Diâmetro de caule de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

As alterações ocorridas nos componentes de produção da canola são reflexo dos efeitos negativos da compactação do solo. A compactação altera negativamente o espaço poroso do solo, com redução da macroporosidade e porosidade total do solo reduzindo, assim, a quantidade de oxigênio no solo (Valadão *et al.*, 2015; Trevisan *et al.*, 2017). Isto altera a resistência ao crescimento das raízes, a dinâmica da água e a interação do solo com os nutrientes, dificultando a absorção pela planta (Pacheco *et al.*, 2016; Valadão *et al.*, 2022).

As moléculas de água em solos com maior densidade aderem às partículas do solo e ocupam seus poros, diminuindo assim a circulação de ar. A

redução da taxa de infiltração de água e da circulação de ar pode levar a condições anóxicas e reduzir severamente a atividade hidráulica das raízes (Ahmad, Li, 2021). No solo compactado, o volume de solo explorado pelas raízes é limitado, reduzindo a quantidade de nutrientes para crescimento das plantas (Oliveira *et al.*, 2016).

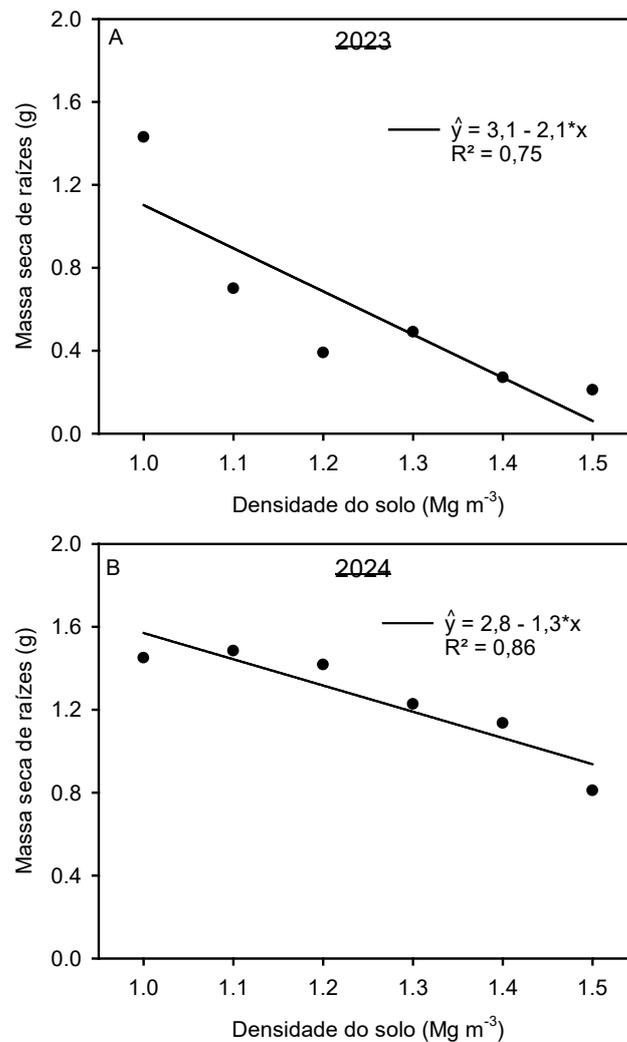


Figura 10 Massa seca de raízes de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

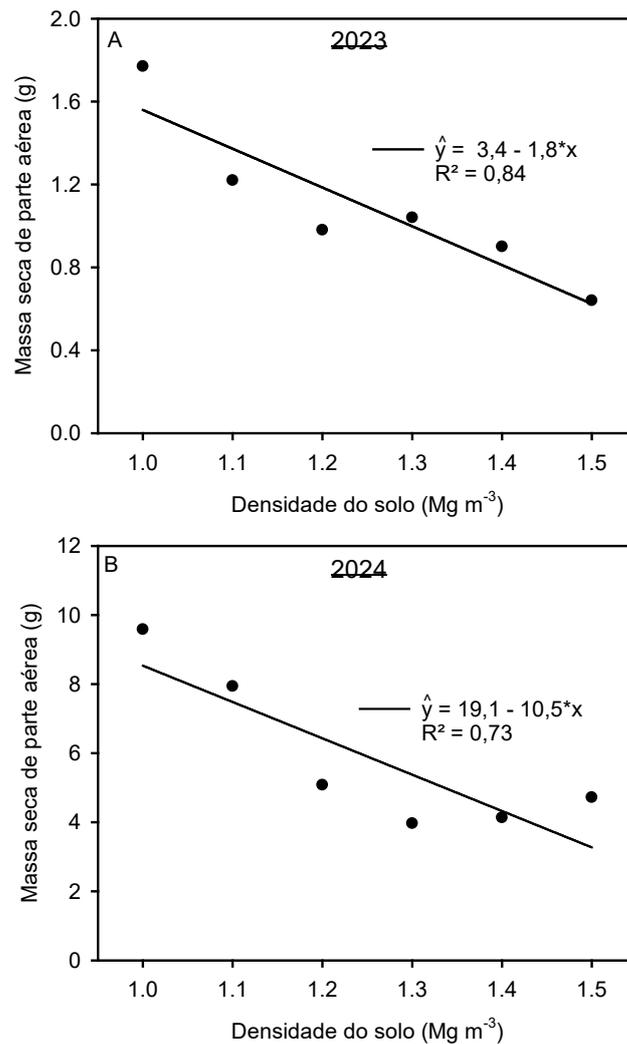


Figura 11 Massa seca de parte aérea de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Como destacado por McPhee *et al.* (2020), todo esse processo de compactação de solo em áreas agrícolas surgiu de uma necessidade de otimização de trabalho e aumento de produtividade de mão de obra, elevando a massa das máquinas de 3 para 35 toneladas. Contudo, o aumento na massa das máquinas ocasionou o declínio na funcionalidade do solo, oscilação nas taxas de rendimento e produtividade das culturas (Keller *et al.*, 2019).

A compactação do solo diminui a biomassa e o rendimento ao reduzir o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Estudos em vários tipos de solo e ambientes mostraram que a massa seca e o rendimento das culturas

diminuíram significativamente em solos compactados devido ao maquinário pesado, maior carga por eixo e tráfego repetido de campo em comparação com equipamentos leves, menor carga por eixo e solo não compactado (Voorhees, 2000; Ishaq *et al.*, 2001; Sidhu; Duiker, 2006; Chan *et al.*, 2006; Abu-Hamdeh, 2010; Whitmore *et al.*, 2011).

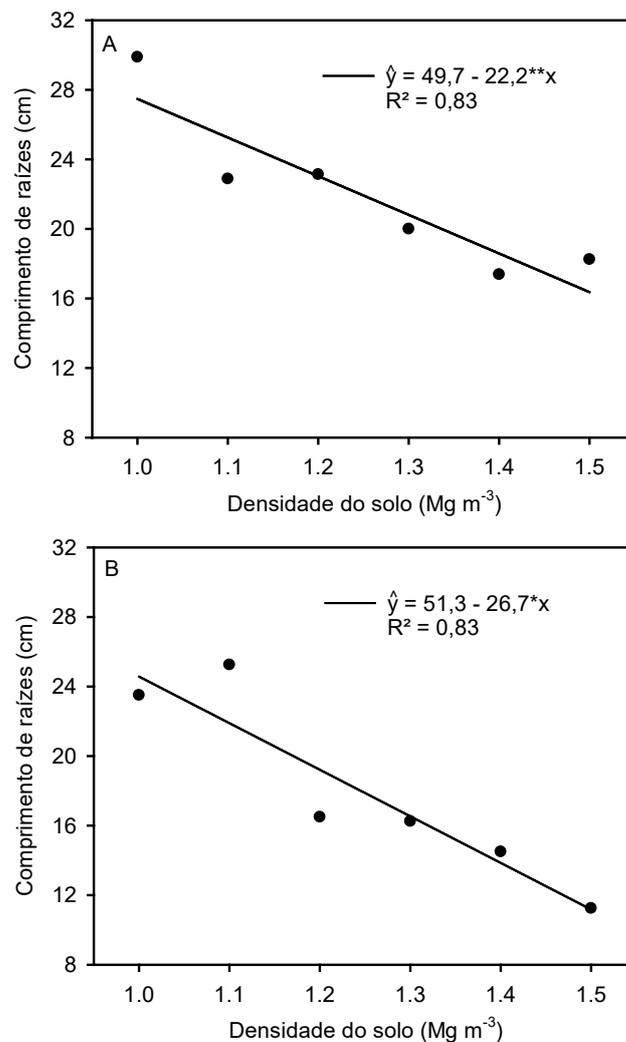


Figura 12 Comprimento de raízes de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

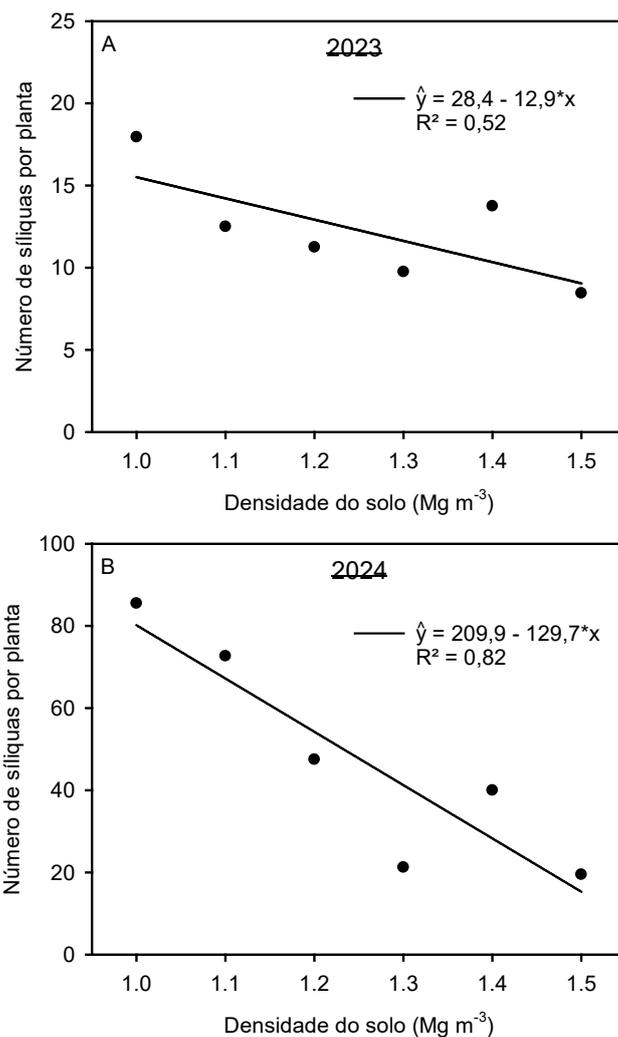


Figura 13 Número de síliquas por planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

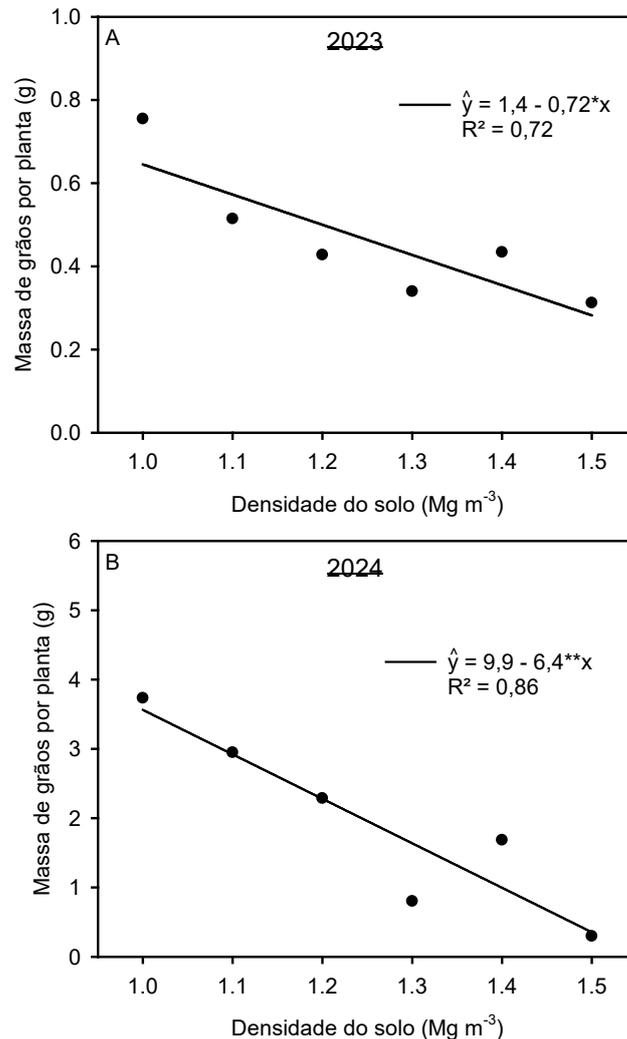


Figura 14 Massa de grãos por planta de canola em 2023 (A) e 2024 (B) em função de níveis de compactação do solo. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

A restrição do crescimento da parte aérea e radicular da canola pelo aumento da densidade do solo refletiu na redução da massa de grãos por planta (Figura 15). Corroborando as análises deste estudo, Oritsejafor *et al.* (2022), ao avaliarem diferentes níveis de compactação do solo na cultura do amendoim, observaram que a raiz principal curta e baixo número de folhas, na densidade de  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  reduziu o potencial das plantas de converter produtos fotossintéticos suficientes em vagens e alta biomassa.

Com o desenvolvimento radicular em profundidade prejudicado em solos compactados as plantas têm limitações na sua taxa de crescimento e

produção, pois nessas condições o volume de solo explorado pelas raízes é menor (Pott *et al.*, 2020).

Normalmente, a canola é considerada uma planta rústica de inverno com capacidade de tolerar geadas e secas (Tomm *et al.*, 2008). Entretanto, observou-se que a cultura, apesar de sua rusticidade, apresentou severas restrições nos componentes da produção. O solo compactado restringe o crescimento radicular e causa um desequilíbrio na relação raiz-parte aérea, consumindo mais energia na produção de novas raízes (Strock, Lynch, 2020).

O fornecimento de água foi realizado pela parte inferior dos vasos a partir floração, pois a cultura apresenta sensibilidade a deficiência hídrica em todas as suas fases de desenvolvimento do ciclo, interferindo significativamente no rendimento de grãos (Angelotti-Mendonça *et al.*, 2016; El Sabagh *et al.*, 2019). O estresse hídrico durante a floração resulta em limitação da fonte para o rendimento de sementes, aborto de vagens e redução na formação de vagens, como foi observado no estudo proposto. Isso provavelmente se deve à suscetibilidade da meiose das células-mãe do pólen aos danos do estresse hídrico (Pradhan *et al.*, 2014). As perdas, caso estivesse em déficit hídrico após a antese, podem chegar até 50 % no rendimento dos grãos, devido ao abortamento de síliquis. Ademais, se ocorrer déficit hídrico no estágio de desenvolvimento dos grãos, isso pode reduzir seu peso individual (Walton *et al.*, 1999; Sinaki *et al.*, 2007).

Redução do crescimento de parte aérea e sistema radicular com aumento da compactação em um latosso argiloso foi relatada com *Stylosanthes* (1,0-1,83 Mg m<sup>-3</sup>; Castagnara *et al.*, 2013), milho (1,28-1,74 Mg m<sup>-3</sup>; Guimarães *et al.*, 2013), culturas de cobertura (1,10-1,90 Mg m<sup>-3</sup>; Lima *et al.*, 2023), cártamo (1,10-1,50 Mg m<sup>-3</sup>; Montiel *et al.*, 2020) e crambe (1,0-1,80 Mg m<sup>-3</sup>; Oliveira *et al.*, 2023).

O número de grãos por síliquis e a massa de mil grãos não foram afetados significativamente pelos níveis de compactação ( $p > 0,05$ ; Tabela 1). Este fato pode indicar que essas variáveis são mais controladas pela variação genética. Corroborando o estudo dos autores Uzun *et al.* (2012), onde mostra que o peso ou a massa das sementes da canola é definido por elementos genéticos e pode sofrer influência de fatores edafoclimáticos.

**Tabela 1.** Número de grãos por siliqua (GS) e massa de mil grãos (MMG) de canola em função de níveis de compactação.

Tratamentos	GS (nº)	GS (nº)	MMG (g)	MMG (g)
	2023	2024	2023	2024
1,0	15,67	13,41	2,78	3,56
1,1	15,71	11,54	2,12	3,56
1,2	15,11	14,23	2,72	2,90
1,3	16,65	9,01	1,63	3,37
1,4	12,76	12,53	2,03	3,20
1,5	19,35	7,84	2,22	1,70
Bloco	0,7332	0,0239	0,6340	0,7971
Tratamentos	0,7595	0,1776	0,2305	0,1219
CV (%)	37,56	55,54	8,14	49,69

Significância estatística foi assumida em  $p < 0,05$ .

O crescimento radicular e também da parte aérea, como massa seca e altura de planta, foram afetados pela compactação do solo (Figura 16 e 17). Em decorrência da menor capacidade de absorção de nutrientes e água a planta apresenta dificuldade de enraizamento. Esses fatores refletem no desenvolvimento da parte aérea (Tormena; Silva; Libardi, 1998; Albuquerque; Sangoi; Ender, 2001; Denardin *et al.*, 2008).



Figura 15 Crescimento radicular da canola nos tratamentos com densidades de 1,0 e 1,5  $Mg\ m^{-3}$ .



Figura 16 Vista lateral do crescimento das plantas em função dos níveis de compactação.

Dauda e Usman (2019) também relataram menor rendimento da soja em mais níveis de compactação do solo, ao realizar experimento com diferentes números de passagens com o trator. Em contrapartida, Hu *et al.* (2019) salientaram que o rendimento da cevada não foi afetado pela compactação.

#### 4.2 Umidade do solo

Os níveis de compactação aumentaram a umidade do solo de forma linear nos sensores 1 e 2, em ambos os anos que o experimento foi conduzido (Figura 18). Esse resultado pode ser explicado pela compactação do solo e a redução da macroporosidade devido ao aumento da compactação. A altura máxima de subida da água capilar é inversamente proporcional ao tamanho dos poros. Quanto maior o poro, menor é a altura de subida da água capilar (Huo *et al.*, 2021). Portanto, o aumento dos níveis de compactação presumidamente diminuiu a macroporosidade do solo e aumentou a microporosidade, o que resultou em uma subida da água capilar.

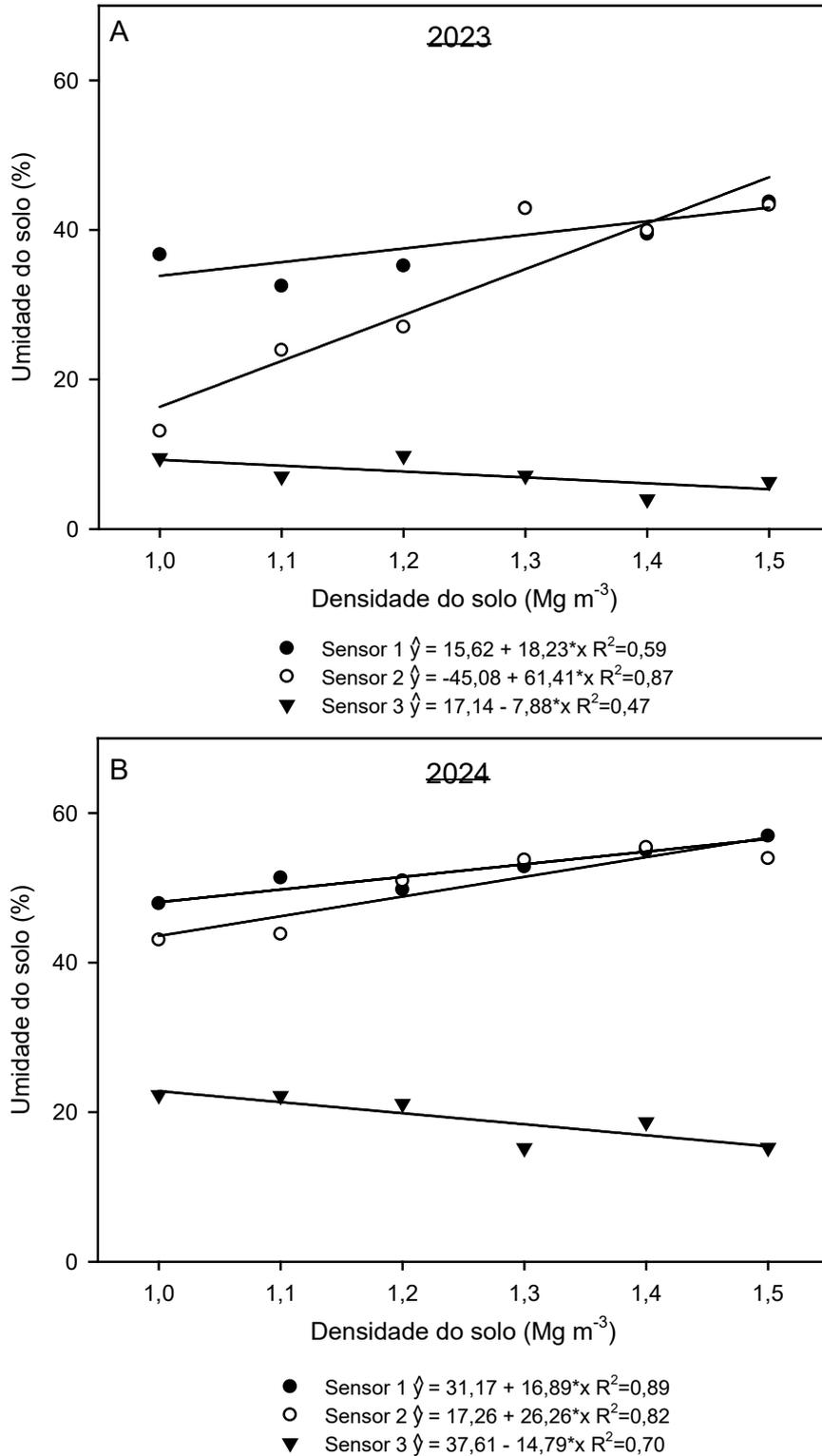


Figura 17 Umidade do solo em função dos níveis de compactação em 2023 (A) e 2024 (B) nos sensores 1, 2 e 3. \*, \*\* Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Por outro lado, a umidade do solo no sensor 3 foi reduzida com o aumento dos níveis de compactação do solo. Tal resultado pode ser devido ao fato de ocorrer uma descontinuidade no espaço poroso, com interferência nos fluxos de água no solo (Kuncoro *et al.*, 2014; Keller *et al.*, 2017).

### **4.3 Análise de correlação**

Os componentes de produção, especialmente o crescimento radicular, número de síliquas por planta e massa de grãos por planta foram negativamente correlacionados com a umidade no sensor 2 em 2023 e 2024. Quanto maior a umidade no sensor 2, maior redução nos componentes da produção da canola foram observados. Correlação negativa entre os componentes da produção e a umidade no sensor 2 em ambos os anos pode ser explicada pela compactação do solo, pois a água estava armazenada nos microporos do solo compactado. Com isso, apesar da maior umidade no sensor 2, a planta não acessou a água para crescimento. Portanto, quanto maior umidade no sensor, maior compactação do solo e, com isso, mais penalizados foram os componentes da produção.

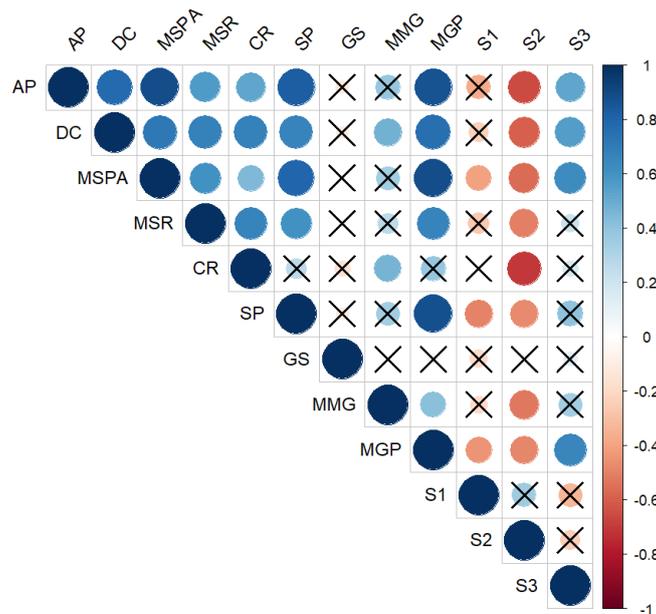


Figura 18 Correlação de Pearson entre os componentes da produção da canola e os sensores de umidade em 2023. × sobre as cores, indica que não há ( $p > 0,05$ ) correlação significativa entre as variáveis. O tamanho do círculo e a tonalidade da cor representam a magnitude e a direção do valor  $r$  da análise de correlação (azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente).

Quanto maior a umidade no sensor 2, maior a redução nos componentes da produção da canola, pois a água estava presa nos microporos do solo compactado e não chegou até o sensor 3. Neste sentido, foram observadas correlações positivas dos componentes da produção da canola com o sensor 3 (Figura 19). Quando a umidade do solo chegou no sensor 3, camada superficial do solo, os componentes da produção foram beneficiados pela umidade. Esse fato ocorreu em níveis de compactação de  $1.0$  e  $1.1 \text{ Mg m}^{-3}$ . Em 2024, apesar de coeficientes de correlação positivos de baixa magnitude, não foram observados efeitos significativos para as correlações entre o sensor 3 e os componentes da produção (Figura 20).

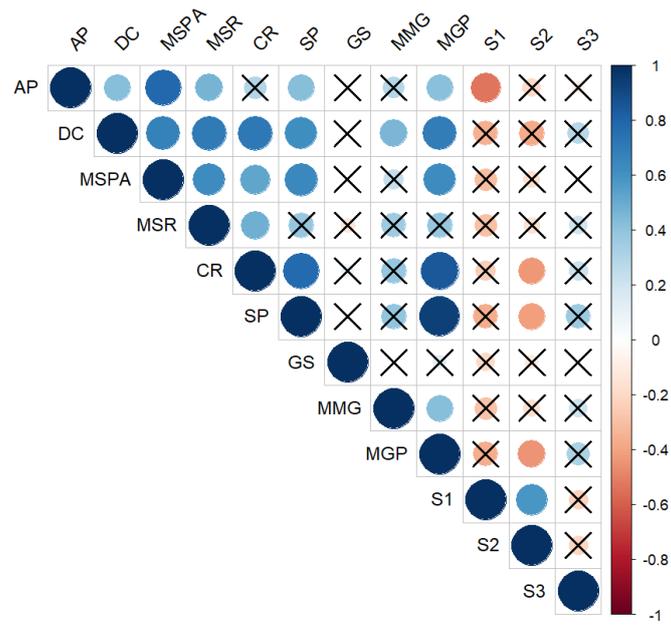


Figura 19 Correlação de Pearson entre os componentes da produção da canola e os sensores de umidade em 2024. x sobre as cores, indica que não existe ( $p > 0,05$ ) correlação significativa entre as variáveis. O tamanho do círculo e a tonalidade da cor representam a magnitude e a direção do valor r da análise de correlação (azul e vermelho representam correlações positivas e negativas, respectivamente).

## 5. CONCLUSÕES

Os níveis de compactação aumentaram a umidade do solo nos sensores 1 e 2. Já no sensor 3, a umidade foi reduzida com o aumento dos níveis de compactação do solo. Correlação negativa do crescimento radicular, número de síliquas por planta e massa de grãos por planta foram encontradas com a umidade no sensor 2. Em contrapartida, foram observadas correlações positivas dos componentes da produção da canola com o sensor 3 (camada descompactada).

Nos maiores níveis de compactação (1,4 e 1,5 Mg m<sup>-3</sup>), embora abaixo de 10 cm de profundidade, foi observado mais quantidade de água retida no solo. No entanto, a planta não conseguiu acessar essa água, pois estava retida nos microporos a um estado de retenção de água no solo superior.

A canola se mostrou muito sensível aos níveis de compactação e os componentes de produção foram afetados negativamente com o aumento da compactação do solo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, H.; LI, J. Impact of water deficit on the development and senescence of tomato roots grown under various soil textures of Shaanxi, China. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 241, 2021.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. ENDER, M. Efeito da integração lavoura pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25, p. 717-723, 2001.

AN, J.; ZHANG, Y.; YU, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 216-223, 2015.

ANGELOTTI-MENDONÇA, Jéssika *et al.* **Canola (Brassica napus L.)**. Piracicaba: ESALQ, 2016.

ARCOVERDE, S. N. S. *et al.* Soil physical attributes and agronomic characteristics relationships of soybean in no-tillage. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 30 (continua), p. 97-110, 2022.

ARCOVERDE, S. N. S. *et al.* Soybean agronomic performance and soil physical attributes under tractor traffic intensities. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n.1, p. 113-120, 2020.

BACQ-LABREUIL, A. *et al.* Cover crop species have contrasting influence upon soil structural genesis and microbial community phenotype. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 7473, 2019.

BAIER, A. C.; ROMAN, E. S. Informações sobre a cultura da canola para o sul do Brasil. In: SEMINÁRIO ESTADUAL DE PESQUISA DE CANOLA, 1, Cascavel. **Anais...Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT**, p. 10, 1992.

BALDOVINO, J. D. J. A.; IZZO, R. Comportamento capilar em siltes sedimentares usando modelo reduzido e altas cargas de sucção. **Holos Environment**, v. 21, n. 2, p. 231–248, 2021.

BALDOVINO, J. D. J. A. *et al.* Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 5, 2020.

BALDOVINO, J. A.; BATISTA, E.; IZZO, R. **Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados: Teoria e Ensaio de Laboratório**. In: Simpósio da prática de engenharia geotécnica na região centro-oeste, 2019.

BALDOVINO, J. A. *et al.* **Influência da porosidade e do coeficiente de permeabilidade saturado na ascensão capilar de um solo arenoso**. In: congresso nacional de geotecnia, p. 16. Jornadas Luso-Espanholas de geotecnia, 6., 2018. **Anais...Ponta Delgada, Portugal**, 2018a.

BALDOVINO, J. A. *et al.* **Análise da ascensão capilar de uma areia em diferentes porosidades.** In: Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. p. 19, 2018. **Anais...** Salvador, Bahia, 2018b.

BALDOVINO, J. A. *et al.* **Análise da ascensão capilar de um solo arenoso.** In: Simpósio da prática de engenharia geotécnica na região centro-oeste. **Anais...** p. 556–562, 2017.

BARETA JUNIOR, E. *et al.* Propriedades físicas do solo em níveis variáveis de compactação do solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, 2021.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019.

BEVILÁQUA, G. A. P.; ANTUNES, I. F.; ZUCHI, J.; MARQUES, R. L. L. **Indicações técnicas para produção de sementes de plantas recuperadoras de solo para a agricultura familiar.** Embrapa Clima Temperado Documentos, p. 43, 2008.

BILIBIO, C. *et al.* Efeito de diferentes níveis de déficit hídrico na cultura da canola. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 35, n. 4, p. 672-684, 2011.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018.

BRAZ, A. J. B. P. *et al.* Adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo em sistema de plantio direto após diferentes culturas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 193-198, 2006.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; GHIRBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 295–303, 2009.

CABRAL, C. E. A. *et al.* Compactação do solo e macronutrientes primários na *Brachiaria brizantha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 362-367, 2012.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **Canola**. Winnipeg, p. 38, 2010.

CARDOSO, R. M. L. *et al.* Doenças de canola no Paraná. Londrina: IAPAR; Cascavel: COODETEC, p.28 (IAPAR. Boletim Técnico, 51; COODETEC. **Boletim Técnico**, 34), 1996.

CASTAGNARA, D. D. *et al.* Crescimento de *Stylosanthes* cv. Campo Grande em diferentes níveis de densidade de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 260-266, 2013.

CHAN, K. Y. *et al.* Agronomic consequences of tractor wheel compaction on clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 13–21, 2006.

CHANCELLOR, W. J. Effects of compaction on soil strength. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M. & TAYLOR, H.M., eds. *Compaction of Agricultural Soils*. St. Joseph: **American Society of Engineering**, p.190-222, 1971.

CHEN, G.; WEIL, Ray R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 17-27, 2011.

CHEN, G.; WEIL, Ray R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant and Soil**, v. 331, p.31-43, 2010.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 161-168, 2005.

CUI, Z.; JING, X.; HAO, J.; DOH, S. Análise da Lei de Migração de Água Capilar de Loess Compactado em Ningxia. **Jornal Polônês de Estudos Ambientais**, v. 30, n. 1, 2021.

DA COSTA, A. C. T. *et al.* Comportamento de dois híbridos de canola cultivados em diferentes épocas na região oeste do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 72498-72510, 2020.

DALMAGO, G. A. *et al.* Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 933 -943, set. 2010.

DAUDA A; USMAN B. Effect of soil compaction and bulk density on the growth and yield of soybean (*Glycine max.*) on sandy clay loam soil of the semi-arid region of Northern Nigeria as influenced by tractor wheel traffic. **Journal of Agriculture and Ecology Research International**. v. 18, n. 1, p. 1–6, 2019.

DE MORI, C.; TOMM, G. O.; FERREIRA, P. E. P. Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, p.36 (Embrapa Trigo. Documentos, 149, 2014).

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 18, p. 33-34, 2008.

DIAS, C. **Simplificação do Plantio Direto reduz eficiência da lavoura**. 2014. Acesso em: 18 de dezembro de 2019, em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1909275/simplificacao-do-plantio-direto-reduz-eficiencia-da-lavoura>.

DOGAN, E. *et al.* Supplemental irrigation effect on canola yield components under semiarid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 98, n.9, p. 1403-1408, 2011.

EL SABAGH, A. *et al.* Effects of drought stress on the quality of major oilseed crops: implications and possible mitigation strategies – a review. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.17, p. 4019-4043, 2019.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos** / Humberto Gonçalves dos Santos, *et al.* – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 356 p. 2018.

FERREIRA, C. J. B. *et al.* Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 3, p. 383-396, 2021.

FERREIRA, A. D. O. *et al.* Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, 1583-1590, 2012.

FIGUEIREDO, D. F. *et al.* Desempenho e morfometria da mucosa de duodeno de frangos de corte alimentados com farelo de canola, durante o período inicial. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p. 1321-1329, 2003.

FILHO, J. F. *et al.* Sensitivity of cotton cultivars to soil compaction. Sensibilidade de cultivares de algodoeiro à compactação do solo. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6 suplemento 1, p. 3645-3654, 2013.

GUIMARÃES, C. *et al.* **Canola: panorama atual e tecnologias de produção no Brasil** (2022).

GUIMARÃES, C. V. *et al.* Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1188-1194, 2013.

HAKANSSON, I. VOORHEES, W. B. Chapter on soil compaction. In: Lal, R. *et al.* **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton, p. 167- 179, 1998.

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

HU W. *et al.* Effects of tillage, compaction and nitrogen inputs on crop production and nitrogen losses following simulated forage crop grazing. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 289, p.106733, 2019.

HUO, W. *et al.* Experimental study on capillary water rise and influencing factors in silty soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 1-16, 2021.

ISHAQ, M. *et al.* Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: I. soil physical properties and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 59, n. 1–2, p. 57–65, 2001.

KELLER, T. *et al.* Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, p. 194, 2019.

KUNCORO, P. H. *et al.* A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: relative gas diffusivity, air permeability, and 91 saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 143, p. 172-179, 2014.

KRUGER, C. A. M. B. *et al.* Arranjo de plantas na expressão dos componentes da produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1448-1453, 2011.

LEITE, L.F.C.; MACIEL, G. A.; DE ARAÚJO, A. S. F. **Agricultura conservacionista no Brasil**. Embrapa, 2014.

LI G.; M. A W. *et al.* Processes and Mechanisms of Multi-Collapse of Loess Roads in Seasonally Frozen Ground Regions: A Review. **Sciences in Cold and Arid Regions**, v. 7, n. 4, p. 456, 2018.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2ªed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 341, 2012.

LIMA, R. S. *et al.* Impactos socioeconômicos e ambientais do uso do aplicativo "mais canola" por stakeholders da cadeia produtiva de canola no Brasil, 2023.

MACEDO V. R. M.; SILVA A. J. N.; CABEDA M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de pré compactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 14, p. 856-862, 2010.

MACHADO, T. M. *et al.* Níveis de compactação e sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo e componentes de produção da soja. **Agrarian**, v. 16, n. 56, e. 17037, 2023.

MCPHEE, J. E. *et al.* Managing soil compaction – A choice of low-mass autonomous vehicle or controlled traffic? **Biosystem Engineering**, v. 195, n. 1, p. 227-241, 2020.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MCCLINCHEY, S. L.; KOTT, L. S. Production of mutants with high cold tolerance in spring canola (*Brassica napus*). **Euphytica**, v. 162, n. 1, p.51 -67, 2008.

MENDONÇA, J. A. *et al.* **Canola (*Brassica napus* L.)**. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, p. 32, 2016.

MION, R. L. *et al.* Tensions from different pressures caused by farm tractor tires. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 63-77, 2016.

MONTIEL, C. B. *et al.* Root and shoot growth in safflower as affected by soil compaction. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 9, p. 1443-1448, 2020.

MORAES, M. T. DE. *et al.* Soil load support capacity increases with time without soil mobilization because of age-hardening phenomenon. **Soil & Tillage Research**, n. 186, p. 128-134, 2019.

MORAES, M.T. DE. *et al.* Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 464-477, 2018.

MORAES, M. T. DE. *et al.* Age-hardening phenomena in an Oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, n. 170, p. 27-37, 2017.

MORAES, M. T. DE; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, n. 155, p. 351-362, 2016.

MORAES, M. T. DE. *et al.* Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014.

MORAES, M. T. DE. *et al.* Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 748-757, 2013.

MOTTER, P. *et al.* Plantio direto, a tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. **Foz do Iguaçu: Parque Itaipu**, v. 144, 2015.

MÜLLER, J. *et al.* Tractive demand, soil mobilization parameters, and corn yield in compacted Oxisol. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 89-96, 2019.

MURRAY, E. J.; SIVAKUMAR V. **Unsaturated soils: a fundamental interpretation of soil behavior**, Wiley – Blackwell, 2010.

NG, C. W. W.; MENZIES B. **Advanced unsaturated soil mechanics and engineering**. Taylor and Francis, New York, USA, 2007.

OECD-Organization for Economic Co-operation and Development. The biology of Brassica napus L. **Office of the Gene Technology Regulator version 2**. 2008.

OLIVEIRA, C. E. S. *et al.* Growth of Crambe under Different Soil Bulk Densities and Water Restriction. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 70, n. 4, p. 63, 2023.

OLIVEIRA, P. D. De. *et al.* Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 1, p. 78-87, 2016.

ORITSEJAFOR, F. O. *et al.* Bulk density: An index for measuring critical soil compaction levels for groundnut cultivation. **Open Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 79-92, 2022.

PACHECO, L. P. *et al.* Shoot and root development of brachiaria grass (*Urochloa ruziziensis*) under different levels of soil density. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 10, p. 1424-1428, 2016.

PASSIOURA, J. B. Soil conditions and plant growth. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 2, p. 311–318, 2000.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, p. 478, 2012.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage Research**, 102:242-254, 2009.

RYKEN, N. *et al.* Soil erosion rates under different tillage practices in central Belgium: New perspectives from a combined approach of rainfall simulations and <sup>7</sup>Be measurements. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 29-37, 2018.

SANCHES, A. C. *et al.* Produtividade da canola sob irrigação e doses de adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.7, p.688–693, 2014.

SARTO, M. V. M. *et al.* Safflower root and shoot growth affected by soil compaction. **Bragantia**, v. 77, p. 348-355, 2018

SCHEUERMANN A.; BIEBERSTEIN A. Determination of the Soil Water Retention Curve and the Unsaturated Hydraulic Conductivity from the Particle Size Distribution. **Experimental unsaturated soil mechanics**.; Springer, 421, 2007.

SIDHU, D.; DUIKER, S. W. Soil compaction in conservation tillage: Crop impacts. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 5, p. 1257–1264, 2006.

SILVA, P. L. F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e revisão de nutrientes por plantas: Uma bibliografia. **Meio Ambiente**, v. 3, p. 24–33, 2021.

SILVA, A. J. N. D.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, VR da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 239-249, 2000.

SINAKI, J. M. *et al.* The effects of water deficit growth stages of canola (Brassica napus L.). **American Eurasian Journal of Agricultural & Environment Sciences**, v. 2, n. 4, p. 417-422, 2007.

SOANE, B. D.; BALL, B. C.; ARVIDSSON, J.; BASCH, G.; MORENO, F.; ROGER-ESTRADE, J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 118, p. 66-87, 2012.

SOUZA, W. J. O. *et al.* Machine traffic and soil penetration resistance in guava tree orchards. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 980-986, 2018.

SOUZA, R. A. F. *et al.* **Produção de grãos de canola em função de épocas de semeadura em dois anos de cultivo.** In: Congresso Brasileiro de Mamona, 4 & Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 1, **Anais...** Campina Grande: EMBRAPA Algodão, p. 1454-1458, 2010.

SPLIETHOFF, J. *et al.* Implicação de grades amostrais na determinação da resistência do solo à penetração e indicação de manejo. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020.

STRECK, E.V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul.** 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, p. 222, 2008.

STROCK, C. F.; LYNCH, J. P. Crescimento secundário de raízes: um componente inexplorado da aquisição de recursos do solo. **Annals of Botany**, v. 126, n. 2, p. 205-218, 2020.

SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2958, 2022.

TAVAKOLI DASTJERDI M.; HABIBAGAH G.; NIKOOEE E. Effect of Confining Stress on Soil Water Retention Curve and Its Impact on the Shear Strength of Unsaturated Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 13, n. 5, 2014.

TOMM, G. O. *et al.* **Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009.

TOMM, G. O. Canola. **Revista Plantio Direto**, v. 5, 2008.

TOMM, G. O. Sistema de Produção: Cultivo de Canola. **Embrapa Trigo**, 2007.

TOMM, G. O. **Situação em 2005 e perspectivas da cultura de canola no Brasil e em países vizinhos.** Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2005.

TOMM, G. O. *et al.* **Efeito de épocas de semeadura o desempenho de genótipos de canola em Três de Maio, RS.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, p.11, 2004.

TOMM, G. O. **Manual para cultivo de canola: indicações para cultivo de canola no Rio Grande do Sul.** Santa Rosa: Camera Alimentos, p. 22, 2003.

TOMM, G. O. **Situação atual e perspectivas da canola no Brasil.** Embrapa Trigo, 2000.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 573-581, 1998.

TORRES, J. L. R. *et al.* Atributos físicos de um Latossolo Vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n. 2, p. 428-437, 2015.

TREVISAN, R. G. *et al.* Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, v. 76, p. 145-154, 2017.

UNGER, PAUL W.; KASPAR, THOMAS C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy journal**, v. 86, n. 5, p. 759-766, 1994.

UZUN, B.; YOL, E.; FURAT, S. The influence of row and intra-row spacing to seed yield and its components of winter sowing canola in the true Mediterranean type environment. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v.18, p. 83-91, 2012.

VALADÃO JUNIOR, D. D. *et al.* Development of castor bean in compacted soil. 2022.

VALADÃO, F. C. A. *et al.* Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 243-255, 2015.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 213-223, 2011.

VIEIRA, M. J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. (Londrina, PR). **Plantio direto no Estado do Paraná** Londrina, p. 19-32. (IAPAR. Circular, 23), 1981.

VOORHEES, W. B. Long-term effects of subsoil compaction on yield of maize. **Advances in Geo Ecology**, v. 32, p. 331–338, 2000.

XU X. *et al.* Strength and Deformation Characteristics of Silty Clay under Frozen and Unfrozen States. **Cold Regions Science and Technology**, 2020.

WALTON, G. *et al.* Phenology, physiology, and agronomy. In: INTERNATIONAL RAPSEED CONGRESS, 10., 1999, Canberra. **Proceedings...** Canberra: Regional Institute, 1999.

WHITMORE, A. P. *et al.* Estimating soil strength in the rooting zone of wheat. **Plant and Soil**, v. 339, n. 1, p. 363–375, 2011.

ZHANG X. *et al.* Experimental Investigation of Water Migration Characteristics for Saline Soil. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 28, n. 3, p. 1495, 2019.

ZHANG Q. *et al.* Influence of Soil Moisture Hysteresis on the Functioning of Capillary Barriers. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 9, p.1369, 2009.