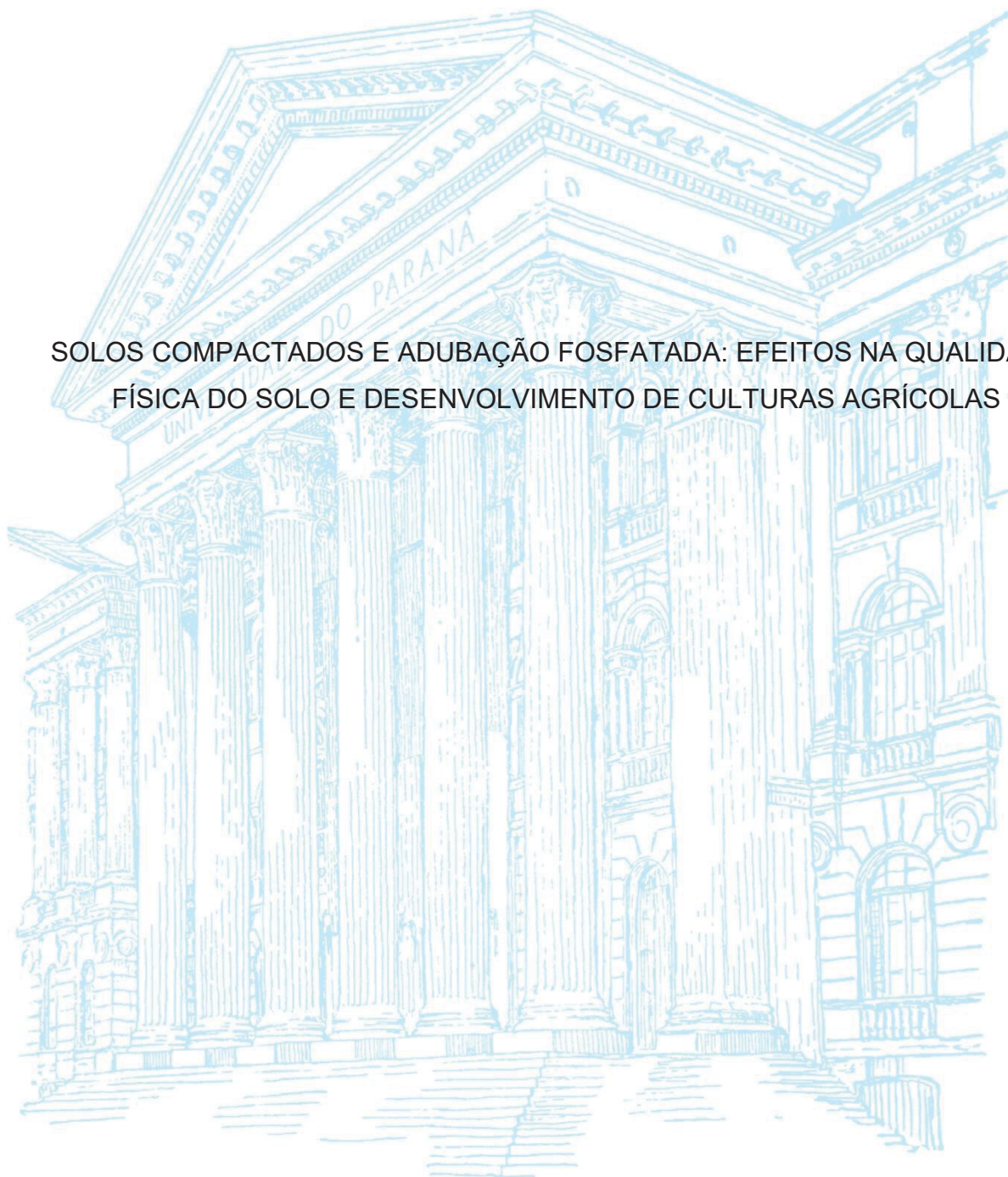


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO RUBEN VIERA FARIÑA

SOLOS COMPACTADOS E ADUBAÇÃO FOSFATADA: EFEITOS NA QUALIDADE  
FÍSICA DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DE CULTURAS AGRÍCOLAS



CURITIBA

2025

PEDRO RUBEN VIERA FARIÑA

SOLOS COMPACTADOS E ADUBAÇÃO FOSFATADA: EFEITOS NA QUALIDADE  
FÍSICA DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DE CULTURAS AGRÍCOLAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência  
do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Auler

Coorientador: Prof. Dr. Filipe Behrends Kraemer

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Viera Fariña, Pedro Ruben

Solos compactados e adubação fosfatada: efeitos na  
qualidade física do solo e desenvolvimento de culturas agrícolas /  
Pedro Ruben Viera Fariña. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do  
Solo.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Euler

Coorientador: Prof. Dr. Filipe Behrends Kraemer

1. Compactação do Solo. 2. Conservação do Solo. 3. Fixação  
de Fósforo. I. Euler, André Carlos. II. Kraemer, Filipe Behrends.  
III. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação  
em Ciência do Solo. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **PEDRO RUBEN VIERA FARIÑA**, intitulada: **SOLOS COMPACTADOS E ADUBAÇÃO FOSFATADA: EFEITOS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DE CULTURAS AGRÍCOLAS**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRÉ CARLOS AULER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Maio de 2025.

  
ANDRÉ CARLOS AULER  
Presidente da Banca Examinadora

  
RACHEL MUYLAERT LOCKS GUIMARÃES  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ - CAMPUS PATO BRANCO)

  
ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
OSVALDO GUEDES FILHO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esta conquista aos meus filhos, que, mesmo sentindo minha ausência, foram minha maior fonte de força e inspiração ao longo deste caminho.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos amigos que fiz ao longo desta jornada, especialmente àqueles que caminharam comigo nos últimos anos e tornaram esta etapa desafiadora muito mais leve e prazerosa.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela oportunidade de realizar este curso de doutorado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Carlos Auler, pela confiança, respeito e constante incentivo ao longo dessa jornada. Mais do que um orientador, foi um verdadeiro amigo, sempre presente com palavras de apoio, orientação sensível e um papel fundamental na minha formação pessoal e acadêmica.

Ao Prof. Dr. Filipe Kraemer, da Universidade de Buenos Aires, pelo acolhimento, ensinamentos e apoio durante o período de doutorado sanduíche.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, que sempre se mostraram disponíveis e solícitos na solução de dúvidas e desafios acadêmicos.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR, pelo ambiente profissional, cordial e acolhedor, que muito contribuiu para minha permanência.

Às técnicas de laboratório Fabiane, Carla, Maria e Josiane, pelo auxílio dedicado nas diversas etapas das atividades experimentais.

À Eduarda, Anna, Guilherme e Horácio pela amizade e pelo apoio na digitalização dos dados experimentais em planilhas eletrônicas.

À Victoria, Querolem, Girogira e Jessica, pelo auxílio prestado nos trabalhos de laboratório e de campo.

Aos dedicados funcionários da Fazenda Canguiri, pelo auxílio prestado na aplicação de produtos fitossanitários para o controle de pragas e doenças ao longo da condução do experimento.

Ao meu grupo de pesquisa GEIES, pela presença constante e pelo apoio nos momentos mais relevantes da condução deste experimento

## RESUMO

A compactação do solo, induzida pelo tráfego de máquinas agrícolas, compromete funções essenciais do solo, como fluxo de água, aeração, ciclagem de nutrientes, produtividade das culturas e habitat de organismos edáficos. Além disso, dificulta a absorção de fósforo pelas plantas, ao restringir o crescimento radicular e reduzir o movimento difusivo do nutriente. Este estudo avaliou os efeitos de diferentes graus de compactação e doses de  $P_2O_5$  sobre atributos físicos e químicos do solo e o desempenho de culturas sob sistema de plantio direto. Compactações elevadas (GC de 95%) aumentaram a resistência à penetração e a densidade do solo, reduzindo porosidade e fluxo de água. A adubação fosfatada mitigou parcialmente esses efeitos, especialmente em compactações moderadas (80–90%), favorecendo a disponibilidade de P, a condutividade hidráulica ( $K_{sat}$ ), a condutividade de ar ( $K_{ar}$ ), o acúmulo de biomassa e a produtividade de milho e feijão. Paralelamente, avaliou-se a construção de Tecnosolos como alternativa para a recuperação de áreas degradadas. Foram comparados um Tecnosolo (mistura de solo descarte e bio sólidos) e um solo orgânico convencional, com dois níveis de compactação. O Tecnosolo apresentou menor densidade aparente, maior estabilidade de agregados, maior hidrofobicidade e maiores teores de fósforo, nitrogênio, condutividade elétrica e pH, especialmente nas camadas superficiais. A biomassa seca foi superior no Tecnosolo ( $10,48 \text{ t ha}^{-1}$ ), com redução expressiva sob compactação. Esses resultados destacam a viabilidade dos Tecnosolos como substratos produtivos e sustentáveis, com desempenho físico-químico superior ao solo convencional, desde que manejados com atenção à compactação. Portanto, tanto em solos agrícolas quanto em Tecnosolos, o grau de compactação é um fator determinante para a eficiência da adubação, a dinâmica de nutrientes e o desempenho das culturas.

**Palavras-chave:** conservação de solo; qualidade física do solo; estabilidade estrutural; fósforo; biomassa.



## ABSTRACT

Soil compaction induced by agricultural machinery traffic compromises essential soil functions such as water flow, aeration, nutrient cycling, crop productivity, and edaphic organism habitat. Additionally, it hampers phosphorus uptake by plants by restricting root growth and reducing the diffusive movement of this nutrient in the soil profile. This study evaluated the effects of different compaction levels and  $P_2O_5$  doses on soil physical and chemical attributes, as well as crop performance under no-till systems. Severe compaction (95%) increased soil penetration resistance and bulk density, reducing porosity and water flow. Phosphorus fertilization partially mitigated these effects, especially under moderate compaction (80–90%), enhancing P availability, hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ), air conductivity ( $K_{ar}$ ), biomass accumulation, and maize and bean yield. Concurrently, the construction of Technosols was assessed as an alternative for the recovery of degraded areas. A Technosol (composed of discarded soil layers and class B biosolids) and a conventional organic soil were compared under two compaction levels. The Technosol showed lower bulk density, greater aggregate stability, higher hydrophobicity, and increased phosphorus, nitrogen, electrical conductivity, and pH especially in the surface layers. Dry biomass was higher in the Technosol ( $10.48 \text{ t ha}^{-1}$ ), with notable reduction under compaction. These results highlight the viability of Technosols as productive and sustainable substrates, with superior physical-chemical performance compared to conventional soils, provided compaction is properly managed. Therefore, in both agricultural soils and Technosols, compaction degree is a key factor for fertilization efficiency, nutrient dynamics, and crop performance.

**Keywords:** soil conservation; soil physical quality; structural stability; phosphorus; biomass.



## SUMÁRIO

|            |                                                                                                                                                                                 |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>  | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                                         | <b>11</b> |
| <b>2</b>   | <b>CAPÍTULO I: COMPACTAÇÃO DO SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA: EFEITOS SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS, DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS SOB PLANTIO DIRETO. ....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1        | RESUMO .....                                                                                                                                                                    | 19        |
| 2.2        | ABSTRACT .....                                                                                                                                                                  | 19        |
| <b>2.3</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                                         | <b>19</b> |
| <b>2.4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                                                                                  | <b>21</b> |
| 2.4,1      | LOCAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO DE CAMPO .....                                                                                                                                  | 21        |
| 2.4,2      | AMOSTRAGENS, AVALIAÇÕES E ANÁLISES DE PLANTAS .....                                                                                                                             | 25        |
| 2.4,3      | ANÁLISE DE FÓSFORO NAS PLANTAS .....                                                                                                                                            | 26        |
| 2.4,4      | ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....                                                                                                                                                      | 27        |
| <b>2.5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                                                                                                         | <b>28</b> |
| 2.5,1      | RESPOSTAS ESTÁTICAS DA RP ENTRE OS GC E ADUBAÇÕES.....                                                                                                                          | 28        |
| 2.5,2      | RESPOSTAS TEMPORAIS E ESPACIAIS DA RP.....                                                                                                                                      | 30        |
| 2.5,3      | DISPONIBILIDADE P NO SOLO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO .....                                                                                                     | 32        |
| 2.5,4      | LIMITAÇÕES NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E NUTRIÇÃO DE FÓSFORO NAS PLANTAS DECORRENTES DA INTERAÇÃO ENTRE A COMPACTAÇÃO DO SOLO E A ADUBAÇÃO FOSFATADA. ....                             | 38        |
| <b>2.6</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                                                          | <b>46</b> |
| 2.6,1      | FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO.....                                                                                                           | 46        |
| 2.6,2      | DINÂMICA DO P EM SOLOS COMPACTADOS E NAS PLANTAS.....                                                                                                                           | 47        |
| 2.6,3      | CONSEQUÊNCIAS DA COMPACTAÇÃO E MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA SOBRE A PRODUÇÃO VEGETAL.....                                                                                       | 49        |
| <b>2.7</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                                                                                                         | <b>55</b> |
| <b>2.8</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                                        | <b>56</b> |
| <b>3</b>   | <b>CAPÍTULO II: INFLUÊNCIA DE GRAUS DE COMPACTAÇÃO E DOSES DE ADUBAÇÃO FOSFATADA NOS ATRIBUTOS ESTRUTURAIS E NO FLUXO DE ÁGUA E AR NO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b> | <b>60</b> |
| 3.1        | RESUMO .....                                                                                                                                                                    | 60        |
| 3.2        | ABSTRACT .....                                                                                                                                                                  | 61        |

|            |                                                                                                                                                   |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.3</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                           | <b>61</b>  |
| <b>3.4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                                                    | <b>64</b>  |
| 3.4,2      | COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS E DETERMINAÇÃO DE<br>PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....                                                            | 65         |
| 3.4,3      | ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....                                                                                                                        | 67         |
| <b>3.5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                                                                           | <b>68</b>  |
| 3.5,1      | DENSIDADE DO SOLO .....                                                                                                                           | 68         |
| 3.5,2      | DISTRIBUIÇÃO E CONTINUIDADE DO ESPAÇO POROSO DO SOLO ....                                                                                         | 70         |
| 3.5,3      | FLUXOS DE ÁGUA E AR NO SOLO.....                                                                                                                  | 91         |
| 3.6        | DISCUSSÃO .....                                                                                                                                   | 98         |
| <b>3.7</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                                                                           | <b>109</b> |
| <b>3.8</b> | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                           | <b>109</b> |
| <b>4.</b>  | <b>CAPITULO III: QUALIDADE FÍSICA DO TECNOSOLO E HORIZONTE A<br/>SOB ÁREAS DEGRADADAS E COM DIFERENTES GRAUS DE COMPACTAÇÃO<br/>DE SOLO. ....</b> | <b>115</b> |
| <b>4.3</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                           | <b>117</b> |
| <b>4.4</b> | <b>MATERIAIS E METODOS. ....</b>                                                                                                                  | <b>119</b> |
| 4.4,2      | CONDUÇÃO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÕES DA COBERTURA<br>VEGETAL.....                                                                                   | 120        |
| 4.4,3      | AMOSTRAGENS E AVALIAÇÕES DE SOLO.....                                                                                                             | 121        |
| 4.4,4      | ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....                                                                                                                        | 122        |
| <b>4.5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                                                                           | <b>122</b> |
| 4.5,1      | MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO .....                                                                                                               | 122        |
| 4.5,2      | ESTRUTURA DO SOLO .....                                                                                                                           | 123        |
| <b>4.6</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                            | <b>130</b> |
| <b>4.7</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                                                                                                             | <b>137</b> |
| <b>4.8</b> | <b>REFERENCIAS .....</b>                                                                                                                          | <b>137</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem se tornado um fenômeno cada vez mais frequente, em grande parte devido ao uso intensivo de máquinas agrícolas, sendo atualmente reconhecida como uma das principais ameaças à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Zijian *et al.*, 2024). A compactação mecânica do solo leva à perda de macroporos do solo e conectividade dos poros, e isso é atribuível à compressão vertical e cisalhamento lateral (Schjønning *et al.*, 2015; Keller *et al.*, 2019). O grau de compactação do solo e diminuição do volume dos poros depende da força aplicada, assumindo que o conteúdo de água permanece constante (Chen *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2015). Assim, a compactação do solo pode reduzir a infiltração de água, aumentar a resistência à penetração de raízes, impactar negativamente na absorção de água e nutrientes pelas plantas e, finalmente, restringir o crescimento das culturas (Bengough *et al.*, 2011; Poeplau *et al.*, 2016).

A redução na densidade de raízes compromete o desenvolvimento das culturas em função da baixa absorção de água e tende a induzir a estresse hídrico nas plantas, causando menor área foliar, cutícula mais espessa, condutância estomática reduzida, menor absorção de água pela raiz com sistemas radiculares extensos e profundos e manutenção da elasticidade da parede celular (Driouich *et al.*, 2013). Estresse oxidativo, causada por espécies reativas de oxigênio como consequências secundárias típicas de estresses ambientais, é muito perigosa para os componentes celulares e deve ser controlada com precisão. A desnaturação do DNA, aminoácidos e outras proteínas funcionais e estruturais, oxidação da clorofila e peroxidação lipídica são efeitos bem conhecidos das EROs (Suzuki e Mittler, 2006). Como consequência, as células vegetais desenvolveram complexos mecanismos antioxidantes enzimáticos (SOD, CAT e APX) e não enzimáticos (ácido ascórbico, glutatona e carotenóides), para se protegerem desses compostos tóxicos (LISAR *et al.*, 2012).

A deficiência de fósforo na planta, somado a impedância mecânica causa desenvolvimento prematuro dos órgãos reprodutivos das plantas e a inibição do crescimento da planta devido à redução da capacidade fotossintética das folhas e proteínas que regulam o enriquecimento de CO<sub>2</sub>, o ciclo de Calvin e o sistema de transporte de elétrons (Neocleous, e Avvas, 2019; Sun *et al.*, 2021). O processo de acúmulo de osmólitos de baixo peso molecular é conhecido como ajuste osmótico, que incluem prolina e outros aminoácidos, ácidos orgânicos e polióis que também

desempenham papéis fundamentais na satisfação das funções das plantas a qualquer tipo de estresse (Lisar *et al.*, 2012) e alta impedância mecânica (Bengough *et al.*, 2006).

A preocupação com a condição física de solos compactados aliado a fertilização de P foi levantada entre as décadas de 80 a 90 (Hoffmann; Jungk, 1995; Nadian *et al.*, 1997; Shierlaw; Alston, 1984), encontrando-se, porém, resultados diversos sobre a interação entre os dois fatores. A partir dos anos 2000, alguns pesquisadores buscaram a obtenção das relações entre adubação fosfatada e compactação do solo sobre o desenvolvimento das plantas (Barzegar *et al.*, 2006; Hamza; Anderson, 2005; Miransari *et al.*, 2009; Nadian *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2018; Valadão *et al.*, 2015), porém as respostas continuaram controversas, pois poucos consideram os efeitos sobre todos os atributos do solo.

Segundo Ebeling *et al.* (2017), o impacto do tráfego de máquinas na dinâmica do P e da fosfatase ácida, em diferentes localidades e espaços de tempo, não apresentou influência entre as atividades enzimáticas na melhoria da recuperação estrutural do solo compactado. Em estudo mais recente, Wang *et al.* (2021), sugeriram que a restrição do crescimento do trigo em resposta a um impedimento mecânico é dependente do suprimento de P, em ensaios de laboratório, levantando a necessidade de considerar o manejo conjunto entre propriedades físicas e nutricionais do solo na prática agrícola. A melhor adaptação da raiz à impedância mecânica pode contribuir para o desenvolvimento de culturas com maior capacidade de explorar solos compactados e penetrar em horizontes profundos do solo, melhorando assim a aquisição de água e nutrientes (Wang *et al.*, 2020). Raízes finas com um diâmetro ligeiramente menor que os pequenos poros do solo podem alongar nos espaços porosos texturais e podem não ser afetadas pelo aumento da resistência do solo quando há uma proporção suficientemente grande de pequenos poros (Jin *et al.*, 2013, Bodner *et al.*, 2014).

Alguns autores descobriram que plantas com alta proporção de raízes laterais e adventícias de pequeno diâmetro exploram um grande volume de solo e têm uma grande zona radicular ativa em solos com alta resistência a penetração (Fukao E Bailey-Serres, 2004, Colombi E Walter, 2017). Nas gramíneas ao aumentar a proporção de raízes finas as plantas diminuem o custo energético para construção de raízes, permitindo assim o desenvolvimento de um sistema radicular em solo compactado (OSTONEN *et al.*, 2007, Olmo *et al.*, 2014), pois o custo energético do

alongamento da raiz aumenta com o aumento da resistência à penetração (Colombi e Keller, 2019). Ao reduzir esse custo energético da exploração do solo, podem melhorar a penetração das raízes em subsolo, sustentando a captura de água e nutrientes em solos compactados (Lynch, 2019). Assim, a maior distribuição espacial das raízes no solo tem impacto significativo na capacidade da cultura em absorver nutrientes e água, principalmente em solos compactados (Schneider *et al.*, 2019).

Como um importante elemento de baixa mobilidade no solo, a disponibilidade de P desempenha um papel importante na alteração do desenvolvimento radicular. Pesquisas em *Arabidopsis* sp. demonstraram que a baixa disponibilidade de P inibe o crescimento das raízes primárias enquanto estimula a formação e o alongamento das raízes laterais (Ruiz *et al.*, 2015). Em culturas de cereais como milho (LI *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2020) e arroz (Wissuwa, 2003), não há redução no alongamento da raiz primária em resposta à privação de P. Além disso, a deficiência de P mostrou aumentar a proporção de raízes finas, bem como o comprimento específico da raiz (Lyu *et al.*, 2016; Wen *et al.*, 2019). A redução do crescimento da parte aérea causada pela baixa oferta de P tem sido amplamente demonstrada e inclui a redução do número de perfilho (Luquet *et al.*, 2015).

## REFERÊNCIAS

- ALAMEDA, D; VILLAR, R. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions. ***Environmental and Experimental Botany***, v.79, p. 49-57, 2012
- BARZEGAR, A. R; NADIAN. H; HEIDARI. F; HERBERT SJ. HASHEMI. A.M. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. ***Soil and Tillage Research***, v. 87, n. 2, p. 155–162, 2006.
- BENGOUGH, A. G., MCKENZIE, B. M., HALLETT, P. D., & VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. ***Journal of experimental botany***, v. 62, n.1, p. 59-68, 2011
- 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, p. 437-447, 2007.
- BATES, L. S. *et al.* Rapid determination of free proline for water-stress studies. ***Plant and soil***, v. 39 n.1, p. 205-207, 1973.

BRADFORD, M.M. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing principle of protein-dye binding. ***Anal Biochem.*** v.72, p. 248-254, 1976.

BAGARELLO, V. *et al.* Simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. ***Soil Science Society of America Journal***, Madison, v. 68, n.1, p. 66-73, 2004.

BODNER, G. *et al.* Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. ***Plant and Soil***, v. 380 n.1, p.133-151, 2014.

BRADFORD, Joe M. Penetrability. *Methods of Soil Analysis: Part 1* ***Physical and Mineralogical Methods***, v. 5, p. 463-478, 1986.

CHEN, G., *et al.* Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. ***Soil and Tillage Research***, v.136, p. 61-69, 2014.

COLOMBI, T. and KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction. A plant eco-physiological perspective. ***Soil and Tillage Research***, v. 191, p. 156-161, 2019.

COELHO FILHO. *et al.* "The involvement of gibberellin signalling in the effect of soil resistance to root penetration on leaf elongation and tiller number in wheat." ***Plant and Soil***, v. 37.1 n.1, p. 81-94, 2013.

CORREA, J. *et al.* "Soil compaction and the architectural plasticity of root systems." ***Journal of experimental botany***, v.70 n. 21, p. 6019-6034, 2019.

COLOMBI, T., and WALTER, A. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. ***Frontiers in plant science***, v8, p. 420, 2017.

CORRÊA J.C. *et al.* Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciada pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. ***Pesquisa agropecuária Brasileira***. Brasília, v.39, n.12, p.1231-1237, 2004.

DEL LONGO, O. T. *et al.* Antioxidant defenses under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. ***Plant Cell Physiol.*** v.34, p.1023-1028, 1993.

DREYER, JULIAN, and HANS G. EDELMANN. Root cap-mediated evaluation of soil resistance towards graviresponding roots of maize (*Zea mays* L.) and the relevance of ethylene. ***Annals of botany***, v. 122, n. 5, p. 791-800, 2018.

DRIOUICH, A. *et al.* Root border cells and secretions as critical elements in plant host defense. ***Current Opinion in Plant Biology***, v. 16, n. 4, p. 489-495, 2013.

EBELING, C. *et al.* Evidence for increased P availability on wheel tracks 10 to 40 years after forest machinery traffic. ***Geoderma***, v. 297, p. 61–69, 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo. Centro Nacional de Levantamento e Conservação do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 212, 1997.

FUKAO, T, and BAILEY-SERRES, J. Plant responses to hypoxia—is survival a balancing act. **Trends in plant science**, v. 9, n. 9, p. 449-456, 2004.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. *Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions*. 2005.

HOFFMANN, C. and JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. **Plant and Soil**, v. 176, n. 1, p. 15–25, 1995.

HU, W. *et al.* Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. **Geoderma**, v. 395, p. 115035, 2021.

JIANG, C. *et al.* Phosphate starvation root architecture and anthocyanin accumulation responses are modulated by the gibberellin-DELLA signaling pathway in Arabidopsis. **Plant physiology**, v.145, n. 4, p. 1460-1470, 2007.

JIN, K. *et al.* How do roots elongate in a structured soil. **Journal of experimental botany**, v. 64, n.15, p. 4761-4777, 2013.

JIN, K. *et al.* Shaping an optimal soil by root–soil interaction. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 10, p. 823-829, 2017.

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, p. 104293, 2019.

LI, Z. *et al.* Phosphate starvation of maize inhibits lateral root formation and alters gene expression in the lateral root primordium zone. **BMC plant biology**, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2012.

LUQUET, D. *et al.* Plasticidade fenotípica de mudas de arroz: caso de deficiência de fósforo. **Plant Production Science**, v. 8, n. 2, p. 145-151, 2005.

LYNCH, J. P. Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. **New phytologist**, v.223, n. 2, p. 548-564, 2019.

LYU, Y. *et al.* Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. **Frontiers in plant science**, v. 7, 2016.

LISAR, S. Y. *et al.* Causes, effects and responses. **Water stress**, v. 25, n. 1, p. 33, 2012.

MACHADO E. C. *et al.* Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, DF, v. 40, n. 12, p. 1161- 1170, 2005.



MANABE, P. M. S. *et al.* Características fisiológicas de feijoeiro em competição com plantas daninhas. **Embrapa Milho e Sorgo**, 2016. Disponível em: ALICE.

MIRANSARI, M. *et al.* Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 282–290, 2009.

MESSER, M. Interference by amino acids and peptides with the photometric estimation of proline. **Analytical Biochemistry**, v. 2, p. 353-359, 1961.

MOYLES, I. R. *et al.* Quasi-steady uptake and bacterial community assembly in a mathematical model of soil-phosphorus mobility. **Journal of Theoretical Biology**, v. 509, p.110-530, 2021.

MASLE, J., G. D.; FARQUHAR, and R. M. GIFFORD. Growth and carbon economy of wheat seedlings as affected by soil resistance to penetration and ambient partial pressure of CO<sub>2</sub>. **Functional Plant Biology**, v. 17, n. 4, p. 465-487, 1990.

MACEDO, W.R. *et al.* Unravelling the physiologic and metabolic action of thiamethoxam on rice plants. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 107, n. 2, p. 244-249, 2013.

NADIAN, H. *et al.* Effects of soil compaction on plant growth, phosphorus uptake and morphological characteristics of vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of *Trifolium subterraneum*. **New Phytologist**, v. 135, n. 2, p. 303–311, 1997.

NEOCLEOUS, D; SAVVAS, D. The effects of phosphorus supply limitation on photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and mineral nutrition in lettuce grown in a recirculating nutrient solution. **Scientia Horticulturae**, v. 252, p. 379-387, 2019.

NADIAN, H. *et al.* Soil compaction, organic matter, and phosphorus addition effects on growth and phosphorus accumulation of clover. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, n. 9–10, p. 1327–1335, 2005.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. 2019. **Environmental Engineering for the 21 st Century: Addressing Grand Challenges**. Washington, DC: The National Academies Press.

NUNES MR. *et al.* Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, p. 259–260, 149–155, 2015.

OLMO, M. *et al.* Drought changes the structure and elemental composition of very fine roots in seedlings of ten woody tree species. Implications for a drier climate. **Plant and Soil**, v. 384, n. 1, p. 113-129, 2014.

OSTONEN, I. *et al.* Specific root length as an indicator of environmental change. **Plant Biosystems**, v. 141, n. 3, p. 426-442, 2007.

OKAMOTO, T. *et al.* Omeprazole enhances mechanical stress-induced root growth reduction in *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Cell Physiology**, v. 59, n. 8, p. 1581-1591, 2018.

POEPLAU, C. *et al.* Opposing effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial metabolism and the implications for soil carbon storage. ***Soil Biology and Biochemistry***, v. 100, p. 83-91, 2016.

POTOCKA, IZABELA, and JOANNA SZYMANOWSKA-PUŁKA. "Morphological responses of plant roots to mechanical stress." ***Annals of botany***, v. 122, n. 5, p. 711-723, 2018.

PAULETTI, V; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2. ed. Curitiba: Editora Cubo, v. 1, p. 289, 2019.

RODRÍGUEZ, D. *et al.* Effects of phosphorus nutrition on tiller emergence in wheat. ***Plant and Soil***, v. 209, n. 2, p. 283-295, 1999.

ROSOLEM, C. A., and PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. ***Soil use and Management***, v. 33, n.1, p. 141-152, 2017.

da ROSA, D. P. *et al.* Chiselling and wheeling on sandy loam long-term no-tillage soil: compressibility and load bearing capacity. ***Soil Research***, v. 59, n. 5, p. 488-500, 2021.

SCHJØNNING, P. *et al.* Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. ***Soil Research***, v. 55, n. 3, p. 234-244, 2016.

SUZUKI, NOBUHIRO, and RON MITTLER. Reactive oxygen species and temperature stresses: a delicate balance between signaling and destruction. ***Physiologia plantarum***, v. 126, n. 1, p. 45-51, 2006.

SCHJØNNING, P. *et al.* Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction a European perspective. ***Advances in agronomy***, v. 133, p. 183-237, 2015.

SCHNEIDER, M. *et al.* Benchmark dataset of the effect of grain size on strength in the single-phase FCC CrCoNi medium entropy alloy. ***Data in brief***, v. 27, p. 104-592, 2019.

SHIERLAW, J. and ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. ***Plant and Soil***, v. 77, n. 1, p. 15–28, 1984.

SILVA D, A. *et al.* Efficiency in the use of phosphorus by common bean genotypes. ***Scientia. Agricola***. v.71, n.3, p. 232-239, 2014.

da SILVA, F. C; Basso, L. C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. ***Revista brasileira de ciência do solo***, v. 17, n. 3, p. 371-375, 1993.

SILVA, S. R. *et al.* Eucalyptus growth and phosphorus nutritional efficiency as affected by soil compaction and phosphorus fertilization. ***Communications in Soil Science and Plant Analysis***, v. 49, n. 21, p. 2700–2714, 2018.

SUN, T. et al. Transcriptome and metabolome analyses revealed the response mechanism of apple to different phosphorus stresses. ***Plant Physiology and Biochemistry***, v. 167, p. 639-650, 2021.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de métodos de análise de solo, 2017.

TUBEILEH, A. *et al.* Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize–soil system. ***Soil and Tillage Research***, v. 71, n. 2, p. 151-161, 2003.

TARDIEU, FRANÇOIS. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. ***Soil and Tillage Research***, v. 30, n. 2-4, p. 217-243, 1994.

VALADÃO, F. C. de 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, n. 1, p. 243–255, 2015.

de VARENNES, A. *et al.* Predicting the concentration and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by field-grown green beans under non-limiting conditions. ***European Journal of Agronomy***, v. 17, n.1, p. 63-72, 2002.

WANG, X. *et al.* Wheat growth responses to soil mechanical impedance are dependent on phosphorus supply. ***Soil and Tillage Research***, v. 205, 2021.

WHALLEY, W. R.; CLARK, L.J. Drought stress, effect on soil mechanical impedance and root (crop) growth. ***Encyclopedia of agrophysics***. Springer Press, Dordrecht, p. 228-231, 2011.

WANG, X. *et al.* Heterogeneous phosphate supply influences maize lateral root proliferation by regulating auxin redistribution. ***Annals of botany***, v. 125,n. 1, p. 119-130, 2020.

WANG, X. *et al.* Sustainable cropping requires adaptation to a heterogeneous rhizosphere. ***Trends in Plant Science***, v. 25, n. 12, p. 1194-1202, 2020.

WEN, Z. *et al.* Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. ***New Phytologist***, v. 223, n. 2, p. 882-895, 2019.

WHALLEY, W. R. *et al.* Structural differences between bulk and rhizosphere soil. ***European Journal of Soil Science***, v. 56, n. 3, p. 353-360, 2005.

WISSUWA, M. How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency? Small causes with big effects. ***Plant physiology***, v. 133, n. 4, p.1947-1958, 2003.

## **2 CAPÍTULO I: COMPACTAÇÃO DO SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA: EFEITOS SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS, DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS SOB PLANTIO DIRETO.**

### **2.3 INTRODUÇÃO**

A compactação provoca a redução da macroporosidade e a perda da conectividade entre os poros do solo, como resultado da compressão vertical e do cisalhamento lateral causados pelas cargas aplicadas (Schjønning *et al.*, 2015; Keller *et al.*, 2019). Deste modo, o grau de compactação (GC) e a redução do volume de poros dependem da força aplicada, assumindo que o teor de água do solo se mantenha constante (Chen *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2015). Como consequências, a compactação do solo pode reduzir a infiltração de água, aumentar a resistência à penetração de raízes, dificultar a absorção de água e nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente, restringir o crescimento das culturas (Bengough *et al.*, 2011; Poeplau *et al.*, 2016).

No sistema plantio direto (SPD), o tráfego de máquinas agrícolas pode intensificar a compactação superficial do solo, tendendo a se concentrar em torno de 0,10 m de profundidade, afetando diretamente o crescimento radicular, a distribuição de raízes e a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Yin *et al.*, 2024). Assim, fica evidente que a compactação do solo é um dos fatores que pode limitar a sustentabilidade do SPD (Bonetti *et al.*, 2023; Saha *et al.*, 2023).

A resposta das culturas à compactação do solo ainda não é totalmente compreendida. Sabe-se que aumento da compactação eleva ao aumento da resistência do solo à penetração (RP), o que pode reduzir o crescimento radicular e podendo comprometer a produtividade ao limitar o acesso das raízes à água e nutrientes (Zhang *et al.*, 2023; Frene *et al.*, 2024; Grande *et al.*, 2025). Em seu estudo de revisão, Zhang *et al.* (2023), demonstram que a compactação do solo pode reduzir a absorção de nitrogênio (N) em 12–35%, de fósforo (P) em 17–27% e potássio (K) entre 12 e 34% para diversas plantas. Especificamente para o milho, a partir de uma metaanálise de 130 estudos, os resultados apontam reduções de 13% na absorção de N, 15% de K e 50% de Mg, sendo o P limitado em apenas 8% (Mwiti *et al.*, 2023). Essas reduções podem estar associadas tanto à menor disponibilidade dos nutrientes quanto à criação de ambientes de baixa oxigenação, que afetam negativamente os microrganismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes (Frene *et al.*, 2024).

Neste contexto, torna-se evidente que há uma ambiguidade entre a compactação e a fertilidade química do solo, quanto a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Dentro deste contexto, a baixa disponibilidade de P e alta fixação do nutriente nos solos brasileiros, faz que o manejo da adubação fosfatada tenha baixa eficiência, o que demanda altas doses aplicadas recorrentemente (da Silva *et al.*, 2024).

Em literatura científica, poucos são estudos, provenientes de ensaios de campo, que analisem conjuntamente os efeitos desses fatores de estresse sobre o desenvolvimento das plantas e a resiliência do solo. Entre os estudos reportados, destacam-se os realizados por Beutler e Centurion (2004), que avaliaram o efeito da ausência ou da aplicação de 10; 50; 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e KCl e cinco níveis de compactação, induzidas pelo tráfego de um trator agrícola (0, 1, 2, 4 e 6 passadas), em um Latossolo com 271 g kg<sup>-1</sup> de argila, sobre a produtividade de soja. Os autores observaram que a compactação reduziu o desenvolvimento e produtividade da cultura, mas os efeitos foram atenuados pela adubação, indicando que a fertilização aumenta a tolerância da soja à compactação. Esses resultados, embora tenham um grande avanço, foram limitados, visto que foi feita uma avaliação pontual sobre a cultura, aos 120 dias após a indução da compactação, e nenhum resultado quanto ao solo foi reportado.

Outro estudo de destaque foi o de Valadão *et al.* (2015). Em outro Latossolo, com 506 g kg<sup>-1</sup> de argila, os autores analisaram conjuntamente o efeito de quatro níveis de compactação (0, 2, 4 e 8 passadas), similares ao realizado anteriormente por Beutler e Centurion (2004), duas formas de aplicação de P (em sulco ou em área total) e quatro doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 50, 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup>), sobre as culturas da soja e milho, cultivado em sucessão. Esses autores também limitaram-se a uma única avaliação de solo, após a colheita da cultura do milho, isto é, menos de um ano após a indução da compactação. Os principais resultados reportados foram que a compactação aumentou a densidade e resistência do solo, reduzindo a macroporosidade, sendo que a forma ou a quantidade de P aplicado não influenciaram essas propriedades. Por outro lado, entre as culturas, as respostas foram distintas. Na soja, a compactação reduziu a área radicular, mas a forma de adubação não teve efeito significativo sobre o desenvolvimento da cultura. No milho, a adubação e, área total aumentou a área radicular superficial; enquanto a adubação no sulco melhorou a distribuição radicular no perfil.

Nessa temática, também são reportados estudos em ambiente protegido, cuja finalidade é buscar os mecanismos envolvidos na fisiologia do estresse induzida pela compactação e deficiência de fósforo, ou dos mecanismos relacionados a disponibilidade do nutriente. Alguns desses estudos já foram conduzidos para alface (Azzi *et al.*, 2017), amaranto (Wang *et al.*, 2023), amendoim (Wu *et al.*, 2024), eucalipto (Silva *et al.*, 2018), trevo (Barzegar *et al.*, 2006), trigo (Mondal e Charkraborty, 2023) e soja (Wang *et al.*, 2019). O resultado comum em todos esses estudos foi que a compactação reduziu o desenvolvimento das plantas e a absorção de P. Desses, o estudo realizado por Silva *et al.* (2018), o único brasileiro, também foi reportado que adubação fosfatada aumentou absorção do nutriente, mas não compensou as perdas induzidas pela compactação, porém sem descrever os mecanismos fisiológicos envolvidos no processo.

Face ao exposto, considerando a expressividade e a importância do SPD para a produção de grandes culturas, o aumento da compactação do solo e a deficiência de fósforo em sistemas intensivos de produção, aliados a escassez de trabalhos em campo, os objetivos desse estudo foram: a) Investigar de que forma as alterações nos atributos físicos do solo influenciam a dinâmica do fósforo em ambientes sob sistema de plantio direto. b) Investigar como diferentes graus de compactação do solo e doses de  $P_2O_5$  influenciam a dinâmica do fósforo no solo, os atributos físicos do solo e a produtividade de culturas agrícolas em sistema plantio direto. Nossa hipótese foi que em baixos níveis de compactação, o aumento da adubação fosfatada é capaz de mitigar os efeitos deletérios da compactação. Porém, esses efeitos são restritos em um curto período de tempo, o que não promove a recuperação do solo, e compromete a sustentabilidade do SPD.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS.

### 2.4,1 LOCAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO DE CAMPO

O experimento teve início em agosto de 2022, no Centro de Estações Experimentais Fazenda do Canguiri (25° 23' sul, 49° 08' oeste) em um Cambissolo Háplico Distrófico Tb típico, com relevo moderadamente ondulado, textura argilosa (41,5 %) e presença de cascalho. O solo apresentava baixos teores de fósforo disponível (2,9 mg/dm<sup>3</sup>), densidade de 1,20 g/cm<sup>3</sup> e ausência de restrições físicas, características consideradas favoráveis à avaliação dos efeitos da adubação



fosfatada e da compactação do solo (Tabela 1). A área experimental encontrava-se em pousio há mais de oito anos, sem histórico recente de cultivo, e recebeu aplicação de calcário ( $\text{NC} = 1832 \text{ kg ha}^{-1}$ ), conforme recomendação do manual de adubação e calagem do Paraná (Pauletti & Motta, 2019).

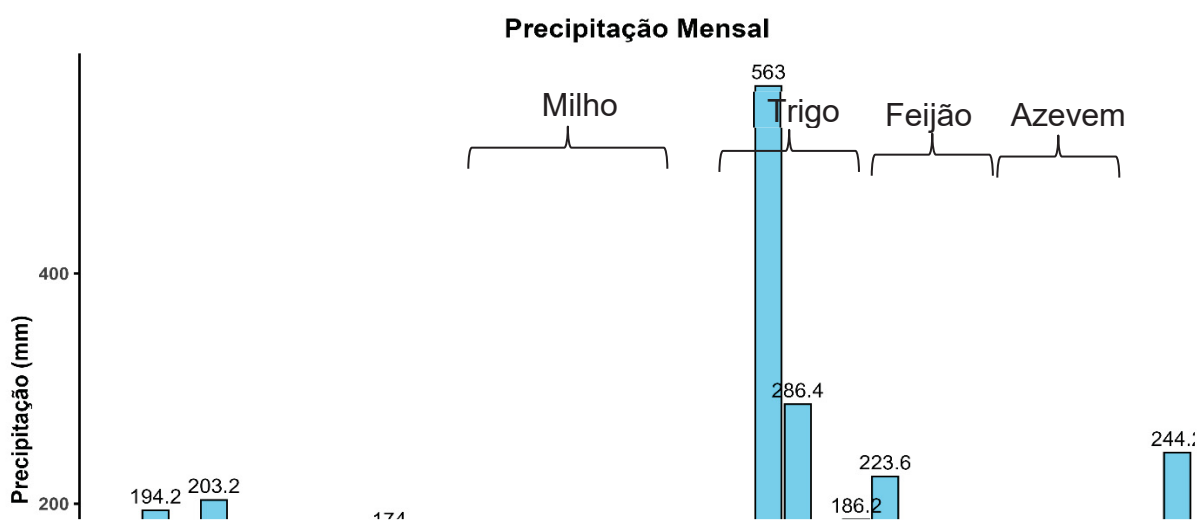
O município de Pinhais-PR possui um clima temperado úmido (Cfb), caracterizado por temperaturas médias de  $22,5^\circ\text{C}$  no período mais quente e  $12,4^\circ\text{C}$  no período mais frio. A precipitação média anual é de cerca de 1.400 mm, podendo haver incidência ocasional de geada e granizo. (Alvares *et al.*, 2013).

Na Figura 1 observa-se a distribuição da precipitação mensal acumulada ao longo do período experimental, destacando-se os picos registrados nos meses de outubro e novembro de 2023. Esses períodos coincidiram com a instalação das culturas, indicando condições de maior disponibilidade hídrica no momento do estabelecimento das plantas, fator determinante para o desempenho inicial e para a interação entre a umidade do solo e os demais manejos adotados.

**Tabela 1.** Análises de solo prévias à instalação do experimento. Fazenda Canguiri, 2022.

**Análises de Solo (0,0 – 0,20 m)**

|                                             |      |                                             |      |
|---------------------------------------------|------|---------------------------------------------|------|
| pH (CaCl <sub>2</sub> )                     | 4,9  | P (Mehlich-1)                               | 2,9  |
| pH (SMP)                                    | 5,9  | C (g/dm <sup>3</sup> )                      | 27,9 |
| H+AL (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )  | 5,9  | MO (g/dm <sup>3</sup> )                     | 48,0 |
| Ca+Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) | 11,0 | SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )    | 11,2 |
| Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )    | 8,4  | CTC t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) | 11,4 |
| Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )    | 2,6  | CTC T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) | 17,1 |
| Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )    | 0,0  | V%                                          | 63,9 |
| Na (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )    | 0,0  | m%                                          | 1,6  |
| K (Mehlich-1)                               | 7,1  | Argila (%)                                  | 42,5 |

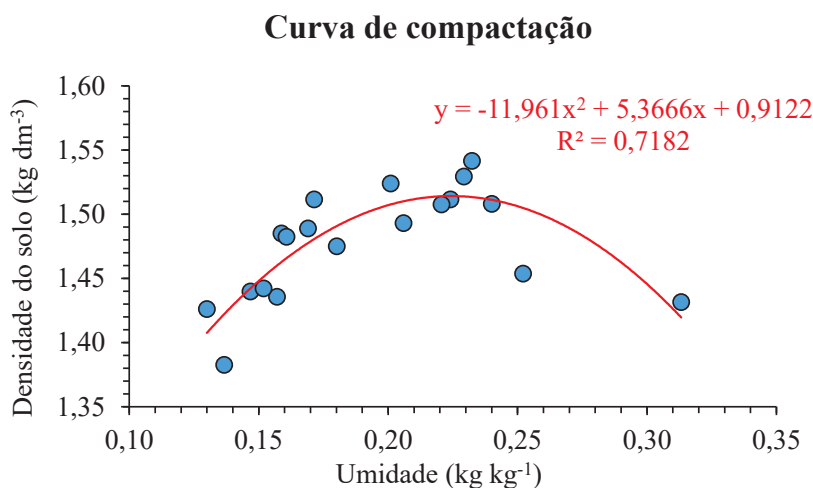




**Figura 1.** Precipitação acumulada por mês durante o ciclo experimental. Fazenda Canguiri, 2025. (Fonte: SIMEPAR, 2025).

O experimento de campo, foi instalado sob delineamento em blocos casualizados, com tratamentos em esquema de parcela subdividida (4×4), com três repetições. Os tratamentos dispostos nas parcelas foram quatro níveis de grau de compactação (GC) do solo: Natural (GC=80±2%), Leve (GC = 85±2%), Moderada (GC = 90±2%) e Alta (GC = 95±2%), induzidas pelo tráfego de um trator agrícola. Os níveis de compactação do solo foram definidos através da curva de compactação do solo, por meio do teste de Proctor (ASTM, 1992), identificando os valores de densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação (Figura 2).

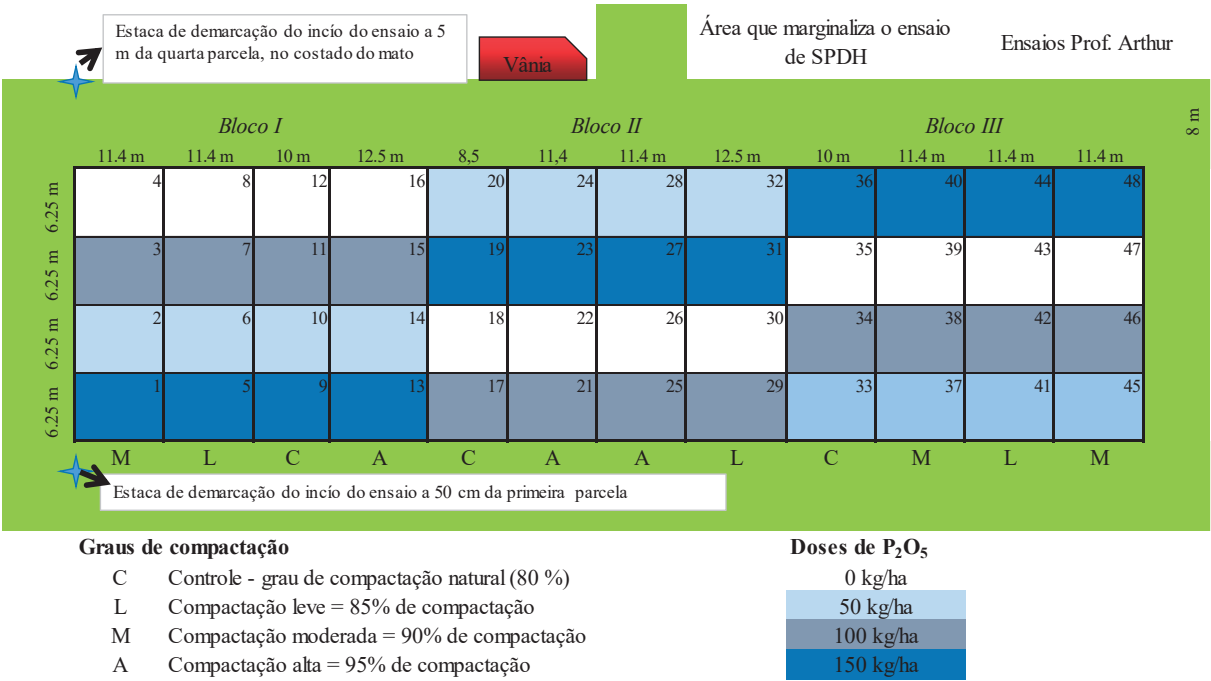
Após a determinação da densidade máxima de compactação (1,514 kg dm<sup>3</sup>) por meio do ensaio de Proctor, procedeu-se à compactação do solo em toda a área experimental utilizando passadas sucessivas de trator. A fim de alcançar os diferentes graus de compactação desejados, o número de passadas foi ajustado com base em medições da densidade do solo. Verificou-se que oito passadas foram suficientes para atingir 95% da densidade máxima de compactação.



**Figura 2:** Ensaio de Proctor para determinação da relação entre umidade gravimétrica e densidade do solo, utilizado para construção da curva de compactação. Fazenda Canguiri, 2025.

A compactação foi realizada com um trator modelo CASE PUMA 165, equipado com pneus diagonais, bitola traseira de 1,7 m e massa total de 10,5 Mg. O rodado era composto por pneus dianteiros 480/70 R28 e traseiros 580/70 R38. Durante o tráfego, o trator operou a uma velocidade constante de 5 km h<sup>-1</sup>, com rotação de 1.800 rpm.

Nas subparcelas, foram aplicadas as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 50, 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup>), em sulco, por ocasião da semeadura das culturas, utilizando o superfosfato triplo como fonte. Os demais fertilizantes (N e K<sub>2</sub>O) foram aplicados homogeneamente e manualmente em superfície, de acordo a análise química do solo e a necessidade das culturas (PAULETTI e MOTTA, 2019) (Figura 3).



**Figura 3:** Distribuição espacial do experimento em função aos graus de compactação e doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (kg ha<sup>-1</sup>). UFPR Fazenda experimental Canguiri (2022/25).

O experimento seguiu um esquema de rotação de culturas, utilizando as principais espécies cultivadas no estado do Paraná, a saber: milho (2022/2023), trigo (2023), feijão (2024) e azevém (2024) (Tabela 1). Com exceção do azevém, todas as demais culturas foram adubadas no momento da semeadura, com doses

definidas com base na análise de solo e nas recomendações do Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (Pauletti & Motta, 2017). As semeaduras foram realizadas com semeadoras adubadoras, utilizando discos defasados ou desencontrados para abertura dos sulcos.

**Tabela 2.** Rotação de culturas utilizada na área experimental em função dos graus de compactação e das doses de  $P_2O_5$ . Fazenda Canguiri, 2022–2025.

| Culturas | Ano     | Época de Plantio | Densidade         | Espaçamentos | Variedade | Híbrido |
|----------|---------|------------------|-------------------|--------------|-----------|---------|
| Milho    | 2022/23 | dizembro         | 60.000            | 0,5 m        |           | VT PRO3 |
| Trigo    | 2023    | agosto           | 300 Plts $m^2$    | 17,5 cm      | Tbio      |         |
| Feijão   | 2024    | janeiro          | 260000 S          | 0,5 m        | IPR Sabia |         |
| Azevém   | 2024    | abril            | 10 kg S $ha^{-1}$ | 17,5 cm      | Barjumbo  |         |

O controle de plantas daninhas, pragas e doenças foi realizado conforme necessidade das culturas, utilizando pulverizador mecanizado Montana SLC 400L de 280 kg, acoplado a um trator (TL5.80 New Holland com peso máximo 4.500 kg), com largura de trabalho de 12 m. Para evitar a compactação adicional devido o tráfego durante as pulverizações, foi feito o controle de tráfego, limitando as passadas do trator sempre nos mesmos locais. As colheitas das culturas foram manuais, sendo necessários a roçada mecânica de restos vegetais (roçadeira Woods BB 720, acoplado com TL5.80 New Holland, 4.500 kg), ou a passada de rolo-faca de 3 metros Marca Freisleben RFF 3000 (acoplado com TL5.80 New Holland, 4.500 kg), para manejo da fitomassa sobre o solo. Deste modo, o tráfego em área total, ocorreu apenas durante as operações de semeadura ou durante o manejo pós colheita da área.

#### 2.4,2 AMOSTRAGENS, AVALIAÇÕES E ANÁLISES DE PLANTAS

**Acúmulo de massa seca:** O acúmulo de massa seca das culturas foi avaliado em momentos distintos, conforme o estágio fenológico de cada espécie:  
**No Milho:** Duas plantas por parcela foram colhidas manualmente no estágio de enchimento de grãos. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada a 65 °C por 72 horas. A massa seca ( $kg\ ha^{-1}$ ) foi estimada com base na população de plantas de cada unidade experimental, multiplicando-se a massa seca individual pela densidade de plantas por hectare.

Trigo: Amostragens foram realizadas utilizando molduras de  $0,5 \times 0,5$  m, coletadas aleatoriamente em cada parcela, na fase final da floração. As plantas foram secas sob as mesmas condições, e os dados foram extrapolados para área em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Feijão: No estágio R8 (maturação fisiológica), foram colhidas três fileiras de 1 m, distribuídas aleatoriamente em cada parcela. As plantas foram secas em estufa a  $65^\circ\text{C}$  por 72 horas e a massa seca foi expressa em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Azevem: Amostragens foram realizadas utilizando molduras de  $0,5 \times 0,5$  m, coletadas aleatoriamente em cada parcela, na fase final da floração. As plantas foram secas sob as mesmas condições, e os dados foram extrapolados para área em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

#### Produtividade de grãos

No Milho: A colheita foi realizada na maturidade fisiológica, utilizando a área útil central de cada parcela (quatro fileiras de 3 m). Após a debulha, os grãos foram pesados e a produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) foi calculada com base na umidade corrigida para 13%, conforme metodologia oficial (BRASIL, 2009).

Feijão: A produtividade foi determinada após a aplicação do maturador químico à base de amônio-glufosinato (glifosato,  $1.230 \text{ g ha}^{-1}$  de ingrediente ativo). A colheita ocorreu quando 90% das plantas apresentavam vagens secas, sendo colhidas três fileiras centrais de 1 m (área equivalente a  $1,2 \text{ m}^2$ ). Os grãos foram pesados e a umidade corrigida para 14% ( $140 \text{ g kg}^{-1}$ ), estimando-se a produtividade em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### 2.4,3 ANÁLISE DE FÓSFORO NAS PLANTAS

Após a secagem, as amostras foliares e/ou da parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley, peneiradas (malha 20) e submetidas à digestão via úmida com peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico em bloco digestor. A quantificação do fósforo foi realizada por espectrofotometria UV-VIS, utilizando o método do complexo fosfomolibdênio azul, conforme descrito por Silva (2009).

Após a colheita das culturas, foram realizadas avaliações de resistência à penetração (RP), em campo, com penetrômetro eletrônico, modelo PLG 1020 (Falker Automação Agrícola®), equipamento da tecnologia nacional com funcionamento normatizado pela ASABE (2009). As medições em campo foram feitas com velocidade constante, equivalente a  $5 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ . Foi utilizada a agulha com ponta cônica, área basal de  $7,74 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  e ângulo de  $30^\circ$ , presa a uma haste cilíndrica de inox com 0,40 m de comprimento e  $6 \times 10^{-3} \text{ m}$  de diâmetro. Em cada

parcela experimental foram efetuadas leitura de RP em três pontos distribuídos na linha e entrelinhas de semeadura das culturas na profundidade de 0,30 m.

Complementarmente, foram retiradas sub amostras deformadas de solo, com o auxílio de trados caladores e holandeses, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, nos mesmos pontos da medida de RP. Essas amostras foram homogeneizadas para compor uma amostra composta, e foram utilizadas para: determinação do conteúdo de água no solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e os teores de P disponível. A amostra composta foi quarteada e parte dela utilizada para determinar o conteúdo de água, por gravimetria ( $105\text{ }^{\circ}\text{C} / 72\text{ h}$ ).

Com os dados de RP e conteúdo de água, foram geradas curvas de RP, empregando o modelo exponencial de ajuste proposto por Mielke et al. (1994) e revisado para solos tropicais do Brasil por Vaz *et al.* (2011), visando corrigir os valores de RP em função das variações de umidade no momento da amostragem. As curvas foram geradas utilizando a função “*nls*” do software R, versão 4.4.3 (R Core Team, 2025). A partir das equações de ajuste, os valores de RP foram normalizados para o valor de umidade de  $0,30\text{ kg kg}^{-1}$ , uma estimativa do valor aproximado de capacidade de campo para solos brasileiro ( $0,34\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ , considerando o potencial matricial de  $-10\text{ kPa}$ , Turek *et al.*, 2020) e a densidade do solo prévia a instalação do experimento ( $1,15\text{ kg m}^{-3}$ ).

O restante da amostra composta e quarteada foi seco em estufa com circulação forçada ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), destorroada e moída em malha de 2 mm, para posteriores análises dos teores de P disponível, extraído com solução de Mehlich-1. A determinação no nutriente foi a partir do complexo fosfomolíbico, utilizando espectrofotometro UV-VIS (DRAWELL- DU-8200), com comprimento de onda de 660 nm (Silva *et al.*, 2009).

#### 2.4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e homoscedasticidade de Bartlett. Quando necessária, foi aplicada a potência ótima de Box-Cox para transformação dos dados. Atendidas as pressuposições, os dados de cada camada do solo e de plantas foram submetidos a análise de variância (ANOVA) de experimento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas ( $4 \times 4$ ), com três repetições. Em caso de interações significativas, foram realizadas análises de desdobramento. Quando significativos os valores de F, o teste de Tukey foi aplicado para comparação múltiplas entre os graus

compactação (GC) do solo, e a análise de regressão polinomial para as doses de fósforo.

Após as análises univariadas de cada camada, os dados de RP foram submetidos a análise temporal e espacial. Para isso, considerando a não significância das doses de  $P_2O_5$  para a variável, os valores de RP entre as doses, dentro de um mesmo GC foram agrupadas. Assim, passou a ser considerado um número de quatro pseudorepetições dos GC dentro de cada bloco. Na sequência foi aplicada análise de medidas repetidas no tempo, para análise temporal das modificações da RP entre os cultivos de milho, trigo e sucessão feijão-azevém. A pressuposição de esfericidade, preceito básico para ANOVA de medidas repetidas, foi verificada pelo teste de Mauchly. Quando necessário, foi usada a correção de Huynh-Feldt para ser atingido o pressuposto.

De modo similar, essa análise estatística também foi aplicada para verificar a análise espacial da RP entre as camadas de solo de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Todas as análises foram feitas com o auxílio do *Software R*, versão 4.4.3 (R Core Team, 2025).

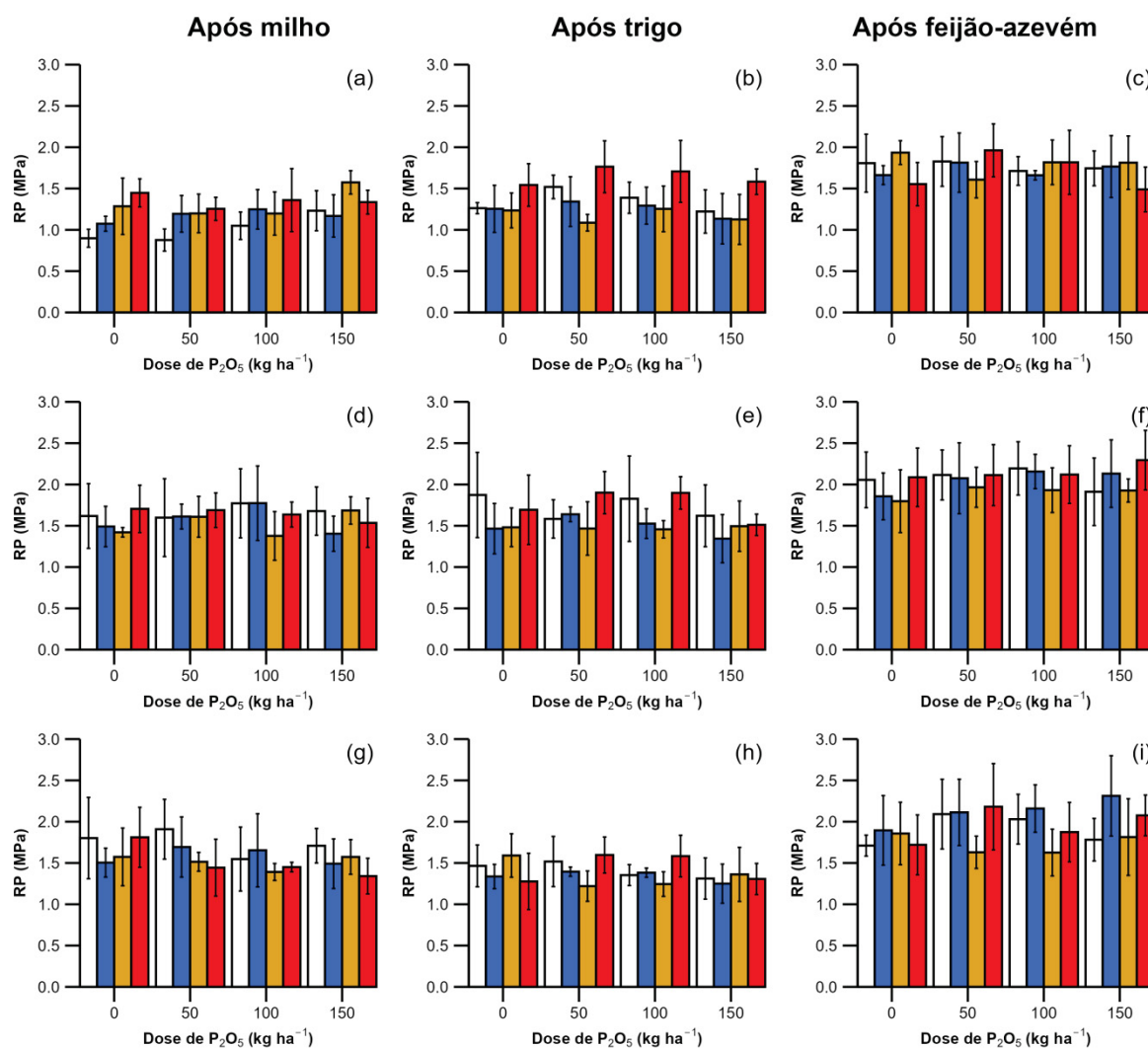
## 2.5 RESULTADOS

### 2.5,1 RESPOSTAS ESTÁTICAS DA RP ENTRE OS GC E ADUBAÇÕES

Em campo, a resistência a penetração (RP) foi pouco influenciada pelos GC e doses de  $P_2O_5$  aplicadas, dentro das camadas de solo avaliadas e períodos de avaliação (Figura 4). Houve uma tendência crescente ( $p = 0,088$ ) para a RP da camada 0-0,10 m após o cultivo de milho (oito meses após indução da compactação), variando de 1,01 à 1,35 MPa entre os GC natural e alto, principalmente quando o solo não foi fertilizado (Figura 4a).

Após o cultivo de trigo (15 meses após compactação), apenas da camada mais superficial foram reportados efeitos isolados dos GC ( $p = 0,019$ ). Neste caso, a RP no GC alto (1,65 MPa) foi superior aos GC leve (1,26 MPa) e moderado (1,18 MPa), os quais não diferiram entre si. Por sua vez, o GC natural elevou a RP nesta camada (1,35 MPa), a valores similares ao GC alto, demonstrando que a compactação é um processo rápido.

Por fim, a após a sucessão feijão-azevém (22 meses após compactação), não foram reportados efeitos dos GC e doses de  $P_2O_5$ , isoladamente ou sua interação, sobre a RP em nenhuma das camadas de solo (Figuras 4c, 4f e 4i). Contudo, entre os cultivos antecessores, pode-se observar a elevação da RP a



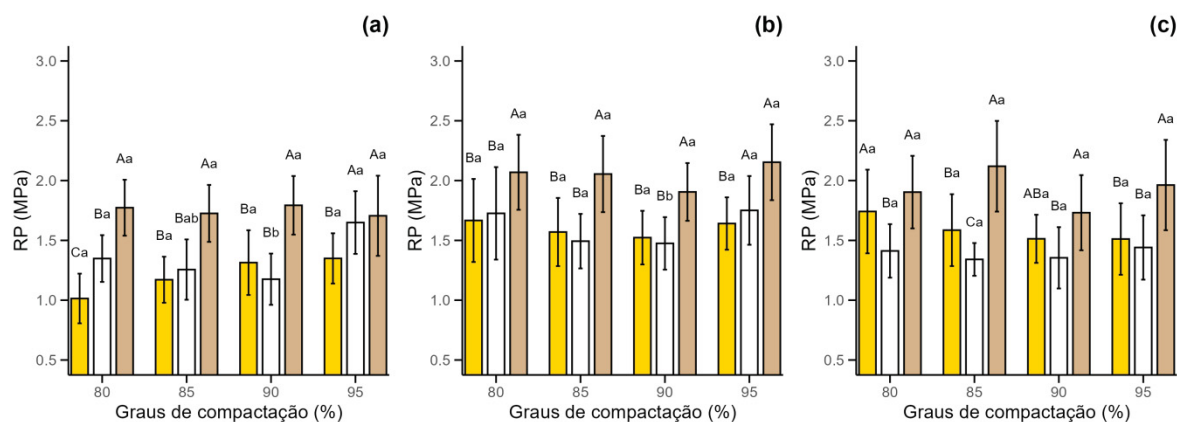
valores superiores a 2 MPa. Esses resultados denotam a importância da análise temporal da RP e a suscetibilidade do solo à compactação, mesmo que sob SPD.

**Figura 4.** Resistência à penetração (RP) do solo após o cultivo de milho (a, d, g), trigo (b, e, h) e sucessão de feijão-azevém (c, f, i) nas camadas de 0-0,10 (a, b, c); 0,10-0,20 (d, e, f) e 0,20-0,30 m (g, h, i) em função aos graus de compactação (natural em branco; leve em azul; moderado em amarelo; e alto em vermelho) e doses de  $P_2O_5$  utilizados na sementeira das culturas em sistema de plantio direto.



## 2.5,2 RESPOSTAS TEMPORAIS E ESPACIAIS DA RP.

Diante da clara tendência de variação temporal da RP, independente dos



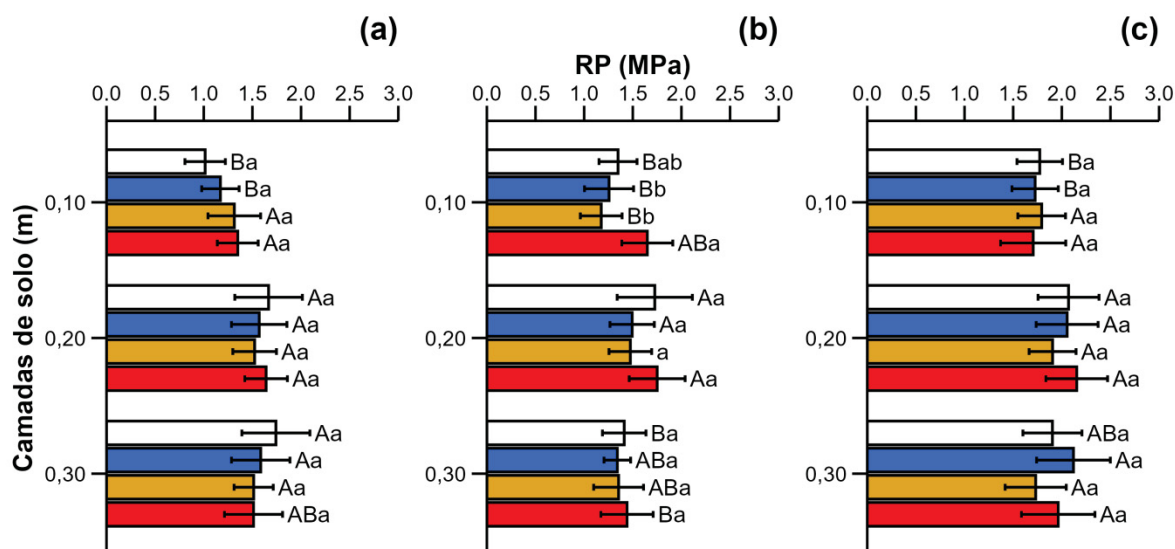
graus de compactação e, principalmente doses de P2O5, foram realizadas as análises de medidas repetidas, no tempo e no espaço, considerando os períodos de avaliação (após os ciclos de cultivo de milho, trigo e da sucessão feijão-azevém) ou as camadas de solo (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) como fatores fixos. A partir desta análise, confirmou-se que a RP apresentou variações ao longo das culturas e das camadas do solo (Figura 5).

**Figura 5.** Análise temporal da resistência à penetração (RP) em função do cultivo antecessor (amarelo = após milho; branco = após trigo; marrom = após sucessão feijão-azevém) nas camadas de 0-0,10 (a); 0,10-0,20 (b) e 0,20-0,30 m (c) e graus de compactação. Médias seguidas da mesma letra maiúscula, comparando os ciclos de cultivo, e minúscula, comparando os graus de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Independente da camada de solo não houve distinção da RP entre os GC após o cultivo do milho, com valores médios próximos a 1,5 MPa. Contudo, mais superficialmente (0-0,10 e 0,10-0,20 m - Figuras 5a e 5b, respectivamente), houve aumento da RP entre o cultivo de milho (8 meses de início do experimento) e da sucessão feijão-azevém (22 meses após início do experimento), especialmente nos menores GC (80 e 85%). O acréscimo na RP nesta camada foi suficiente para elevar a RP do GC de 80% (1,77 MPa) a valores similares ao GC de 95% (1,71 MPa) após o cultivo da sucessão feijão-azevém (Figura 5a). Essa variação representou um acréscimo de RP de aproximadamente 75% em apenas 18 meses entre as avaliações, denotando que o solo está estava altamente suscetível aos processos compressivos.

O cultivo de trigo reduziu a RP na camada de 0-0,10 m nos GC de 80 e 85%, em relação ao cultivo de milho, porém após o feijão-azevém a RP elevou-se novamente, atingindo valores próximo de 2 MPa (Figura 5c). Nos maiores GC (90 e 95%) a RP após o trigo foi similar as medidas realizadas após milho, e ambos inferiores aquelas realizadas após a sucessão feijão-azevém. Por fim, após o cultivo de trigo, pode-se observar redução da RP das camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m no GC de 90% (Figuras 5a e 5b).

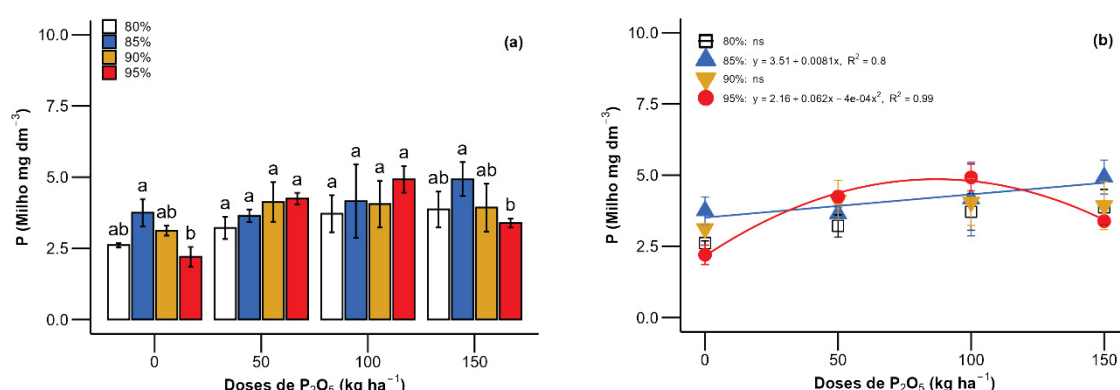
Em relação a análise espacial (Figura 6), após todos os ciclos de cultivo, na camada de 0-0,10 m, a RP tendeu a ser menor em comparação com as camadas mais profundas, independente dos GC. As exceções foram para os GC de 90 e 95 %, que após o milho já condicionaram RP na camada de 0-0,10 m similar as camadas subjacentes (Figura 6a). Em relação aos ciclos de cultivo, após o trigo, pode-se observar a concentração do aumento da RP na camada de 0,10-0,20 m, para todos dos GC (Figura 6b). Contudo, após o cultivo da sucessão feijão-azevém, a RP da camada de 0,20-0,30 m aumentou a valores próximos aos reportados para 0,10-0,20 m, atingindo valores próximos a 2,0 MPa (Figura 6c).



**Figura 6:** Resistência à penetração (RP) do solo sob graus compactação (80 %, em branco; 85 %, em azul; 90 %, em amarelo; e 95 %, em vermelho) entre camadas de solo após o cultivo de milho (a), trigo (b) e sucessão feijão-azevém (c). Médias seguidas de mesma letra maiúscula, comparando um mesmo GC dentro de cada camada de solo, e mesma letra minúscula, comparando GC dentro de uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

### 2.5,3 DISPONIBILIDADE P NO SOLO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO

A disponibilidade de fósforo no solo cultivado com milho, na camada de 0–0,30 m, foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  (Figura 7). Na ausência de adubação fosfatada, observou-se maior teor de P no solo sob compactação de 85%, com redução significativa sob compactação de 95%. Com a aplicação de 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , os teores de fósforo aumentaram de forma geral, com menor variação entre os graus de compactação, sugerindo que a adubação contribuiu para compensar os efeitos negativos da compactação sobre a disponibilidade de P. Entretanto, na dose de 150  $kg\ ha^{-1}$ , os valores mais elevados também foram observados em 85%, enquanto o grau de 95% apresentou os menores teores, o que reforça que a compactação mais intensa pode limitar a eficiência do fertilizante fosfatado, mesmo em doses elevadas.



**Figura 7:** Teores de P disponível no solo na cultura do milho, na profundidade de 0–0,30 m, em função dos graus de compactação do solo (a) e das doses de  $P_2O_5$  (b), sob sistema de plantio direto (SPD), Fazenda Canguiri, 2025. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Após o cultivo de trigo, o teor de fósforo (P) no solo apresentou interação significativa entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Após o cultivo de trigo, na camada de 0–0,10 m, observou-se respostas quadráticas nos GC de 80% e 95%, indicando uma dose que proporcionasse a disponibilidade máxima de P de 12,8 e 7,7  $mg\ dm^{-3}$  em doses de 69 e 58  $kg\ ha^{-1}$ , respectivamente. Entre os GC de 85 e 90 % as doses de  $P_2O_5$  não afetaram a disponibilidade do nutriente,

tendo teores médios de  $4,9 \text{ mg dm}^{-3}$ . Nas doses de 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , houve distinção entre os GC sobre os teores de P na camada de 0-0,10 m. Em ambas as doses, a maior disponibilidade de P foi reportada para o GC de 80 %, isto é, a condição natural do solo. E, entre os GC de 85 a 95 % quase não houve distinção entre os teores de P disponível nestas doses, com exceção para o GC de 90% com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 3).

Nas camadas subsuperficiais (0,10–0,20 e 0,20–0,30 cm), como esperado, os teores de P foram consideravelmente mais baixos. Contudo, em 0,10–0,20 m houve aumento linear da aplicação de P sobre a disponibilidade do nutriente para os GC de 80, 90 e 95 % e resposta quadrática para o GC de 85 %. E, em 0,20-0,30 m, foi reportado apenas o efeito quadrático das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  sobre os teores de P no solo, nos GC de 85 e 90 %.

Em cada dose, a resposta dos GC foi oposta nestas camadas, em relação ao reportado para a camada mais superficial, onde houve a deposição dos fertilizantes. Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato triplo, os teores de P disponível nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m nos GC de 85 e 90 % foram superiores a condição do solo não compactado (GC = 80 %), porém com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  nenhuma diferença foi reportada para esses GC. Por sua vez, em condição de compactação severa (GC = 95%) é válido ressaltar que independente da dose aplicada, os teores de P na camada de 0,10-0,20 m foram inferiores aos demais tratamentos e os menores reportados (Tabela 3). Por fim, deve-se mencionar que embora tenham ocorrido diferenças estatísticas entre os tratamentos, os níveis de P para um solo argiloso continuam baixos, isto é, menores que  $6 \text{ mg dm}^{-3}$  (Pauletti e Motta, 2019).

Após a sucessão feijão-azevém, os teores de P no solo também foram influenciados pelos GC e doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , de modo mais expressivo que anteriormente reportado, pós cultivo de trigo (Tabela 3). Na camada mais superficial (0–0,10 m), observou-se P incremento na disponibilidade do nutriente, principalmente nos GC de 80 e 85 %, com resposta quadrática e linear. A partir das regressões ajustadas, pode-se observar que as doses de 114 e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  podem resultar em teores altos ( $41,7$  e  $48,2 \text{ mg dm}^{-3}$  respectivamente), nesta camada, para esses GC. Nesta mesma camada, para o GC de 90 e 95% houve resposta linear dos teores de P no solo em função das doses de fertilizante.

Os teores de P disponível na camada de 0-0,10 m do solo, após a sucessão feijão-azevém, diferiram entre os GC nas doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Neste caso, nos GC de 80 e 85 %, proporcionaram teores de P disponível superiores aos maiores GC (90 e 95%), esses com resultados similares entre si. A distinção foi de 27,2 mg dm<sup>-3</sup> para a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> entre os GC de 80 e 95%; e 43,3 mg dm<sup>-3</sup> para a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> entre os GC de 85 e 95%. A distinção entre dos teores de P nessa camada, para essas doses, entre os GC de 80 e 85% foi baixa (5,6 e 6,5 mg dm<sup>-3</sup>), porém suficiente para a distinção estatística dos tratamentos (Tabela 3).

**Tabela 3:** Teores de P disponível (mg dm<sup>-3</sup>) no solo sob graus de compactação (GC) e doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas em sulco, na semeadura de trigo (2023) e feijão (2024) sob sistema de plantio direto.

| GC (%) | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                            |                            |                           |                                   |                |         | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                            |                            |                            |                                  |                |         |
|--------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------|---------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------|---------|
|        | 0                                                             | 50                         | 100                        | 150                       | Regressão                         | R <sup>2</sup> | p-valor | 0                                                             | 50                         | 100                        | 150                        | Regressão                        | R <sup>2</sup> | p-valor |
|        | Após trigo                                                    |                            |                            |                           |                                   |                |         |                                                               |                            |                            |                            |                                  |                |         |
|        | Após sucessão feijão-azevém *                                 |                            |                            |                           |                                   |                |         |                                                               |                            |                            |                            |                                  |                |         |
|        | Camada de 0-0,10 m                                            |                            |                            |                           |                                   |                |         |                                                               |                            |                            |                            |                                  |                |         |
| 80     | 5,0 <sup>±0,80</sup><br>a                                     | 13,1 <sup>±0,75</sup><br>a | 11,8 <sup>±1,25</sup><br>a | 4,4 <sup>±0,36</sup><br>a | $\hat{y} = 5,23+0,22x-0,0016x^2$  | 0,99           | <0,001  | 4,5 <sup>±0,81</sup><br>a                                     | 28,9 <sup>±1,6</sup><br>a  | 41,7 <sup>±0,55</sup><br>b | 36,6 <sup>±0,39</sup><br>d | $\hat{y}= 4,18+0,66x-0,0029x^2$  | 0,99           | <0,001  |
| 85     | 4,0 <sup>±0,45</sup><br>a                                     | 4,9 <sup>±0,55</sup><br>c  | 5,5 <sup>±2,1</sup><br>b   | 4,9 <sup>±1,24</sup><br>a | ns                                | ---            | ---     | 3,9 <sup>±0,60</sup><br>a                                     | 23,3 <sup>±1,73</sup><br>b | 48,2 <sup>±3,47</sup><br>a | 76,0 <sup>±1,75</sup><br>a | $\hat{y}=1,66+0,48x$             | 0,99           | <0,001  |
| 90     | 5,1 <sup>±0,75</sup><br>a                                     | 3,9 <sup>±0,20</sup><br>c  | 5,8 <sup>±0,75</sup><br>b  | 5,3 <sup>±1,03</sup><br>a | ns                                | ---            | ---     | 1,4 <sup>±0,17</sup><br>a                                     | 6,8 <sup>±0,30</sup><br>c  | 32,2 <sup>±3,07</sup><br>c | 71,0 <sup>±0,47</sup><br>b | $\hat{y}=-,232+0,468x$           | 0,90           | <0,001  |
| 95     | 4,9 <sup>±0,75</sup><br>a                                     | 9,9 <sup>±1,1</sup><br>b   | 5,2 <sup>±2,2</sup><br>b   | 4,2 <sup>±1,72</sup><br>a | $\hat{y}= 5,62+0,07x - 0,0006x^2$ | 0,57           | <0,001  | 2,4 <sup>±0,3</sup><br>a                                      | 4,7 <sup>±0,05</sup><br>c  | 20,2 <sup>±2,05</sup><br>d | 46,8 <sup>±1,35</sup><br>c | $\hat{y} =-,76+0,297x$           | 0,88           | <0,001  |
|        | Camada de 0,10-0,20 m                                         |                            |                            |                           |                                   |                |         |                                                               |                            |                            |                            |                                  |                |         |
| 80     | 2,8 <sup>±0</sup><br>bc                                       | 4,4 <sup>±0,05</sup><br>a  | 4,7 <sup>±0</sup><br>a     | 5,3 <sup>±0,35</sup><br>a | $\hat{y}=3,16+0,015x$             | 0,89           | <0,001  | 2,7 <sup>±0,88</sup><br>a                                     | 30,5 <sup>±1,93</sup><br>a | 32,5 <sup>±5,04</sup><br>a | 32,5 <sup>±0,25</sup><br>c | $\hat{y}=2,74+0,731x-0,00365x^2$ | 0,99           | <0,001  |
| 85     | 3,5 <sup>±0,26</sup><br>b                                     | 5,2 <sup>±0,30</sup><br>a  | 5,3 <sup>±0,30</sup><br>a  | 5,5 <sup>±0,20</sup><br>a | $\hat{y}=3,58+0,035x-0,0002x^2$   | 0,95           | <0,002  | 2,2 <sup>±0,17</sup><br>a                                     | 27,2 <sup>±8,35</sup><br>a | 44,7 <sup>±5,75</sup><br>a | 61,8 <sup>±4,7</sup><br>a  | $\hat{y}=4,56+0,392x$            | 0,99           | <0,001  |
| 90     | 4,5 <sup>±0,15</sup><br>a                                     | 5,0 <sup>±0,28</sup><br>a  | 5,4 <sup>±0,45</sup><br>a  | 5,8 <sup>±0,75</sup><br>a | $\hat{y}=4,58+0,0084x$            | 0,99           | 0,003   | 3,0 <sup>±0,63</sup><br>a                                     | 4,3 <sup>±1,92</sup><br>b  | 43,3 <sup>±1,2</sup><br>a  | 61,2 <sup>±7,65</sup><br>a | $\hat{y}=-4,36+0,436x$           | 0,93           | <0,004  |
| 95     | 2,1 <sup>±0,05</sup><br>c                                     | 4,4 <sup>±0,23</sup><br>a  | 3,8 <sup>±0,10</sup><br>b  | 4,9 <sup>±0,40</sup><br>a | $\hat{y} =2,67+0,015x$            | 0,68           | 0,008   | 6,1 <sup>±0,78</sup><br>a                                     | 5,9 <sup>±0,79</sup><br>b  | 6,2 <sup>±1,72</sup><br>b  | 48,7 <sup>±5,85</sup><br>b | $\hat{y}=8,17-0,383x+0,0043x^2$  | 0,93           | <0,001  |
|        | Camada de 0,20-0,30 m                                         |                            |                            |                           |                                   |                |         |                                                               |                            |                            |                            |                                  |                |         |
| 80     | 3,8 <sup>±0,45</sup><br>ab                                    | 3 <sup>±0,10</sup><br>b    | 4,9 <sup>±1,03</sup><br>a  | 3,8 <sup>±0,68</sup><br>a | ns                                | ---            | ----    | 3,7 <sup>±0,80</sup><br>a                                     | 18,3 <sup>±3,55</sup><br>b | 22,4 <sup>±4,65</sup><br>b | 26,8 <sup>±4,05</sup><br>c | $\hat{y}=6,85+0,146x$            | 0,89           | <0,002  |
| 85     | 2,6 <sup>±0,23</sup><br>b                                     | 5,7 <sup>±0,65</sup><br>a  | 4,1 <sup>±0,66</sup><br>a  | 5,4 <sup>±1,31</sup><br>a | $\hat{y}=3,04+0,040x-0,0002x^2$   | 0,51           | <0,05   | 2,4 <sup>±0,51</sup><br>a                                     | 39,1 <sup>±0,55</sup><br>a | 44,6 <sup>±4,25</sup><br>a | 54,4 <sup>±2,3</sup><br>a  | $\hat{y}=10,9+0,325x$            | 0,84           | <0,001  |
| 90     | 2,6 <sup>±0,30</sup><br>b                                     | 4,9 <sup>±0,98</sup><br>a  | 5,2 <sup>±0,68</sup><br>a  | 5,4 <sup>±0,85</sup><br>a | $\hat{y}=2,75+0,048x-0,0002x^2$   | 0,97           | <0,01   | 4,1 <sup>±0,70</sup><br>a                                     | 5,9 <sup>±0,35</sup><br>c  | 40,2 <sup>±2,05</sup><br>a | 44,8 <sup>±6,25</sup><br>b | $\hat{y}=0,360+0,312x$           | 0,86           | <0,001  |
| 95     | 5,0 <sup>±1,03</sup><br>a                                     | 4,9 <sup>±1,51</sup><br>a  | 3,9 <sup>±0,3</sup><br>a   | 4,5 <sup>±0,40</sup><br>a | ns                                | ----           | ----    | 4,1 <sup>±1,56</sup><br>a                                     | 4,6 <sup>±0,58</sup><br>c  | 8,1 <sup>±0,42</sup><br>c  | 40,5 <sup>±0,57</sup><br>b | $\hat{y}=-2,52+0,225x$           | 0,69           | <0,001  |

A aplicação do fertilizante foi durante a semeadura de feijão, mas a amostragem de solo foi após o manejo do azevém, cultivado em sucessão como planta de cobertura, sem nenhuma adubação. Médias (com valores de desvio padrão sobrescritos) seguidas pela mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em cada dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  houve um resultado distinto sobre os teores de P disponível em todas as camadas de solo, entre os GC. Nesse caso, na ausência de compactação (GC = 80%), os teores do nutriente foram inferiores em relação a elevação da compactação, com diferenças de 36,6; 32,5 e 26,8  $\text{mg dm}^{-3}$  em 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Com essa dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , também houve distinções nos teores de P no solo nas camas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m entre os GC de 85 a 95 %, sendo que o aumento do GC proporcionou menores teores de P em todas as camadas de solo. Nessas camadas, para as doses de 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  as respostas dos GC de 85 a 95% foram sobre os teores de P tenderam a ser similares aos reportados para a dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com diferenças acentuadas de 22,9 e 38,5  $\text{mg dm}^{-3}$  em 0,10-0,20 m; e 34,5 e 36,5  $\text{mg dm}^{-3}$  m 0,20-0,30 m, com a aplicação de 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Por fim, outro resultado em destaque é o maior teor de P na camada de 0,20-0,30 m com a aplicação de 50 a  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no GC de 85% em relação ao GC de 80% (Tabela 3).

Por fim, as respostas das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m formam em sua maioria linear, exceto para o GC de 80 e 95 % nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20m os demais graus de compactação com resposta linear. A partir das regressões polinomiais, obteve-se as doses de máxima eficiência de 114, 100 e 45  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para os GC de 80, e 95 %, respectivamente, na camada de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; (Tabela 3). Assim, fazendo a média, incluindo as doses derivadas das regressões ajustadas na camada de 0-0,10 m, obteve-se os valores de resposta sobre os teores de P no solo (0-0,30 m) em doses máximas de 109, 102, 115 e 79  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para os GC de 80, 85, 90 e 95 %, respectivamente.

#### 2.5,4 LIMITAÇÕES NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E NUTRIÇÃO DE FÓSFORO NAS PLANTAS DECORRENTES DA INTERAÇÃO ENTRE A COMPACTAÇÃO DO SOLO E A ADUBAÇÃO FOSFATADA.

A produção, tanto de massa seca (milho, trigo, feijão e azevém) quando de grãos (milho e feijão) foram influenciadas negativamente pelos GC e positivamente pela adubação fosfatada. Dentre as culturas, o milho foi a que teve a maior redução no acúmulo de massa seca (MS) na parte aérea pelo aumento da compactação do solo, em todas as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  houve decréscimo gradual de aproximadamente 8810 kg de MS  $\text{ha}^{-1}$  entre o GC de 80 e 95%; e similarmente, de aproximadamente 6246 kg de MS  $\text{ha}^{-1}$  entre o GC de 85 e 95%

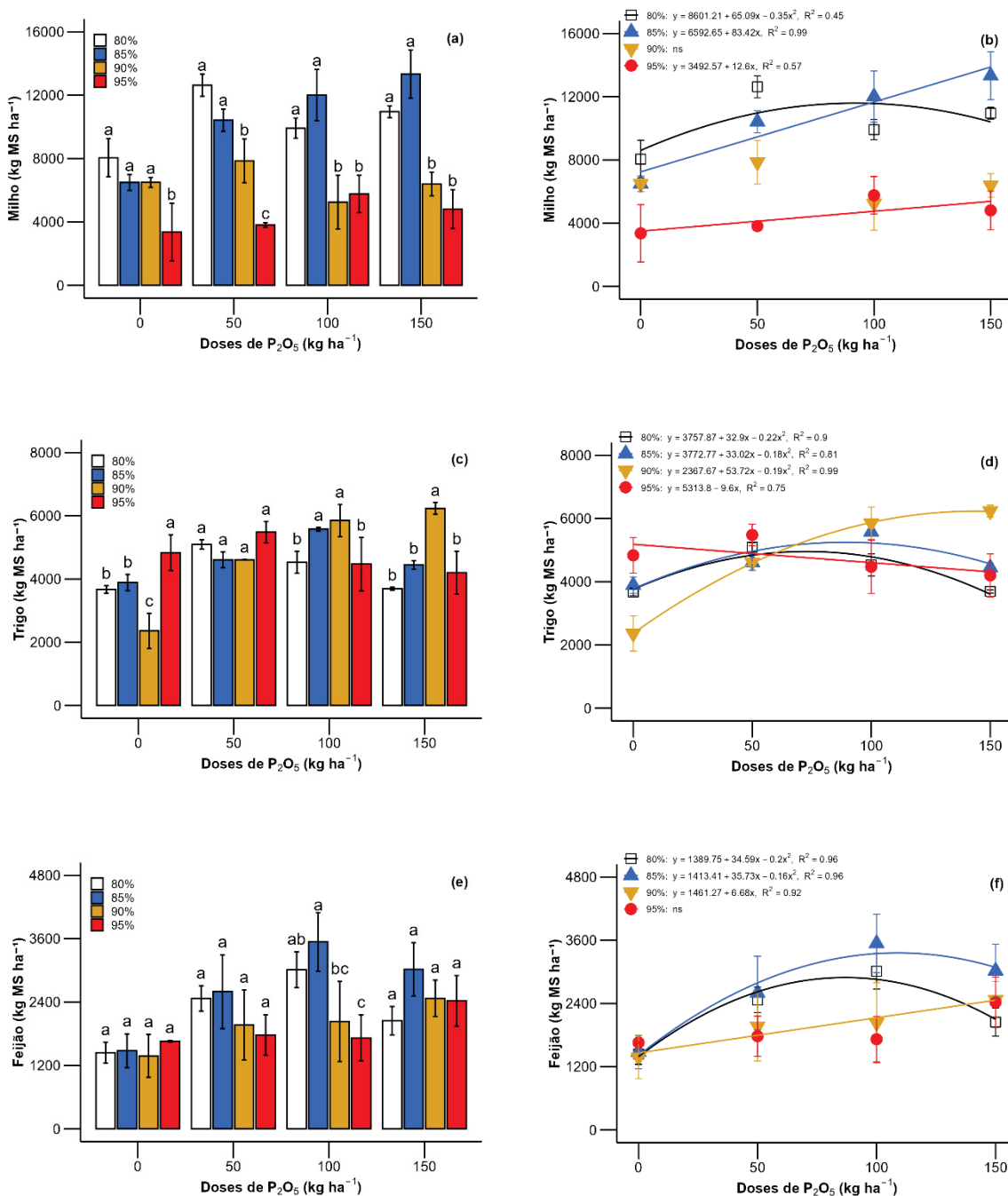


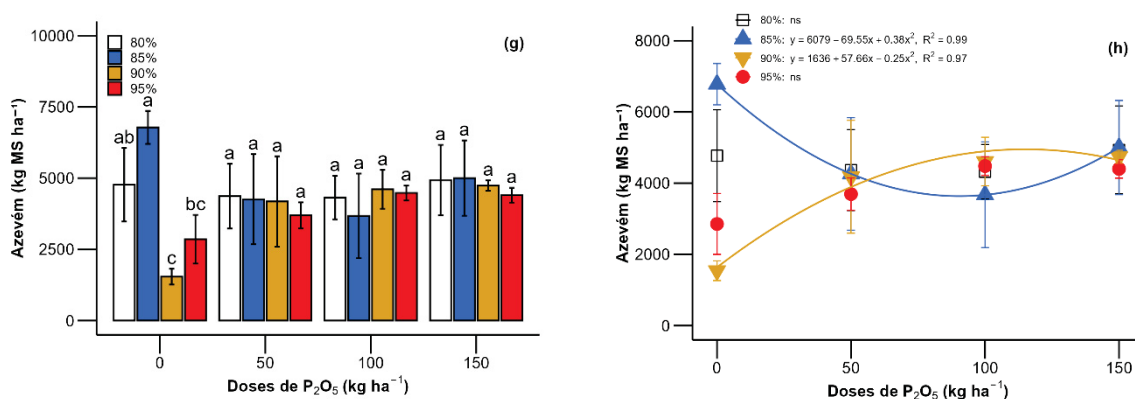
com a as aplicações de 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Mesmo na ausência de adubação, a compactação do solo prejudicou o desenvolvimento das plantas, em que na ausência de compactação houve produção aproximada de 8000 kg de MS ha<sup>-1</sup> com o GC de 80 % e apenas 3358kg de MS ha<sup>-1</sup> com o GC de 95% (Figura 8a). A aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> promoveu acréscimos quadrático na MS do milho no GC de 80% e lineares nos GC de 85 e 95% (Figura 8b). Assim, na ausência de compactação, a produção máxima de 11627 kg de MS ha<sup>-1</sup>, foi obtida com a aplicação de 93 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; enquanto que, nos GC de 85 e 95%, com a aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, obteve-se as produções de 12513 e 5382 kg de MS ha<sup>-1</sup>.

Para o trigo, o acúmulo de MS foi afetado pelos GC na ausência da adubação e com a aplicação de 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Sem a aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a maior produção de trigo (4835 kg de MS ha<sup>-1</sup>), superior ao demais tratamentos, ocorreu no GC de 95%, seguido pelos GC de 80 e 85%, os quais não diferiram entre si, porém foram superiores ao GC de 90 %, que limitou a produção do trigo em 2360 kg de MS ha<sup>-1</sup>. Contudo, tanto com a aplicação de 100 quanto de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a produção da cultura foi máxima no GC de 90% (Figura 8c). Deste modo, pode-se inferir que o acúmulo de MS pelo trigo é influenciado pela adubação fosfatada de modo distinto entre os GC. Devido à alta produção de MS no GC de 95 %, houve um efeito linear que resultou no decréscimo da produção de 9,6 kg de MS para cada a kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado. Porém, para todos os demais GC houve respostas quadráticas das doses de fertilizante aplicadas sobre a produção de MS do trigo. Derivando as regressões ajustadas, as doses que proporcionaram as melhores produções foram 75 (4988 kg de MS ha<sup>-1</sup>), 92 (5287 kg de MS ha<sup>-1</sup>) e 141 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (6165 kg de MS ha<sup>-1</sup>) para os GC de 80, 85 e 90 %, respectivamente (Figura 8d).

Os GC influenciaram o acúmulo de MS no feijão apenas com a aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 8e). Nesta dose, o maior crescimento ocorreu no GC de 85 %, o qual foi superior à produção de MS nos GC de 90 e 95 %, os quais não diferiram entre si. Para o GC de 80 %, o acúmulo de MS foi intermediário (3100 kg de MS ha<sup>-1</sup>), não diferindo da produção obtida nos GC de 85 e 90 %, porém superior ao GC de 95 % (1900 kg de MS ha<sup>-1</sup>). Em relação a resposta da adubação, foram obtidas respostas: quadráticas para os menores GC; linear para o GC de 90 %; e não houve influência das doses sobre a produção de MS do feijão no maior GC

(Figura 8f). As equações ajustadas demonstram que com o aumento da compactação do solo, maiores doses de  $P_2O_5$  são requeridas para manter o acúmulo de MS da cultura: 86 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  para GC de 80 % (2885 kg de MS  $ha^{-1}$ ); 112 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  para GC de 85 % (3408 kg de MS  $ha^{-1}$ ) e 150 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  para GC de 90 % (2463 kg de MS  $ha^{-1}$ ). Contudo, em condições severas, tais como as impostas no GC de 95%, o aumento da adubação não é suficiente para manter a produção (Figura 8f).





**Figura 8.** Produção de massa seca de milho (a, b), trigo (c, d), feijão (e, f) e azevém (g, h), em função dos graus de compactação do solo e das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas na semeadura das culturas, sob sistema de plantio direto. Médias seguidas da mesma letra, comparando os graus de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Com relação a cultura do azevém, é importante ressaltar que esta não foi adubada. Então, a influência no seu crescimento, quando condicionado pelas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, é devido ao efeito residual da adubação realizada na cultura antecessora (feijão). Sobre a produção de MS do azevém, apenas houve distinção dos GC na ausência da aplicação de fertilizante fosfatado no feijão. Nesse caso, verificou-se a seguinte ordem de distinção entre os GC: 85 % > 90 % = 95 %; enquanto que a produção de MS do azevém com o GC de 80 % (4770 kg MS ha<sup>-1</sup>) foi similar aos reportados para os GC de 85 (6780 kg MS ha<sup>-1</sup>) e 95 % (26853 kg MS ha<sup>-1</sup>), porém superior à 90 % - 1540 kg MS ha<sup>-1</sup> (Figura 8g). Neste caso, houve resposta das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, apenas nos GC de 85 e 90 %, ambas quadráticas, porém inversas. No GC de 85 %, houve redução no acúmulo de MS do azevém até a aplicação de 92 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, de 6079 para 2897 kg MS ha<sup>-1</sup>. Mas, a partir dessa dose, houve incremento de MS na cultura, atingindo o máximo de 4197 kg MS ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Já no GC de 90 %, a resposta quadrática demonstrou que o crescimento máximo do azevém (4961 kg MS ha<sup>-1</sup>) ocorre com a aplicação de 115 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 8h).

O acúmulo de fósforo na parte aérea do milho aumentou de forma consistente com a elevação das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sobretudo nos níveis de compactação de 80 e 85% (Figura 9a). O maior valor de acúmulo foi registrado na dose de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com uma média de 13,0 g/kg<sup>-1</sup> sob o grau de

compactação de 80%, o que indica que a menor restrição física do solo favoreceu a absorção do nutriente pelas plantas. Por outro lado, os níveis de compactação de 90 e 95% apresentaram acúmulos mais baixos e menos responsivos ao aumento das doses de  $P_2O_5$ , sugerindo limitação no desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, na exploração do solo.

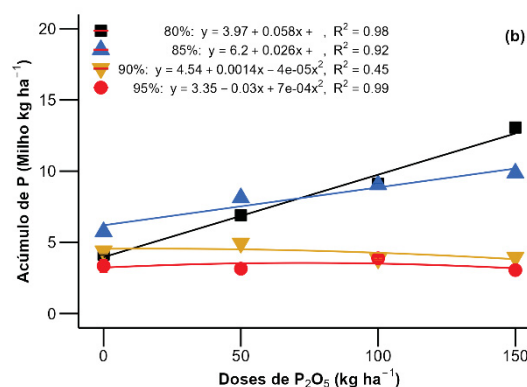
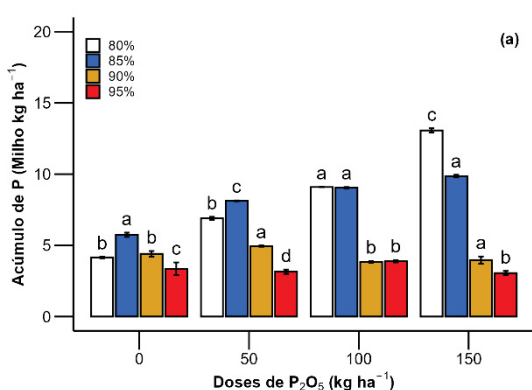
A análise de regressão (Figura 9b) mostrou que apenas o nível de compactação de 85% apresentou resposta linear positiva ao aumento das doses de  $P_2O_5$ , evidenciando que, mesmo com um grau de compactação de 85%, é possível alcançar incrementos no acúmulo do nutriente, desde que a densidade do solo não exceda o limite de tolerância fisiológica da cultura. Nos graus de 90 e 95%, as respostas foram estáveis ou decrescentes, o que reforça a hipótese de que o excesso de compactação limita a absorção de fósforo, mesmo quando este está disponível no solo.

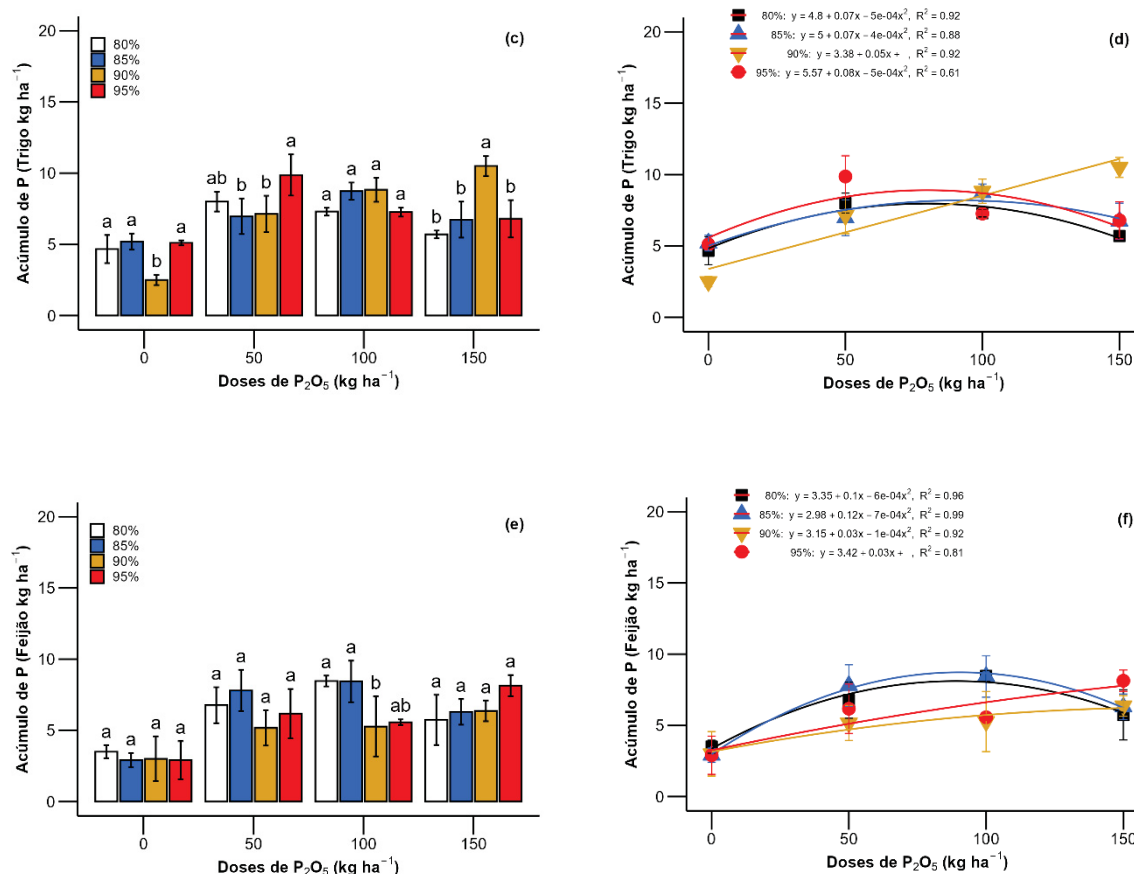
O acúmulo de fósforo na parte aérea do trigo variou em função dos níveis de compactação do solo e das doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Os maiores valores foram observados nas doses de 50 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ , com uma média de 9,8 e 10,5 g/kg<sup>-1</sup> principalmente no grau de compactação de 95 e 90 %, respectivamente, (Figura 9c), indicando que essas condições físicas favoreceram o desenvolvimento radicular e a absorção do nutriente. Em contrapartida, o nível de compactação de 80% apresentou os menores acúmulos nas doses mais elevadas, sugerindo possível redução na eficiência de absorção de fósforo, possivelmente associada à menor resistência mecânica e menor exploração radicular.

A análise de regressão (Figura 9d) revelou que o nível de compactação de 90% apresentou resposta linear positiva ao aumento das doses de  $P_2O_5$ , refletindo maior eficiência de absorção do nutriente sob essa condição. Já os demais níveis apresentaram comportamento quadrático, com resposta intermediária ou decrescente nas doses mais altas, indicando um limite fisiológico de absorção ou possível acúmulo de P não aproveitado, especialmente sob restrições físicas mais brandas ou severas. Esses resultados sugerem que há uma faixa de compactação ideal para otimizar a absorção de fósforo no trigo, acima ou abaixo da qual há perda de eficiência no uso do nutriente.

O acúmulo de fósforo na parte aérea do feijoeiro aumentou em função das doses de  $P_2O_5$ , com destaque para os níveis de compactação de 80 e 85%, que apresentaram os maiores valores médios (Figura 9e). O maior acúmulo foi registrado na dose de 50 e 100  $kg\ ha^{-1}$   $P_2O_5$ , sob o grau de compactação de 85%, obtendo uma média 7,8 e 8,4  $g/kg^{-1}$ , respectivamente, o grau de compactação de 80%, que também demonstrou resposta crescente com o aumento das doses de  $P_2O_5$  obteve uma média de 8,4  $g/kg^{-1}$  com aplicação de 100  $kg\ ha^{-1}$   $P_2O_5$ . Por outro lado, os níveis de compactação de 90% e 95% apresentaram acúmulos mais baixos e com menor variação entre as doses, sugerindo uma possível limitação física ou fisiológica à absorção de fósforo nessas condições.

A análise de regressão (Figura 9f) revelou que o nível de compactação de 90% ajustou-se a uma curva quadrática, com acúmulo máximo estimado entre 100 e 150  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , enquanto o nível de 85% apresentou tendência linear crescente. Já os níveis de 80 e 95% exibiram comportamento mais estável, com baixa resposta à adubação fosfatada, o que pode indicar limitação no desenvolvimento radicular e menor eficiência na absorção de fósforo. Esses resultados sugerem que existe uma faixa ideal de compactação que permite o desenvolvimento radicular adequado e a otimização da absorção do nutriente.

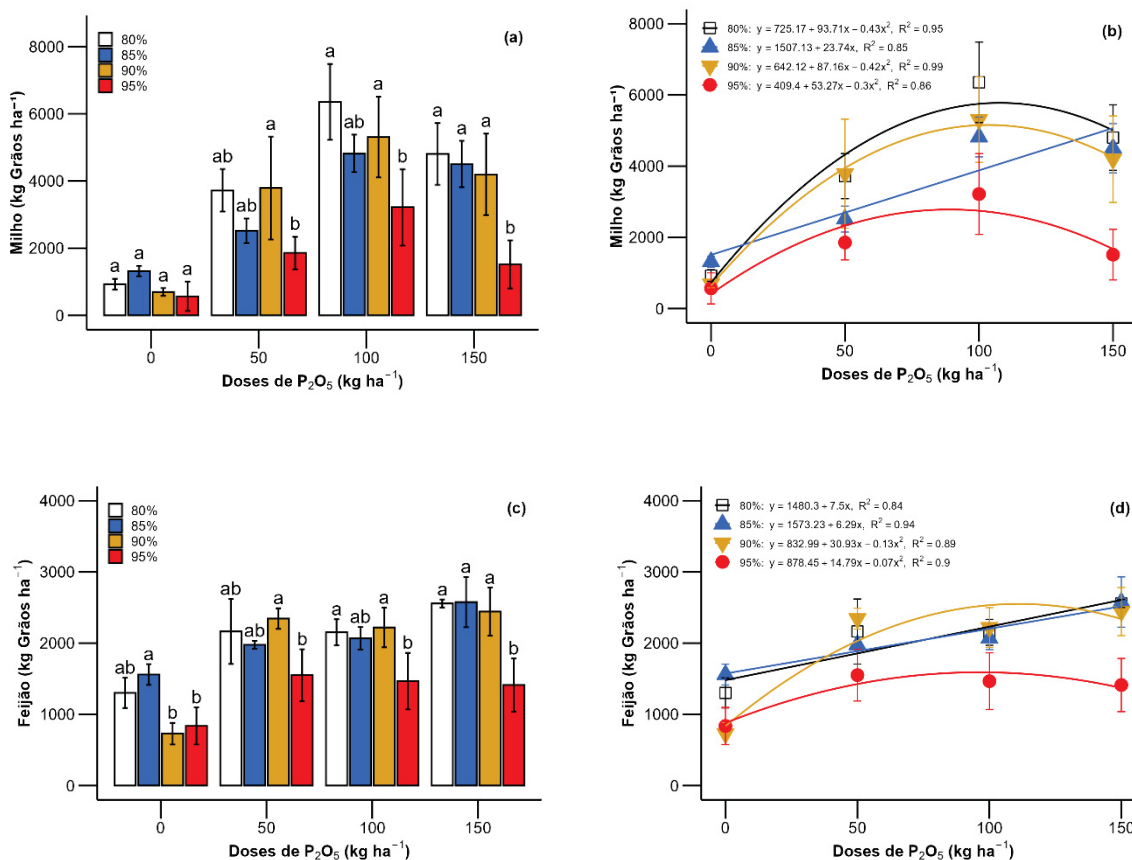




**Figura 9:** Acúmulo de P nas plantas de milho (a, b), trigo (c, d) e feijão (e, f), em função dos graus de compactação do solo e das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas na semeadura das culturas, sob sistema de plantio direto. Médias seguidas da mesma letra, comparando os graus de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

As diferenças no crescimento das plantas de milho e feijão também influenciaram a produtividade de grãos das culturas (Figura 10). A produtividade do milho apresentou interação entre os GC e as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> fatores analisados. Nas doses de 50, 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a produtividade de milho foi similar entre os GC de 80, 85 e 90 %. Enquanto que, a produtividade dessa cultura foi severamente limitada no GC de 95 % em todas as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 10a). Observou-se um incremento na produtividade de grãos com as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, até 6.354 e 5.309 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sob os GC de 80 e 90%, respectivamente. A resposta das doses sobre a produtividade do milho (Figura 10b) foi quadrática para os GC de 80, 90 e 95 % e linear para o GC de 85 %. Assim, foram obtidas as produtividades de 5831; 5068; 5164 e 2774 kg de grãos ha<sup>-1</sup>, respectivamente com as aplicações de 109 (GC de 80 %); 150 (GC de 85 %); 104 (GC de 90 %) e 89 kg

$\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (GC de 95 %), demonstrando que o acréscimo na compactação reduz a eficiência da adubação fosfatada.



**Figura 10:** Produtividade de grãos de milho (a, b) e feijão (c, d), em função dos graus de compactação do solo e das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas na semeadura das culturas, sob sistema de plantio direto. Médias seguidas da mesma letra, comparando os graus de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

A produtividade do feijão também apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . As maiores produtividades foram observadas nos níveis de compactação de 80, 85 e 90 %, principalmente na dose de 150  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . A produtividade do feijão foi limitada tanto pela ausência de adubação quanto pela compactação. Nesse caso, sem a sem a adubação fosfatada, a produtividade do feijão foi severamente reduzida a valores próximos de 800  $\text{kg de grãos ha}^{-1}$ , nos níveis de 90 e 95 % (Figura 10c). Entre os GC, a produtividade do feijão teve resposta linear nos dois menores GC; e quadrática nos dois maiores GC. Neste caso, para os GC de 80 e 85 % as produtividades máximas (2516 a 2605  $\text{kg de grãos ha}^{-1}$ ) são similares com a aplicação de 150  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . E, para os GC de 90 e 95 % as doses de máximas foram de 119 e 106  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,



respectivamente. Embora as doses de máxima entre esses dois GC sejam similares, as produtividades máximas foram muito divergentes: equivalentes a 2672 e 1660 kg de grãos ha<sup>-1</sup> para os níveis de 90 e 95 %, respectivamente (Figura 10d). Esses resultados demonstram a sensibilidade da cultura do feijão a compactação do solo, que mesmo mantendo doses similares, a produtividade pode ser reduzida em aproximadamente 1000 kg de grãos ha<sup>-1</sup>) com a elevação da compactação de um nível moderado (GC de 90 %) a alto (GC = 95%).

## 2.6 DISCUSSÃO

### 2.6,1 FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A resistência à penetração (RP) é um importante indicador da compactação do solo, influenciada por fatores como o manejo agrícola, a umidade do solo e o sistema radicular das culturas (Bengough et al., 2011). Os resultados obtidos neste estudo mostram que a RP aumentou progressivamente com a compactação do solo e foi maior nas camadas mais profundas, o que está em conformidade com estudos anteriores (Beutler & Centurion, 2004; Bertollo et al., 2019). No presente estudo, a RP foi mais elevada na camada de 10-20 cm e 20-30 cm, especialmente após o cultivo do feijão, o que pode ser atribuído ao efeito cumulativo do tráfego agrícola e ao tipo de sistema radicular da cultura. De acordo com Kozłowski, (1999), solos sob cultivo contínuo tendem a sofrer compactação progressiva, principalmente nas camadas subsuperficiais, onde ocorre maior restrição ao crescimento das raízes.

Outro ponto relevante é que, segundo Busscher et al. (2000), valores de RP superiores a 2 MPa podem restringir o crescimento radicular e, conseqüentemente, limitar a absorção de água e nutrientes. No presente estudo, a RP ultrapassou esse limite nos tratamentos com maior compactação, especialmente pós-feijão, o que indica possíveis dificuldades para o desenvolvimento das culturas subsequentes. Esses achados são semelhantes aos de Ashworth, A. J. et al. (2020), que observaram que sistemas agrícolas manejados sem práticas conservacionistas podem levar ao aumento da resistência à penetração (RP) do solo ao longo do tempo, especialmente nas camadas subsuperficiais.

Além disso, os resultados indicam que a cultura do milho apresentou a menor RP em todas as profundidades, sugerindo que seu sistema radicular pode ter contribuído para a estruturação do solo. Isso está de acordo com estudos como o de

Correa *et al.* (2019), que relatam que culturas de gramíneas podem melhorar a porosidade do solo devido ao seu sistema radicular fasciculado, promovendo maior infiltração de água, também se destacam a importância da plasticidade adaptativa da RSA, que permite às plantas modificar sua arquitetura radicular em resposta à compactação, promovendo características como raízes mais espessas, maior tortuosidade e ângulos de crescimento ajustados, essas adaptações podem melhorar a penetração das raízes em solos compactados.

#### 2.6,2 DINÂMICA DO P EM SOLOS COMPACTADOS E NAS PLANTAS

A compactação do solo altera significativamente os processos físicos e biogeoquímicos que regulam a disponibilidade e o aproveitamento do fósforo (P) pelas plantas. Neste estudo, observou-se que a compactação elevada (90% e 95%) limitou a eficiência da adubação fosfatada, mesmo com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , resultando em menores teores de P disponível no solo. Essa limitação está relacionada à redução da porosidade total e da condutividade hidráulica em solos compactados, o que restringe o fluxo difusivo de água e nutrientes — principal mecanismo de transporte do fósforo no solo (Barber, 1995; Schjønning *et al.*, 2017). Como consequência, mesmo em solos com teores adequados de P, a absorção pode ser prejudicada. Além disso, a compactação dificulta o crescimento e a distribuição das raízes, restringindo a exploração do volume de solo onde o P está disponível (Bengough *et al.*, 2011; Tracy *et al.*, 2011). Em especial, as raízes tendem a se concentrar em camadas menos densas, reduzindo a absorção de P em profundidade (Lipiec *et al.*, 2003), o que é particularmente relevante em sistemas de plantio direto, nos quais a compactação superficial é comum devido ao tráfego de máquinas (Hamza & Anderson, 2005).

Além das limitações físicas, a compactação influencia processos químicos importantes, como a adsorção e a precipitação do fósforo. Em solos ácidos tropicais, o fósforo é fortemente fixado por óxidos de ferro e alumínio, especialmente nas formas de P-Al e P-Fe, que são pouco disponíveis para as plantas (Novais & Smyth, 1999; Sato *et al.*, 2021). A compactação pode aumentar o contato entre partículas e intensificar essas reações, diminuindo ainda mais a disponibilidade do nutriente (Kopittke *et al.*, 2019). No entanto, diferentemente do que se espera para um nutriente de baixa mobilidade, os resultados também demonstraram valores elevados de fósforo nas camadas subsuperficiais (10–20 e 20–30 cm), particularmente quando foram aplicadas doses mais elevadas  $100$  e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de

$P_2O_5$ . Essa tendência sugere que, sob condições de menor compactação, o fósforo pode ter alcançado níveis próximos à saturação no solo, facilitando sua movimentação vertical por difusão ou redistribuição ao longo dos ciclos agrícolas. Ainda assim, nos níveis de compactação mais elevados (90% e 95%), a restrição física continua sendo um fator limitante, resultando em menores teores de fósforo nas camadas mais profundas. Esse padrão reforça a hipótese de que o excesso de aplicação de adubação fosfatada, aliado à compactação do solo, pode favorecer a formação de zonas de acúmulo no perfil, possivelmente similares a um claypan que atuam como barreiras físicas e químicas à redistribuição e absorção do nutriente. Como discutido por Mitzscherling et al. (2023), tais camadas podem comprometer a dinâmica microbiana e a eficiência de absorção de nutrientes, exigindo estratégias de manejo que integrem correção física e racionalização da adubação fosfatada.

Do ponto de vista fisiológico, a deficiência de P em ambientes compactados tem efeitos significativos no metabolismo das plantas. O fósforo é essencial na fotossíntese, na produção de ATP e no desenvolvimento de raízes finas, responsáveis pela absorção eficiente de nutrientes (Vance et al., 2003). Culturas como milho e feijão, quando cultivadas em solos compactados com baixa disponibilidade de P, tendem a apresentar crescimento limitado, menor área foliar e redução na produtividade (Beutler et al., 2001; Silva et al., 2014).

Adicionalmente, a compactação afeta negativamente a microbiota do solo, incluindo microrganismos solubilizadores de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares, que desempenham papel fundamental na disponibilização de formas orgânicas e insolúveis de P (Smith & Smith, 2011; Chen et al., 2022). A redução do espaço poroso e da oxigenação do solo compromete a atividade biológica e os processos de mineralização do fósforo orgânico, reduzindo ainda mais o suprimento do nutriente às plantas (Chulo et al., 2021).

Na prática agrícola, estratégias de manejo são necessárias para mitigar os efeitos da compactação na dinâmica do fósforo. O uso de fontes solúveis e a aplicação localizada de fertilizantes são práticas que aumentam a eficiência do P em solos compactados (Withers et al., 2018). Além disso, o uso de cultivares com maior capacidade de exploração radicular e eficiência na absorção de fósforo pode representar uma alternativa viável (Lynch, 2011).

Assim, os resultados aqui discutidos corroboram com diversos estudos que destacam a interação negativa entre compactação do solo e disponibilidade de

fósforo, reforçando a importância de estratégias integradas que envolvam o manejo físico e químico do solo, bem como práticas conservacionistas e o uso racional de fertilizantes fosfatados (Sá et al., 2016; Keller et al., 2019).

### 2.6,3 CONSEQUÊNCIAS DA COMPACTAÇÃO E MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA SOBRE A PRODUÇÃO VEGETAL.

A interação significativa entre os graus de compactação do solo e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas sobre a massa seca do milho evidencia a complexa relação entre o ambiente físico do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Observou-se que os maiores acúmulos de biomassa ocorreram sob condições de compactação moderada (80 e 85% da densidade máxima), especialmente nas faixas de adubação entre 50 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ . Esse resultado sugere que, embora a compactação excessiva seja geralmente associada à limitação do crescimento radicular, níveis moderados podem, em certos casos, melhorar o contato entre raízes e solo, favorecendo a absorção de água e nutrientes — desde que a disponibilidade de fósforo esteja adequadamente suprida. Resultados semelhantes foram relatados por Souza et al. (2008), que verificaram incremento na massa seca do milho com doses mais elevadas de fósforo (200 e 400 mg dm<sup>-3</sup>), principalmente em densidades menores (1,34 e 1,44 g cm<sup>-3</sup>), compatíveis com os graus de compactação intermediários deste estudo. De forma complementar, Guo et al. (2024) mostraram que a aplicação de fósforo em solos sujeitos a estresse físico-químico, como os salinos, elevou a massa seca do milho em até 15,36%, efeito atribuído à melhoria da estrutura do solo e à dinâmica do carbono, fatores que também podem ter contribuído para a maior eficiência da adubação sob compactações moderadas.

Durante o ciclo da cultura, no entanto, foi registrada escassez de chuvas justamente no período de florescimento — fase crítica para o acúmulo de biomassa. Essa limitação hídrica pode ter comprometido o pleno desenvolvimento das plantas, especialmente nos graus mais elevados de compactação (90% e 95%), onde a menor porosidade dificulta a infiltração e a retenção de água. Assim, a combinação entre déficit hídrico e compactação excessiva pode ter intensificado os efeitos negativos sobre a produtividade, reforçando a importância de considerar conjuntamente os fatores físicos e climáticos no manejo do solo.

De fato, a compactação excessiva interfere diretamente na dinâmica física e biológica do solo. Segundo Long et al. (2024), o aumento da densidade e a redução

da porosidade limitam a difusão de gases, o crescimento radicular e o acesso a água e nutrientes, como o fósforo. Além disso, o estresse físico pode reduzir a atividade microbiana, prejudicando processos como a mineralização e a solubilização de formas indisponíveis de P. No presente estudo, o grau de compactação de 95% resultou nos menores valores de massa seca, mesmo sob as maiores doses de  $P_2O_5$ , demonstrando que a limitação física não foi superada apenas pela adubação, sendo necessário um manejo integrado da estrutura do solo.

De forma semelhante ao observado para o milho, a massa seca do trigo também foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação do solo e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas. No caso do trigo, o grau de compactação de 90% promoveu os maiores acúmulos de biomassa com aplicações de 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ , sugerindo que essa condição física favoreceu o crescimento radicular e a absorção de nutrientes. Em contraste, sob compactação de 80%, os menores valores de massa seca nas doses mais altas de fósforo indicam que o excesso de porosidade ou a baixa resistência mecânica do solo podem ter limitado o desenvolvimento adequado das raízes.

Esses achados estão em consonância com Zhao et al. (2023), que destacaram a importância do posicionamento do fósforo em zonas com maior atividade radicular para maximizar sua eficiência de uso pelo trigo. Da mesma forma, Shafi et al. (2015) demonstraram que a aplicação localizada de 105 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo na zona de crescimento das raízes aumentou significativamente a biomassa da espiga e o rendimento de grãos, reforçando a necessidade de alinhar a adubação fosfatada às condições físicas do solo.

Adicionalmente, durante a fase de espigamento, foi registrado excesso de chuvas (out/2023 figura 1), o que favoreceu a ocorrência de doenças e erosão superficial, particularmente nos tratamentos com maior compactação. Esse cenário potencialmente contribuiu para a lixiviação de nutrientes, restringindo ainda mais o acúmulo de biomassa e o desempenho fisiológico da cultura.

A resposta positiva à compactação moderada também foi relatada por Bonfim-Silva et al. (2011), em estudo com Latossolo Vermelho do Cerrado, no qual a produção de massa seca aérea do trigo seguiu um comportamento quadrático, com máximo desempenho em densidade de 1,33 Mg m<sup>-3</sup>. Densidades superiores resultaram em reduções significativas de biomassa, padrão compatível com os

resultados deste estudo, em que tanto as compactações inferiores (80%) quanto a superior (95%) comprometeram a resposta da cultura às doses de  $P_2O_5$ .

Resultados similares foram observados por Ahmad et al. (2008), que constataram que a compactação excessiva reduz a absorção de nitrogênio, fósforo e potássio, restringe o crescimento radicular e, por consequência, compromete a produção de biomassa e o rendimento de grãos. Esses dados reforçam a existência de uma faixa ideal de densidade do solo para o desenvolvimento do sistema radicular do trigo, fora da qual a eficiência na absorção de nutrientes e o desempenho agrônômico são significativamente reduzidos.

A massa seca do feijoeiro apresentou boa resposta à aplicação de  $P_2O_5$  sob o grau de compactação de 85%. No entanto, compactações mais elevadas reduziram significativamente a produção de biomassa, o que pode ser atribuído à limitação imposta ao crescimento radicular. O sistema radicular do feijoeiro é superficial e pouco agressivo, o que restringe sua capacidade de explorar camadas mais profundas do solo em busca de nutrientes (Baldani et al., 2008). Como o fósforo possui baixa mobilidade no solo, sua absorção depende de uma zona próxima às raízes enriquecida com o nutriente, o que justifica a elevada eficiência da adubação fosfatada localizada no sulco de plantio (Fageria & Baligar, 2005).

Além disso, o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é reconhecidamente responsivo à adubação fosfatada, devido a fatores fisiológicos, morfológicos e edafoclimáticos. O fósforo é fundamental para processos metabólicos como a transferência de energia (ATP/ADP), a síntese de ácidos nucleicos e o desenvolvimento dos órgãos radiculares e reprodutivos. Em culturas de ciclo curto e metabolismo acelerado, como o feijoeiro, a exigência por fósforo é acentuada, sobretudo nas fases iniciais e no enchimento de grãos (Vidal et al., 2022; Fageria et al., 2010).

Nos solos tropicais, a disponibilidade de fósforo é naturalmente baixa devido à fixação por óxidos de ferro e alumínio, predominantes em Latossolos e Argissolos. Nessas condições, grande parte do P aplicada forma complexos pouco solúveis, como P-Fe e P-Al, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (Novais & Smyth, 1999; Sato et al., 2021).

Os efeitos da compactação sobre a absorção de fósforo foram evidenciados por Ribeiro et al. (2010), que observaram redução da massa seca da parte aérea da soja com o aumento da densidade do solo, mesmo com a aplicação de  $P_2O_5$ . Isso

demonstra que a compactação pode limitar a resposta das plantas ao fósforo, prejudicando o crescimento radicular. De forma semelhante, Souza et al. (2008) constataram que o aumento da compactação compromete a produção de biomassa ao dificultar a penetração das raízes e o aproveitamento de nutrientes, especialmente aqueles de baixa mobilidade, como o fósforo. Esses efeitos estão diretamente associados às restrições físicas impostas pela compactação, que reduzem o crescimento radicular (Bengough et al., 2006) e limitam o acesso a água e nutrientes (Soane & Van Ouwerkerk, 1995).

Apesar disso, os resultados também indicaram que, mesmo sob alta compactação, o aumento das doses de fósforo pode atenuar parcialmente os efeitos negativos da limitação física. Esse comportamento é compatível com os achados de Souza et al. (2008), que verificaram aumento na massa seca da parte aérea da soja com doses elevadas de  $P_2O_5$ , mesmo em solos densificados. Isso sugere que a maior disponibilidade do nutriente pode, até certo ponto, compensar a limitação imposta ao crescimento radicular.

No cultivo do azevém, observou-se que, na ausência de adubação fosfatada, a maior produção de massa seca ocorreu sob 85% de compactação. Contudo, a aplicação crescente de  $P_2O_5$  resultou em aumentos proporcionais na biomassa nos graus de compactação de 85% e 90%. Tal resposta pode ser atribuída à maior capacidade do sistema radicular do azevém, caracterizado por elevada agressividade e profundidade, de explorar os horizontes do solo e se beneficiar da disponibilidade de fósforo, mesmo sob condições parcialmente limitantes (Gatiboni et al., 2000).

Esses achados estão em consonância com os resultados de Valadão et al. (2005), que relataram a necessidade de doses mais elevadas de  $P_2O_5$  para manter o desempenho produtivo do milho em solos compactados, similar ao de tratamentos em solos não compactados. Isso evidencia que a compactação impõe restrições ao desenvolvimento radicular, exigindo ajustes na adubação para mitigar os efeitos negativos sobre a absorção de nutrientes.

Adicionalmente, observa-se que o azevém foi capaz de aproveitar o efeito residual do fósforo aplicado no cultivo anterior com feijão. Estudos como o de da Silva et al. (2014) demonstraram que a aplicação de doses mais elevadas de  $P_2O_5$  no primeiro cultivo proporcionou teores residuais suficientes para sustentar elevadas produtividades nos cultivos subsequentes, mesmo sem novas adubações. Além



disso, a presença de leguminosas como culturas antecessoras pode potencializar o aproveitamento do fósforo residual, sobretudo quando utilizadas fontes de menor solubilidade. Ramos et al. (2010) observaram que esse efeito é ainda mais pronunciado em solos com baixos teores de óxidos de ferro e alumínio, favorecendo a disponibilidade de P ao cultivo sucessor.

Nas culturas de milho e feijão, os maiores acúmulos de fósforo na parte aérea foram observados nos graus de compactação de 80 e 85%, enquanto o trigo respondeu de forma mais eficiente sob compactações mais elevadas, como 90 e 95%. Esses resultados indicam que a resposta à adubação fosfatada varia entre as espécies, com incremento no acúmulo de P à medida que se elevam as doses de  $P_2O_5$ , porém com limites fisiológicos distintos para cada cultura. De maneira geral, compactações excessivas (95%) comprometeram a eficiência de absorção do fósforo em todas as culturas avaliadas, provavelmente devido à limitação do crescimento radicular e da difusão de nutrientes no solo.

Barzegar et al. (2006) relataram interações entre a compactação do solo e os nutrientes fósforo e zinco no crescimento do trevo, observando que o acúmulo de fósforo por unidade de comprimento radicular aumentou em solos compactados. Os autores sugerem que esse efeito pode representar uma adaptação fisiológica das plantas, capaz de manter a absorção de nutrientes mesmo sob estresse físico. Esse mecanismo ajuda a compreender os resultados do presente estudo, especialmente o maior acúmulo de P sob compactação elevada (95%) com aplicação de 50 e 100 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , sugerindo que, mesmo com restrição física, a planta pode compensar parcialmente suas limitações ao ajustar a eficiência de absorção, desde que haja fósforo disponível no solo. Zuo et al. (2017), ao estudarem a colza em solos compactados com incorporação de palha, observaram que a compactação moderada favoreceu o crescimento inicial e o acúmulo de nutrientes, como o fósforo, ao melhorar o contato solo-semente e aumentar a retenção de umidade. No entanto, níveis elevados de compactação reduziram significativamente o crescimento radicular e dificultaram a absorção de nutrientes, mesmo com disponibilidade adequada no solo.

A compactação do solo afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes, sobretudo os de baixa mobilidade como o fósforo. De acordo com Silva (2021), a redução da porosidade e da difusividade sob compactação excessiva limita o movimento dos íons em direção às raízes, o que pode explicar os menores

acúmulos de P sob 90% e 95% de compactação no milho observados neste estudo. Além disso, a restrição física ao crescimento radicular desencadeia respostas fisiológicas como o aumento da produção de ácido abscísico, hormônio de estresse que reduz a área foliar e a atividade fotossintética, impactando negativamente o crescimento da planta (RICHART et al., 2005). Esses fatores combinados contribuem para a menor eficiência de uso do fósforo sob compactação severa, ressaltando a importância do manejo adequado da densidade do solo para garantir o bom funcionamento do sistema solo-planta.

Doses de até 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> promoveram aumento da produtividade do milho nos graus de compactação de 80% e 90%. No entanto, compactações mais elevadas comprometeram o desempenho da cultura, comportamento semelhante ao observado para o feijão, cuja produção de grãos também foi favorecida por doses mais altas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nos graus de compactação de 80%, 85% e 90%, mas sofreu redução sob compactação excessiva. Esse padrão de resposta é coerente com estudos recentes, como o de Zawaz et al. (2023), que relataram que a compactação superficial moderada, resultante do tráfego de máquinas em condições reais de campo, não afetou significativamente o rendimento de grãos — especialmente em cultivares com maior capacidade de crescimento radicular em profundidade. Por outro lado, os autores observaram perdas superiores a 15% na produtividade do milho em solos franco-arenosos com elevada compactação, indicando que a resistência mecânica do solo pode restringir a penetração das raízes, dificultar a absorção de água e nutrientes e, assim, limitar o desenvolvimento das culturas.

Esses achados estão em consonância com os resultados do presente estudo, em que o grau de compactação mais elevado (95%) reduziu significativamente a produtividade do milho. Essa tendência também é respaldada por Chen e Weil (2011), que associaram a queda no rendimento à limitação do crescimento radicular e à menor exploração do perfil do solo. Os autores ainda destacam que o uso de plantas de cobertura, como nabo forrageiro e centeio, pode mitigar os efeitos da compactação, ao promover melhorias na estrutura física do solo, favorecer o crescimento radicular e, conseqüentemente, aumentar a produtividade. Esses resultados reforçam a importância de estratégias integradas de manejo, que combinem o uso de cultivares tolerantes à compactação, adubação fosfatada adequada e práticas como o uso de plantas de cobertura, para otimizar o desempenho do milho em áreas sujeitas ao adensamento do solo.

No caso do feijão, a produtividade foi significativamente influenciada pela interação entre os níveis de compactação do solo e as doses de fósforo. Essa resposta pode estar associada não apenas à maior disponibilidade do nutriente, mas também à intensificação da atividade microbiana na rizosfera. De acordo com Wu et al. (2024), a compactação do solo e os níveis de fósforo influenciam dinamicamente as populações de bactérias solubilizadoras de fosfato (PSB) e fixadoras de nitrogênio (NFB), essenciais para a nutrição de leguminosas. Os autores observaram que a compactação moderada, aliada a níveis adequados de fósforo, estimula a atividade dessas comunidades microbianas, promovendo maior disponibilidade de nutrientes no solo. Essa sinergia entre fatores físicos e biológicos pode explicar a alta produtividade observada nos tratamentos com compactações moderadas e adubação fosfatada adequada, enquanto a compactação severa (95%) compromete tanto o desenvolvimento radicular quanto a atividade microbiana, resultando em menores produtividades, mesmo com adubação.

No presente estudo, os melhores resultados produtivos do feijão foram registrados sob compactação de 80%, com doses de 50 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, resultando em produtividades de 2.533 e 2.556 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esses valores são comparáveis aos obtidos por De Lara et al. (2022), que relataram produtividade de 2.337,74 kg ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 111,9 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em sulco. Tais resultados evidenciam que a combinação entre dose adequada e posicionamento eficiente do fertilizante pode maximizar a absorção de fósforo pelas plantas e favorecer o rendimento da cultura. Embora este experimento não tenha avaliado o modo de aplicação do fertilizante, é possível que as condições físicas mais favoráveis do solo sob compactações moderadas (80% e 85%) tenham proporcionado um efeito semelhante, facilitando o desenvolvimento radicular e o acesso ao fósforo. Dessa forma, tanto o manejo da adubação quanto a qualidade física do solo são determinantes para o desempenho agrônomo da cultura do feijão.

## 2.7 CONCLUSÕES

A compactação do solo, sobretudo nas camadas superficiais, comprometeu os atributos físicos do solo, restringindo o crescimento radicular e reduzindo a eficiência de absorção de nutrientes pelas culturas. Em contrapartida, a aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mostrou-se eficiente em aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e em

melhorar o desempenho das plantas, especialmente sob condições de maior compactação.

Os efeitos positivos do fósforo tornaram-se mais evidentes nas culturas subsequentes, resultado do acúmulo residual do nutriente e de sua interação com a estrutura física do solo. Nesse sentido, a integração entre o manejo da compactação e estratégias adequadas de adubação fosfatada representa uma alternativa promissora para fortalecer a sustentabilidade e a produtividade em sistemas de plantio direto.

## 2.8 REFERÊNCIAS

AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. **Bioresource technology**, v. 71, n. 3, p. 253-259, 2000.

AHMAD, N.; HASSAN, F. U.; BELFORD, R. K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): I. Compaction. **Field Crops Research**, v. 110, n. 1, p. 54-60, 2009.

ASHWORTH, A. J.; OWENS, P. R.; ALLEN, F. L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, p. 114062, 2020.

BATEY, Tom. Soil compaction and soil management—a review. **Soil use and management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009.

BENGOUGH, A. Glyn et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of experimental botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

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, p. 437-447, 2006.

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

BEUTLER, A. N., & CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, 34, 1793-1800, 2004.

BEUTLER, A. N., SILVA, M. L. N., CURI, N., FERREIRA, M. M., CRUZ, J. C., & PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25, 167-177 2001.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Compactação do solo na cultura do trigo em Latossolo do cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, p. 1-6, 2011.

BRONICK, Carol Jean; LAL, Rattan. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 999-1003, 2000.

CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 4, p.493-501, 2006.

CHEN, G., WEIL, R. R., & HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, 136, 61-69 2014

CHEN, Guihua; 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.

CLARK, L. J., COPE, R. E., WHALLEY, W. R., BARRACLOUGH, P. B., & WADE, L. J. Root penetration of strong soil in rainfed lowland rice: comparison of laboratory screens with field performance. **Field Crops Research**, 76(2-3), 189-198. 2002.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R. & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*, 255:93-104, 2003.

COLLARES, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. 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**, 32, 933-942. 2008.

CORREA, José et al. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of experimental botany**, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019.

DE LARA, Ronaldo Taborda; PESSENTI, Isabela Letícia. Produtividade, rendimento de grãos e atributos físicos em diferentes sistemas de cultivo com plantio de feijão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 8, pág. e57511831286-e57511831286, 2022.

DE SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição et al. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 94-99, 2008.

FREDDI, O.S, *et al.* Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 31: p. 627-636, 2007.

GATIBONI, LUCIANO COLPO et al. Influência da adubação fosfatada e da introdução de espécies forrageiras de inverno na oferta de forragem de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1663-1668, 2000.

GENRO JUNIOR, S. A., Reinert, D. J., & Reichert, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28, 477-484, 2004.

GŁĄB, Tomasz; KULIG, Bogdan. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 169-178, 2008.

GUO, Zhenxin et al. Straw and phosphorus applications promote maize (*Zea mays* L.) growth in saline soil through changing soil carbon and phosphorus fractions. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1336300, 2024.

HERENCIA, Juan Francisco et al. Comparison of nutritional quality of the crops grown in an organic and conventional fertilized soil. **Scientia horticulturae**, v. 129, n. 4, p. 882-888, 2011.

ISHAQ, M. et al. Efeitos da compactação do subsolo em culturas em Punjab, Paquistão: I. Propriedades físicas do solo e produtividade agrícola. **Soil and Tillage Research**, v. 59, n. 1-2, p. 57-65, 2001.

KELLER, T., SANDIN, M., COLOMBI, T., HORN, R., & OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, 194, 104293. 2019.

KIRK, G. J. D.; KRONZUCKER, HJ4247031. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modelling study. **Annals of botany**, v. 96, n. 4, p. 639, 2005.

KOZLOWSKI, T. T. Soil compaction and growth of woody plants. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 6, p. 596-619, 1999.

LIPIEC, Jerzy et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74-81, 2012.

NAWAZ, Muhammad Mohsin et al. Field traffic-induced soil compaction under moderate machine-field conditions affects soil properties and maize yield on sandy loam soil. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1002943, 2023.

NUNES MR. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, p. 259–260, 149–155, 2015.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 1, p. 57-64, 2005.

POEPLAU, C. et al. Opposing effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial metabolism and the implications for soil carbon storage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 100, p. 83-91, 2016.



RIBEIRO, Marco Aurélio Vitorino et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1157-1164, 2010.

SCHJØNNING, Per et al. Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective. **Advances in agronomy**, v. 133, p. 183-237, 2015.

SCHRÖDER, Dirk. **Physically based real-time auralization of interactive virtual environments**. Logos Verlag Berlin GmbH, 2011.

SHAFI, Mohammad et al. Dry matter partitioning and grain yield of wheat as affected by phosphorus and its applications. **Pak. J. Bot.**, v. 47, p. 281-287, 2015.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n.1-2, p. 5-22, 1995.

SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição de et al. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 94-99, 2008.

TAVARES FILHO, J., Barbosa, G. M. C., Guimarães, M. F., & Fonseca, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25, 725-730, 2001.

WU, Qi et al. Impacts of soil compaction and phosphorus levels on the dynamics of phosphate-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria in the peanut rhizosphere. **Agronomy**, v. 14, n. 9, p. 1971, 2024.

ZHAO, De-Yong et al. Root Distribution, Agronomic Performance, and Phosphorus Utilization in Wheat as Mediated by Phosphorus Placement under Rainfed Coastal Saline Conditions. **Agronomy**, v. 13, n. 11, p. 2700, 2023.



### 3 CAPÍTULO II: INFLUÊNCIA DE GRAUS DE COMPACTAÇÃO E DOSES DE ADUBAÇÃO FOSFATADA NOS ATRIBUTOS ESTRUTURAIS E NO FLUXO DE ÁGUA E AR NO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

#### 3.1 RESUMO

A compactação do solo altera negativamente a estrutura física, reduzindo a conectividade entre os poros e dificultando tanto o desenvolvimento radicular quanto o movimento de água e nutrientes no perfil. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar como os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  influenciam os atributos físicos do solo, especialmente aqueles relacionados à estrutura e ao fluxo de água, em diferentes profundidades de um sistema sob cultivo. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Canguiri, UFPR, num Cambissolo Háplico Distrofíco Tb típico, com relevo moderadamente ondulado, textura argilosa e presença de cascalho. Com baixos níveis de fósforo disponível (P) e sem restrições físicas. O experimento foi iniciado na safra de verão 2022, em campo, sob delineamento experimental de blocos aleatorizados em esquema de parcela subdividida ( $4 \times 4$ ), com três repetições. Os tratamentos dispostos nas parcelas experimentais foram quatro níveis de grau de compactação (GC) do solo: Natural ( $GC=80 \pm 2\%$ ), Leve ( $GC = 85 \pm 2\%$ ), Moderada ( $GC = 90 \pm 2\%$ ) e Alta ( $GC = 95 \pm 2\%$ ), induzidas pelo tráfego de um trator agrícola (CASE 165 de 10.500 kg). Os níveis de compactação do solo foram definidos através da curva de compactação do solo, por meio do teste de Proctor (ASTM, 1992), identificando os valores de densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação. Nas subparcelas, foram aplicadas as doses de  $P_2O_5$  (0, 50, 100 e 150  $kg\ ha^{-1}$ ), em sulco, por ocasião da semeadura das culturas, utilizando o superfosfato triplo como fonte (SFT). Os resultados mostraram que a Ds foi maior na camada de 0–0,05 m sob GC de 95%, chegando a 1,67  $g\ cm^{-3}$  sem  $P_2O_5$ . A adubação reduziu a Ds para 1,23  $g\ cm^{-3}$  no GC de 90%. A porosidade total (PT) após milho foi de 61,0  $cm^3\ cm^{-3}$  no GC de 85% e atingiu 65,0  $cm^3\ cm^{-3}$  no GC de 90% (0,05–0,10 m), valor semelhante ao observado após feijão-azevém. A macroporosidade (Ma) foi maior no GC de 85% (0,153  $cm^3\ cm^{-3}$ ) e no GC de 95% (0,053  $cm^3\ cm^{-3}$ ). A mesoporosidade (Meso) destacou-se no GC de 80% (0,050  $cm^3\ cm^{-3}$ ) e 85% (0,084  $cm^3\ cm^{-3}$ ). A microporosidade (Micro) foi mais alta no GC de 90%, com até 0,530  $cm^3\ cm^{-3}$ . A Ki após milho foi maior no GC de 85% (132) com 100  $kg\ ha^{-1}$  na camada 0–0,05 m. Em 0,05–0,10 m, GC de 80% com 150  $kg\ ha^{-1}$  teve o maior valor (540). Após feijão-azevém, o destaque foi o GC de 95% (265) e 90% (240) com 100 e 150  $kg\ ha^{-1}$ , respectivamente, na camada 0,10–0,20 m. A Ksat após milho foi maior no GC de 95% (15  $mm\ h^{-1}$ ) sem adubação e no GC de 80% (61,9  $mm\ h^{-1}$ ) com 150  $kg\ ha^{-1}$  após feijão-azevém. Na camada 0,05–0,10 m, o GC de 85% teve destaque com valores entre 23 e 28  $mm\ h^{-1}$ . Em 0,10–0,20 m, o GC de 80% com 50  $kg\ ha^{-1}$  manteve os maiores fluxos, enquanto o GC de 95% permaneceu abaixo de 2  $mm\ h^{-1}$ . A Kar foi mais alta no GC de 85% (15,6  $\mu m^2$ ) na camada superficial com 150  $kg\ ha^{-1}$ , e no GC de 80% (21,0  $\mu m^2$ ) em 0,05–0,10 m. Em 0,10–0,20 m, o GC de 90% com 150  $kg\ ha^{-1}$  apresentou o maior valor. A adubação com  $P_2O_5$  aumentou a Kar principalmente nos GC de 80% e 90%.

**Palavras chaves:** indicadores físicos; fósforo no solo; conservação de solo.

### 3.2 ABSTRACT

Soil compaction negatively affects physical structure by reducing pore connectivity and hindering both root development and the movement of water and nutrients throughout the soil profile. This study aimed to evaluate how different compaction levels and  $P_2O_5$  application rates influence the physical attributes of soil, particularly those related to structure and water flow, across different layers under a cultivated system. The experiment was conducted at the Canguiri Experimental Farm (UFPR), in a typical dystrophic Tb Haplic Cambisol, with moderately undulating topography, clayey texture, and gravel presence. The site had low available phosphorus (P) levels and no physical restrictions. The field trial began during the 2022 summer season, under a randomized block design in a split-plot arrangement ( $4 \times 4$ ), with three replicates. Treatments consisted of four soil compaction levels: Natural (GC =  $80 \pm 2\%$ ), Light (GC =  $85 \pm 2\%$ ), Moderate (GC =  $90 \pm 2\%$ ), and High (GC =  $95 \pm 2\%$ ), induced by tractor traffic (CASE 165, 10,500 kg). Compaction levels were defined based on the soil compaction curve using the Proctor test (ASTM, 1992), identifying the maximum soil bulk density and optimal moisture content. In the subplots,  $P_2O_5$  doses (0, 50, 100, and 150 kg ha<sup>-1</sup>) were applied in the seeding furrow using triple superphosphate (TSP) as the source. Results showed that soil bulk density (Ds) was highest in the 0–0.05 m layer under GC 95% ( $1.67 \text{ g cm}^{-3}$  without  $P_2O_5$ ), while fertilization reduced Ds to  $1.23 \text{ g cm}^{-3}$  at GC 90%. Total porosity (PT) after maize reached  $61.0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  at GC 85% and  $65.0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  at GC 90% in the 0.05–0.10 m layer, similar to values after the common bean–ryegrass succession. Macroporosity (Ma) was highest at GC 85% ( $0.153 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) and 95% ( $0.053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Mesoporosity (Meso) stood out at GC 80% ( $0.050 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) and 85% ( $0.084 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Microporosity (Micro) was highest at GC 90%, reaching up to  $0.530 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Ki after maize was highest at GC 85% (132) with 100 kg ha<sup>-1</sup> in the 0–0.05 m layer. In the 0.05–0.10 m layer, GC 80% with 150 kg ha<sup>-1</sup> showed the highest value (540). After the common bean–ryegrass succession, the highest values were found at GC 95% (265) and 90% (240) with 100 and 150 kg ha<sup>-1</sup>, respectively, in the 0.10–0.20 m layer. Ksat after maize was highest at GC 95% ( $15 \text{ mm h}^{-1}$ ) without fertilization, and at GC 80% ( $61.9 \text{ mm h}^{-1}$ ) with 150 kg ha<sup>-1</sup> after the succession. In the 0.05–0.10 m layer, GC 85% had the highest values (23–28 mm h<sup>-1</sup>). In the 0.10–0.20 m layer, GC 80% with 50 kg ha<sup>-1</sup> maintained the highest flow, while GC 95% remained below  $2 \text{ mm h}^{-1}$ . Air permeability (Kar) was highest at GC 85% ( $15.6 \mu\text{m}^2$ ) in the surface layer with 150 kg ha<sup>-1</sup>, and at GC 80% ( $21.0 \mu\text{m}^2$ ) in the 0.05–0.10 m layer. In the 0.10–0.20 m layer, GC 90% with 150 kg ha<sup>-1</sup> had the highest value.  $P_2O_5$  fertilization increased Kar mainly at GC 80% and 90%.

**Keywords:** physical indicators; soil phosphorus; soil conservation.

### 3.3 INTRODUÇÃO

Os avanços na mecanização agrícola transformaram profundamente as práticas de produção, tornando-as mais eficientes e produtivas. No entanto, o uso intensivo de tratores de alta potência e máquinas agrícolas pesadas tem contribuído para o agravamento da compactação do solo (Keller et al., 2019). Essa compactação mecânica compromete a qualidade física do solo, reduz a

produtividade das culturas e pode gerar impactos ambientais negativos em diferentes condições climáticas, configurando-se como uma ameaça relevante à sustentabilidade dos sistemas agrícolas e à segurança alimentar global.

O efeito da compactação mecânica sobre as propriedades do solo pode variar consideravelmente em função do tipo de solo e das características locais, como textura, teor de matéria orgânica e condições de umidade. Brus e Van Den Akker (2018), sugeriram que solos com menos de 17,5% de argila são mais suscetíveis à compactação. Além disso, uma meta-análise conduzida por Obour e Ugarte (2021) demonstrou que a compactação do solo aumenta a resistência mecânica, com efeitos mais pronunciados em solos de textura média a grossa, especialmente na camada superficial (0–30 cm). Embora os solos argilosos apresentem menor suscetibilidade inicial à compactação, podem impor maiores restrições ao desenvolvimento radicular quando atingem determinados níveis de densidade, dado que o limite crítico ( $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ ) para o crescimento das raízes em solos argilosos (Jin et al., 2017).

Como a compactação do solo deforma sua estrutura, reduz a porosidade e altera a morfologia dos poros, ela desencadeia efeitos negativos em cascata sobre o armazenamento e o transporte de água, o crescimento radicular e a disponibilidade de nutrientes (Keller et al., 2017; Schjønning et al., 2017). Essas alterações comprometem diretamente a produtividade agrícola, a oferta de habitat para organismos do solo e diversas funções ecossistêmicas, como a regulação climática, o fornecimento e a purificação da água (Batey, 2009; Berisso et al., 2013). A compactação eleva a resistência mecânica do solo, que pode ser expressa por meio da densidade do solo ( $D_s$ ) e da resistência à penetração (RP). Valores elevados de  $D_s$  ou RP podem atrasar a emergência das plântulas, dificultar o crescimento e a expansão das raízes, além de limitar a absorção de água e nutrientes (Bengough et al., 2011). De maneira geral, o crescimento das plantas pode ser restringido quando a densidade do solo ultrapassa  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$  em solos argilosos,  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$  em solos siltosos e  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$  em solos franco-arenosos (Arshad et al., 1996).

As alterações na configuração dos poros devido à compactação também comprometem propriedades hidráulicas essenciais, como a condutividade hidráulica saturada ( $K_{\text{sat}}$ ) e permeabilidade ao ar ( $K_{\text{ar}}$ ), prejudicando a aeração e o fornecimento de água às plantas (Lipiec e Hatano, 2003). Tanto o aumento da resistência mecânica quanto a redução da capacidade hidráulica, ou a combinação

de ambos, podem criar condições físicas desfavoráveis ao crescimento vegetal, visto que fatores como resistência à penetração das raízes, baixa aeração, limitação na infiltração e na absorção de água, ou a interação entre esses fatores sob diferentes condições climáticas, exercem influência decisiva sobre o rendimento das culturas (Lipiec e Hatano, 2003). Estudos demonstram que concentrações de oxigênio no solo inferiores a 10% podem prejudicar severamente o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas (Gill e Miller, 1956; Gliński e Stępniewski, 1985).

A compactação afeta severamente a difusividade de gases no solo, parâmetro diretamente controlado pela porosidade e pela tortuosidade dos poros preenchidos por ar, o que pode resultar em um aumento substancial nas emissões de  $N_2O$  (Pulido-Moncada e Munkholm, 2022). Estudos indicam que a compactação da camada superficial do solo pode elevar as emissões de óxido nitroso em até 1,3 a 42 vezes, dependendo das condições locais e do uso do solo (Pulido-Moncada e Munkholm, 2022). Além disso, a redução da difusão gasosa provocada pela compactação limita o crescimento radicular, ao diminuir o volume de poros aerados e dificultar a dissipação de etileno. Esse acúmulo de etileno ativa respostas hormonais de estresse que inibem o desenvolvimento das raízes (Pandey et al., 2021).

A produção vegetal também é afetada pela compactação de solo. O fornecimento de nutrientes para a parte aérea, especialmente o fósforo (P), um elemento relativamente pouco móvel, e pode ser dificultado (Boone e Veen, 1982; Goss et al., 1989). O fornecimento de P às plantas resulta da interação entre a disponibilidade de P no solo e a capacidade de absorção da planta (Jungk e Claassen, 1989). A disponibilidade de P depende da quantidade presente no solo e da sua mobilidade. As plantas absorvem o fósforo a partir da fase dissolvida; portanto, apenas o fósforo presente na solução do solo ou em equilíbrio com ela está potencialmente disponível. A aquisição de P envolve características da planta como o tamanho do sistema radicular, a eficiência de absorção por unidade de raiz (influxo de P) e o tempo de absorção de cada segmento radicular (Claassen e Jungk, 1984).

O objetivo deste trabalho foi Avaliar os efeitos de diferentes graus de compactação do solo e doses de  $P_2O_5$  sobre os atributos físicos do solo, com foco nas alterações estruturais e hidráulicas resultantes dessas interações em sistema de plantio direto.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 LOCAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO DE CAMPO

O experimento teve início em agosto de 2022, no Centro de Estações Experimentais Fazenda do Canguiri (25° 23' sul, 49° 08' oeste) em um Cambissolo Háplico Distrófico Tb típico, com relevo moderadamente ondulado, textura argilosa (41,5 %) e presença de cascalho. O solo apresentava baixos teores de fósforo disponível (2,9 mg/dm<sup>3</sup>), densidade de 1,20 g/cm<sup>3</sup> e ausência de restrições físicas, características consideradas favoráveis à avaliação dos efeitos da adubação fosfatada e da compactação do solo (Tabela 1 Cap 1). A área experimental encontrava-se em pousio há mais de oito anos, sem histórico recente de cultivo, e recebeu aplicação de calcário (NC = 1832 kg ha<sup>-1</sup>), conforme recomendação do manual de adubação e calagem do Paraná (PAULETTI & MOTTA, 2019).

O município de Pinhais-PR possui um clima temperado úmido (Cfb), caracterizado por temperaturas médias de 22,5 °C no período mais quente e 12,4 °C no período mais frio. A precipitação média anual é de cerca de 1.400 mm, podendo haver incidência ocasional de geada e granizo. (ALVARES et al., 2013).(Ver Fig 1, Cap 1)

O experimento de campo, foi instalado sob delineamento em blocos casualizados, com tratamentos em esquema de parcela subdividida (4×4), com três repetições. Os tratamentos dispostos nas parcelas foram quatro níveis de grau de compactação (GC) do solo: Natural (GC=80±2%), Leve (GC = 85±2%), Moderada (GC = 90±2%) e Alta (GC = 95±2%), induzidas pelo tráfego de um trator agrícola. Os níveis de compactação do solo foram definidos através da curva de compactação do solo, por meio do teste de Proctor (ASTM, 1992), identificando os valores de densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação (Figura 2, Cap 1).

Após a determinação da densidade máxima de compactação (1,514 kg dm<sup>3</sup>) por meio do ensaio de Proctor, procedeu-se à compactação do solo em toda a área experimental utilizando passadas sucessivas de trator. A fim de alcançar os diferentes graus de compactação desejados, o número de passadas foi ajustado com base em medições da densidade do solo. Verificou-se que oito passadas foram suficientes para atingir 95% da densidade máxima de compactação.

A compactação foi realizada com um trator modelo CASE PUMA 165, equipado com pneus diagonais, bitola traseira de 1,7 m e massa total de 10,5 Mg. O rodado era composto por pneus dianteiros 480/70 R28 e traseiros 580/70 R38.

Durante o tráfego, o trator operou a uma velocidade constante de 5 km h<sup>-1</sup>, com rotação de 1.800 rpm.

Nas subparcelas, foram aplicadas as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 50, 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup>), em sulco, por ocasião da semeadura das culturas, utilizando o superfosfato triplo como fonte. Os demais fertilizantes (N e K<sub>2</sub>O) foram aplicados homogeneamente e manualmente em superfície, de acordo a análise química do solo e a necessidade das culturas (PAULETTI e MOTTA, 2019) (Figura 3, Cap 1).

O experimento seguiu um esquema de rotação de culturas, utilizando as principais espécies cultivadas no estado do Paraná, a saber: milho (2022/2023), trigo (2023), feijão (2024) e azevém (2024) (Tabela 2, Cap 1). Com exceção do azevém, todas as demais culturas foram adubadas no momento da semeadura, com doses definidas com base na análise de solo e nas recomendações do Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (Pauletti & Motta, 2017). As semeaduras foram realizadas com semeadoras adubadoras, utilizando discos defasados ou desencontrados para abertura dos sulcos.

O controle de plantas daninhas, pragas e doenças foi realizado conforme necessidade das culturas, utilizando pulverizador mecanizado Montana SLC 400L de 280 kg, acoplado a um trator (TL5.80 New Holland com peso máximo 4.500 kg), com largura de trabalho de 12 m. Para evitar a compactação adicional devido o tráfego durante as pulverizações, foi feito o controle de tráfego, limitando as passadas do trator sempre nos mesmos locais. As colheitas das culturas foram manuais, sendo necessários a roçada mecânica de restos vegetais (roçadeira Woods BB 720, acoplado com TL5.80 New Holland, 4.500 kg), ou a passada de rolo-faca de 3 metros Marca Freisleben RFF 3000 (acoplado com TL5.80 New Holland, 4.500 kg), para manejo da fitomassa sobre o solo. Deste modo, o tráfego em área total, ocorreu apenas durante as operações de semeadura ou durante o manejo pós colheita da área.

#### 3.4,2 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS E DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

As amostras indeformadas foram coletadas em duas etapas. A primeira foi realizada aos 4 meses após o cultivo do milho, nas camadas de 0–0,05 m e 0,05–0,10 m, utilizando anéis volumétricos de 35 × 50 mm. A segunda etapa ocorreu aos 26 meses após a aplicação dos graus de compactação (GC) e das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, durante a sucessão feijão-azevém, com coleta realizada por anéis volumétricos



maiores, de 40 × 60 mm. Após o preparo, as amostras em anéis volumétricos foram saturadas por ascensão capilar até 2/3 da altura do anel (Klute, 1986). Na sequência, foram submetidas a determinação da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), de acordo com método da carga decrescente descrito por Cavalieri K, (2007). Nesse método, o aparato experimental é composto de um recipiente com um orifício lateral, no qual ao se abrir permite que água escoe, estabelecendo um fluxo através da amostra de solo dentro do recipiente. O deslocamento de água sobre a amostra de solo, de altura  $L$ , no tempo  $t$ , corresponde a um deslocamento entre duas alturas ( $h_0$  e  $h_1$ ), que representam o gradiente hidráulico. Então, a  $K_{sat}$  ser calculada através da equação 1:

$$K_{sat} = (L/t) \ln (h_0/h_1) \quad (1)$$

Após determinação da  $K_{sat}$ , a massa das amostras saturada foi aferida, para determinação da porosidade total ( $PT = \theta_s$ ) e então submetidas as tensões ( $h$ ) de -30 hPa em mesa de tensão de papel filtro; e -100 hPa em câmaras de Richards. A escolha dessas tensões foi baseada na classificação de tamanhos de poros de Brewer (1964), na qual os macroporos possuem diâmetro equivalente ( $\varnothing_{eq}$ ) maior que 100  $\mu m$ ; os mesoporos são aqueles com  $\varnothing_{eq}$  entre 30 e 100  $\mu m$ ; e os microporos aqueles com  $\varnothing_{eq}$  menor que 30  $\mu m$ , considerando a Equação de Laplace (2):

$$\varnothing_{eq} = 2980 / h \quad (2)$$

Após o equilíbrio hidráulico em -100 hPa, valor esse referenciado como potencial matricial teórico representativo da capacidade de campo de solos argilosos brasileiros (Turek et al., 2020), foi feita a determinação da permeabilidade intrínseca ao ar ( $K_{ar}$ ). A determinação foi feita apenas nas amostras coletadas após 26 meses de compactação, isto é, após o cultivo de azevém, a partir da medida do decréscimo da pressão do ar no interior de um reservatório em função do tempo (MCKENZIE e DEXTER, 1996). O decréscimo de pressão ocorre porque o ar flui através da amostra e a pressão do reservatório diminui exponencialmente. Essa redução de pressão foi registrada por um sistema de aquisição de dados em intervalos de um segundo, até que todo o ar passasse pela amostra. A inclinação ( $S$ ) da curva obtida



é composta por variáveis constantes e pela  $K_{ar}$ , permitindo que a permeabilidade intrínseca ao ar possa ser isolada da inclinação  $S$ , aplicando a equação 3:

$$K_{ar} = \frac{S \cdot \mu}{Pa \cdot \frac{L}{V \cdot A}} \quad (3)$$

em que,  $\mu$  = viscosidade dinâmica do ar ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $L$  = comprimento da amostra (m);  $V$  = volume do reservatório ( $\text{m}^3$ );  $A$  = área da amostra exposta ao fluxo de ar ( $\text{m}^2$ );  $Pa$  = pressão atmosférica do ar (kPa);  $|S|$  = módulo da inclinação (linearizada da queda de pressão com o tempo).

Com os valores de  $PT$  e da capacidade de campo teórica, foi determinada a porosidade de aeração ( $\epsilon_{ar}$ ), isto é, aquela livre de água. E, com base nestes valores, foi determinado o índice de continuidade dos poros ( $k_i$ ), proposto por Groenevelt et al. (1984):

$$k_i = K_{ar} / \epsilon_{ar} \quad (4)$$

Por fim, após a determinação da  $RP$ , as amostras foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 72 h para a obtenção densidade do solo ( $D_s$ ), conforme Blake e Hartge (1986).

### 3.4,3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e homoscedasticidade de Bartlett. Quando necessária, foi aplicada a potência ótima de Box-Cox para transformação dos dados. Atendidas as pressuposições, os dados de cada camada do solo e período de avaliação foram submetidos a análise de variância (ANOVA) de experimento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas ( $4 \times 4$ ), com três repetições. Em caso de interações significativas, foram realizadas análises de desdobramento. Quando significativos os valores de  $F$ , o teste de Tukey foi aplicado para comparações múltiplas entre os graus compactação (GC) do solo, e a análise de regressão polinomial para as doses de fósforo. Todas as análises foram feitas com o auxílio do *Software R*, versão 4.4.3 (R Core Team, 2025).

### 3.5 RESULTADOS

#### 3.5.1 DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi afetada pelos GC e doses de  $P_2O_5$  em todas as camadas e ambos períodos de avaliação (após milho - 8 meses - e após sucessão feijão-azevém - 26 meses). Na primeira avaliação, 8 meses após aplicação dos GC, observaram os maiores valores de  $D_s$  na camada de 0–0,05 m decorrente do GC de 95 % em todas as doses de fósforo. Na ausência de adubação fosfatada, o GC de 95 % atingiu  $D_s$  de  $1,57 \text{ g cm}^{-3}$ , significativamente superior aos demais. Em oposição ao esperado, o GC de 80 % apresentou  $D_s$  intermediária ( $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ ), superior ao GC de 85 %. Similarmente com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  também foi observado tal comportamento para o GC de 80%, porém agora, em relação ao GC de 90 %. Quanto as doses de  $P_2O_5$ , foram observados efeitos positivos, como redução da  $D_s$  da camada de 0-0,05 m de modo linear para o GC de 90% e quadrático para o GC de 80% (Tabela 4). Nesse caso, derivando a regressão ajustada, pode-se observar que com a aplicação de  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , a densidade do solo pode ser reduzida a  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ , isto é, uma redução de aproximadamente  $0,17 \text{ g cm}^{-3}$  em relação a ausência de adubação.

Na camada de 0,05–0,10 m, após cultivo de milho, a  $D_s$  diferiu entre os GC apenas quando aplicado 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ . Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , os GC de 95% e 80% tiveram as maiores  $D_s$  ( $1,61$  e  $1,52 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente), estatisticamente superiores aos graus de 85% e 90%. Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , o GC de 85 % proporcionou a menor  $D_s$ , em comparação ao GC de 95 %. Assim, a análise de regressão confirmou a resposta positiva linear da adubação fosfatada sobre a redução da  $D_s$  na camada de 0,05-0,10 m, com o GC de 95 %; e quadrática para o GC de 85 %, atingindo o valor mínimo de  $D_s$  ( $1,24 \text{ g cm}^{-3}$ ) com a dose de  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 4). Esses resultados sugerem que, em 0,05-0,10 m, o efeito das doses de  $P_2O_5$  sobre a  $D_s$  tende a ser mais tênue, sendo que a compactação elevada (95 %) manteve os valores mais altos, independentemente da dose. Em contrapartida, os graus de compactação de 85 % e, em menor grau, 90 %, mostraram respostas mais sensíveis às doses intermediárias, com redução na  $D_s$ , próximas a  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ .

**Tabela 4.** Densidade do solo após cultivo de milho (aos 8 meses) e da sucessão feijão-azevém (aos 26 meses) pós aplicação de graus de compactação (GC) e doses de  $P_2O_5$  na semeadura das culturas de verão.

|                                        | GC (%)                | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                          |                          |                          | Regressão                                       | R <sup>2</sup> |
|----------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|----------------|
|                                        |                       | 0                                                             | 50                       | 100                      | 150                      |                                                 |                |
| Após milho (8 meses)                   | Camada de 0-0,05 m    |                                                               |                          |                          |                          |                                                 |                |
|                                        | 80                    | 1,54 <sup>±0,00</sup> ab                                      | 1,39 <sup>±0,01</sup> b  | 1,35 <sup>±0,02</sup> b  | 1,46 <sup>±0,08</sup> ab | $\hat{y} = 1,54 - 0,004x + 0,0003x^2$           | 0,99           |
|                                        | 85                    | 1,41 <sup>±0,005</sup> c                                      | 1,37 <sup>±0,06</sup> b  | 1,39 <sup>±0,01</sup> ab | 1,41 <sup>±0,07</sup> bc | ns                                              | ---            |
|                                        | 90                    | 1,45 <sup>±0,03</sup> bc                                      | 1,38 <sup>±0,08</sup> b  | 1,31 <sup>±0,05</sup> b  | 1,32 <sup>±0,04</sup> c  | $\hat{y} = 1,43 - 0,0010x$                      | 0,90           |
|                                        | 95                    | 1,57 <sup>±0,01</sup> a                                       | 1,52 <sup>±0,00</sup> a  | 1,50 <sup>±0,04</sup> a  | 1,54 <sup>±0,04</sup> a  | ns                                              | ---            |
|                                        | Camada de 0,05-0,10 m |                                                               |                          |                          |                          |                                                 |                |
|                                        | 80                    | 1,47 <sup>±0,05</sup> a                                       | 1,52 <sup>±0,04</sup> a  | 1,43 <sup>±0,10</sup> ab | 1,46 <sup>±0,04</sup> a  | ns                                              | ---            |
|                                        | 85                    | 1,49 <sup>±0,09</sup> a                                       | 1,30 <sup>±0,03</sup> b  | 1,32 <sup>±0,06</sup> b  | 1,37 <sup>±0,08</sup> a  | $\hat{y} = 1,48 - 0,0044x + 0,00002x^2$         | 0,92           |
|                                        | 90                    | 1,43 <sup>±0,04</sup> a                                       | 1,31 <sup>±0,10</sup> b  | 1,34 <sup>±0,16</sup> ab | 1,37 <sup>±0,01</sup> a  | ns                                              | ---            |
|                                        | 95                    | 1,5 <sup>±0,005</sup> a                                       | 1,61 <sup>±0,00</sup> a  | 1,50 <sup>±0,05</sup> a  | 1,45 <sup>±0,11</sup> a  | $\hat{y} = 1,60 - 0,0009x$                      | 0,70           |
| Após sucessão feijão-azevém (26 meses) | Camada de 0-0,05 m    |                                                               |                          |                          |                          |                                                 |                |
|                                        | 80                    | 1,54 <sup>±0,04</sup> b                                       | 1,44 <sup>±0,02</sup> b  | 1,41 <sup>±0,03</sup> b  | 1,37 <sup>±0,04</sup> a  | $\hat{y} = 1,52 + -0,0011x$                     | 0,92           |
|                                        | 85                    | 1,43 <sup>±0,05</sup> c                                       | 1,25 <sup>±0,02</sup> c  | 1,33 <sup>±0,01</sup> bc | 1,39 <sup>±0,05</sup> a  | $\hat{y} = 1,41 + -0,003x + 0,00002x^2$         | 0,77           |
|                                        | 90                    | 1,34 <sup>±0,05</sup> c                                       | 1,18 <sup>±0,05</sup> c  | 1,30 <sup>±0,01</sup> c  | 1,23 <sup>±0,03</sup> b  | $\hat{y} = 1,31 - 0,0018x + 0,0001x^2$          | 0,30           |
|                                        | 95                    | 1,67 <sup>±0,02</sup> a                                       | 1,61 <sup>±0,02</sup> a  | 1,58 <sup>±0,00</sup> a  | 1,44 <sup>±0,09</sup> a  | $\hat{y} = 1,68 - 0,0015x$                      | 0,90           |
|                                        | Camada de 0,05-0,10 m |                                                               |                          |                          |                          |                                                 |                |
|                                        | 80                    | 1,60 <sup>±0,00</sup> a                                       | 1,51 <sup>±0,08</sup> ab | 1,53 <sup>±0,11</sup> ab | 1,59 <sup>±0,04</sup> a  | ns                                              | ---            |
|                                        | 85                    | 1,48 <sup>±0,04</sup> ab                                      | 1,35 <sup>±0,02</sup> c  | 1,58 <sup>±0,03</sup> a  | 1,45 <sup>±0,02</sup> b  | $\hat{y} = 1,47 - 0,01x + 0,0002x^2 - 0,001x^3$ | 1              |
|                                        | 90                    | 1,37 <sup>±0,00</sup> b                                       | 1,41 <sup>±0,02</sup> bc | 1,44 <sup>±0,04</sup> a  | 1,50 <sup>±0,10</sup> ab | ns                                              | ---            |
|                                        | 95                    | 1,53 <sup>±0,09</sup> a                                       | 1,60 <sup>±0,04</sup> a  | 1,54 <sup>±0,03</sup> ab | 1,56 <sup>±0,02</sup> ab | ns                                              | ---            |
|                                        | Camada de 0,10-0,20 m |                                                               |                          |                          |                          |                                                 |                |
|                                        | 80                    | 1,50 <sup>±0,05</sup> a                                       | 1,46 <sup>±0,02</sup> b  | 1,49 <sup>±0,08</sup> a  | 1,54 <sup>±0,06</sup> a  | ns                                              | ---            |
|                                        | 85                    | 1,49 <sup>±0,06</sup> a                                       | 1,39 <sup>±0,03</sup> b  | 1,38 <sup>±0,04</sup> ab | 1,49 <sup>±0,08</sup> a  | $\hat{y} = 1,48 - 0,003x + 0,0002x^2$           | 0,99           |
|                                        | 90                    | 1,46 <sup>±0,02</sup> a                                       | 1,37 <sup>±0,01</sup> b  | 1,45 <sup>±0,04</sup> b  | 1,36 <sup>±0,00</sup> b  | $\hat{y} = 1,44 - 0,0004x$                      | 0,28           |
|                                        | 95                    | 1,32 <sup>±0,07</sup> a                                       | 1,58 <sup>±0,04</sup> a  | 1,54 <sup>±0,05</sup> a  | 1,49 <sup>±0,02</sup> a  | ns                                              | ---            |

Valores sobrescritos representam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparam GC dentro de uma mesma dose de  $P_2O_5$ , não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Após 26 meses de experimentação, com avaliação após a sucessão feijão-azevém, na camada de 0–0,05 m, em todas as doses, o GC de 95% resultou nos maiores valores de Ds (Tabela 4), assim como demonstrado na avaliação prévia, aos 8 meses. Para este GC, a maior dose de  $P_2O_5$  amenizou parcialmente o aumento da Ds, visto a igualdade entre os valores da Ds desse GC com os GC de 80 e 85%. Na ausência de adubação fosfatada, o valor mais elevado de Ds registrado foi 1,67 g cm<sup>-3</sup>, no GC de 95 %. E, assim como na avaliação de 8 meses, o sem a aplicação de  $P_2O_5$ , o GC de 80 % proporcionou Ds intermediária (1,54 g cm<sup>-3</sup>), enquanto os graus de 85% e 90% apresentaram os menores valores, estatisticamente semelhantes. Esse mesmo padrão de resultados repetiu-se para as doses de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ . Ainda, com a maior dose aplicada houve redução da Ds do GC de 90 % (1,23 g cm<sup>-3</sup>), em relação aos demais GC. Nessa

camada mais superficial, com o maior tempo de experimentação, foram observados efeitos positivos das doses de  $P_2O_5$  em todos os GC para redução da  $D_s$ , de modo linear para os GC de 80 e 95 %; e quadráticas para 85 e 90 %. No caso das regressões quadráticas, em ambos os GC, a dose que promoveu a máxima redução da  $D_s$  foi 90 kg ha de  $P_2O_5$  (Tabela 4).

Na camada de 0,05–0,10 m, após 26 meses da compactação, o GC de 95 % ainda proporcionou os maiores valores de  $D_s$ , porém apenas na ausência da adubação fosfatada ( $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ ) e com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  ( $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ ). Nessa camada, em todas as doses de fósforo, novamente foi reportada a elevação dos valores de  $D_s$  com o GC de 80 %, a valores próximos ao GC de 95 %, e por vezes superiores aos GC de 85 % e, principalmente, 90 %. Esses resultados denotam que a suscetibilidade dos solos aos processos compressivos. Dentre os GC, apenas em 85 % foram reportados efeitos das doses de  $P_2O_5$ . Contudo, decorrente do ajuste cúbico, não há como se inferir a real resposta das doses de  $P_2O_5$  sobre a  $D_s$  dessa camada (Tabela 4).

Em relação a camada de 0,10-0,20 m, analisada apenas aos 26 meses após aplicação dos GC, as respostas foram mais sutis, em relação ao observado nas camadas sobrejacentes. Na ausência de adubação fosfatada, não foram observadas diferenças estatísticas entre os GC, com  $D_s$  variando entre 1,45 e  $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ . No entanto, com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o GC de 95% manteve-se com  $D_s$  superior aos demais GC, os quais não diferiram entre si. Com as doses de 100 e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  as menores  $D_s$  foram reportadas para os GC de 85 e 90 %, respectivamente. Por fim, o efeito das doses fósforo foram observados para os GC de 85 e 90 %, de modo linear e quadrático, respectivamente. Ambas as respostas foram positivas, conforme reportado nas camadas sobrejacentes de ambas as avaliações, exceto em 0,05-0,10 m após 26 meses. Neste caso, a resposta quadrática reportada para o GC de 85 % demonstrou que a aplicação de  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  é capaz de reduzir a  $D_s$  de 1,48 para  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$  (Tabela 4).

### 3.5,2 DISTRIBUIÇÃO E CONTINUIDADE DO ESPAÇO POROSO DO SOLO

A porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) após cultura do milho (Tabela 5), na profundidade de 0-0,05m, variou em função dos graus de compactação e das doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Na ausência de adubação fosfatada, observou-se maior

porosidade no GC de 90% ( $60,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido pelos GC 85% e 95%, com o GC 80% apresentando a menor porosidade ( $53,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o comportamento manteve-se semelhante, com os GC de 85 e 90% apresentando os maiores valores de porosidade, próximos a  $58\text{--}60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , destacou-se o aumento da porosidade no GC 80% ( $59,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o GC 85% apresentou redução ( $52,7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Com a dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , o maior valor de porosidade foi registrado no GC de 85% ( $61,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), indicando uma possível recuperação estrutural do solo com a adubação fosfatada neste GC. Esses resultados indicam que a porosidade total do solo foi mais favorecida em graus de compactação intermediários (85% e 90%), enquanto os solos com compactação mais baixa (80%) ou mais elevada (95%) apresentaram menores valores de porosidade, variando de acordo com a dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicada.

A análise de regressão da porosidade total do solo após cultivo de milho (Tabela 5) revelou resposta significativa apenas no grau de compactação de 85%. Para o grau de 85%, foi ajustado um modelo quadrático. O modelo sugere uma redução inicial da porosidade com o aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , seguida de uma tendência de recuperação em doses mais elevadas. Esses resultados sugerem que a adubação fosfatada teve efeito sobre a estrutura do solo de maneira limitada, influenciando principalmente a porosidade em solos com grau de compactação intermediário (85%).

Na camada 0,05- 0,10 m a porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), após cultivo de milho, variou em função dos graus de compactação e das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas (Tabela 2). Na ausência de adubação fosfatada, não foram observadas diferenças significativas entre os GC, com valores de porosidade oscilando entre 56,0 e  $58,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Contudo, com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o GC de 90% apresentou o maior valor de porosidade ( $62,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), diferindo estatisticamente do GC 80%, que registrou o menor valor ( $51,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , embora não tenham sido detectadas diferenças estatísticas significativas, o GC de 90% manteve-se em destaque, com porosidade de  $62,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Esse padrão foi ainda mais acentuado na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando o GC de 90% alcançou o valor absoluto mais elevado de porosidade ( $65,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), novamente sem diferença estatística formal, mas numericamente superior aos

demais. Esses dados indicam uma tendência consistente de aumento da porosidade total no GC de 90% com o incremento das doses de  $P_2O_5$ .

A análise de regressão (Tabela 5) reforçou a influência da adubação fosfatada sobre a estrutura física do solo, especialmente no GC de 85%, onde foi ajustado um modelo cúbico altamente significativo. Esse modelo indica que a porosidade total sofreu uma leve redução inicial com o aumento das doses de  $P_2O_5$ , seguida por estabilização e posterior incremento nas doses mais elevadas. Esses resultados mostram que, na profundidade de 0,05–0,10 m, a adubação fosfatada exerceu impacto mais expressivo sobre a porosidade do solo em condições de compactação intermediária (85%), enquanto os demais GC apresentaram resposta menos consistente.

A macroporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), após cultivo de milho aos 8 meses após aplicação de graus de compactação (GC), na profundidade de 0–0,05 m (Tabela 5), variou significativamente em função dos GC e das doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Sem adubação fosfatada, não foram observadas diferenças estatísticas entre os GC, com valores de macroporosidade variando de 0,083 a 0,120  $cm^3 cm^{-3}$ . Com a aplicação de 50  $kg ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o GC de 85% destacou-se, apresentando o maior valor de macroporosidade (0,153  $cm^3 cm^{-3}$ ), enquanto o GC de 90% apresentou o menor valor (0,073  $cm^3 cm^{-3}$ ). Na dose de 100  $kg ha^{-1}$ , os graus de compactação de 85%, 80% e 95% agruparam-se, apresentando os maiores valores de macroporosidade, enquanto o GC de 90% registrou o menor valor (0,050  $cm^3 cm^{-3}$ ). Com a aplicação de 150  $kg ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o GC de 85% manteve a maior macroporosidade (0,143  $cm^3 cm^{-3}$ ), enquanto os GC de 90% e 95% apresentaram os menores valores.

Na camada de 0–0,05 m, observou-se ajuste significativo apenas para o grau de compactação de 90%, cujo comportamento foi descrito por um modelo quadrático. A equação indicou uma dose ótima de 45  $kg ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , a partir da qual a variável respondeu positivamente, sugerindo que, nessa condição física do solo, essa dose foi suficiente para suprir a demanda do milho nesta profundidade.

Na camada de 0,05–0,10 m, a macroporosidade ( $m^3 m^{-3}$ ) apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $P_2O_5$  (Tabela 2). Na ausência de  $P_2O_5$ , o maior valor de Ma foi observado no GC de 95% (0,233  $cm^3 cm^{-3}$ ), estatisticamente superior aos demais, que apresentaram valores de 0,150  $cm^3 cm^{-3}$ .

(GC 80% e 90%) e  $0,113 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (GC 85%). Esse resultado indica que, sob alta compactação, a estrutura do solo pode ter favorecido a formação ou preservação de macroporos, mesmo sem a aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Com  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os valores variaram entre  $0,107$  e  $0,137 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , com destaque para GC 85% ( $0,137 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 95% ( $0,130 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), embora as diferenças tenham sido menores. Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , as médias ficaram entre  $0,120$  e  $0,137 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , e na de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , o maior valor novamente foi registrado no GC de 95% ( $0,170 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido por 90% ( $0,157 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), reforçando a tendência de maiores valores de macroporosidade nos GC mais altos, especialmente nas doses mais elevadas de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Na análise de regressão (Tabela 5), apenas o GC de 95% apresentou ajuste significativo, com modelo quadrático. A equação indicou uma dose ótima de  $125 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a partir da qual a macroporosidade tende a atingir seu valor máximo. Esse resultado sugere que, em condições de maior compactação, a aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em doses crescentes promove efeito benéfico até um ponto ideal, além do qual os ganhos adicionais podem ser reduzidos ou estabilizados. Assim, os resultados demonstram que a macroporosidade nesta profundidade foi influenciada significativamente pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com destaque para o comportamento positivo observado no GC de 95%, especialmente nas doses de 0 e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , e com dose ótima estimada em  $125 \text{ kg ha}^{-1}$ .

A mesoporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) do solo, na profundidade de 0–0,05 m, após cultivo de milho, apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , refletindo a influência combinada do manejo químico e físico sobre a estrutura porosa do solo (Tabela 5). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os valores foram baixos e semelhantes nos GC de 85, 90 e 95% ( $0,020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), com o menor valor observado em 80% ( $0,013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os maiores valores foram registrados nos GC de 80% e 95% ( $0,027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), superior ao de 90% ( $0,010 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), o que demonstra que doses moderadas foram mais efetivas nos extremos dos graus de compactação. Com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o maior valor absoluto da mesoporosidade foi observado no grau de compactação de 80% ( $0,050 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), significativamente superior aos demais, que variaram de  $0,015$  a  $0,027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . A dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  também manteve esse padrão, com



o GC de 80% atingindo  $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , seguido por 85% e 95% ( $0,027$  e  $0,020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), e o menor valor em 90% ( $0,017 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

A regressão mostra (Tabela 5), apenas o GC de 80% apresentou ajuste significativo, com modelo quadrático, indicando resposta positiva da mesoporosidade à aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em doses intermediárias. Esses resultados indicam que, na camada superficial do solo, a mesoporosidade foi mais sensível às doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  sob menor GC (80%), onde o solo apresentava maior capacidade de reorganização estrutural.

Na camada de 0,05–0,10 m, a mesoporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) do solo, apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , refletindo o efeito combinado das condições físicas e da adubação fosfatada na organização dos poros (Tabela 2). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o maior valor de mesoporosidade foi observado no GC de 80% ( $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), estatisticamente superior ao GC de 90% ( $0,013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Os GC de 85% e 95% apresentaram valores intermediários ( $0,020$  e  $0,030 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente). Esses dados sugerem que, sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a mesoporosidade foi favorecida por solos com menor GC. Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o GC de 80% manteve a superioridade ( $0,047 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto os demais graus apresentaram valores significativamente menores, entre  $0,010$  e  $0,020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Em  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , tanto o GC 80% e 95% atingiram valores elevados de  $0,040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , mostrando que a adubação promoveu recuperação da mesoporosidade em maiores GC. Na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , o GC de 80% manteve o maior valor ( $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto os demais permaneceram inferiores (entre  $0,020$  e  $0,023 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

Na regressão (Tabela 5), apenas o GC de 95% apresentou ajuste significativo, com um modelo polinomial de terceiro grau. Esse ajuste indica que, no GC de 95%, a mesoporosidade respondeu de forma complexa ao incremento de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com variações em diferentes doses. A elevada qualidade do ajuste sugere que o modelo descreve perfeitamente os dados obtidos, embora a interpretação prática de um polinômio de terceiro grau deva ser feita com cautela.

A Microporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) na profundidade de 0–0,05 m do solo após cultivo de milho apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , (Tabela 2) Na dose de  $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o maior valor de microporosidade foi observado no GC de 90% ( $0,53 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), estatisticamente superior aos demais,

que variaram entre 0,417 e 0,450  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Isso sugere que, na ausência de adubação fosfatada, a condição de maior compactação favoreceu a retenção de microporos nesta camada do solo. Com a aplicação de 50  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o GC de 90% manteve o maior valor (0,51  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), enquanto os demais GC apresentaram valores iguais ou próximos (0,44  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). Esse padrão se repetiu com 100  $\text{kg ha}^{-1}$ , em que o GC de 90% novamente se destacou com 0,517  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , enquanto os demais variaram de 0,420 a 0,443  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Na dose de 150  $\text{kg ha}^{-1}$ , embora o valor de microporosidade para o grau de 90% tenha reduzido para 0,477  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , ele ainda permaneceu superior aos demais GC, que ficaram entre 0,420 e 0,447  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

Na análise de regressão (Tabela 5), apenas o GC de 90% apresentou ajuste significativo, com um modelo linear negativo. Esse modelo indica que, embora inicialmente o aumento da dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  tenha favorecido a microporosidade, o incremento contínuo nas doses resultou em tendência de decréscimo da microporosidade no GC de 90%, sugerindo uma limitação estrutural em doses mais altas.

Na camada de 0,05–0,10 m, também apresentou interação significativa entre os graus de compactação e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com variações evidentes conforme o tratamento (Tabela 5). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o maior valor foi registrado no GC de 90% (0,480  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), estatisticamente superior aos demais. À medida que se aplicaram doses crescentes de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , manteve-se o padrão de maiores valores de microporosidade nos GC de 90% e, em doses mais altas, também em 85%. Na dose de 150  $\text{kg ha}^{-1}$ , o destaque foi para 85% (0,490  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e 90% (0,487  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), indicando que esses dois GC responderam positivamente ao incremento da adubação fosfatada.

A regressão (Tabela 5), apenas o GC de 85% apresentou modelo significativo, com comportamento linear crescente. Esse resultado sugere que, em solos moderadamente compactados, a adubação fosfatada promove melhoria expressiva na microporosidade até esse ponto, contribuindo para a manutenção da qualidade física do solo.

A porosidade total do solo, após cultivo da sucessão feijão-azevém (Tabela 6) na camada de 0-0,05 m, variou de acordo com os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas. Sem adubação fosfatada, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os GC. Entretanto, o GC de 90% apresentou o maior valor de

porosidade ( $54,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o GC de 95% registrou o menor ( $45,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o GC de 90% destacou-se com a maior porosidade ( $56,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), diferindo estatisticamente do GC de 95%, que apresentou a menor porosidade. Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas, o GC de 90% novamente apresentou a maior porosidade ( $53,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). A aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , todos os GC agruparam-se estatisticamente, com destaque para o GC de 90% que alcançou a maior porosidade ( $59,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

A regressão da porosidade total na mesma camada (Tabela 6) evidenciou que as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  promoveram diferentes respostas conforme o GC. Para os graus de 80, 90 e 95%, foram ajustados modelos lineares significativos, todos com coeficientes positivos, indicando que o aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  promoveu incremento linear na porosidade do solo. Esses resultados indicam que a adubação fosfatada foi eficaz em promover aumento da porosidade total do solo, especialmente nos GC de 80, 90 e 95%.

A porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), após cultivo da sucessão feijão-azevém, na camada de 0,05–0,10 m, apresentou variações de acordo com os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas (Tabela 3). Sem adubação fosfatada, o maior valor de porosidade foi observado no GC de 90% ( $52,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o menor valor foi registrado no GC de 95% ( $46,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os maiores valores continuaram a ser verificados nos GC de 85% ( $51,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 90% ( $51,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o GC de 95% manteve a menor porosidade ( $43,7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , o padrão se manteve, com destaque novamente para o GC de 90% ( $51,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto os demais GC apresentaram redução nos valores de porosidade. Entretanto, na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , observou-se uma redução generalizada da porosidade total do solo, sendo o menor valor registrado no próprio GC de 90% ( $43,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), invertendo a tendência observada nas doses anteriores.

A análise de regressão da porosidade total (Tabela 6) revelou que as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  influenciaram a resposta do solo de forma diferenciada conforme o GC. Para o grau de 90%, foi ajustado um modelo quadrático significativo, indicando que a porosidade aumentou com o incremento das doses de fósforo, atingindo um valor

máximo estimado próximo de  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a partir do qual foi observada uma tendência de estabilização ou leve declínio em doses mais elevadas.

**Tabela 5.** Porosidade total e distribuição de poros por tamanho após cultivo de milho aos 8 meses após aplicação de graus de compactação (GC) e doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na semeadura da cultura.

| Medida                                               | GC (%) | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                            |                             | Regressão                                | R <sup>2</sup> | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             |                             | Regressão                   | R <sup>2</sup>                                      |      |
|------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|------|
|                                                      |        | 0                                                             | 50                          | 100                        | 150                         |                                          |                | 0                                                             | 50                          | 100                         | 150                         |                             |                                                     |      |
| Porosidade total (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) |        | Camada de 0-0,05 m                                            |                             |                            |                             |                                          |                |                                                               |                             |                             |                             | Camada de 0,05-0,10 m       |                                                     |      |
|                                                      | 80     | 0,53 <sup>±0,04</sup><br>a                                    | 0,55 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,59 <sup>±0,06</sup><br>a | 0,55 <sup>±0,03</sup><br>a  | ns                                       |                |                                                               | 0,58 <sup>±0,05</sup><br>a  | 0,52 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,60 <sup>±0,08</sup><br>a  | 0,56 <sup>±0,05</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,57 - 0,0048x + 0,0001x^2 - 0,00000x^3$ | 1    |
|                                                      | 85     | 0,56 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,58 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,52 <sup>±0,03</sup><br>a | 0,61 <sup>±0,02</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,57 - 0,0008x + 0,00001x^2$  | 0,99           |                                                               | 0,56 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,60 <sup>±0,04</sup><br>ab | 0,55 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,60 <sup>±0,05</sup><br>ab | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 90     | 0,60 <sup>±0,06</sup><br>a                                    | 0,59 <sup>±0,06</sup><br>a  | 0,58 <sup>±0,02</sup><br>a | 0,58 <sup>±0,02</sup><br>a  | ns                                       |                |                                                               | 0,58 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,62 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,62 <sup>±0,05</sup><br>a  | 0,65 <sup>±0,05</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 95     | 0,54 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,54 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,57 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,54 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                       |                |                                                               | 0,56 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,55 <sup>±0,005</sup><br>b | 0,53 <sup>±0,04</sup><br>a  | 0,61 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
| Macroporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )  |        | Camada de 0-0,05 m                                            |                             |                            |                             |                                          |                |                                                               |                             |                             |                             |                             |                                                     |      |
|                                                      | 80     | 0,08 <sup>±0,03</sup><br>a                                    | 0,12 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,10 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,11 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                       |                |                                                               | 0,15 <sup>±0,03</sup><br>b  | 0,10 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,13 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,14 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 85     | 0,12 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,15 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,13 <sup>±0,01</sup><br>a | 0,14 <sup>±0,03</sup><br>a  | ns                                       |                |                                                               | 0,13 <sup>±0,01</sup><br>b  | 0,13 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,12 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,12 <sup>±0,03</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 90     | 0,09 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,07 <sup>±0,03</sup><br>c  | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>b | 0,08 <sup>±0,00</sup><br>b  | $\hat{y} = 0,09 - 0,0009x + 0,00001x^2$  | 0,81           |                                                               | 0,15 <sup>±0,01</sup><br>b  | 0,12 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,12 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,15 <sup>±0,00</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 95     | 0,11 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,10 <sup>±0,03</sup><br>bc | 0,12 <sup>±0,01</sup><br>a | 0,08 <sup>±0,05</sup><br>b  | ns                                       |                |                                                               | 0,23 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,13 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,13 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,17 <sup>±0,05</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,23 - 0,0025x + 0,00001x^2$             | 0,97 |
| Mesoporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )   |        | Camada de 0-0,05 m                                            |                             |                            |                             |                                          |                |                                                               |                             |                             |                             |                             |                                                     |      |
|                                                      | 80     | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,03 <sup>±0,00</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,01 + 0,0006x - 0,000003x^2$ | 0,82           |                                                               | 0,03 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>a  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 85     | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>ab | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>b | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>ab | ns                                       |                |                                                               | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>b  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 90     | 0,02 <sup>±0,0</sup><br>a                                     | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b  | ns                                       |                |                                                               | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>b  | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,02 <sup>±0,0</sup><br>b   | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 95     | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                       |                |                                                               | 0,03 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>b  | ns                                                  | --   |
| Microporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )  |        | Camada de 0-0,05 m                                            |                             |                            |                             |                                          |                |                                                               |                             |                             |                             |                             |                                                     |      |
|                                                      | 80     | 0,41 <sup>±0,005</sup><br>b                                   | 0,44 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>b | 0,42 <sup>±0,01</sup><br>b  | ns                                       |                |                                                               | 0,4 <sup>±0,005</sup><br>b  | 0,44 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>c  | 0,42 <sup>±0,01</sup><br>b  | ns                                                  | ---  |
|                                                      | 85     | 0,45 <sup>±0,03</sup><br>b                                    | 0,42 <sup>±0,01</sup><br>b  | 0,45 <sup>±0,01</sup><br>b | 0,44 <sup>±0,02</sup><br>ab | ns                                       |                |                                                               | 0,45 <sup>±0,03</sup><br>b  | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,42 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,44 <sup>±0,02</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,36 + 0,0009x$                          | 0,94 |
|                                                      | 90     | 0,53 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,51 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,51 <sup>±0,02</sup><br>a | 0,47 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,53 - 0,0003x$               | 0,76           |                                                               | 0,53 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,51 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,51 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,43 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                                  | ---- |
|                                                      | 95     | 0,43 <sup>±0,01</sup><br>b                                    | 0,44 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>b | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                       |                |                                                               | 0,43 <sup>±0,01</sup><br>b  | 0,44 <sup>±0,0</sup><br>ab  | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>bc | 0,44 <sup>±0,01</sup><br>b  | ns                                                  | ---  |

Valores sobrescritos representam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparam GC dentro de uma mesma dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Na camada 0,10–0,20 m, variou de acordo com os GC e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas (Tabela 6). Na ausência de adubação fosfatada, os valores de porosidade oscilaram entre  $47,7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $50,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sem diferenças estatísticas significativas entre os GC. Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o GC de 90% se destacou, apresentando o maior valor de porosidade ( $51,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o GC de 95% manteve o menor valor. Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , não foram observadas diferenças estatísticas, com os valores variando de  $47,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a  $48,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  entre os GC. Por fim, na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , os maiores valores de porosidade foram registrados novamente nos GC de 90% ( $51,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 80% ( $50,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o grau de 95% apresentou o menor valor ( $45,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), mantendo o padrão de menor resposta estrutural à adubação fosfatada.

A análise de regressão (Tabela 6) indicou respostas diferenciadas conforme o grau de compactação. Para o GC de 90%, foi ajustado um modelo linear significativo, sugerindo que o aumento progressivo das doses de  $P_2O_5$  promoveu incremento contínuo da porosidade do solo ao longo da faixa testada. Esses resultados indicam que, na profundidade de 0,10–0,20 m, a adubação fosfatada foi mais eficaz em melhorar a porosidade do solo sob o GC de 90%, enquanto em outros GC os efeitos foram menos expressivos.

Na camada superficial do solo (0–0,05 m), após cultivo da sucessão feijão-azevém a Macroporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $P_2O_5$  (Tabela 6) e pelos ajustes dos modelos de regressão (Tabela 3). De forma geral, os maiores valores foram registrados nos GC de 90% e 95%, especialmente nas doses intermediárias de  $P_2O_5$ , enquanto os menores valores ocorreram com maior frequência nos GC de 80% e 85%. Na ausência de  $P_2O_5$ , os valores aumentaram com o GC, com destaque para 90% ( $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 95% ( $0,040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), sugerindo que, mesmo sem adubação, condições de compactação moderada a alta favoreceram a manutenção da macroporosidade. Para a dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o maior valor foi observado no GC de 95% ( $0,053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido por 90% ( $0,040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), ambos estatisticamente superiores aos GC de 80% e 85%. Com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , o GC de 85% apresentou o maior valor ( $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido por 95% ( $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto 90% e 80% registraram  $0,030$  e  $0,017 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. Na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ ,

os maiores valores voltaram a ocorrer em 90% ( $0,040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 95% ( $0,035 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), os GC de 80% e 85% apresentaram menores valores.

Os modelos de regressão reforçaram esses resultados. Os GC de 85% e 90% apresentaram modelos quadráticos com bom ajuste, demonstrando resposta significativa da macroporosidade à adubação com  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Já os GC de 80% e 95% apresentaram modelos lineares com inclinação negativa, indicando que o aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  não promoveu incrementos relevantes da macroporosidade sob essas condições, podendo inclusive ter contribuído para uma leve redução. Esses achados indicam que a combinação de adubação com  $\text{P}_2\text{O}_5$  e graus moderados de compactação (85% e 90%) favoreceu a manutenção ou o incremento da macroporosidade na camada mais superficial do solo.

Na camada 0,05–0,10 m, apresentou interação significativa entre os graus de compactação e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , indicando que os efeitos da adubação fosfatada sobre a estrutura porosa do solo dependem diretamente da condição física imposta (Tabela 6). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os maiores valores de macroporosidade foram observados nos GC de 90% ( $0,053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 80% ( $0,050 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), ambos estatisticamente superiores ao GC de 85%, que apresentou os menores valores. Esse padrão sugere que, mesmo sem adubação, a estrutura porosa superficial foi favorecida por condições de compactação moderada a elevada, provavelmente devido à maior estabilidade de agregados e à preservação de canais por onde as raízes cresceram. Com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o maior valor de macroporosidade foi registrado no GC de 95% ( $0,053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido pelos graus de 80% e 90% (ambos com  $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). O GC de 85% manteve-se com os menores valores, indicando baixa resposta à adubação nesta condição estrutural. Na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , os valores tornaram-se mais homogêneos entre os tratamentos, variando de  $0,033$  a  $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sem diferenças expressivas. Já na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , os maiores valores voltaram a ocorrer nos GC de 80% ( $0,040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 90% ( $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), sugerindo uma leve recuperação da porosidade em condições menos compactadas.

A análise de regressão (Tabela 6) evidenciou respostas distintas conforme o GC. Para o grau de 90%, foi ajustado um modelo linear significativo, indicando redução contínua da macroporosidade com o aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sugerindo possível saturação estrutural ou adensamento secundário com altas



doses. Já para o grau de 95%, foi ajustado um modelo quadrático, indicando uma resposta variável, com ligeiro aumento em doses iniciais seguido de estabilização ou queda em doses mais elevadas. Esses resultados demonstram que, nesta profundidade, a macroporosidade do solo foi sensível à interação entre os graus de compactação e as doses de fósforo, com respostas negativas ou pouco consistentes sob compactação elevada. O comportamento linear decrescente no GC de 90% e a curva quadrática em 95% indicam que doses mais altas de  $P_2O_5$  não foram eficazes na melhoria da estrutura física do solo, especialmente em ambientes mais compactados.

Na profundidade de 0,10–0,20 m, a macroporosidade do solo ( $cm^3\ cm^{-3}$ ), foi influenciada por uma interação significativa entre os GC e as doses de  $P_2O_5$ , como demonstrado tanto pelas variações nas médias observadas (Tabela 3) quanto pelos modelos de regressão ajustados (Tabela 6). Sem adubação fosfatada, os valores de macroporosidade foram relativamente próximos entre os tratamentos, com destaque para o GC de 80% ( $0,047\ cm^3\ cm^{-3}$ ), seguido por 85%, 90% e 95%, todos com valores em torno de  $0,040\ cm^3\ cm^{-3}$ . Com a aplicação de  $50\ kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , houve um decréscimo generalizado na macroporosidade, mais acentuado nos GC de compactação mais elevados, especialmente em 95%, que registrou o menor valor ( $0,015\ cm^3\ cm^{-3}$ ), evidenciando os efeitos negativos da compactação acentuada mesmo na presença de fósforo. A partir da dose de  $100\ kg\ ha^{-1}$ , os efeitos tornaram-se mais distintos. O GC de 80% apresentou o maior valor de macroporosidade ( $0,057\ cm^3\ cm^{-3}$ ), significativamente superior aos verificados em 95% ( $0,033\ cm^3\ cm^{-3}$ ) e 85% ( $0,030\ cm^3\ cm^{-3}$ ). Entretanto, com a aplicação de  $150\ kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , houve uma inversão no padrão de resposta: o maior valor foi registrado no GC de 95% ( $0,060\ cm^3\ cm^{-3}$ ), seguido de 90% ( $0,053\ cm^3\ cm^{-3}$ ), enquanto os menores valores foram observados nos GC de 80% e 85% (ambos com  $0,040\ cm^3\ cm^{-3}$ ).

Os modelos de regressão ajustados (Tabela 6) reforçaram essas diferenças. Para os GC de 90% e 95%, foram ajustados modelos quadráticos significativos, com bons coeficientes de determinação, indicando uma resposta quadrática da macroporosidade ao aumento das doses de  $P_2O_5$ . Para o GC de 80%, o modelo ajustado foi linear crescente, sugerindo aumento progressivo da macroporosidade com o incremento da adubação fosfatada.

A mesoporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) do solo após cultivo da sucessão feijão-azevém, na camada 0-0,05 m, apresentou interação significativa entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , (Tabela 6). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os valores foram bastante homogêneos entre os GC, variando de 0,050 a 0,052  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sem diferenças estatísticas expressivas. Com a aplicação de 50  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os valores aumentaram de forma geral, com destaque para GC 90% (0,078  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 85% (0,065  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Entretanto, todos os GC apresentaram médias estatisticamente semelhantes, indicando que a aplicação inicial de  $\text{P}_2\text{O}_5$  promoveu ganhos de mesoporosidade, independentemente do GC. Com 100  $\text{kg ha}^{-1}$ , os maiores valores foram registrados em 80% (0,069  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 85% (0,066  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto 90% apresentou queda acentuada para 0,037  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sugerindo um ponto de inflexão no comportamento da variável. Esse padrão foi ainda mais evidente com 150  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ : enquanto o GC de 85% atingiu o maior valor absoluto (0,084  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 90% apresentou o menor valor registrado entre todos os tratamentos (0,011  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

A regressão apresentada (Tabela 6) reforça esse padrão. Apenas o GC de 90% apresentou ajuste significativo, com modelo quadrático, evidenciando uma resposta decrescente da mesoporosidade a partir de doses intermediárias de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Para os demais GC (80%, 85% e 95%), não houve ajuste estatisticamente significativo, o que sugere variação mais aleatória ou ausência de tendência clara.

Na camada de 0,05–0,10 m, a mesoporosidade ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) apresentou interação significativa entre os graus de compactação e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , demonstrando a influência combinada das condições físicas do solo e da adubação fosfatada sobre a estrutura porosa (Tabela 6). Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os valores foram relativamente homogêneos, com destaque para o GC de 80% (0,018  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido por 85% (0,017  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 95% (0,016  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e o menor valor em 90% (0,012  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Com a aplicação de 50  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a mesoporosidade aumentou consideravelmente no GC de 95% (0,036  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), superior aos demais, enquanto o menor valor foi observado no GC de 90% (0,003  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), indicando sensibilidade negativa neste último. Para a dose de 100  $\text{kg ha}^{-1}$ , os valores oscilaram entre 0,013 e 0,024  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sem padrões evidentes, sendo o maior valor registrado no GC de 85%. Com 150  $\text{kg ha}^{-1}$ , os valores voltaram a ser mais

equilibrados, variando de 0,012 a 0,024 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, novamente com leve superioridade no GC de 80%.

Na análise de regressão (Tabela 6), apenas o GC de 95% apresentou ajuste significativo. O modelo indicou uma dose ótima estimada de 75 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a partir da qual a mesoporosidade atingiu seu ponto máximo nesta condição. Esse resultado demonstra que, sob alta compactação, o fornecimento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pode auxiliar na reorganização estrutural do solo, melhorando a formação de poros médios até esse nível de adubação.

Na camada de 0,10–0,20 m, na ausência de adubação fosfatada, os maiores valores de mesoporosidade foram observados nos GC de 80% (0,052 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e 85% (0,050 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), significativamente superior aos verificados nos GC de 90% e 95%, indicando que compactações moderadas favoreceram a formação de poros médios. Com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, houve incremento da mesoporosidade em todos os graus de compactação, com destaque para os GC 80% (0,059 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e 85% (0,054 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), mantendo-se também elevada no GC de 95% (acima de 0,050 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). Na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, os valores tornaram-se mais homogêneos entre os tratamentos, variando entre 0,046 e 0,052 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Já na dose de 150 kg ha<sup>-1</sup>, o maior valor permaneceu no GC de 80% (0,058 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), enquanto os demais apresentaram redução, com destaque para o GC de 95%, que registrou o menor valor (0,027 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

Na regressão (Tabela 6), os GC de 85% e 95% apresentaram ajustes quadráticos significativos, com excelentes coeficientes de determinação. Esses modelos indicam que, para os GC de 85% e 95%, houve uma resposta positiva da mesoporosidade à aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> até um ponto ideal, com posterior tendência de estabilização ou redução.

A microporosidade (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) do solo após cultivo da sucessão feijão-azevém, apresentou interação significativa entre os GC e as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, evidenciando que o comportamento da estrutura porosa é sensível ao manejo químico em função das condições físicas do solo (Tabela 6). Na ausência de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, os valores variaram de 0,363 a 0,407 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, com destaque para o GC de 85% (0,407 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). Com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, observou-se aumento expressivo da microporosidade nos GC de 85% (0,453 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e 90% (0,403 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), ambos estatisticamente superiores aos demais. Na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, o

maior valor absoluto foi registrado no GC de 90% ( $0,453 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), com 85% mantendo uma média elevada ( $0,420 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na dose mais alta da adubação fosfatada, o GC de 90% manteve o maior valor ( $0,453 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido por 80% ( $0,410 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 85% ( $0,403 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto o GC de 95% apresentou os menores valores em todas as doses.

Na análise de regressão (Tabela 6), os GC de 85% e 90% apresentaram modelos significativos. Para 85%, foi identificado um comportamento quadrático, com aumento da microporosidade até a dose ótima de  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , seguida de tendência de estabilização. Já para o grau de compactação de 90%, observou-se resposta linear crescente, indicando que a microporosidade aumentou progressivamente ao longo das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Na camada de 0,05–0,10 m, a microporosidade também foi influenciada pela interação entre os GC e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , (Tabela 6). Sem adubação, o maior valor foi registrado no GC de 90% ( $0,460 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), enquanto os demais ficaram abaixo de  $0,430 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Com 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os maiores valores permaneceram no gGC de 90%, com médias de  $0,450$  e  $0,463 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. Na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , os valores se estabilizaram em torno de  $0,427 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  em 90% e 85%, com menor resposta no GC de 80%.

Na regressão (Tabela 6) somente o GC de 90% apresentou ajuste significativo, com modelo polinomial de terceiro grau. O modelo indicou uma dose ótima de  $24 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , na qual a microporosidade atingiu seu ponto máximo sob essa condição. Acima dessa dose, a tendência foi de estabilização ou redução leve, sugerindo que, embora o GC de 90% tenha sido altamente responsivo à adubação fosfatada, doses superiores podem não proporcionar benefícios adicionais para a microporosidade nesta profundidade.

Na camada de 0,10–0,20 m, de maneira geral, os maiores valores foram registrados sistematicamente no GC de 90%, independentemente da dose aplicada. Na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o grau de 90% apresentou o maior valor ( $0,483 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), seguido pelos demais, que variaram de  $0,373$  a  $0,420 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Com 50 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , os maiores valores seguiram sendo observados no GC de 90%, enquanto os demais apresentaram variação entre  $0,333$  e  $0,423 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , os valores mantiveram a mesma tendência, com o GC de 90% em destaque ( $0,423 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e os demais próximos ou inferiores a  $0,363 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Na análise de regressão (Tabela 6), observou-se que todos os GC apresentaram resposta significativa à aplicação de  $P_2O_5$ . Para os GC de 80%, 85% e 95%, o comportamento foi quadrático, indicando aumento da microporosidade com o incremento da adubação até um ponto máximo, seguido de leve declínio. As doses ótimas estimadas foram de aproximadamente 62,5 kg ha<sup>-1</sup> para 80%, 30 kg ha<sup>-1</sup> para 85%, e 75 kg ha<sup>-1</sup> para 95% de GC, evidenciando que essas condições físicas do solo responderam positivamente a doses intermediárias de  $P_2O_5$ . No entanto, para o GC de 90%, a resposta foi linear decrescente, com redução gradual da microporosidade à medida que as doses aumentaram.

A continuidade dos poros na camada de 0–0,05 m foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas (Figura 1a). Observou-se que, na ausência de adubação fosfatada, o GC de 85% apresentou a maior continuidade dos poros (114,7), enquanto os demais GC tiveram valores inferiores, variando entre 75,7 e 81. Esse comportamento evidencia que, mesmo sem a adição de  $P_2O_5$ , níveis moderados de compactação podem favorecer a conectividade dos poros, possivelmente pela melhor acomodação das partículas do solo.

Com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ , o grau de compactação de 80% apresentou o maior valor de continuidade dos poros (120), com diferenças estatísticas em relação aos GC de 85 e 95%. A aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> resultou em maiores valores de continuidade para os GC de 80% e 85% (114,3 e 132, respectivamente), mantendo superioridade em relação ao GC de 95% (66). Por fim, a maior dose (150 kg ha<sup>-1</sup>) promoveu aumentos expressivos na continuidade dos poros para os GC de 80, 85 e 90%, com valores superiores a 124, enquanto o GC de 95% apresentou o menor valor (56,3), confirmando o efeito negativo da compactação mais intensa sobre a porosidade funcional do solo (Figura 11a)

Os modelos de regressão (figura 11b) evidenciaram respostas distintas entre os graus de compactação. Para GC 80% e 90%, observou-se aumento linear da continuidade dos poros em função das doses de  $P_2O_5$ , com altos coeficientes de determinação, indicando forte relação positiva. Para o GC de 85%, o comportamento foi quadrático, com o ponto de mínimo estimado na dose de aproximadamente 46,2 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ , a partir da qual a continuidade dos poros voltou a aumentar.

**Tabela 6.** Porosidade total e distribuição de poros por tamanho após cultivo da sucessão feijão-azevém, aos 26 meses após aplicação de graus de compactação (GC) e doses de P2O5 na semeadura da cultura da cultura de verão.

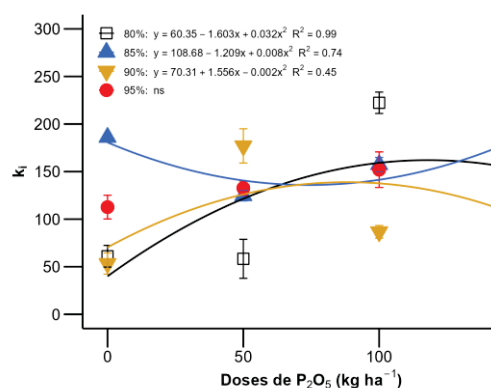
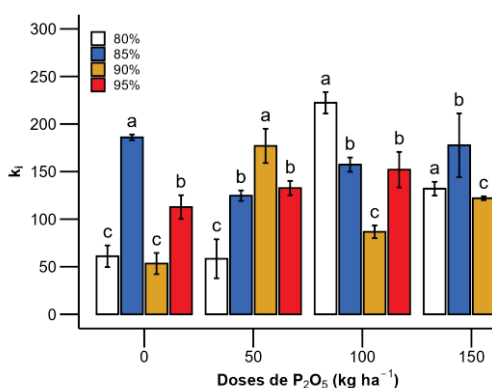
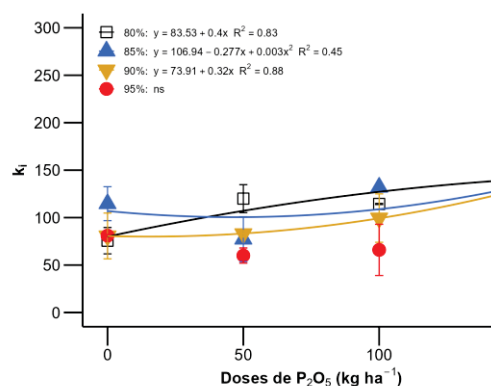
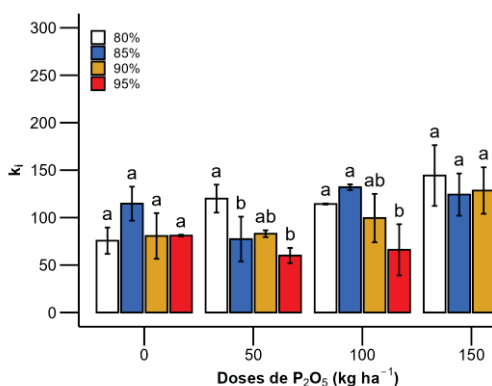
| Camada de solo | GC (%) | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                            |                             | Regressão                                 | R <sup>2</sup> | Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             |                             | Regressão                                 | R <sup>2</sup> |
|----------------|--------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------|
|                |        | 0                                                             | 50                          | 100                        | 150                         |                                           |                | 0                                                             | 50                          | 100                         | 150                         |                                           |                |
| 0-0,05 m       |        | Porosidade total (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )          |                             |                            |                             |                                           |                | Macroporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )           |                             |                             |                             |                                           |                |
|                | 80     | 0,47 <sup>±0,03</sup><br>a                                    | 0,47 <sup>±0,02</sup><br>ab | 0,48 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,54 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,46 + 0,0004x$                | 0,71           | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,02 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>b  | $\hat{y} = 0,02 - 0,0001x$                | 0,69           |
|                | 85     | 0,49 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,53 <sup>±0,08</sup><br>ab | 0,52 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,50 <sup>±0,06</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,03 <sup>±0,01</sup><br>b                                    | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,04 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>b  | $\hat{y} = 0,03 - 0,0001x + 0,0000x^2$    | 0,30           |
|                | 90     | 0,54 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,56 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,53 <sup>±0,01</sup><br>a | 0,59 <sup>±0,03</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,53 + 0,0003x$                | 0,56           | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,04 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>ab  | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,04 - 0,0002x + 0,000001x^2$  | 0,64           |
|                | 95     | 0,45 <sup>±0,04</sup><br>a                                    | 0,44 <sup>±0,00</sup><br>b  | 0,50 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,50 <sup>±0,02</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,44 + 0,0004x$                | 0,77           | 0,04 <sup>±0,0</sup><br>a                                     | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | $\hat{y} = 0,03 - 0,0001x$                | 0,30           |
| 0,05-0,10 m    | 80     | 0,47 <sup>±0,04</sup><br>a                                    | 0,49 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,44 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,46 <sup>±0,05</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,05 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>ab | 0,03 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                        |                |
|                | 85     | 0,49 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,51 <sup>±0,05</sup><br>a  | 0,49 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,48 <sup>±0,02</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>b                                    | 0,02 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,03 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                        |                |
|                | 90     | 0,52 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,51 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,51 <sup>±0,05</sup><br>a | 0,43 <sup>±0,02</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,53 - 0,0006x$                | 0,71           | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,04 <sup>±0,0</sup><br>ab  | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | $\hat{y} = 0,05 - 0,0001x$                | 0,86           |
| 0,10-0,20 m    | 95     | 0,46 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,43 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,47 <sup>±0,02</sup><br>a | 0,45 <sup>±0,03</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>ab                                    | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>a   | $\hat{y} = 0,03 + 0,0002x - 0,000002x^2$  | 0,41           |
|                | 80     | 0,47 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,49 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,47 <sup>±0,02</sup><br>a | 0,50 <sup>±0,02</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,03 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>b  | $\hat{y} = 0,04 + 0,00001x$               | 0,58           |
|                | 85     | 0,49 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,49 <sup>±0,0</sup><br>ab  | 0,47 <sup>±0,01</sup><br>a | 0,48 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                        |                | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,03 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,04 <sup>±0,02</sup><br>b  | ns                                        |                |
|                | 90     | 0,48 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,51 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,48 <sup>±0,01</sup><br>a | 0,51 <sup>±0,01</sup><br>a  | ns                                        |                | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,02 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,05 <sup>±0,0</sup><br>ab  | $\hat{y} = 0,03 - 0,00003x + 0,000003x^2$ | 0,85           |
|                | 95     | 0,50 <sup>±0,0</sup><br>a                                     | 0,46 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,47 <sup>±0,02</sup><br>a | 0,45 <sup>±0,01</sup><br>b  | $\hat{y} = 0,49 - 0,0003x$                | 0,80           | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,01 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,03 <sup>±0,0</sup><br>b   | 0,06 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,03 - 0,00006x + 0,000001x^2$ | 0,94           |
|                |        | Mesoporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )            |                             |                            |                             |                                           |                | Microporosidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )           |                             |                             |                             |                                           |                |
| 0-0,05 m       | 80     | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>a  | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,07 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                        |                | 0,38 <sup>±0,03</sup><br>a                                    | 0,38 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,38 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,41 <sup>±0,01</sup><br>ab | ns                                        |                |
|                | 85     | 0,05 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,06 <sup>±0,00</sup><br>a  | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a | 0,08 <sup>±0,0</sup><br>a   | ns                                        |                | 0,40 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,45 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,42 <sup>±0,04</sup><br>ab | 0,40 <sup>±0,04</sup><br>ab | $\hat{y} = 0,41 + 0,00009x - 0,000001x^2$ | 0,70           |
|                | 90     | 0,05 <sup>±0,00</sup><br>a                                    | 0,07 <sup>±0,0</sup><br>a   | 0,04 <sup>±0,01</sup><br>b | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>b   | $\hat{y} = 0,05 + 0,00005x - 0,000001x^2$ | 0,84           | 0,36 <sup>±0,02</sup><br>a                                    | 0,40 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,45 <sup>±0,02</sup><br>a  | 0,45 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,37 + 0,00006x$               | 0,89           |
|                | 95     | 0,05 <sup>±0,01</sup><br>a                                    | 0,04 <sup>±0,03</sup><br>a  | 0,06 <sup>±0,0</sup><br>ab | 0,04 <sup>±0,00</sup><br>c  | ns                                        |                | 0,36 <sup>±0,03</sup><br>a                                    | 0,37 <sup>±0,02</sup><br>b  | 0,39 <sup>±0,04</sup><br>b  | 0,38 <sup>±0,00</sup><br>b  | ns                                        |                |
| 0,05-0,10 m    | 80     | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>a                                     | 0,02 <sup>±0,01</sup><br>ab | 0,01 <sup>±0,0</sup><br>a  | 0,02 <sup>±0,1</sup><br>a   | ns                                        |                | 0,37 <sup>±0,03</sup><br>b                                    | 0,40 <sup>±0,02</sup><br>ab | 0,35 <sup>±0,02</sup><br>c  | 0,38 <sup>±0,01</sup><br>a  | $\hat{y} = 0,38 - 0,00001x$               | 0,65           |

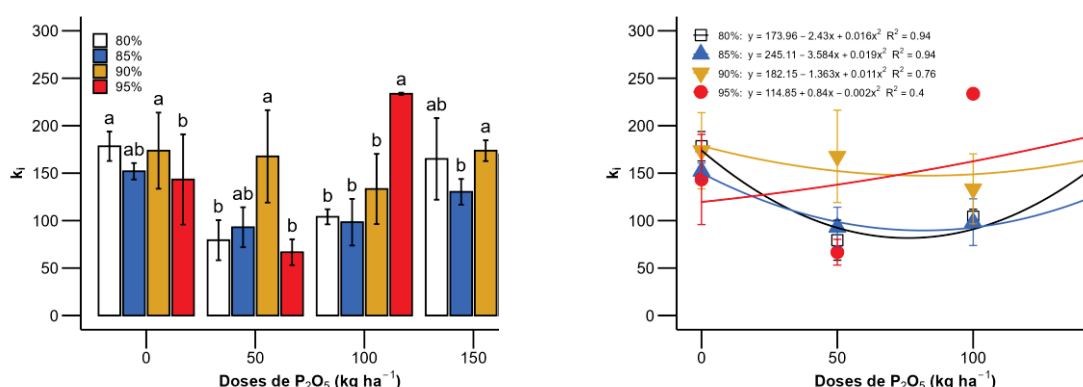
|                 |    |                 |   |                 |    |                 |                 |   |                                          |      |  |                 |                 |                 |                 |                                          |      |
|-----------------|----|-----------------|---|-----------------|----|-----------------|-----------------|---|------------------------------------------|------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------------------|------|
|                 | 85 | 0,01 $\pm$ 0,00 | a | 0,01 $\pm$ 0,00 | b  | 0,02 $\pm$ 0,00 | 0,01 $\pm$ 0,0  | a | ns                                       |      |  | 0,42 $\pm$ 0,02 | 0,41 $\pm$ 0,02 | 0,45 $\pm$ 0,04 | 0,42 $\pm$ 0,04 | ns                                       |      |
|                 | 90 | 0,01 $\pm$ 0,01 | a | 0,003 $\pm$ 0,0 | c  | 0,01 $\pm$ 0,0  | 0,01 $\pm$ 0,01 | a | ns                                       |      |  | 0,46 $\pm$ 0,02 | 0,45 $\pm$ 0,01 | 0,46 $\pm$ 0,02 | 0,42 $\pm$ 0,01 | ns                                       |      |
|                 | 95 | 0,01 $\pm$ 0,00 | a | 0,03 $\pm$ 0,0  | a  | 0,02 $\pm$ 0,0  | 0,01 $\pm$ 0,01 | a | $\hat{y} = 0,01 + 0,0003x - 0,000002x^2$ | 0,53 |  | 0,37 $\pm$ 0,03 | 0,36 $\pm$ 0,02 | 0,39 $\pm$ 0,04 | 0,39 $\pm$ 0,00 | ns                                       |      |
|                 | 80 | 0,05 $\pm$ 0,0  | a | 0,05 $\pm$ 0,00 | a  | 0,05 $\pm$ 0,0  | 0,05 $\pm$ 0,0  | a | ns                                       |      |  | 0,37 $\pm$ 0,00 | 0,41 $\pm$ 0,02 | 0,36 $\pm$ 0,02 | 0,36 $\pm$ 0,01 | $\hat{y} = 0,38 + 0,0005x - 0,000004x^2$ | 0,43 |
| 0,10-<br>0,20 m | 85 | 0,05 $\pm$ 0,01 | a | 0,05 $\pm$ 0,0  | a  | 0,05 $\pm$ 0,0  | 0,04 $\pm$ 0,01 | b | $\hat{y} = 0,04 + 0,0002x - 0,00001x^2$  | 0,98 |  | 0,42 $\pm$ 0,03 | 0,41 $\pm$ 0,00 | 0,45 $\pm$ 0,01 | 0,35 $\pm$ 0,02 | $\hat{y} = 0,41 + 0,0006x - 0,00001x^2$  | 0,85 |
|                 | 90 | 0,03 $\pm$ 0,00 | b | 0,04 $\pm$ 0,00 | b  | 0,04 $\pm$ 0,00 | 0,03 $\pm$ 0,00 | b | ns                                       |      |  | 0,48 $\pm$ 0,02 | 0,44 $\pm$ 0,01 | 0,45 $\pm$ 0,02 | 0,42 $\pm$ 0,01 | $\hat{y} = 0,47 - 0,0003x$               | 0,75 |
|                 | 95 | 0,03 $\pm$ 0,00 | b | 0,05 $\pm$ 0,00 | ab | 0,05 $\pm$ 0,00 | 0,02 $\pm$ 0,00 | c | $\hat{y} = 0,03 + 0,0006x - 0,000004x^2$ | 0,99 |  | 0,40 $\pm$ 0,02 | 0,33 $\pm$ 0,01 | 0,34 $\pm$ 0,01 | 0,36 $\pm$ 0,01 | $\hat{y} = 0,39 - 0,0015x - 0,00001x^2$  | 0,91 |

Valores sobrescritos representam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparam GC dentro de uma mesma dose de  $P_2O_5$ , não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



Na camada de 0,05–0,10 m (figura 11c), a  $K_i$  também foi influenciada pela interação entre os GC e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Na ausência de adubação fosfatada, o GC de 85% apresentou o maior valor (186), seguido por 95% (112,7), enquanto os GC de 80 e 90% mostraram os menores valores, inferiores a 62. Esse padrão foi alterado com a aplicação das doses crescentes de  $P_2O_5$ . Com 50  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , a  $K_i$  aumentou significativamente com GC 90% (177), indicando resposta positiva à adubação sob esse GC, enquanto o grau de 80% manteve valores baixos (58,3). Já com a aplicação de 100  $kg\ ha^{-1}$ , foi observado um notável incremento na continuidade dos poros no GC de 80%, atingindo 222,3, valor estatisticamente superior aos demais. Esse efeito foi ainda mais expressivo com 150  $kg\ ha^{-1}$ , quando a continuidade dos poros em 80% de GC atingiu 540, reforçando a sensibilidade desse GC à adubação fosfatada para a reestruturação da porosidade funcional.





**Figura 11.** Índice de continuidade de poros ( $k_i$ ) de Groenvelt das camadas de 0-0,05 (a, b), 0,05-0,10 (c, d) e 0,10-0,20 m (e, f) após 26 meses de compactação em diferentes graus (80 % = em branco; 85 % = em azul; 90 % em amarelo; e 95 % em vermelho) e doses de  $P_2O_5$  aplicadas na semeadura da cultura de verão da sucessão feijão-azevém, antecessora à coleta das amostras. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os modelos de regressão ajustados para a continuidade dos poros na profundidade de 0,05–0,10 m revelaram diferentes padrões de resposta entre os GC (Figura 11d). Para o grau de 80%, observou-se um comportamento quadrático bem definido, com aumento expressivo na continuidade dos poros até uma dose próxima de  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , a partir da qual os valores tenderam à estabilização. Esse resultado demonstra alta sensibilidade da estrutura porosa superficial a baixas doses de fósforo sob esse GC. No GC de 85%, também foi identificado um padrão quadrático, com incremento progressivo da  $K_i$  até uma dose intermediária de adubação, indicando que a resposta à aplicação de  $P_2O_5$  é positiva, mas limitada a uma faixa específica de dose, além da qual os ganhos estruturais tendem a se reduzir. Já para o grau de 90%, o ajuste quadrático indicou um padrão de resposta distinto, com aumento inicial da continuidade dos poros, porém sem estabilização clara dentro da faixa de doses testadas, sugerindo uma tendência crescente. Por outro lado, no GC de 95%, não foi identificado ajuste significativo, reforçando que altos níveis de compactação comprometem a eficácia da adubação fosfatada na melhoria da conectividade dos poros do solo.

Na camada de 0,10–0,20 m (Figura 11e), a continuidade dos poros foi significativamente influenciada pela interação entre as doses de  $P_2O_5$  e os GC. Na

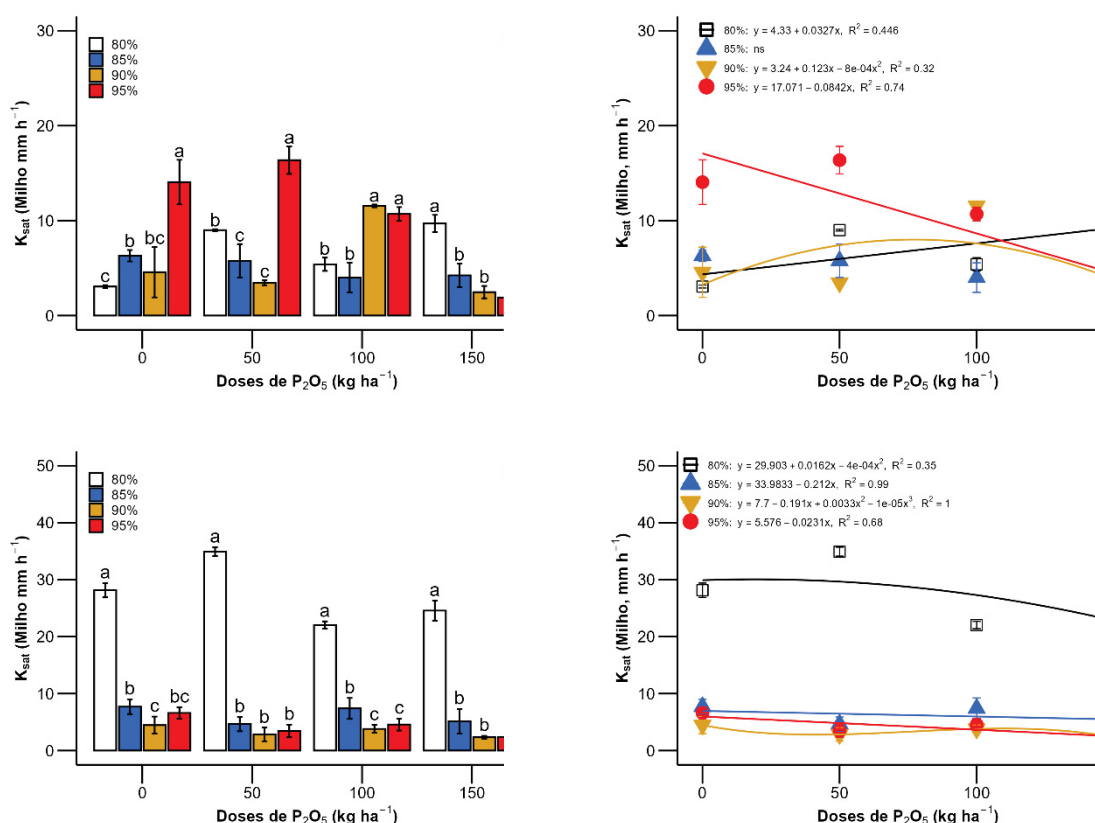
ausência de adubação, o maior valor foi observado no GC de 85%, com 252, sendo superior aos demais. Os graus de 80% e 90% apresentaram valores intermediários, enquanto o grau de 95% teve o menor valor (143,3). Com a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, houve redução da continuidade dos poros em todos os graus, sendo o melhor desempenho observado em 90 % de GC (167,7%). Para os GC de 85%, 80% e 95%, os valores foram significativamente inferiores, variando entre 66,7 e 93, indicando que doses baixas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não foram suficientes para manter a conectividade estrutural do solo em níveis adequados. A aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> resultou em expressivo aumento da continuidade dos poros no GC de 95%, atingindo 265,3, valor significativamente superior aos demais. Já os demais GC apresentaram respostas similares, com valores entre 98,3 e 133,3. Com a dose de 150 kg ha<sup>-1</sup>, observou-se novo incremento no GC de 90%, que atingiu 240,3, enquanto os demais graus variaram de 130,3 a 169,7. Esses resultados indicam que, mesmo em profundidades subsuperficiais, a adubação fosfatada pode contribuir para a melhoria da continuidade dos poros, especialmente em condições de compactação elevada ou intermediária, desde que aplicadas doses mais elevadas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Já doses mais baixas podem ser insuficientes para manter ou promover a conectividade porosa, sobretudo em graus de compactação mais limitantes.

### 3.5.3 FLUXOS DE ÁGUA E AR NO SOLO

Houve interação entre os graus de compactação (GC) e as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sobre a condutividade hidráulica saturada (K<sub>sat</sub>) em todas as camadas de solo (0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), tanto após o cultivo de milho (8 meses após aplicação dos GC) quanto após a sucessão feijão-azevém (26 meses após aplicação dos GC). Após 8 meses, na camada de 0–0,05 m (Figura 12a), tanto sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> quanto na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup>, o GC de 95 % apresentou as maiores K<sub>sat</sub> (aproximadamente 15 mm h<sup>-1</sup>), diferindo dos GC de 85 e 90 %, que não diferiram entre si. O GC de 80% resultou no menor valor quando não foi aplicado P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e levemente superior com a 50 kg ha<sup>-1</sup>. Na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, os GC de 90 % e 95 % destacaram-se, com os maiores valores de K<sub>sat</sub>, próximos a 12 mm h<sup>-1</sup>. Já com 150 kg ha<sup>-1</sup>, o maior valor foi registrado no GC de 80 %, superando os demais.

Os modelos de regressão ajustados para a K<sub>sat</sub> em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nesta camada (Figura 12b) apresentaram respostas distintas conforme entre os GC. No GC de 80 %, observou-se resposta linear crescente, com aumento discreto (0,0327 mm h<sup>-1</sup>) da K<sub>sat</sub> à medida que se elevaram as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para

o GC de 85 %, não houve resposta significativa. Enquanto no GC de 90 %, a resposta seguiu um modelo quadrático, com incremento inicial da  $K_{sat}$  até uma dose aproximada de  $77 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , seguido de decréscimo. Já no GC de 95%, observou-se tendência linear decrescente, indicando redução progressiva da  $K_{sat}$  com o aumento da adubação fosfatada.



**Figura 12.** Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) das camadas de 0-0,05 (a, b) e 0,05-0,10 m (c, d) após 8 meses de compactação em diferentes graus (80 % = em branco; 85 % = em azul; 90 % em amarelo; e 95 % em vermelho) e doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas na semeadura da cultura de verão da sucessão feijão-azevém, antecessora à coleta das amostras. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Na camada de 0,05-0,10 m os resultados da  $K_{sat}$  entre os GC (Figura 12c) não seguiram a mesma tendência do observado na camada de 0-0,05 m. Nesta camada, a  $K_{sat}$  decaiu expressivamente (de 22 a  $35 \text{ mm h}^{-1}$ ) em todas as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em decorrência da elevação da compactação do solo a valores menores que  $10 \text{ mm h}^{-1}$ . Entretanto, entre os GC de 85, 90 e 95 % as variações na  $K_{sat}$  (de 3,8 a  $7,4 \text{ mm h}^{-1}$ ) foram pequenas e similares. Os modelos de regressão ajustados para a  $K_{sat}$  em função das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na camada de 0,05-0,10 m (Figura 12d)

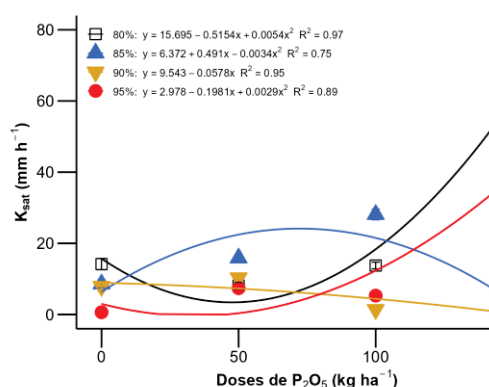
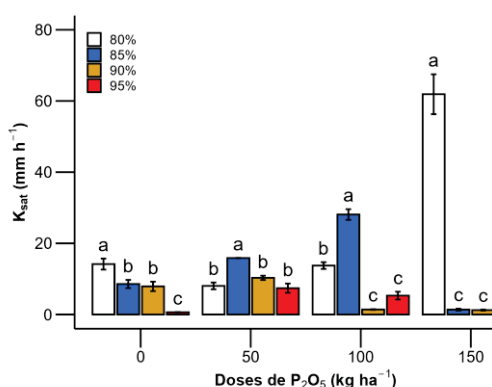
demonstraram comportamentos distintos entre os GC. No GC de 80 %, a resposta foi quadrática, porém com acurácia baixa, de apenas 45%). No GC de 85 e 95 %, foram encontrados modelos linear decrescentes, porém a redução da  $K_{sat}$  com o GC de 85 % foi mais expressiva (0,212 mm h<sup>-1</sup> para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado) em relação ao GC de 95 % (0,0231 mm h<sup>-1</sup>). E, no GC de 90 % o modelo cúbico foi o de melhor ajuste, indicando oscilações mais complexas na  $K_{sat}$  neste nível moderado de compactação.

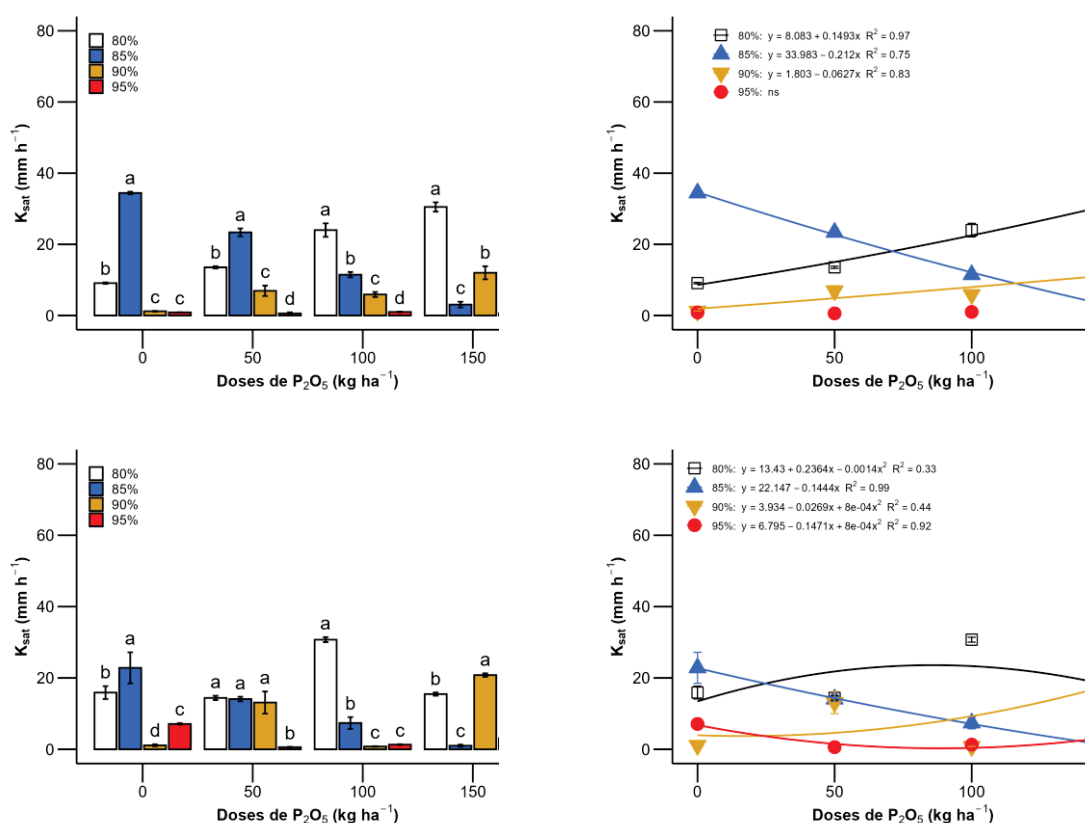
Após 26 meses do estabelecimento dos GC e aplicações de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas culturas do milho, trigo e feijão, na camada de 0–0,05 m (Figura 13a), na ausência da aplicação de fósforo, a maior  $K_{sat}$  foi observado no GC de 80% (14,17 mm h<sup>-1</sup>), diferindo dos demais GC. Nesta condição, chama a atenção os baixos valores de  $K_{sat}$  no GC de 95 %, inferiores a 0,6 mm h<sup>-1</sup>, distinguindo-se dos GC de 85 % (8,57 mm h<sup>-1</sup>) e 90 % (7,90 mm h<sup>-1</sup>), que não diferiram entre si. Com a aplicação de 50 e 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a  $K_{sat}$  no GC de 85% aumentou, sendo superior a  $K_{sat}$  no GC de 80 %. Ainda, na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> a  $K_{sat}$  nos GC de 90 e 95 % foi inferior aos demais GC, com valores próximos a 5,3 e 1,4 mm h<sup>-1</sup>. Já com 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o maior valor foi registrado no grau de 80% (61,90 mm h<sup>-1</sup>), enquanto o grau de 95% teve valor intermediário (41,23 mm h<sup>-1</sup>) e os graus de 85% e 90% não diferiram entre si e mantiveram baixos valores de  $K_{sat}$ . Nessa camada, os modelos de regressão ajustados para a  $K_{sat}$  em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 13b) evidenciaram respostas contrastantes para os GC de 80 e 95 % (quadráticas negativas), em relação aos GC de 85 (quadrática positiva) e 90 % (linear decrescente). Esses resultados denotam que baixas doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (menores que 50 kg ha<sup>-1</sup>) tendem a reduzir a  $K_{sat}$  da camada mais superficial do solo em GC de 80 e 95 %. Contudo, em condição de compactação leve (GC de 85 %) a aplicação até 72,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pode favorecer o fluxo de água no solo. E sob compactação moderada (GC = 90 %) o aumento a adubação fosfatada reduz a  $K_{sat}$ , porém de modo sutil (0,0578 mm h<sup>-1</sup> para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado).

Já na camada de 0,05–0,10 m, após 26 meses, tanto sem a aplicação de fósforo quanto a aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> a  $K_{sat}$  condicionada no GC de 85 % (entre 23 e 28 mm h<sup>-1</sup>) foi superior aos demais GC, principalmente em relação aos GC de 90 e 95 %. Já nas doses de 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a  $K_{sat}$  reduziu progressivamente com o aumento da compactação do solo (Figura 13c), demonstrando que o acréscimo da adubação não é suficiente para mitigar o

problema da compactação sobre a  $K_{sat}$ . Esses resultados são reforçados ao serem analisadas as regressões da  $K_{sat}$  em função das doses de  $P_2O_5$  (Figura 13d). Inicialmente, ficou evidente que nessa camada, no GC de 95 % as doses de fósforo não influenciaram a  $K_{sat}$  e nesse GC ocorreram os menores valores de fluxo de água. Contudo, em condições do GC de 80 e 90 % a adubação afetou positivamente a  $K_{sat}$ , resultado oposto ao observado para o GC de 85% (decréscimo de 0,0627 mm  $h^{-1}$  para cada kg de  $P_2O_5$  aplicado).

Por fim, na camada de 0,10-0,20 m, após a sucessão feijão-azevém (26 meses), os resultados entre os GC com a aplicação de 100 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  foram similares aos reportados na camada de 0,05-0,10 m: redução da  $K_{sat}$  com o aumento do GC, porém agora, não foram reportadas diferenças entre os GC de 90 e 95 %. Do mesmo modo, observaram-se resultados similares da  $K_{sat}$  da camada mais inferior, em relação a camada de 0,05-0,10 m, para os GC na ausência da aplicação de fósforo e na dose de 150 kg  $ha^{-1}$ . Contudo, em 0,10-0,020 m, com a aplicação de 50 kg  $ha^{-1}$  a  $K_{sat}$  entre os GC de 80, 85 e 90% foram similares (entre 13,1 e 14,4 mm  $h^{-1}$ ) e superiores aos GC de 95 % - 2 mm  $h^{-1}$  (Figura 13e). Em relação a resposta das doses de  $P_2O_5$  em cada GC, foram observadas respostas positivas sobre a  $K_{sat}$  nos GC de 80, 90 e 95 % e linear negativa para o GC de 85 % (similar ao reportado na camada sobrejacente). Embora tenham ocorrido respostas positivas sobre os GC de 80, 90 e 95 %, deve-se ressaltar que o aumento da  $K_{sat}$  no GC de 80 % é incerto ( $R^2 = 0,33$ ), e nos GC de 90 e 95 % as regressões foram quadráticas negativas (Figura 13f).





**Figura 13.** Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) das camadas de 0-0,05 (a, b), 0,05-0,10 (c, d) e 0,10-0,20 m (e, f) após 26 meses de compactação em diferentes graus (80 % = em branco; 85 % = em azul; 90 % em amarelo; e 95 % em vermelho) e doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas na semeadura da cultura de verão da sucessão feijão-azevém, antecessora à coleta das amostras. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

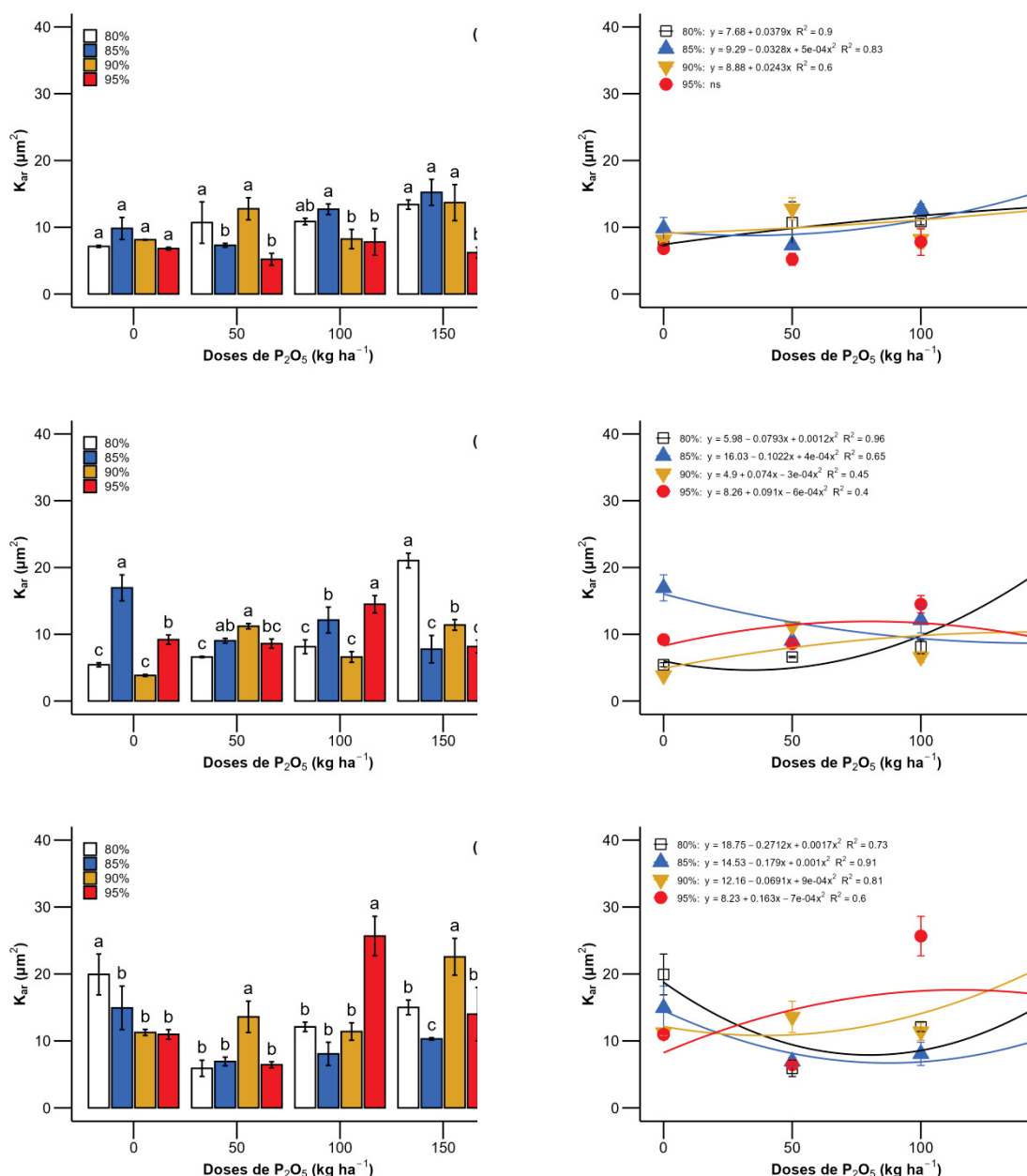
Assim como a  $K_{sat}$ , a permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ) também foi influenciada pelos GC e doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em todas as camadas do solo (Figura 14). É válido ressaltar que a  $K_{ar}$  foi analisada uma única vez, aos 26 meses após experimentação. Na camada de 0-0,05 m, na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a variação nos valores de  $K_{ar}$  (de 6,8 a 9,8  $\mu\text{m}^2$ ) foi baixa, não suficiente para distinguir os GC. Contudo, com a aplicação de 50  $\text{kg ha}^{-1}$ , os GC de 80 e 90% apresentaram as maiores  $K_{ar}$ , similares entre si. Na dose de 100  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  houve redução da  $K_{ar}$  do GC de 90% e aumento da  $K_{ar}$  com o GC de 85 %, o que manteve-se com a dose de 150  $\text{kg ha}^{-1}$ . Ainda, independente da aplicação entre 50 e 150  $\text{kg ha}^{-1}$ , a  $K_{ar}$  com o GC de 95 % sempre foi inferior aos demais, principalmente na maior dose aplicada (Figura 14a). Deste modo, com exceção do GC de 95 %, foram observados efeitos positivos da



adubação fosfatada sobre a  $K_{ar}$  nessa camada mais superficial. A resposta foi linear para os GC de 80 e 90 % e quadrática para o GC de 85 % (Figura 14b); a qual demonstrou que doses baixas ( $33 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ ) podem promover uma sutil redução da  $K_{ar}$  de  $9,3 \mu\text{m}^2$  a  $8,7 \mu\text{m}^2$ . Contudo, a partir dessa dose, os valores de  $K_{ar}$  nesse GC voltam a se elevar, até atingir a máxima de  $15,6 \mu\text{m}^2$  com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ . Ainda, é válido ressaltar que mesmo o menor valor de  $K_{ar}$  obtido no GC de 85 % com essa dose de  $33 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , os valores ainda são superiores aos reportados para o GC de 95 %, independentemente da dose.

A  $K_{ar}$  das camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m foi mais sensível as alterações impostas pelos GC e doses de  $P_2O_5$ , com resultados discrepantes entre as próprias camadas. Em 0,05-0,10 m (Figura 14c), sem a adubação fosfatada, o maior valor de  $K_{ar}$  foi registrado no GC de 85% ( $16,95 \mu\text{m}^2$ ) muito acima dos demais. Ainda nessa condição de ausência de adubação, com a  $K_{ar}$  no GC de 95 % superior aos GC de 80 e 90 %. Enquanto que, na camada de 0,10-0,20 m (Figura 14e), a  $K_{ar}$  do GC de 80 % foi superior aos demais tratamentos, os quais não diferiram entre si.

Em ambas as camadas, com a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , o GC de 90% proporcionou os maiores valores de  $K_{ar}$  com maior discrepância em relação aos demais GC, ocorrendo na camada mais profunda (Figura 14e). Do mesmo modo, com a dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , em ambas as camadas, pode-se observar que os maiores valores de  $K_{ar}$  foram decorrentes do GC de 95 %. Ainda, na camada de 0,05-0,10 m o GC de 85 % teve valores intermediários de  $K_{ar}$ , superiores aos GC de 80 e 90 % (Figura 14c). Já na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , a maior  $K_{ar}$  foi registrada no GC de 80% ( $21,03 \mu\text{m}^2$ ), indicando forte resposta da adubação condições menos compactadas, como confirmado na regressão polinomial ajustada para esse GC (Figura 14d). Nessa mesma dose, na camada de 0,10-0,20 m, a maior  $K_{ar}$  foi reportada no GC de 90 %, seguido dos GC de 80 e 95 %, similares entre si, e por fim 85 % com a menor  $K_{ar}$  (Figura 14e).



**Figura 14.** Permeabilidade ao ar ( $K_{ar}$ ) das camadas de 0-0,05 (a, b), 0,05-0,10 (c, d) e 0,10-0,20 m (e, f) após 26 meses de compactação em diferentes graus (80 % = em branco; 85 % = em azul; 90 % em amarelo; e 95 % em vermelho) e doses de  $P_2O_5$  aplicadas na semeadura da cultura de verão da sucessão feijão-azevém, antecessora à coleta das amostras. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Em ambas as camadas, foram reportadas respostas quadráticas da adubação fosfatada sobre a  $K_{ar}$ . Para o GC de 80 % observou-se que a partir de doses de 33 e 80 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , há aumento da  $K_{ar}$  das camadas de 0,05-0,10 (Figura 14d) e 0,10-0,20 m (Figura 14f), respectivamente. Todavia, é válido ressaltar

que para a camada mais profunda, a redução da  $K_{ar}$  imposta, até ser atingida tal dose, em relação a ausência da adubação, é maior que o acréscimo de  $K_{ar}$  a ser obtido com a aplicação de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Em relação ao GC de 85 %, houve uma reposta negativa pela aplicação de fósforo, até doses de 127 e 90  $\text{kg ha}^{-1}$  nas camadas de 0,05-0,10 (Figura 14d) e 0,10-0,20 m (Figura 4f), respectivamente. Embora as doses de mínima tenham diferido, a intensidade da redução em ambas as camadas é similar entre si, considerando que os coeficientes lineares (16,025 e 14,531) entre as regressões são similares. Quanto ao GC de 90 %, houve um ponto de máxima ( $123 \text{ kg ha}^{-1}$ ) na camada de 0,05-0,10 m; e de mínima ( $38 \text{ kg ha}^{-1}$ ) na camada de 0,10-0,20 m. Assim, pode-se inferir, que na camada mais profunda, a adubação fosfatada teve um efeito positivo sobre a  $K_{ar}$  em um grau moderado de compactação (90 %).

Para finalizar, em ambas as camadas, no GC de 95 % as respostas da adubação fosfatada sobre a  $K_{ar}$  indicam que a aplicação de doses entre 76 e 116  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  proporcionam valores máximos de  $K_{ar}$  nas camadas de 0,05-0,10 (Figura 14d) e 0,10-0,20 m (Figura 14f), respectivamente, superiores aos reportados nessas mesmas doses em níveis de compactação menor. Também, deve-se mencionar que embora tenha sido possível ser estabelecidos ajustes polinomiais para todos os GC, alguns apresentaram baixa precisão, principalmente para o maior nível de compactação (entre 40 e 60 %).

### 3.6 DISCUSSÃO

A densidade do solo ( $D_s$ ) é um indicador físico essencial da compactação, afetando negativamente a aeração, o fluxo de água, a emergência de plântulas e o crescimento radicular (HORN et al., 1995; LIPIEC et al., 2006). Os resultados obtidos neste estudo revelaram que a  $D_s$  foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com respostas distintas entre culturas, profundidades e níveis de adubação. Após cultivo do milho, na profundidade de 0–0,5 m, os maiores valores de  $D_s$  foram consistentemente observados no grau de compactação de 95%, superando os demais independentemente da dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Em contraste, os graus intermediários (80% e 90%) apresentaram sensibilidade à adubação fosfatada, com redução da densidade nas doses intermediárias. O modelo quadrático ajustado para o grau de 80% indicou densidade mínima próxima a  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , enquanto o grau de 90%

respondeu de forma linear decrescente, sugerindo efeito da adubação sobre a atividade biológica e a estabilidade estrutural do solo (BENGOUGH et al., 2011; CHEN et al., 2022).

Após a sucessão feijão-azevém (26 meses), também na profundidade de 0–0,5 m, o padrão foi semelhante. A densidade foi mais elevada nos solos mais compactados, mas graus de 85% e 80% apresentaram redução significativa da Ds com o aumento das doses de  $P_2O_5$ . Modelos de regressão ajustados para esses níveis confirmam esse comportamento: linear decrescente para 80% e 95%, e quadrático para 85%, com densidade mínima estimada em torno de 90 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ . A atuação do fósforo, mesmo sendo pouco móvel, pode estar relacionada ao estímulo ao crescimento radicular e à exsudação de compostos orgânicos que favorecem a agregação do solo (MENDONÇA et al., 2006).

Nas camadas subsuperficiais (0,5–1,0 m), tanto no pos milho quanto sucessão feijão-azevem, a resposta à adubação foi menos pronunciada. Ainda assim, observou-se redução da densidade no grau de compactação de 85%, com modelos quadráticos e cúbicos significativos. Após milho, a dose de 110 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$  foi associada à menor densidade nesse grau, indicando que mesmo em profundidade a adubação pode contribuir para alívio estrutural em condições intermediárias de compactação.

Na camada de 0,10–0,20 m, sob feijão, a resposta foi semelhante à das camadas mais rasas. O grau de 95% manteve os maiores valores de Ds, mas o nível de 85% apresentou resposta quadrática significativa, com redução da densidade até cerca de 75 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ . O grau de 90% respondeu de forma linear, com leve redução da Ds, sugerindo que, mesmo em profundidades intermediárias, o fósforo pode melhorar a condição física do solo, especialmente quando associado a graus de compactação moderados. Em síntese, a densidade do solo respondeu de maneira significativa às doses de  $P_2O_5$ , principalmente nos graus de compactação de 80% e 85%, enquanto os extremos (95% e 90%) mostraram menor variação. A capacidade do fósforo em melhorar atributos físicos do solo parece estar associada à sua influência indireta sobre o desenvolvimento do sistema radicular, estabilidade de agregados e atividade microbiana. Esses resultados indicam que o manejo adequado da adubação fosfatada pode contribuir não apenas para o fornecimento nutricional, mas também para a melhoria estrutural do solo, especialmente em

condições de compactação intermediária, sendo uma ferramenta complementar à prevenção de compactação.

Por outra parte a análise dos dados revelou que, em algumas situações, a densidade do solo aumentou com o incremento das doses de  $P_2O_5$ , especialmente nos graus de compactação de 80% e 95%. Essa resposta pode ser interpretada de maneiras distintas, conforme o estado inicial de compactação e a faixa de densidade atingida. Em solos não compactados, um aumento leve da densidade pode refletir uma melhoria na agregação do solo, resultante do maior crescimento radicular e da atividade biológica estimulada pela adubação fosfatada (BENGOUGH et al., 2011). Esse efeito pode contribuir para a estabilização da estrutura, o aumento da coesão entre partículas e até mesmo para uma melhor retenção de água em microporos, características desejáveis em sistemas sob plantio direto. Por outro lado, em solos já compactados (como no GC de 95%), a elevação da densidade, mesmo que discreta, deve ser vista com cautela. Valores superiores a  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$  em Latossolos argilosos podem limitar a difusão de oxigênio, impedir o alongamento radicular e reduzir a infiltração de água, comprometendo a produtividade das culturas (LIPIEC et al., 2006; HORN et al., 1995). Assim, nesses casos, o aumento da Ds associado à adubação indica ausência de resposta estrutural positiva, possivelmente por limitação física severa que impede a ação reestruturadora das raízes. Portanto, o impacto do aumento da densidade depende da condição estrutural prévia do solo. Em níveis intermediários de compactação (80% e 85%), os efeitos da adubação fosfatada sobre a densidade podem ser considerados positivos, desde que os valores permaneçam dentro de faixas não limitantes. Já em solos altamente compactados, a manutenção ou elevação da densidade com a adubação revela a necessidade de ações mecânicas corretivas antes da intervenção química.

Os resultados obtidos evidenciaram que a porosidade total do solo foi significativamente influenciada pela interação entre os GC e as doses de  $P_2O_5$  aplicadas, tanto na cultura do milho quanto na do feijão. De maneira geral, os maiores valores de porosidade foram observados sob graus de compactação intermediários, principalmente em 85% e 90%, enquanto os extremos de compactação (80% e 95%) apresentaram respostas menos consistentes. Após cultivo de milho, os efeitos mais expressivos da adubação fosfatada sobre a porosidade total foram observados nos GC de 85% e 90%, com destaque para o modelo quadrático ajustado no grau de 85%, que indicou uma redução inicial da

porosidade com o aumento das doses de  $P_2O_5$ , seguida de recuperação em doses mais elevadas. Esses resultados corroboram os achados de Zhang et al. (2015), que observaram que a aplicação de fósforo, ao estimular o crescimento radicular e a atividade biológica do solo, contribui para a melhoria da estrutura física do solo e para a formação de poros de maior diâmetro, especialmente em condições de compactação moderada.

Após cultivo da sucessão feijão-azevém, (26 meses), os efeitos da adubação fosfatada sobre a porosidade total também foram evidentes, principalmente nos GC de 90% e 95%, para os quais foram ajustados modelos lineares e quadráticos positivos, indicando incremento progressivo da porosidade com o aumento das doses de  $P_2O_5$ . Esses resultados estão em consonância com estudos que demonstram que a adição de fósforo promove melhorias na qualidade física do solo ao favorecer a estabilidade de agregados e aumentar a condutividade hidráulica, fatores que refletem diretamente na porosidade (Głąb & Szewczyk, 2014; Roldán et al., 2007). Contudo, verificou-se que, em graus de compactação mais elevados (95%), embora tenham ocorrido respostas positivas em algumas profundidades e doses, os efeitos da adubação fosfatada sobre a porosidade foram limitados, provavelmente devido à restrição física imposta à expansão radicular e à menor atividade biológica. Esse comportamento foi descrito por Lipiec et al. (2006), os quais afirmam que altos níveis de compactação reduzem a mobilidade e disponibilidade de nutrientes no solo, incluindo o fósforo, e dificultam os mecanismos naturais de recuperação da estrutura do solo. Assim, os dados obtidos reforçam que a eficiência da adubação fosfatada está diretamente relacionada às condições físicas do solo, sendo mais efetiva em compactações moderadas, onde há maior capacidade de resposta da estrutura porosa. Em contrapartida, em condições extremas de compactação, o uso isolado de  $P_2O_5$  pode não ser suficiente para promover melhorias estruturais expressivas, sendo necessário adotar estratégias complementares de manejo físico, como o uso de plantas de cobertura, controle do tráfego de máquinas e práticas conservacionistas.

Após cultivo de milho (8 meses), na profundidade de 0–0,05 m, observou-se que a macroporosidade respondeu positivamente à aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , especialmente no grau de compactação de 85%, que apresentou o maior valor ( $0,153 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Esse comportamento foi compatível com o que relatam Valadão et al. (2015), ao descreverem que a interação entre compactação e fertilização

influencia diretamente a estrutura do solo e o desenvolvimento radicular. Já no grau de 90%, observou-se um comportamento quadrático significativo, com dose ótima estimada em  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , indicando que doses moderadas foram mais eficazes para essa condição de compactação.

Na profundidade de 0,05–0,10 m, a macroporosidade no milho também foi afetada significativamente. Em especial, o grau de compactação de 95% destacou-se com o maior valor de macroporosidade na ausência de adubação ( $0,233 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), sugerindo possível reorganização estrutural do solo mesmo sob alta compactação. O modelo de regressão para este grau indicou uma dose ótima de  $125 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , corroborando com o que relatam Miranda et al. (2001) sobre o efeito estruturador do fósforo em sistemas de plantio direto, especialmente em camadas mais densificadas.

Após cultivo da sucessão feijão-azevém, (26 meses), a resposta da macroporosidade à adubação fosfatada foi distinta entre as profundidades avaliadas. Na camada de 0–0,05 m, os maiores valores de macroporosidade foram observados nos graus de compactação de 90% e 95%, sobretudo nas doses intermediárias de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (50 a  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ), o que está de acordo com os achados de Bonfim-Silva et al. (2014), que relataram melhores condições de porosidade em solos com adubação equilibrada, mesmo sob compactação moderada. Os modelos de regressão demonstraram resposta quadrática significativa para os graus de 85% e 90%, e respostas lineares negativas para os graus de 80% e 95%, sugerindo que a resposta à adubação depende fortemente da estrutura física presente. Na profundidade de 0,05–0,10 m, no feijão, novamente se observou que graus intermediários e altos de compactação (90% e 95%) apresentaram os maiores valores de macroporosidade. A análise de regressão mostrou um modelo linear decrescente no grau de 90%, enquanto para o grau de 95% foi identificado modelo quadrático. Esses padrões sugerem que, em condições de elevada compactação, o aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  pode contribuir com a recuperação parcial da macroporosidade até um ponto ótimo, sendo que, após isso, a estrutura pode voltar a declinar, o que está de acordo com Santos et al. (2005), que relataram limitação de crescimento radicular e porosidade em solos compactados mesmo com suprimento adequado de nutrientes. Por fim, na camada de 0,10–0,20 m no feijão, observou-se comportamento similar ao anterior, com o grau de compactação de 95% apresentando os menores valores na ausência de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , mas com expressiva



melhoria após a aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup>. Os modelos de regressão indicaram respostas quadráticas para os graus de 90% e 95% e linear crescente para 80%, sugerindo que a eficiência da adubação depende do grau de compactação, sendo mais eficaz em condições de restrição física intermediária.

A mesoporosidade do solo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), atributo essencial para a retenção de água disponível às plantas e para a oxigenação do sistema radicular, é diretamente afetada por práticas de manejo que envolvem tanto a compactação do solo quanto a adubação fosfatada. A compactação, frequentemente resultante do tráfego de máquinas agrícolas em sistemas de plantio direto, reduz a porosidade total, afetando especialmente os poros médios (0,02–0,05 mm), o que compromete a infiltração de água, a difusão de gases e o crescimento das raízes (Lipiec et al., 2012; da Silva et al., 2021). Os resultados obtidos neste estudo indicam que, nas camadas superficiais do solo (0–0,05 m e 0,05–0,10 m), a mesoporosidade foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação e as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tanto no milho quanto no feijão. Após cultivo de milho (8 meses), o menor GC (80%) apresentou os maiores valores de mesoporosidade nas doses intermediárias e altas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com destaque para a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, que resultou em 0,050 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> na camada de 0–0,05 m. Esses dados indicam que, em condições físicas mais favoráveis, a adubação fosfatada promove reorganização da estrutura porosa do solo, possivelmente mediada pela atividade radicular e microbiana. Esse comportamento foi descrito por Guber et al. (2022), que destacaram o papel da fertilização fosfatada na ativação do sistema radicular e na formação de bioporos, principalmente em solos com menor densidade. Por outro lado, nos graus de compactação mais elevados (90% e 95%), os efeitos positivos da adubação foram menos expressivos ou até mesmo negativos. No feijão, por exemplo, o grau de 90% apresentou significativa queda da mesoporosidade com o aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, atingindo apenas 0,011 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> com 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na camada de 0–0,05 m. Tal resposta negativa à adubação em solos compactados pode ser atribuída à limitação do crescimento radicular e à baixa atividade biológica, que impedem a reorganização da estrutura porosa (Chen et al., 2020). Além disso, a regressão estatística reforça essa interpretação. Após cultivo de milho, apenas o GC de 80% apresentou ajuste quadrático significativo, evidenciando uma resposta positiva e estruturada da mesoporosidade ao aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Em contraste, após cultivo de feijão-azevem, o grau de 90%

apresentou regressão quadrática significativa, mas com tendência decrescente, indicando que doses elevadas de fósforo, em condições de alta compactação, podem ser contraproducentes. A literatura confirma que a eficácia da adubação fosfatada depende da condição física do solo. Segundo Souza et al. (2020), solos compactados limitam a absorção de fósforo pelas plantas devido à restrição ao crescimento das raízes e à menor difusão do nutriente. Já em solos bem estruturados, o fósforo estimula a elongação radicular e favorece a formação de poros secundários por ação das raízes, o que contribui para a melhoria da mesoporosidade.

Outro aspecto relevante é a resposta diferenciada entre as culturas. O milho, com um sistema radicular mais robusto e agressivo, tende a ser mais eficiente na exploração de solos compactados em comparação ao feijão. Essa diferença explica, em parte, a melhor resposta da mesoporosidade às doses de fósforo no milho em condições adversas, conforme discutido por Beutler et al. (2021), que observaram maior plasticidade do sistema radicular do milho frente ao aumento da densidade do solo. Na camada de 0,10–0,20 m, os resultados mostraram que as doses intermediárias de  $P_2O_5$  (entre 75 e 100 kg ha<sup>-1</sup>) foram mais eficientes em promover o aumento da mesoporosidade, especialmente nos graus de compactação de 85% e 95%, conforme indicado pelos modelos quadráticos significativos. Isso reforça a ideia de que a resposta do solo à adubação fosfatada é modulada pelo grau de compactação, e que existe uma faixa ótima de aplicação do nutriente em cada condição física (Zhao et al., 2019). Portanto, a adoção de práticas integradas de manejo, como o controle do tráfego de máquinas, a correção da compactação e a aplicação estratégica de  $P_2O_5$ , é fundamental para manter a estrutura porosa do solo, melhorar a disponibilidade de água e nutrientes e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas. Estratégias sustentáveis de manejo devem considerar não apenas os aspectos químicos, mas também as limitações físicas do solo, em consonância com as recomendações de White & Kirkegaard (2010) sobre a importância de um solo fisicamente funcional para sistemas agrícolas resilientes.

A microporosidade do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), essencial para a retenção de água e a aeração do sistema radicular, é influenciada por práticas de manejo como a compactação do solo e a adubação fosfatada. A compactação, frequentemente resultante do tráfego de máquinas agrícolas, pode alterar a distribuição dos poros do solo, afetando a microporosidade e, conseqüentemente, o desenvolvimento radicular

das culturas. Estudos indicam que a interação entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  afeta significativamente a microporosidade nas camadas superficiais do solo (0–0,05 m e 0,05–0,10 m), tanto no cultivo de milho quanto de feijão. Em condições de compactação moderada (85% a 90%), observou-se aumento da microporosidade com doses crescentes de  $P_2O_5$ , até um ponto ótimo, além do qual a microporosidade tende a estabilizar ou diminuir. Esse comportamento sugere que a adubação fosfatada, até certo nível, pode promover a reorganização da estrutura porosa do solo, possivelmente mediada pela atividade radicular e microbiana, melhorando a retenção de água e a aeração (Liu et al., 2025).

No entanto, doses excessivas de  $P_2O_5$  podem levar à redução da microporosidade, especialmente em solos com maior grau de compactação. Isso pode ser atribuído à saturação dos sítios de adsorção de fósforo e à possível formação de compostos que obstruem os microporos, prejudicando a estrutura do solo e a disponibilidade de água para as plantas (Santos et al., 2008). Comparando com outros estudos, Valadão et al. (2015) observaram que o tráfego de máquinas aumentou a densidade do solo e a resistência à penetração, reduzindo a microporosidade, sem efeito significativo da adubação fosfatada. No entanto, a compactação afetou negativamente o crescimento radicular do milho, enquanto a soja apresentou aumento no diâmetro das raízes sob maior compactação. Esses resultados destacam a importância de calibrar as doses de adubação fosfatada conforme as condições físicas do solo, evitando excessos que possam comprometer a estrutura do solo e a disponibilidade de água para as plantas.

A compactação reduz a conectividade e continuidade dos macroporos, limitando o fluxo de ar no solo (DEXTER, 1988; LIPIEC et al., 2003). Entretanto, quando associada a uma adubação fosfatada adequada, pode haver compensações estruturais relacionadas ao estímulo do crescimento radicular e da atividade microbiana. Conforme TISDALL e OADES (1982), raízes e exsudatos orgânicos contribuem para a formação e estabilização de agregados, o que amplia a porosidade funcional do solo, especialmente em leguminosas como o feijão, que apresentam rizosfera altamente ativa.

As respostas não-lineares observadas nas curvas de regressão reforçam que há um ponto ótimo de adubação para cada grau de compactação, a partir do qual os ganhos em condutividade de ar se estabilizam ou declinam. Isso pode estar relacionado ao limite físico da estrutura em sustentar macroporos funcionais, mesmo

com incremento na fertilização. Além disso, doses excessivas podem provocar desequilíbrios na microbiota do solo ou afetar a dinâmica hídrica, interferindo negativamente na difusão gasosa (VAN LIER, 2010). Tais achados são particularmente relevantes para sistemas de cultivo sob plantio direto, nos quais a compactação induzida pelo tráfego de máquinas é frequente. A combinação de manejo físico e químico adequado permite mitigar os efeitos adversos sobre a aeração do solo, fundamental para processos biológicos e para o desenvolvimento do sistema radicular das leguminosas.

A continuidade dos poros, variável que representa a conectividade funcional da estrutura porosa do solo, foi significativamente influenciada pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$  em todas as profundidades analisadas. Esses resultados reforçam que a eficiência da adubação fosfatada na melhoria da estrutura física do solo depende fortemente da condição mecânica imposta ao sistema radicular. Na camada superficial (0–0,05 m), a maior continuidade dos poros foi observada em compactações moderadas (80% e 85%), especialmente com doses crescentes de  $P_2O_5$ . Isso indica que há um limiar físico favorável à reorganização estrutural induzida pelo crescimento radicular e atividade microbiana, ambos processos estimulados pelo fósforo (TISDALL; OADES, 1982). Valores superiores a 130% nesse contexto indicam forte reestruturação física, associada à estabilidade de agregados (VAN LIER, 2010), o que beneficia o fluxo gasoso e a infiltração de água.

Na profundidade de 0,05–0,10 m, os efeitos da adubação fosfatada sobre a continuidade de poros foram ainda mais pronunciados, sobretudo no grau de compactação de 80%, que alcançou valores superiores a 500% com a maior dose de  $P_2O_5$ . Esse comportamento evidencia alta sensibilidade estrutural dessa camada à adição de fósforo, possivelmente pela presença de raízes finas que promovem bioporos contínuos. Segundo Tuller e Or (2005), a conectividade dos poros em solos estruturados está intimamente ligada à formação de redes de macroporos geradas por raízes e organismos edáficos.

Na camada de 0,10–0,20 m, embora os efeitos tenham sido mais sutis em doses baixas, o incremento da continuidade com aplicações de 100 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ , especialmente nos graus de compactação de 90% e 95%, sugere que a adubação também pode promover efeitos benéficos nas camadas subsuperficiais, desde que sejam utilizadas doses mais elevadas. Nessa profundidade, a menor

resposta em 80% pode indicar limitação do alcance radicular ou redistribuição vertical do fósforo, fenômeno já descrito por Silva et al. (2014) em sistemas sob plantio direto. De forma geral, os modelos de regressão ajustados apontaram padrões distintos conforme o grau de compactação, sendo majoritariamente quadráticos ou lineares positivos, o que reforça a existência de doses críticas que maximizam a reestruturação física do solo. Além disso, a baixa resposta observada no grau de 95% em algumas condições confirma que a compactação mais intensa compromete a ação benéfica da adubação sobre a conectividade porosa.

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) é amplamente reconhecida como um indicador sensível da qualidade física do solo, especialmente em relação à compactação e à porosidade funcional (HORN et al., 2018; LIPIEC et al., 2006). Os resultados obtidos neste estudo demonstram que tanto os graus de compactação do solo quanto as doses de  $P_2O_5$  influenciaram significativamente a  $K_{sat}$  em diferentes profundidades e culturas agrícolas. Na cultura do milho, em ambas as profundidades avaliadas (0–0,05 m e 0,05–0,10 m), observou-se que os menores graus de compactação (80%) favoreceram os maiores valores de  $K_{sat}$ , evidenciando o impacto positivo de uma estrutura física menos restritiva sobre o fluxo de água no solo. Esse comportamento está em consonância com estudos que relatam que solos menos compactados possuem maior volume de macroporos contínuos, facilitando a infiltração (ZHANG et al., 2021; CHEN et al., 2022). Por outro lado, compactações mais severas (95%) limitaram a condutividade hidráulica, mesmo com a aplicação de adubação fosfatada, isso pela redução da conectividade entre poros estruturais e bioporos. O efeito da adubação fosfatada foi mais evidente em condições grau de compactação de 85 a 90%. Por exemplo, no milho, observou-se ajuste quadrático para o grau de compactação de 90%, indicando que doses intermediárias de  $P_2O_5$  podem melhorar a  $K_{sat}$  até determinado ponto, acima do qual os ganhos são limitados ou inexistentes. Tal comportamento pode estar associado ao papel do fósforo em estimular o crescimento radicular e a atividade biológica do solo, favorecendo a formação de bioporos e a estabilidade de agregados (BRITO et al., 2020).

Após o cultivo da sucessão de feijão-azevem (26 meses), os efeitos da adubação fosfatada sobre a  $K_{sat}$  foram ainda mais evidentes. Em todas as profundidades analisadas, as doses de  $P_2O_5$  influenciaram positivamente a  $K_{sat}$ , sobretudo nos graus de compactação de 80% e 90%, onde se observaram os

maiores incrementos. Esses resultados corroboram os achados de Beutler et al. (2001), que reportaram maior sensibilidade do feijoeiro às melhorias estruturais do solo em função do manejo adequado, especialmente em sistemas sob plantio direto. Em contrapartida, os graus mais elevados de compactação (95%) apresentaram valores consistentemente baixos de  $K_{sat}$ , e os modelos de regressão associados, em geral, foram decrescentes ou não significativos, indicando que a compactação severa compromete a capacidade de resposta do solo à adubação fosfatada. Isso reforça a necessidade de ações preventivas e corretivas de manejo físico do solo. Nas camadas mais profundas (0,10–0,20 m), os resultados seguiram o mesmo padrão, embora com algumas variações. Observou-se que a resposta da  $K_{sat}$  ao  $P_2O_5$  foi dependente tanto da profundidade quanto do grau de compactação, evidenciando que as condições estruturais da superfície podem influenciar a dinâmica da água nas camadas subsuperficiais. De forma geral, os resultados indicam que a condutividade hidráulica saturada do solo pode ser positivamente modulada pelo uso adequado de  $P_2O_5$ , especialmente em condições de grau de compactação de 85 e 90%. No entanto, em solos com alto grau de compactação, os benefícios da adubação são limitados.

A condutividade de ar ( $K_{ar}$ ) no solo cultivado da sucessão de feijão-azevem foi sensivelmente afetada pela interação entre os graus de compactação e as doses de  $P_2O_5$ , o que evidencia a influência combinada do manejo físico e químico sobre a porosidade funcional do solo. Em geral, os valores de  $K_{ar}$  foram reduzidos nas condições de ausência de fósforo, refletindo possivelmente menor atividade biológica e uma estrutura porosa menos eficiente para a difusão gasosa. Com o aumento das doses de  $P_2O_5$ , observou-se incremento em determinados graus de compactação, especialmente em 85% e 90%, sugerindo que a adubação fosfatada pode ter favorecido a estabilidade de agregados e o desenvolvimento radicular, contribuindo para a formação de bioporos.

Segundo Horn et al. (2003), a  $K_{ar}$  é altamente sensível à continuidade e à interconectividade dos poros, propriedades estas que são diretamente afetadas pela compactação e pelo crescimento radicular. Além disso, a aplicação de fósforo pode estimular a atividade microbiana e rizosférica, o que favorece a estruturação do solo (Tisdall & Oades, 1982). O fato de os maiores valores de  $K_{ar}$  terem sido observados em condições intermediárias de compactação reforça a hipótese de que há um limiar



ideal de densidade para a otimização do fluxo de gases, onde coexistem estabilidade estrutural e presença de macroporos funcionais.

Os resultados obtidos para a condutividade de ar ( $K_{ar}$ ) na camada de 0,10–0,20 m demonstram que este atributo é sensível tanto à condição física do solo quanto ao suprimento de fósforo, com interação significativa entre os fatores. Em geral, os maiores valores foram observados nas doses intermediárias e elevadas de  $P_2O_5$ , especialmente nos graus de compactação de 80% e 90%, o que sugere que, sob compactação moderada, a adubação fosfatada promove melhorias na estrutura porosa do solo, favorecendo a difusão de gases.

### 3.7 CONCLUSÕES

O aumento da compactação da solo causa efeitos deletérios sobre sua estrutura, elevando a densidade e a resistência à penetração, além de reduzir a porosidade total e modificar a distribuição dos poros, especialmente macroporos e mesoporos. Também compromete a continuidade estrutural, influenciando negativamente os fluxos de água e ar no solo.

A aplicação de adubação fosfatada tende a mitigar os efeitos da compactação sobre as propriedades físico-hidráulicas do solo. No entanto, essa resposta é mais efetiva apenas até graus de compactação moderados (90%), visto que, sob compactação elevada (95%), as melhorias estruturais com o aumento das doses de  $P_2O_5$  são limitadas.

### 3.8 REFERÊNCIAS.

- AHMAD, N.; HASSAN, F. U.; BELFORD, R. K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): I. Compaction. **Field Crops Research**, v. 110, n. 1, p. 54-60, 2009.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 11, n. 1–2, p. 25–30, 1996.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil & Tillage Research**, v. 49, n. 1–2, p. 159–170, 1998.
- BARZEGAR, A. R. et al. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 155-162, 2006.



BATEY, Tom. Soil compaction and soil management—a review. **Soil use and management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009.

BECKETT, Christopher TS et al. As condições de compactação afetam significativamente o crescimento durante o estabelecimento inicial da planta. **Engenharia Ecológica**, v. 106, p. 471-481, 2017.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BENGOUGH, A. Glyn et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of experimental botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.

BEUTLER, A. N. et al. Compactação do solo e desenvolvimento radicular do feijoeiro em Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 497–505, 2001.

Beutler, A. N., et al. Soil compaction and phosphorus interaction: Effects on maize root growth and soil structure. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 45, e0200164. 2021

BISWAS, C. et al. Forty-two years impact of chemical fertilization on soil phosphorus partition and distribution under rice-based cropping systems. **Plos one**, v. 19, n. 6, p. e0305097, 2024.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Adubação fosfatada no desenvolvimento e produção de feijão guandu em Latossolo Vermelho do Cerrado em primeiro cultivo. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1380–1388, 2014.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Compactação do solo na cultura do trigo em Latossolo do cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, p. 1-6, 2011.

BRITO, I. R. et al. Fósforo no solo e na planta e o seu efeito sobre atributos físicos do solo em sistemas conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0200053, 2020.

BRUS, D. J.; VAN DEN AKKER, J. J. H. How serious a problem is subsoil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling. **Soil**, v. 4, n. 1, p. 37–45, 2018.

CHEN, G. et al. Soil hydraulic properties as affected by compaction and fertilization: A meta-analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 215, 105153, 2022.

CHEN, G., et al. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v.136, p. 61-69, 2014.

Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. Effects of compaction and phosphorus on root growth and soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, 200, 104594, 2020

DA SILVA, Pedro Luan Ferreira. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 2, 2021.

DE LARA, Ronaldo Taborda; PESSENTI, Isabela Letícia. Produtividade, rendimento de grãos e atributos físicos em diferentes sistemas de cultivo com plantio de feijão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 8, pág. e57511831286-e57511831286, 2022.

DE SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição et al. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 94-99, 2008.

DEXTER, Anthony Roger. Advances in characterization of soil structure. **Soil and tillage research**, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G. A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil & Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 121-126, 2000.

GATIBONI, Luciano Colpo et al. Influência da adubação fosfatada e da introdução de espécies forrageiras de inverno na oferta de forragem de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1663-1668, 2000.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1984.

GLĄB, T.; SZEWCZYK, W. Influence of root systems on soil porosity under different plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 139, p. 1-9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.003>.

Guber, A. K., et al. (2022). Phosphorus fertilization and soil pore structure: A mechanistic perspective. **Geoderma**, 422, 115943.

GUO, Z et al. Straw and phosphorus applications promote maize (*Zea mays* L.) growth in saline soil through changing soil carbon and phosphorus fractions. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1336300, 2024.

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, 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 & Tillage Research**, v. 35, n. 1-2, p. 23-36, 1995.

HORN, R. et al. Soil structure recovery after compaction and the role of roots. **Geoderma**, v. 322, p. 58-66, 2018.

JENSEN, J. L. et al. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma**, v. 337, p. 834–843, 2019.

JIN, K. et al. Shaping an optimal soil by root–soil interaction. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 10, p. 823–829, 2017.

KELLER, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*, [S.l.], v. 194, p. 104293, 2019.

KELLER, T. et al. Towards a standardised approach to assess the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, v. 175, p. 102–120, 2017.

KELLER, THOMAS, et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104293, 2019.

LI, Z. et al. Phosphate starvation of maize inhibits lateral root formation and alters gene expression in the lateral root primordium zone. **BMC plant biology**, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2012.

LIPIEC, J. et al. Impact of soil compaction on root development and yield of cereals: A review. **Soil & Tillage Research**, v. 97, n. 1, p. 119–130, 2006.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, p. 107–136, 2003.

LIPIEC, Jerzy et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74-81, 2012.

LIU, Yi-Wen et al. Spatial dynamics of phosphorus mobilization by mycorrhiza. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 206, p. 109797, 2025.

MA, Jie et al. Phosphorus transport in different soil types and the contribution of control factors to phosphorus retardation. **Chemosphere**, v. 276, p. 130012, 2021.

MENDONÇA, E. S. et al. Caracterização química e estabilidade de agregados de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 715–723, 2006.

MIRANDA, L. N. et al. Manejo da adubação fosfatada corretiva para as culturas do milho e do feijoeiro irrigado em rotação. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2001. 35 p.

MITZSCHERLING, J. et al. Clay-associated microbial communities and their relevance for a nuclear waste repository in the Opalinus Clay rock formation. **MicrobiologyOpen**, v. 12, n. 4, p. e1370, 2023.

NUNES MR. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, p. 259–260, 149–155, 2015.

OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregate in soils. **Jornal. Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1984.

OBOUR, P. B.; UGARTE, C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil & Tillage Research**, v. 211, p. 105019, 2021.

OLUBANJO, Obafemi Olutola; YESSOUFOU, Mouiz Aremou. Effect of Soil Compaction on the Growth and Nutrient Uptake of Zea Mays L. **Sustainable Agriculture Research**, v. 8, n. 2, p. 46-54, 2019.

PANDEY, Bipin K. et al. Plant roots sense soil compaction through restricted ethylene diffusion. **Science**, v. 371, n. 6526, p. 276-280, 2021.

PAULETTI, V; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Editora Cubo, v. 1, p. 289, 2019.

POEPLAU, C. et al. Opposing effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial metabolism and the implications for soil carbon storage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 100, p. 83-91, 2016.

PULIDO-MONCADA, M.; MUNKHOLM, L. J. Wheel load, repeated wheeling, and traction effects on subsoil compaction in northern Europe. **Soil & Tillage Research**, v. 186, p. 300–309, 2019.

PULIDO-MONCADA, Mansonia; PETERSEN, Søren O.; MUNKHOLM, Lars J. Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, p. 38, 2022.

## Referencias

RIBEIRO, Marco Aurélio Vitorino et al. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1157-1164, 2010.

RICHART, A et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Seminário: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.

ROLDÁN, A. et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions. **Geoderma**, v. 139, n. 1–2, p. 1–8, 2007.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576-586, 2008.

SANTOS, H. G. dos et al. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o crescimento radicular e a produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 9, p. 943–950, 2005.

SCHJØNNING, P. et al. Targeted tillage – how to improve subsoil loosening techniques. **Soil & Tillage Research**, v. 173, p. 104–113, 2017.

SCHJØNNING, P. *et al.* Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. **Soil Research**, v. 55, n. 3, p. 234-244, 2016.

SCHJØNNING, Per *et al.* Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction—a European perspective. **Advances in agronomy**, v. 133, p. 183-237, 2015.

SHAFI, Mohammad *et al.* Dry matter partitioning and grain yield of wheat as affected by phosphorus and its applications. **Pak. J. Bot**, v. 47, p. 281-287, 2015.

SILVA D, A. *et al.* Efficiency in the use of phosphorus by common bean genotypes. **Scientia. Agricola**. v.71, n.3, p. 232-239, 2014.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n.1-2, p. 5-22, 1995.

SOUZA, G. S., *et al.* (2020). Soil compaction and phosphorus availability in tropical soils. **Scientia Agricola**, 77(5), e20180247.

SOUZA, Rômulo Vinícius Cordeiro Conceição de *et al.* Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 94-99, 2008.

TULLER, Markus. Física do Solo. **Manual de Ciências do Solo (Conjunto de dois volumes)**, 2018.

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.

VALADÃO, Franciele Caroline de Assis *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.

VALICHESKI, Romano R. *et al.* Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 969-977, 2012.

VAN LIER, Q. de J. Física do solo. **Viçosa: SBCS**, 2010.

White, R. G., & Kirkegaard, J. A. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in compacted soil. **Field Crops Research**, 118(1), 51–58.

WU, Qi *et al.* Impacts of soil compaction and phosphorus levels on the dynamics of phosphate-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria in the peanut rhizosphere. **Agronomy**, v. 14, n. 9, p. 1971, 2024.

YANG, P. et al. Soil compaction prevention, amelioration and alleviation measures are effective in mechanized and smallholder agriculture: a meta-analysis. **Land**, v. 11, n. 5, p. 645, 2022.

ZHANG, B.; HORN, R.; HALLETT, P. D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 3, p. 864–871, 2005.

ZHANG, F et al. Root exudation of organic acid anions and recruitment of beneficial actinobacteria facilitate phosphorus uptake by maize in compacted silt loam soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 184, p. 109074, 2023.

ZHANG, S. et al. Soil physical properties and apple root growth under different phosphorus levels in a compacted soil. **Plant and Soil**, v. 395, p. 327–337, 2015.

ZHANG, Y. et al. Field traffic-induced soil compaction under moderate machine-field conditions affects soil properties and maize yield on sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, v. 206, p. 104837, 2021.

ZHAO, De-Yong et al. Root Distribution, Agronomic Performance, and Phosphorus Utilization in Wheat as Mediated by Phosphorus Placement under Rainfed Coastal Saline Conditions. **Agronomy**, v. 13, n. 11, p. 2700, 2023.

Zhao, Y., et al. (2019). Effect of phosphorus application on soil structure and function in different compaction conditions. **Catena**, 176, 38–47.

ZUO, Q et al. The effect of sowing depth and soil compaction on the growth and yield of rapeseed in rice straw returning field. **Field Crops Research**, v. 203, p. 47-54, 2017.

#### 4. CAPÍTULO III: QUALIDADE FÍSICA DO TECNOSOLO E HORIZONTE A SOB ÁREAS DEGRADADAS E COM DIFERENTES GRAUS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO.

##### 4.1 RESUMO

Nos últimos anos, a construção de Tecnosolos ganhou relevância como alternativa para a recuperação de áreas degradadas e também para fins produtivos. Em um ensaio de longa duração em campo, foram avaliadas diferentes propriedades físicas e químicas de um Tecnosolo (T) (composto por solo descartado: horizontes A, Bt e C + bio sólidos classe B) e de um solo orgânico (A) (Horizonte A), com dois níveis de compactação: compactado (C) e sem compactação (SC). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em parcelas subdivididas (3 blocos, 12 unidades experimentais). Assim, os tratamentos foram: TC, TSC, AC e ASC. A densidade aparente apresentou interação significativa (material\*compactação) para ambas as profundidades (0–10 e 10–20 cm). Como média das duas profundidades, o tratamento TC apresentou valores de  $1,04 \text{ g cm}^{-3}$  e o TSC de  $0,99 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto que para o solo A os valores foram de  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,12 \text{ g cm}^{-3}$  para AC e ASC, respectivamente. Para todos os testes de estabilidade estrutural de agregados



(Le Bissonnais, 1996), incluindo a média, houve interação significativa entre os fatores, com a seguinte ordem de estabilidade: TC > TSC > ASC > AC. Esse resultado era esperado devido ao caráter siltoso do material A, que é geralmente instável, enquanto os altos valores do Tecnosolo podem ser atribuídos à presença de cálcio do horizonte C e das poliacrilamidas presentes no biossólido. Por outro lado, a maior estabilidade também pode ser explicada pela maior hidrofobicidade observada no Tecnosolo em comparação ao solo A (índice de repelência: 3,24 e 2,82, respectivamente). Na camada de 0–10 cm, não houve diferenças significativas nos teores de fósforo entre os níveis de compactação, mas houve entre os materiais (T: 351,22 mg/kg > A: 15,25 mg/kg). Na camada de 10–20 cm, houve interação significativa, com valores de 352,71 e 281,59 mg/kg para TC e TSC, respectivamente, enquanto AC e ASC apresentaram 12,97 e 18,99 mg/kg. O nitrogênio total na camada de 0–10 cm também apresentou interação significativa entre material e compactação, com valores de 0,43% e 0,33% para TC e TSC, respectivamente, enquanto AC e ASC apresentaram 0,14% e 0,16%. Na camada de 10–20 cm, houve diferença significativa apenas entre os materiais, com valores de 0,30% a 0,40% para TSC e TC, enquanto AC e ASC apresentaram 0,16%. O pH apresentou diferenças significativas entre os materiais estudados na camada de 0–10 cm (T: 6,12; A: 5,74). Como média entre as camadas, o Tecnosolo apresentou valores de condutividade elétrica (CE) de 3926  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto o solo A apresentou 588  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por fim, a biomassa seca foi significativamente maior no Tecnosolo (10,48 t ha<sup>-1</sup>) em relação ao solo A (6,6 t ha<sup>-1</sup>), sendo o fator compactação de grande importância, com médias de 6,47 t ha<sup>-1</sup> para os tratamentos compactados e 10,68 t ha<sup>-1</sup> para os não compactados. Esses dados demonstram que os Tecnosolos podem ser uma alternativa viável para a recuperação de áreas degradadas, sendo o grau de compactação um fator chave para sua construção e desenvolvimento.

**Palavras chaves:** recuperação de áreas degradadas; propriedades físicas do solo; biomassa vegetal

## 4.2 ABSTRACT

In recent years, the construction of Technosols has gained prominence as an alternative for the recovery of degraded areas and also for productive purposes. In a long-term field trial, various physical and chemical properties of a Technosol (T) (composed of discarded soil: horizons A, Bt, and C + Class B biosolids) and an organic soil (A) (Horizon A) were evaluated under two compaction levels: compacted (C) and non-compacted (SC). The experimental design was a randomized block design in a split-plot scheme (3 blocks, 12 experimental units). The treatments were: TC, TSC, AC, and ASC. Bulk density showed a significant interaction (material\*compaction) for both depths (0–10 and 10–20 cm). On average, across both depths, the TC treatment had values of 1.04 g cm<sup>-3</sup> and TSC had 0.99 g cm<sup>-3</sup>, while for soil A, values were 1.40 g cm<sup>-3</sup> and 1.12 g cm<sup>-3</sup> for AC and ASC, respectively. For all aggregate stability tests (Le Bissonnais, 1996), including the overall average, there was a significant interaction between factors, with the following stability ranking: TC > TSC > ASC > AC. This result was expected due to the silty nature of material A, which is generally unstable, while the high stability values of the Technosol may be attributed to the presence of calcium from horizon C and polyacrylamides in the biosolids. On the other hand, the greater stability may also be explained by the higher hydrophobicity observed in the Technosol compared to soil A



(water repellency index: 3.24 and 2.82, respectively). At the 0–10 cm layer, there were no significant differences in phosphorus levels between compaction treatments, but there were differences between materials (T: 351.22 mg/kg > A: 15.25 mg/kg). At the 10–20 cm layer, a significant interaction was observed, with values of 352.71 and 281.59 mg/kg for TC and TSC, respectively, while AC and ASC presented 12.97 and 18.99 mg/kg. Total nitrogen at the 0–10 cm layer also showed a significant interaction between material and compaction, with values of 0.43% and 0.33% for TC and TSC, respectively, while AC and ASC showed 0.14% and 0.16%. At the 10–20 cm depth, a significant difference was observed only between materials, with values ranging from 0.30% to 0.40% for TSC and TC, and 0.16% for AC and ASC. Soil pH showed significant differences between materials at the 0–10 cm layer (T: 6.12; A: 5.74). On average, across depths, the Technosol showed electrical conductivity (EC) values of 3926  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , while soil A showed 588  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Finally, dry biomass was significantly higher in the Technosol (10.48 t ha<sup>-1</sup>) compared to soil A (6.6 t ha<sup>-1</sup>), with compaction being a key factor: compacted treatments averaged 6.47 t ha<sup>-1</sup>, and non-compacted treatments 10.68 t ha<sup>-1</sup>. These results demonstrate that Technosols can be a viable alternative for the restoration of degraded areas, with compaction degree being a critical factor for their construction and development.

**Keywords:** degraded land restoration; soil physical properties; plant biomass.

#### 4.3 INTRODUÇÃO

A degradação do solo é uma preocupação global crescente, afetando aproximadamente 33% dos solos do mundo devido a atividades humanas (FAO, 2019), sendo a mineração uma das principais causas, ocupando mais de 1% do território mundial (Carabassa et al., 2020; Šálek, 2012). A mineração a céu aberto, em especial, provoca severa degradação do solo, muitas vezes irreversível (Ibarra e De Las Heras, 2005; Smirnov et al., 2021; Soliveres et al., 2021). Esse impacto é ainda mais crítico em regiões áridas e semiáridas, onde as condições extremas e a escassez de nutrientes dificultam a regeneração da vegetação natural (Ortega et al., 2020), tornando a recuperação da funcionalidade do solo um grande desafio (Moreno-de las Heras, 2009).

Nesse contexto, os Tecnosolos têm ganhado destaque como uma alternativa promissora para a recuperação de áreas degradadas. Tecnosolos são definidos como “solos cujas propriedades e funções são predominantemente influenciadas por intervenções técnicas humanas” (Rossiter, 2007). Diversas pesquisas têm demonstrado o potencial do uso de misturas formuladas a partir de resíduos sólidos, como lodos de esgoto, cinzas volantes e areias de fundição, na reabilitação de ambientes fortemente impactados por atividades extrativas (Séré et al., 2008; Yao et al., 2009; Hafeez et al., 2012a).

Paralelamente, a construção de Tecnosolos a partir de resíduos urbanos e industriais alinha-se aos princípios da economia circular, contribuindo para o reaproveitamento de materiais e a recuperação do capital natural (Fabbri et al., 2021; Abhilash, 2021; Alba-Patiño et al., 2021). Além disso, esses solos artificiais têm demonstrado potencial para melhorar significativamente as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo, favorecendo a retenção de água, a formação de agregados estáveis e o crescimento da vegetação (Hueso-González et al., 2018; Rodríguez-Berbel et al., 2021). Estudos recentes demonstram que Tecnosolos formulados com resíduos como tijolos, concreto e lodo de esgoto estabilizado podem apresentar elevada porosidade total (até  $0,76 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e condutividade hidráulica saturada considerável (até  $34,74 \text{ cm h}^{-1}$ ), o que favorece a infiltração e o armazenamento de água, além da colonização radicular (Yilmaz et al., 2016). No entanto, a eficiência desses materiais depende fortemente da sua composição físico-química, incluindo a granulometria, o teor de matéria orgânica, o pH e a capacidade de formação de estruturas estáveis (Ye et al., 2019; Cannavo et al., 2014). Dessa forma, a construção criteriosa de Tecnosolos pode representar uma alternativa técnica viável e ambientalmente sustentável para a revegetação de áreas urbanas e a reabilitação de solos severamente degradados (Séré et al., 2012).

Adicionalmente, a matéria orgânica é amplamente reconhecida como um indicador-chave da qualidade e da funcionalidade ecológica do solo (Hoffland et al., 2020). Frente aos impactos provocados pela degradação e ao acúmulo crescente de resíduos orgânicos, a criação de Tecnosolos representa uma estratégia eficaz de reaproveitamento desses materiais (Hernández et al., 2015; Fabbri et al., 2021). Sua aplicação tem demonstrado capacidade de elevar os teores de matéria orgânica no solo e promover melhorias significativas em suas propriedades físico-químicas e biológicas (Hueso-González et al., 2018; Rodríguez-Berbel et al., 2021), embora a eficácia dessa abordagem dependa da natureza dos resíduos utilizados e de sua interação com os constituintes minerais do solo (Ye et al., 2019). Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e químicas de um Tecnosolo e de um solo orgânico, submetidos a dois níveis de compactação, em uma área degradada localizada na região da Pampa Ondulada, Argentina. A pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficazes de recuperação ambiental, promovendo a sustentabilidade do uso do solo e a conservação dos recursos naturais.

#### 4.4 MATERIAIS E METODOS.

##### 4.4,1 ÁREA EXPERIMENTAL E DELINEAMENTO.

O estudo que deu origem a este capítulo foi desenvolvido durante o período de doutorado sanduíche, entre novembro de 2023 e junho de 2024 (EDITAL Nº 01/2023-PPGCS/UFPR). O experimento foi conduzido em uma área degradada no município de Campana, localizado na província de Buenos Aires, Argentina. A região apresenta um clima subtropical úmido (classificação Cfa de Köppen-Geiger), caracterizado por verões quentes e invernos amenos. A temperatura média anual é de aproximadamente 17,2 °C, com máximas médias de 24,5 °C em janeiro e mínimas médias de 10,1 °C em julho. A precipitação anual gira em torno de 1.093 mm, sendo outubro o mês mais chuvoso, com média de 133 mm, e junho o mais seco, com cerca de 55 mm (CLIMATE-DATA, 2025).

Do ponto de vista geotécnico, os solos da região são predominantemente compostos por formações sedimentares. Destacam-se a Formação Postpampeano, composta por solos finos e macios, incluindo argilas de baixa e alta plasticidade e siltes de baixa plasticidade; a Formação Pampeano, constituída por siltes e argilas de baixa a média plasticidade, geralmente sobreconsolidadas por dessecação e, ocasionalmente, cimentadas por carbonatos de cálcio; e a Formação Puelchense, composta por areias quartzíticas finas a médias, limpas e uniformes (MARTÍNEZ et al., 2025).

O delineamento adotado foi em blocos ao acaso, com tratamentos em arranjos de parcelas subdivididas (2×2), com três repetições, totalizando 12 unidades experimentais. Cada bloco continha quatro unidades experimentais com dimensões de 20 × 20 m, separadas por carreadores de 5 m. Os tratamentos consistiram na combinação de dois tipos de solo, Horizonte A e Tecnosolo e dois níveis de compactação compactado (C) e não compactado (SC), definidos da seguinte forma: TC: Tecnosolo compactado, TSC: Tecnosolo sem compactação, AC: Horizonte A compactado, ASC: Horizonte A sem compactação.



vegetação estabelecida e vigor aparente. Assim, a mensuração do índice de cobertura vegetal foi feita a partir do greenness index. Também foi quantificada a produção de massa seca das forrageiras, determinada por meio da coleta de plantas em quadros de 0,5 × 0,5 m, seguida de secagem em estufa a 80 °C e pesagem em balança de precisão.

Um sistema de irrigação por aspersão foi instalado em uma parcela com Tecnosolo por bloco, composto por um reservatório de 8.000 L, motobomba, tubulação principal, válvulas de controle e mangueiras de ¾". Foi instalada também uma estação meteorológica automática (Vantage PRO 2) para o monitoramento contínuo da temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade do vento.

#### 4.4,3 AMOSTRAGENS E AVALIAÇÕES DE SOLO

Foram realizadas quatro amostragens ao longo do experimento, com intervalos de dois meses entre cada uma. As coletas foram feitas nas profundidades de 0–0,10 m e 0,10–0,20 m, utilizando anéis volumétricos de 50 × 50 mm com o auxílio de um amostrador do tipo Uhland.

Após a coleta e preparo, as amostras em anéis volumétricos foram secas em estufa (105 °C, até massa constante) para obtenção da densidade do solo ( $D_s$ ), conforme descrito por Blake e Hartge (2002). A porosidade total do solo foi estimada a partir da relação entre a  $D_s$  e a densidade de partículas, adotada como igual a 2,65 g cm<sup>-3</sup>.

Amostras deformadas também foram coletadas, nessas mesmas camadas, com auxílio de uma pá, para determinação das curvas de compactação, pelo método de Proctor. A partir dos dados de densidade máxima ( $D_{s_{max}}$ ) obtidas pelo Teste de Proctor, foi estimada a densidade relativa ( $D_r$ ), com base na equação proposta por Debb et al. (2016):  $D_r (\%) = (D_{s_{campo}} / D_{s_{max}}) \times 100$ .

A partir das amostras deformadas, foram selecionados agregados com diâmetro entre 3-5 mm, para determinação da estabilidade estrutural dos agregados conforme Le Bissonnais (1996), utilizando três métodos de ruptura: umedecimento rápido, agitação em água após submersão em etanol, e umedecimento lento. Na sequência, foi determinado o diâmetro médio ponderado nas condições de umedecimento rápido, desagregação mecânica e umedecimento lento. Também foi calculado o índice de estabilidade estrutural. Todas as determinações de estabilidade foram realizadas em triplicata.

Por fim, nas amostras deformadas também foram feitas as determinações das propriedades químicas do solo: pH (em água), por potenciometria; condutividade elétrica (CE) em condutivímetro de bancada; fósforo disponível (P), com extração via Mehlich-1 e determinação por UV-VIS; e nitrogênio total (NT).

#### 4.4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). Posteriormente, foi realizada análise de variância (ANOVA) e, quando necessárias, foram feitas análises de desdobramento e o teste de Tukey foi utilizado para comparação das médias. As análises foram realizadas pela plataforma InfoStat.

### 4.5 RESULTADOS

#### 4.5.1 MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO

Os resultados das análises químicas evidenciam diferenças substanciais entre o Tecnossolo e o Horizonte A em relação à fertilidade do solo (Tabela 7). Destaca-se que o Tecnossolo apresentou teor significativamente mais elevado de fósforo (P), em ambas as camadas e avaliações, independente a compactação do solo, com média de  $243 \text{ mg dm}^{-3}$ , em comparação ao Horizonte A, que apresentou  $13 \text{ mg dm}^{-3}$ . Isso sugere que o Tecnossolo é uma fonte expressiva desse nutriente, devido à presença de biossólidos em sua composição.

Além disso, o pH do Tecnossolo foi de 7,4, indicando uma reação neutra a levemente alcalina, enquanto o Horizonte A apresentou pH de 5,7; caracterizando-se como moderadamente ácido. Essa diferença pode influenciar diretamente a disponibilidade de nutrientes, especialmente o fósforo, que tende a ser mais acessível em solos com pH próximo da neutralidade. Observou-se ainda que a condutividade elétrica e o teor de nitrogênio total foram mais elevados no Tecnossolo, tanto nas camadas analisadas quanto na segunda avaliação (Tabela 7).

**Tabela 7:** Análises química do solo, nos diferentes materiais avaliados e na profundidade de 0-10-10-20 cm.

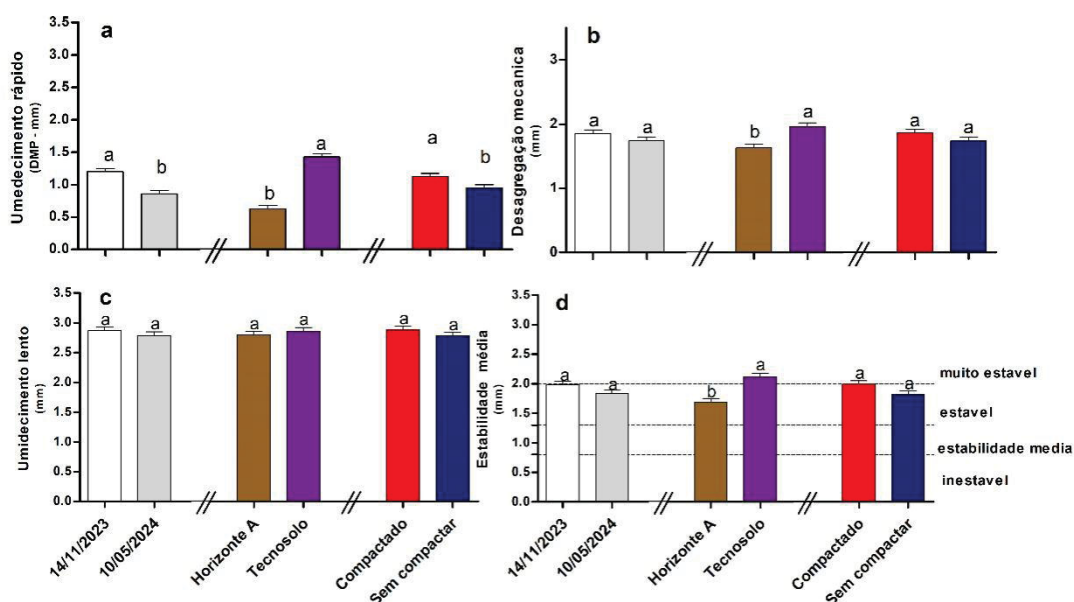
| Materiais                 | Primeira avaliação |            |                      |         | Segunda avaliação         |            |                      |        |
|---------------------------|--------------------|------------|----------------------|---------|---------------------------|------------|----------------------|--------|
|                           | pH                 | CE (µS/cm) | P mg/dm <sup>3</sup> | NT(%)   | pH                        | CE (µS/cm) | P mg/dm <sup>3</sup> | NT(%)  |
| <b>Camada de 0-10 cm</b>  |                    |            |                      |         | <b>Camada de 0-10 cm</b>  |            |                      |        |
| TC                        | 6,23 a             | 3403 a     | 359,2 a              | 0,333 a | 6,03 a                    | 3900 a     | 341,8 a              | 0,39 a |
| TSC                       | 6,00 a             | 3616 a     | 343,1 a              | 0,430 a | 7,36 a                    | 2461 ab    | 267,12 a             | 0,28 a |
| AC                        | 5,78 a             | 365 b      | 15,7 b               | 0,157 b | 5,77 a                    | 351,3 c    | 13,52 b              | 0,13 b |
| ASC                       | 5,76 a             | 351 b      | 13,5 b               | 0,134 b | 6,05 a                    | 382,3 c    | 12,28 b              | 0,16 b |
| <b>Camada de 10-20 cm</b> |                    |            |                      |         | <b>Camada de 10-20 cm</b> |            |                      |        |
| TC                        | 6,53 a             | 4512 a     | 281,5 a              | 0,295 a | 6,65 a                    | 4150 a     | 308,34 a             | 0,33 a |
| TSC                       | 6,22 a             | 4173 a     | 352,7 a              | 0,398 a | 7,56 a                    | 2508 b     | 215,87 a             | 0,19 b |
| AC                        | 6,03 a             | 810 b      | 12,5 b               | 0,152 a | 6,62 a                    | 735 c      | 12,83 b              | 0,18 b |
| ASC                       | 6,62 a             | 735 b      | 12,8 b               | 0,180 b | 6,04 a                    | 810 c      | 12,6 b               | 0,15 b |

Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.5,2 ESTRUTURA DO SOLO

As estabilidades dos agregados apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados (Figura 16). A análise do umedecimento rápido (figura 2a) foi o mais sensível às variações, apresentando diferenças expressivas entre as datas e entre os materiais testados. Essa sensibilidade pode ser atribuída ao fato de o teste de umedecimento rápido simular condições de entrada abrupta de água, exigindo alta resistência estrutural dos agregados.

Nos demais métodos de avaliação – desagregação mecânica (Figura 16b), umedecimento lento (figura 16c) e estabilidade média (figura 16d) – não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos de compactação, sugerindo que a compactação não exerceu influência relevante sobre a estabilidade estrutural do solo. Além disso, os materiais analisados apresentaram, em geral, classificações que variam de estável a muito estável, reforçando a boa qualidade estrutural conferida pelo manejo e pela constituição físico-química dos agregados.

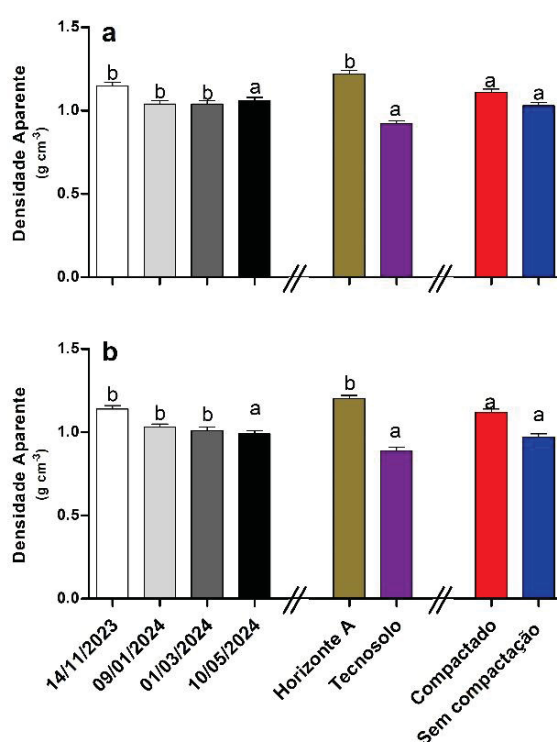




**Figura 16:** Estabilidade dos agregados em diferentes tipos de tratamentos, (a) Umedecimento rápido, (b) Desagregação mecânica, (c) Umedecimento lento, (c) Estabilidade media. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A densidade aparente (Figura 17) manteve-se relativamente estável ao longo das datas avaliadas, com pequenas variações estatisticamente significativas apenas na primeira coleta, quando foram observados valores ligeiramente mais elevados (Figura 17a - b). Nas demais datas, os valores foram similares, indicando que o solo manteve sua estrutura física ao longo do tempo, mesmo diante de diferentes condições ambientais ou de manejo.

Entre os materiais avaliados, o tecnossolo apresentou significativamente menor densidade aparente em comparação ao Horizonte A, o que era esperado devido ao seu maior conteúdo de matéria orgânica e à natureza dos constituintes artificiais incorporados, os quais favorecem maior porosidade e menor compactação dos agregados. No que se refere à compactação, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos compactado e sem compactação. No entanto, os resultados sugerem uma leve tendência de aumento na densidade aparente no tratamento compactado. Essa diferença, embora sutil, pode indicar uma reorganização das partículas e formação de agregados mais estáveis sob o efeito da compactação moderada, o que pode refletir uma estrutura física mais consolidada, porém ainda funcional.

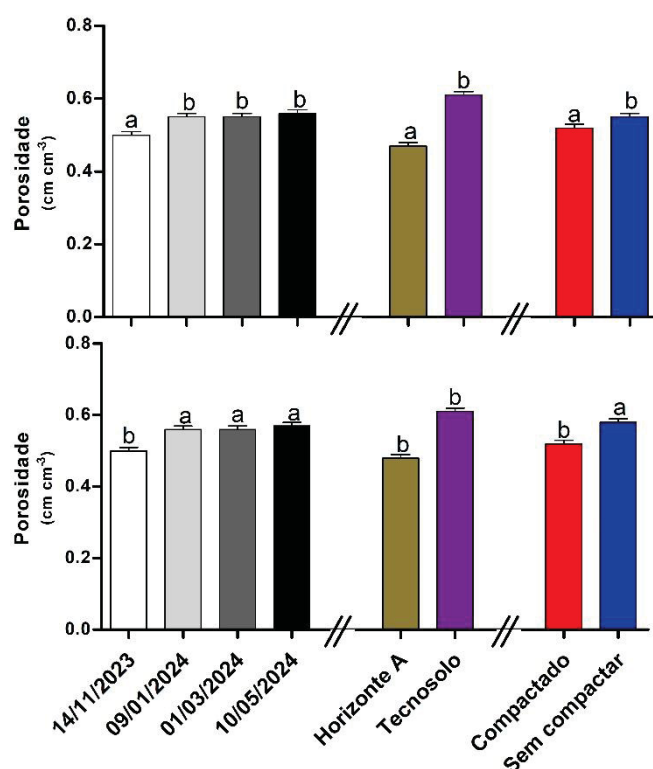


**Figura 17:** Densidade Aparente diferentes datas de avaliação, materiais estudados e nível de compactação. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A porosidade total do solo apresentou variações significativas ao longo das datas avaliadas e entre os materiais testados (Figura 4). De modo geral, observou-se um aumento na porosidade a partir da segunda avaliação (09/01/2024), que se manteve estável nas datas subsequentes (painel superior), sugerindo melhoria gradual da estrutura do solo ao longo do tempo, possivelmente em resposta à maior umidade e à atividade biológica associada ao cultivo.

Esse comportamento foi consistente nas duas profundidades avaliadas, com padrão semelhante observado também na camada de 10–20 cm (painel inferior), evidenciando que os efeitos observados na porosidade não se restringiram à superfície do solo. Entre os materiais avaliados, o tecnossolo apresentou a maior porosidade total, significativamente superior à do Horizonte A, fato atribuído ao seu elevado conteúdo de matéria orgânica e à composição mais leve e agregada, que favorece maior volume de poros. Já o Horizonte A, mais denso e de composição mineral mais compacta, apresentou os menores valores.

Quanto aos tratamentos de compactação, observou-se que o solo compactado apresentou menor porosidade em relação ao solo não compactado (Figura 18), embora essa diferença tenha sido mais evidente na camada superficial. Esses resultados indicam que a compactação, mesmo que moderada, reduz parcialmente o volume total de poros, o que pode impactar negativamente a aeração, infiltração e armazenamento de água.

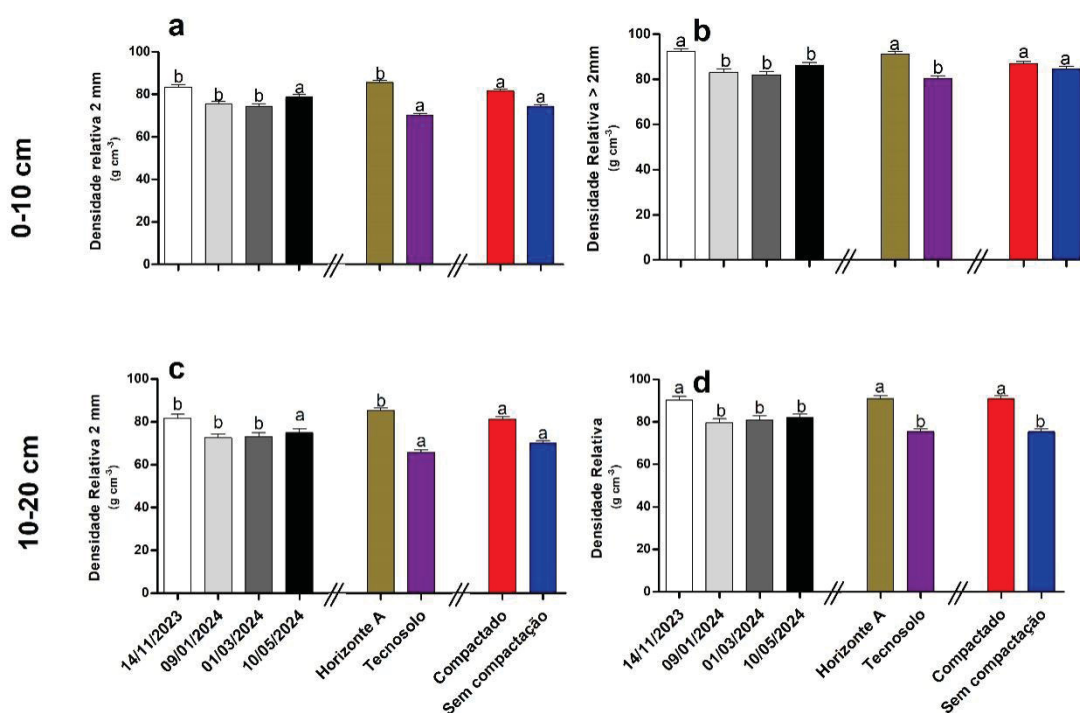


**Figura 18:** Porosidade do solo nas diferentes datas de avaliação, materiais estudados e nível de compactação, na profundidade de 0-10 cm (a), e 10-20 cm (b). Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A densidade relativa do solo apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos avaliados (Figura 19). O parâmetro "densidade relativa de agregados  $> 2$  mm" destacou-se por apresentar interação tripla significativa (data  $\times$  material  $\times$  compactação), evidenciando-se como o mais sensível às variações nos tratamentos. Esse parâmetro apresentou os maiores valores nas camadas de 0–10 cm (figura 19a - b) e 10–20 cm (figura 19c - d), sugerindo uma predominância de agregados maiores e mais densos nessas profundidades sob determinadas condições. Na camada de 0–10 cm, materiais como o Horizonte A e o Tecnossolo apresentaram alta densidade relativa de agregados  $> 2$  mm (figura 19b), indicando uma maior proporção de macroagregados estáveis. Já a densidade relativa total (figura 19a) apresentou variações menos expressivas, com destaque para o efeito dos diferentes materiais, mas sem influência clara da compactação. O mesmo padrão foi observado na camada de 10–20 cm (figura 19 c - d), onde novamente a

fração > 2 mm se mostrou mais responsiva às variações, especialmente nos materiais naturais e Tecnossolo.

Esses resultados sugerem que a presença e a estabilidade dos macroagregados (> 2 mm) estão fortemente relacionadas ao tipo de material e ao momento da amostragem, sendo menos influenciadas pela compactação em si. Isso reforça a importância de práticas que promovam a formação e preservação de agregados maiores, essenciais para a estrutura e a funcionalidade do solo



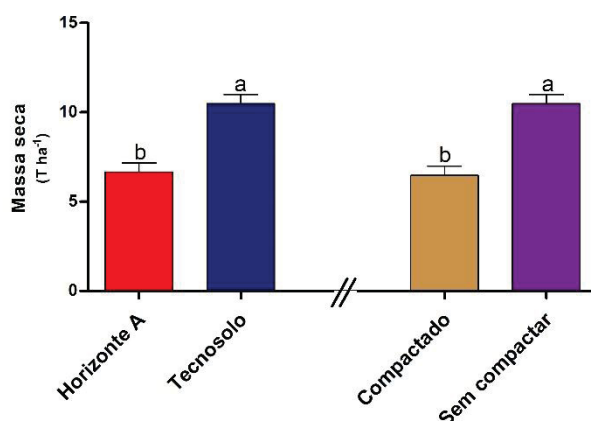
**Figura 19:** Densidade Relativa nas diferentes datas de avaliação, matérias estudadas e nível de compactação. (a) Ds relativa 2mm (0-10cm), (b) Ds relativa >2mm (0-10cm), (c) Ds relativa. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.5.3 PRODUÇÃO DE VEGETAL E PROTEÇÃO DO SOLO

A produção de massa seca (Figura 20) foi influenciada tanto pelo tipo de material quanto pela condição de compactação do solo. O tecnossolo apresentou os maiores valores de massa seca, atingindo aproximadamente  $10,5 \text{ t ha}^{-1}$ , enquanto o Horizonte A obteve valores significativamente inferiores, em torno de  $7 \text{ t ha}^{-1}$ . Esse resultado reforça o papel positivo do tecnossolo na promoção do desenvolvimento

vegetal, possivelmente associado à sua maior porosidade, maior teor de matéria orgânica e melhor retenção de água observados em análises anteriores.

Quanto à compactação, o solo sem compactação apresentou desempenho superior, com valores significativamente maiores de massa seca do que os observados no solo compactado. Isso indica que, apesar de a compactação leve não ter comprometido diretamente a umidade ou porosidade de forma marcante, seu efeito negativo sobre o crescimento radicular e a exploração do volume de solo pode ter limitado a produção de biomassa. De forma geral, os resultados apontam para uma clara vantagem do uso de tecnossolos não compactados no incremento da produtividade de biomassa, refletindo melhores condições físicas e estruturais do solo para o crescimento das plantas.

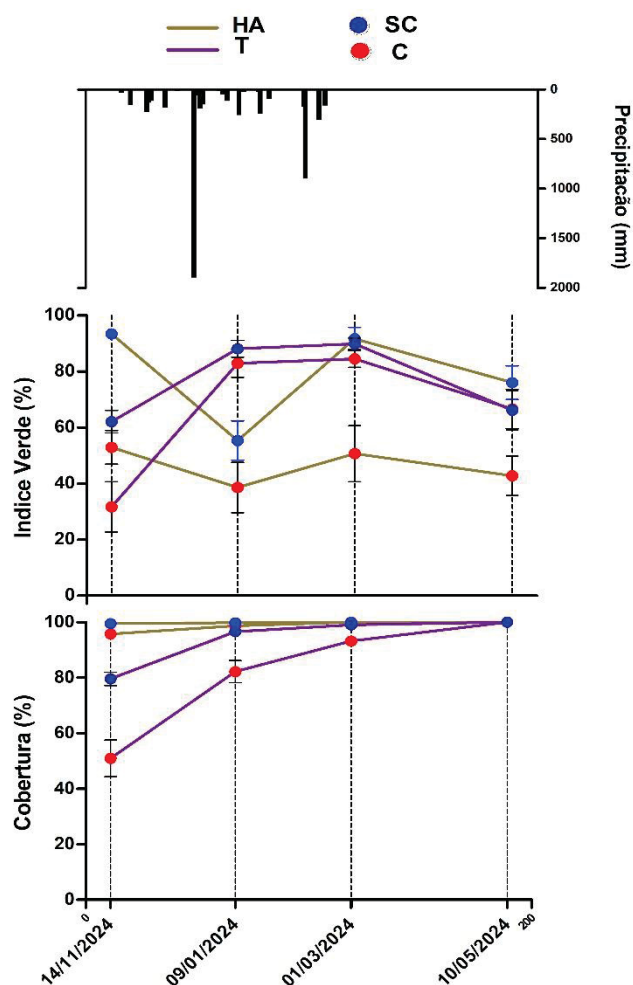


**Figura 20:** Massa seca da parte aérea nas diferentes datas de avaliação, materiais estudados e nível de compactação. Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando os graus de compactação em uma mesma dose, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A cobertura vegetal (%) apresentou diferenças marcantes entre os tratamentos desde o início do experimento (Figura 21). Na primeira data, o material Horizonte A já exibia praticamente 100% de cobertura, independentemente da compactação, evidenciando uma rápida ocupação do solo. Por outro lado, o tecnossolo compactado apresentou cobertura inicial significativamente mais baixa (em torno de 50%), enquanto o tecnossolo sem compactação atingiu cerca de 80%. Com o avanço das avaliações, houve incremento contínuo da cobertura nos tratamentos com tecnossolo, atingindo 100% apenas na última data, o que indica um estabelecimento mais lento, porém progressivo, especialmente sob a condição sem compactação.

No que se refere ao índice verde (%), os dados (painel central) revelam que os materiais compactados apresentaram os menores valores na primeira data, o que pode estar associado não apenas ao menor desenvolvimento vegetativo, mas também à presença limitada de cobertura verde efetiva nesse estágio inicial. Na segunda e terceira datas, os tratamentos com tecnossolo atingiram valores máximos de índice verde, com destaque para o tecnossolo sem compactação, que demonstrou uma resposta vigorosa em termos de densidade e coloração da vegetação.

Ao longo do experimento, o Horizonte A sob condição sem compactação manteve consistentemente altos índices de verdor, refletindo o bom desempenho vegetativo da cobertura estabelecida nesse material. Já os tratamentos com tecnossolo apresentaram redução no índice verde nas datas finais, possivelmente em função do avanço do outono e do ciclo da vegetação utilizada, enquanto o Horizonte A sob compactação manteve valores relativamente estáveis, com queda mais gradual. Essas dinâmicas estão fortemente associadas à precipitação registrada, que influenciou o desenvolvimento da vegetação. A distribuição irregular das chuvas pode ter contribuído para os picos e quedas observados ao longo do tempo, especialmente nos tratamentos com menor cobertura inicial, mais sensíveis à disponibilidade hídrica.



**Figura 21** Coberturas vegetal e Índice de verdor (greenness) nas diferentes datas de avaliação, materiais estudados e nível de compactação, na profundidade de 0-10 cm (a), e 10-20 cm (b).

#### 4.6 DISCUSSÃO

A estabilidade dos agregados do solo foi significativamente influenciada pelo tipo de material e pelo método de avaliação adotado. O teste de umedecimento rápido apresentou maior sensibilidade às variações entre os tratamentos, evidenciando diferenças marcantes entre o tecnossolo e o Horizonte A. Esse comportamento reflete a resposta do solo à entrada súbita de água, exigindo maior coesão entre as partículas para resistir à desagregação. Observou-se que o tecnossolo demonstrou maior estabilidade estrutural, especialmente no tratamento de agitação rápida, sugerindo que sua composição rica em matéria orgânica e aditivos estruturantes (como resíduos orgânicos estabilizados) favorece a formação de agregados mais resistentes.



Esse resultado está em concordância com estudos como o de Vidal-Beaudet et al. (2018), que demonstraram que os primeiros estágios da formação de tecnossolos favorecem a rápida agregação das partículas, com maior estabilidade observada em misturas que contêm resíduos verdes, compostos orgânicos e materiais de origem vegetal. Da mesma forma, Séré et al. (2010) apontam que tecnossolos compostos por resíduos orgânicos apresentam formação precoce de agregados estáveis, promovendo melhor estrutura física e maior funcionalidade do solo. Embora a compactação não tenha promovido diferenças estatísticas significativas na estabilidade estrutural, observou-se uma leve tendência de melhoria nos agregados compactados, possivelmente devido à reorganização das partículas em uma configuração mais coesa. De acordo com Deeb et al. (2017), mesmo em solos compactados, a presença de resíduos orgânicos pode manter ou melhorar a estrutura física, sobretudo quando há estímulo à atividade biológica, como crescimento radicular e ação de microrganismos.

Além disso, os resultados deste trabalho corroboram com Barredo et al. (2020), que, ao avaliarem tecnossolos formados com resíduos urbanos e industriais, observaram boa resposta vegetativa e evolução rápida das propriedades do solo. Embora a estabilidade estrutural não tenha sido mensurada diretamente, os autores destacam que os tecnossolos com maior teor de matéria orgânica favoreceram o crescimento de plantas e apresentaram melhores condições físicas para o desenvolvimento vegetal, sugerindo uma estrutura mais estável e funcional. Esses achados reforçam que a composição dos tecnossolos, especialmente o uso de materiais orgânicos estabilizados, é um fator determinante na melhoria da qualidade física do solo e na formação de agregados resistentes, mesmo em ambientes sujeitos a perturbações como a compactação superficial.

A densidade relativa do solo apresentou variações significativas entre os tratamentos avaliados (Figura 18), especialmente na fração de agregados maiores que 2 mm, que foi a única a evidenciar interação tripla significativa entre data, profundidade e material. Esse comportamento sugere que os macroagregados são mais sensíveis às variações físico-químicas dos tecnossolos e mais responsivos à evolução estrutural do sistema ao longo do tempo. As maiores densidades relativas foram observadas nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, sobretudo nos tratamentos com tecnossolo, indicando maior proporção de agregados volumosos e estáveis nessas condições.

Diversos autores relataram que a presença de resíduos orgânicos estabilizados tende a favorecer a formação de agregados coesos e resistentes, o que implica, indiretamente, em maior densidade relativa da fração sólida agregada (Castiglioni et al., 2019; Vidal-Beaudet et al., 2018). Esses agregados, por sua vez, aumentam a porção densa e funcional do solo, favorecendo a estrutura e a resistência à compactação.

Além disso, conforme apontado por Novak et al. (2017) e Custódio et al. (2015), a densidade relativa é uma variável que reflete diretamente o estado de compactação do solo em relação ao seu potencial máximo de compactação. Solos sob vegetação nativa ou manejo com maior aporte de matéria orgânica tendem a apresentar menores valores de densidade relativa, indicando maior porosidade e melhor condição física. No presente estudo, embora o tecnossolo tenha apresentado maior densidade relativa na fração  $>2$  mm, isso não foi acompanhado de aumento na densidade aparente total, o que indica uma estrutura agregada densa, mas ainda porosa e funcional resultado esperado em materiais ricos em compostos orgânicos estabilizados.

Segundo Marcolin e Klein (2011), a densidade relativa pode ser estimada com base no teor de matéria orgânica e argila, refletindo o estado físico ideal do solo. No caso dos tecnossolos, a composição orgânica elevada reduz a densidade máxima possível, de modo que valores relativamente altos de densidade aparente ainda podem indicar boa estrutura física, desde que acompanhados por elevada estabilidade de agregados e adequada porosidade, como observado neste trabalho. Portanto, os resultados obtidos reforçam a ideia de que a densidade relativa pode ser utilizada como indicador complementar da evolução estrutural dos tecnossolos, especialmente quando associada à estabilidade dos agregados e à avaliação da fração de macroagregados.

A densidade aparente do solo mostrou-se estável ao longo das datas avaliadas, com pequenas variações iniciais, mas sem alterações significativas atribuídas à compactação. Apesar disso, observaram-se diferenças expressivas entre os materiais avaliados, sendo que o tecnossolo apresentou valores consistentemente inferiores em relação ao horizonte A. Esses resultados indicam que a composição do tecnossolo, rica em matéria orgânica e resíduos estruturantes, favorece uma menor compactação e maior porosidade do solo.

Estudos anteriores corroboram essa observação. Segundo Debb et al. (2016), substratos com altos teores de composto orgânico apresentaram densidade aparente tão baixa quanto  $0,61 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto materiais mais minerais e compactados ultrapassaram  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ . Da mesma forma, Séré et al. (2010) relataram que tecnosolos formulados com resíduos urbanos e industriais apresentaram densidades variando de  $0,53$  a  $1,81 \text{ g cm}^{-3}$ , com os valores mais baixos associados à maior capacidade de retenção de água e desenvolvimento vegetal.

A relação inversa entre densidade aparente e porosidade total é bem documentada, conforme descrito por Glinski & Lipiec (1990). No presente estudo, os menores valores de densidade aparente do tecnosolo indicam uma estrutura mais porosa, provavelmente resultante da natureza fibrosa e orgânica do material. Essa característica contribui positivamente para o armazenamento de água, a aeração e o desenvolvimento radicular, especialmente nos períodos iniciais de estabelecimento da vegetação.

Embora a compactação não tenha promovido mudanças estatisticamente significativas na densidade aparente, observou-se uma leve tendência de aumento em alguns tratamentos, sugerindo que a compactação pode ter promovido acomodação das partículas sem alterar substancialmente a estrutura dos materiais. Essa resposta é coerente com o que foi reportado por Séré et al. (2008), que destacaram a resiliência estrutural dos tecnosolos frente a perturbações físicas. Portanto, os resultados reforçam a importância da composição do material sobre a densidade aparente, sendo o tecnosolo uma alternativa promissora para a formação de solos estruturados e menos suscetíveis à compactação.

A umidade gravimétrica do solo apresentou variações significativas ao longo das datas de avaliação, refletindo diretamente os eventos pluviométricos ocorridos no período. Apesar dessa influência natural, observou-se que o tecnosolo manteve, de forma consistente, os maiores valores de umidade em comparação ao horizonte A. Esse comportamento pode ser atribuído à maior capacidade de retenção hídrica conferida pelos componentes orgânicos presentes no tecnosolo.

Segundo Debb et al. (2016), substratos enriquecidos com matéria orgânica possuem alta capacidade de retenção de água, mesmo em condições de baixa disponibilidade hídrica. Essa característica se deve à presença de frações coloidais e estruturas mais porosas que aumentam a superfície de retenção. De forma

semelhante, Séré et al. (2008) relataram que tecnosolos compostos por resíduos orgânicos urbanos apresentaram elevado conteúdo de umidade gravimétrica, especialmente nas camadas superficiais.

O comportamento observado no presente estudo sugere que a composição dos materiais é mais determinante para a umidade do solo do que o grau de compactação aplicado. De fato, a compactação não promoveu diferenças significativas na umidade gravimétrica, o que indica que a reestruturação física do solo, mesmo sob pressão, não comprometeu substancialmente a retenção hídrica dos materiais. Essa estabilidade pode ser explicada pela estrutura resiliente dos tecnosolos, cuja porosidade funcional tende a ser preservada mesmo sob pressão moderada, conforme destacado por Castiglioni et al. (2020).

Além disso, a manutenção de maiores teores de umidade nos tecnosolos é estratégica para o desenvolvimento vegetal, especialmente em períodos de déficit hídrico. A presença de matéria orgânica melhora a capacidade de tamponamento da umidade e reduz a perda por evaporação, favorecendo a sustentabilidade da vegetação implantada, como também apontado por Barredo et al. (2020) em estudos com solos construídos para recuperação ambiental. Dessa forma, os resultados indicam que a utilização de tecnosolos na recomposição de áreas degradadas pode favorecer o balanço hídrico no solo, promovendo maior estabilidade da umidade ao longo do tempo, independentemente das variações induzidas por compactação.

A porosidade total (Pt) do solo é composta pela soma dos macroporos (responsáveis pela drenagem e aeração) e dos microporos (relacionados à retenção de água). Essa estrutura de poros é determinante para o desempenho físico e biológico do solo, impactando diretamente a infiltração de água, oxigenação radicular e a atividade da biota edáfica. No presente estudo, os valores de porosidade total foram superiores no tecnosolo em relação ao horizonte A em todas as datas e profundidades avaliadas. Isso indica que a natureza do Tecnosolo, composta por resíduos orgânicos e materiais estruturantes, confere maior estabilidade e volume de poros, mesmo sob diferentes graus de compactação. A literatura confirma esse comportamento: segundo Séré et al. (2008), tecnosolos com alto conteúdo de matéria orgânica apresentaram porosidade total acima de 70%, com manutenção de macroporos essenciais à drenagem mesmo após simulações de tráfego. No experimento em questão, a compactação não gerou reduções significativas na porosidade total, reforçando a hipótese de que a estrutura do

tecnosolo é resiliente à pressão mecânica. Essa estabilidade pode estar associada à formação de agregados estáveis, promovida pelo teor de carbono orgânico e pela interação com agentes cimentantes naturais, como óxidos de ferro e alumínio, conforme discutido por Castiglioni et al. (2020) e Debb et al. (2016).

Quando analisadas separadamente, observou-se que os macroporos foram mais sensíveis à compactação do que os microporos, sobretudo no horizonte A, onde se notou leve redução nos valores de porosidade drenante em graus mais elevados de compactação. Em contrapartida, os microporos apresentaram pouca variação entre tratamentos, mantendo-se relativamente estáveis, especialmente no tecnosolo. Essa resposta é coerente com o modelo teórico de Boivin et al. (2006), no qual a compactação tende a colapsar os poros maiores enquanto os poros menores permanecem preservados ou até aumentam por reorganização das partículas. Portanto, os resultados reforçam que a estrutura dos tecnosolos favorece uma distribuição mais equilibrada entre macro e microporos, promovendo uma função hidráulica mais eficiente e resistente à compactação. Esses atributos são fundamentais para o sucesso da revegetação e da reabilitação de áreas degradadas, especialmente em cenários de limitação hídrica.

A produção de massa seca da parte aérea é um indicador direto do desempenho vegetativo das plantas, refletindo as condições físicas e químicas do solo, incluindo disponibilidade de água, aeração, fertilidade e resistência à penetração radicular. No presente estudo, a massa seca foi influenciada tanto pelo tipo de solo (tecnosolo vs. horizonte A) quanto, em menor grau, pela compactação.

De modo geral, o tecnosolo proporcionou maior produção de biomassa em comparação ao horizonte A, especialmente nas fases intermediárias e finais do ciclo vegetativo. Isso pode ser atribuído à maior capacidade de retenção de água e nutrientes, bem como à menor densidade aparente e maior porosidade funcional observadas nesse material. Esses atributos físicos favorecem o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e a fotossíntese, resultando em maior acúmulo de massa seca, como destacado por Barredo et al. (2020) em estudos com vegetação implantada em solos reconstruídos.

A influência da compactação foi menos pronunciada, mas em alguns tratamentos observou-se redução da massa seca nas condições mais compactadas, principalmente no horizonte A. Tal comportamento é coerente com os achados de Debb et al. (2016), que relataram que o aumento da densidade do solo limita o

crescimento radicular e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes, refletindo-se em menor acúmulo de biomassa. Em contraste, no tecnosolo, os efeitos da compactação foram mitigados pela estrutura orgânica e resiliente do material, mantendo-se a produtividade relativamente estável mesmo sob pressão.

Além disso, a evolução temporal da massa seca indicou que o tecnosolo sem compactação alcançou valores máximos de produção mais rapidamente, sugerindo maior eficiência no estabelecimento inicial das plantas. Essa vantagem inicial é fundamental para o sucesso da revegetação em áreas degradadas, pois plantas mais vigorosas tendem a competir melhor por luz e recursos hídricos, como também evidenciado por Séré et al. (2008) em ensaios com tecnosolos aplicados à recuperação ambiental. Portanto, os resultados evidenciam o potencial do tecnosolo como substrato alternativo eficiente, capaz de sustentar o crescimento vegetal com boa performance mesmo sob diferentes condições físicas, demonstrando ser uma ferramenta promissora para estratégias de restauração e revegetação de ambientes impactados.

A dinâmica da cobertura vegetal ao longo das avaliações evidenciou diferenças marcantes entre os tipos de solo e os tratamentos de compactação. O horizonte A apresentou desempenho superior desde as fases iniciais, atingindo praticamente 100% de cobertura logo na primeira data de avaliação, independentemente da compactação. Esse resultado indica maior capacidade de estabelecimento inicial da vegetação nesse substrato, possivelmente associada à sua familiaridade físico-química para as espécies utilizadas, além de uma microbiota mais adaptada.

Por outro lado, os tratamentos com tecnosolo apresentaram uma evolução mais gradual da cobertura. Na primeira data, os valores foram modestos, cerca de 50% no tecnosolo compactado e 80% no sem compactação. A cobertura total (100%) foi atingida apenas na última avaliação, o que demonstra uma necessidade de tempo maior para o estabelecimento da vegetação em substratos alternativos. Essa resposta pode estar associada à maior heterogeneidade estrutural e porosidade inicial do tecnosolo, exigindo mais tempo para que as raízes explorem e estabilizem o perfil.

O índice de verdor acompanhou essa dinâmica, refletindo não apenas a densidade da cobertura, mas também o vigor e a qualidade da vegetação. Nos tratamentos compactados, tanto com tecnosolo quanto com horizonte A, os valores

iniciais foram mais baixos, possivelmente devido à menor biomassa foliar e à presença de espécies pioneiras de menor porte. Com o avanço das datas, o índice de verdor aumentou, principalmente nos tecnosolos, indicando o avanço da cobertura e a melhoria fisiológica das plantas. Ainda assim, o horizonte A sem compactação manteve os maiores valores ao longo de todo o período experimental, o que reforça sua capacidade de sustentação do crescimento vegetal. Esses resultados estão em consonância com estudos recentes sobre monitoramento espectral da vegetação. Jia et al. (2016) demonstraram que a estimativa da cobertura vegetal fracionária e de índices como o NDVI em áreas com solo nu ou vegetação esparsa exige metodologias robustas, especialmente em substratos heterogêneos como os tecnosolos. Os autores propuseram um método fisicamente baseado capaz de melhorar a interpretação dos índices espectrais mesmo em estágios iniciais de revegetação, validando a abordagem utilizada no presente trabalho para monitorar o desempenho dos tratamentos ao longo do tempo.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a eficácia do uso do índice de verdor como ferramenta para avaliar a recuperação da cobertura vegetal e a qualidade da vegetação em solos de diferentes naturezas físicas. Embora os tecnosolos apresentem resposta mais lenta, mostraram-se funcionais e promissores no médio prazo, evidenciando seu potencial em estratégias de revegetação de áreas degradadas.

#### 4.7 CONCLUSÃO

O Tecnosolo apresentou melhores atributos químicos e físicos que o Horizonte A, com destaque para maior fertilidade, porosidade e estabilidade estrutural, além de favorecer o crescimento radicular. As avaliações em campo e por imagens aéreas confirmaram maior cobertura vegetal e acúmulo de biomassa, especialmente em áreas não compactadas, evidenciando seu potencial para recuperar solos degradados de forma sustentável.

#### 4.8 REFERENCIAS

ABHILASH, P.C., Restoring the Unrestored: Strategies for Restoring Global Land during the UN Decade on **Ecosystem Restoration** (UN-DER). Land, 10, 201, 2021.

ALBA-PATÍÑO, D., et al. Social indicators of ecosystem restoration for enhancing human wellbeing. **Resources, Conservation and Recycling**, 174, 105782, 2021.



BARREDO, J. I. et al. Vegetation recovery after forest fires in Mediterranean ecosystems: A long-term perspective using satellite data. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 1581–1591, 2019.

BOIVIN, Pascal et al. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modelling: Experimental data and perspectives. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1-2, p. 65–79, 2006.

CARABASSA, V., et al. Mid-term effects on ecosystem services of quarry restoration with technosols under Mediterranean conditions: 10-year impacts on soil organic carbon and vegetation development. **Restoration Ecology**, 28, 960–970, 2020.

CASTIGLIONI, D. et al. Short-term effects of Technosol use on soil quality indicators in a degraded urban **soil Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 2385–2396, 2020.

DEBB, A. et al. Influence of compost and mineral additives on physical properties and structural stability of Technosols. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 23155–23165, 2016.

FABBRI, D., et al. Constructed technosols: a strategy toward a circular **economy. Applied Sciences**, 11, 3432, 2021

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton: CRC Press, 1990.

HERNÁNDEZ, T; GARCIA, E; GARCIA, C. A strategy for marginal semiarid degraded soil restoration: a sole addition of compost at a high rate. A five-year field experiment. **Soil Biology and Biochemistry**, 89, 61–71, 2015

IBARRA, J.M.N., De Las Heras, M.M., 2005. Opencast mining reclamation. In: Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees. **Springer**, New York, pp. 370–376.

JIA, K. et al. Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method. **Remote Sensing of Environment**, v. 183, p. 336–349, 2016.

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, p. 349-354, 2011.

ORTEGA, R. et al. Improving the fertility of degraded soils from a limestone quarry with organic and inorganic amendments to support vegetation restoration with semiarid Mediterranean plants. **Soil & Tillage Research**, 204, 104718, 2020.

ROSSITER, D. G. Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. **Journal of Soils and Sediments**, 7(2), 96–100, 2007.

Šálek, M. Spontaneous succession on opencast mining sites: implications for bird biodiversity. **Journal of Applied Ecology**, 49, 1417–1425, 2012.

SÉRÉ, G. et al. Constructed Technosols are a solution to rehabilitate degraded mining and industrial lands. **Geoderma**, v. 149, n. 1-2, p. 138–147, 2008.

SÉRÉ, G. et al. Functional indicators for the monitoring of Technosol development. **Applied Soil Ecology**, v. 45, p. 254–265, 2010.

Smirnov, Y.D., Suchkov, D.V., Goryunova, T.V., 2021. Justification of the **line of action for reclamation of lands disturbed by opencast mining**. **E3S Web of Conferences**, 266, 08009.

SOLIVERES, S., et al. Effects of early irrigation and compost addition on soil and vegetation of a restored semiarid limestone quarry are undetectable after 13 years. **Journal of Arid Environments**, 186, 104401, 2021.

YE, G. et al. Long-term application of manure over plant residues mitigates acidification, builds soil organic carbon and shifts prokaryotic diversity in acidic ultisols. **Applied Soil Ecology**, 133, 24–33, 2019.

SÉRÉ, G., et al. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. **Journal of Soils and Sediments**, 8(1), 41–52, 2008.

YAO, Z. Y., Li, J. H., & Xie, H. Chemical changes in heavy metals in the leachates from Technosols. **Chemosphere**, 76(5), 638–643, 2009.

HAFEEZ, B. et al. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. **Chemosphere**, 88(6), 705–712, 2021a.

CANNAVO, P et al. Technosols made with various urban wastes showed contrasted performance for tree development during a 3-year experiment. **Ecological Engineering**, 62, 79–90, 2014.

YILMAZ D. et al. Assessment of hydraulic properties of technosols using Beerkan and inverse modeling methods. **European Journal of Soil Science**, 67(5), 567–577, 2016.