

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL

UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**COMPACTAÇÃO EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO E INOCULAÇÃO
COM BACILLUS ARYABHATAI: EFEITOS FÍSICOS E AGRONÔMICOS NA
CULTURA DO GERGELIM**

NICOLLY QUEIROZ RODRIGUES

CASSILÂNDIA – MS

JUNHO/2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL

UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**COMPACTAÇÃO EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO E INOCULAÇÃO
COM *BACILLUS ARYABHATTAI*: EFEITOS FÍSICOS E AGRONÔMICOS NA
CULTURA DO GERGELIM**

NICOLLY QUEIROZ RODRIGUES

Orientador: Prof. Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, com área de concentração em Sustentabilidade na Agricultura.

CASSILÂNDIA – MS

JUNHO/2026

R614c Rodrigues, Nicolly Queiroz

Compactação em neossolo quartzarênico e inoculação com bacillus aryabhattai: efeitos físicos e agronômicos na cultura do gergelim/ Nicolly Queiroz Rodrigues. – Cassilândia, MS: UEMS, 2026.
40 p.

Dissertação (Mestrado) – Agronomia – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor

1. *Sesamum indicum* L. 2. Física do solo 3. Impedimento mecânico 4. Bactérias promotoras de crescimento vegetal. I. Título. II. Guimarães Júnnyor, Wellington da Silva.

CDD 23. ed. - 631.43

Ficha Catalográfica elaborada pela bibliotecária da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS)

Susy dos Santos Pereira CRB1º1783

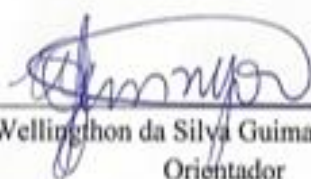
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: COMPACTAÇÃO EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO E INOCULAÇÃO COM
BACILLUS ARYABHATTAI: EFEITOS FÍSICOS E AGRONÔMICOS NA CULTURA DO
GERGELIM**

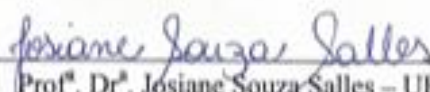
AUTOR: NICOLLY QUEIROZ RODRIGUES

ORIENTADOR: PROF. DR. WELLINGTON DA SILVA GUIMARÃES JÚNNYOR

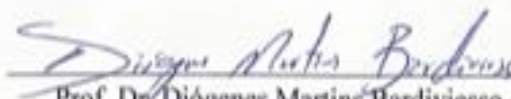
Aprovado como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de concentração: "Sustentabilidade na Agricultura", pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor – UEMS
Orientador



Prof. Dr. Josiane Souza Salles – UEMS



Prof. Dr. Diógenes Martins Bardivieso – UEMS

Participação via videoconferência

Prof. Dr. Ana Carina da Silva Cândido Seron – UFMS

Data da realização: 03 de junho de 2026.

EPÍGRAFE

“...para que todos vejam, saibam, considerem e entendam juntamente que a mão do
Senhor fez isso.”

Isaías 41:20.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui, me dando forças para suportar todo o processo e a minha família que nunca me deixou desistir, em especial a minha avó que me deu todo o apoio necessário para seguir meus sonhos e a minha irmã por me dar forças para lutar por mim e por ela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado ao longo do curso e por continuar me dando forças para seguir frente as dificuldades e problemas, me fornecendo conforto e sabedoria durante todo o período.

Agradeço a minha avó Lília que se fez presente durante toda minha vida e principalmente no período do curso, me aconselhando e me guiando pelos melhores caminhos suportando cada dificuldade para que eu me mantivesse firme.

Agradeço a minha mãe pelo colo, carinho, apoio e todo amor necessários para que me tornasse forte e suportasse todo o processo.

Agradeço a minha irmã, que mesmo sem entender, me ofereceu todo o suporte e todo colo que precisei. Agradeço a ela também por me dar forças para continuar.

Agradeço ao meu tio Ivo e meu padrasto Seomar por terem feito papel de pai em minha vida e por sempre me acolherem e torcerem por mim.

Agradeço aos meus tios, tias e primos, principalmente a minha prima Cintia, minha tia Alene e meu primo Guilherme que sempre estiveram comigo nos melhores e piores momentos.

Agradeço a minha amiga irmã Andressa por todos os dias em que passamos juntas, por cada conselho, cada choro, cada risada, por todas as coisas que enfrentamos e sobrevivemos. Agradeço a Andressa por me ajudar a ser quem sou hoje e por cada dia me incentivar a melhorar, saiba que todo meu coração é seu, minha irmã!

A Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e todo corpo docente envolvido, pelas oportunidades e ensinamentos durante todo período da pós-graduação.

Agradeço ao meu orientador Wellington da Silva Guimarães Júnnyor pelo apoio, ensinamentos e incentivo durante os anos de orientação, você foi fundamental!

Resumo

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) tem se expandido como uma importante alternativa de cultivo de segunda safra na região Centro-Oeste do Brasil. Contudo, o tráfego mecanizado intensivo associado às operações agrícolas pode acarretar em compactação do solo, limitando o desenvolvimento radicular e o rendimento das culturas, sobretudo em solos arenosos de baixa resiliência estrutural. Objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos de diferentes níveis de compactação do solo e da inoculação com *Bacillus aryabhattai* sobre os atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e no desempenho produtivo do gergelim. O experimento foi conduzido na Unidade Universitária de Cassilândia (UEMS), em delineamento de blocos casualizados com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas principais consistiram em cinco níveis de compactação induzida por passagens de trator (T0: zero, T1: uma, T2: duas, T8: oito e T16: dezesseis passadas), enquanto as subparcelas foram compostas pela ausência e presença de inoculação com *B. aryabhattai*. Foram avaliados a densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), porosidade total (PT), macro e microporosidade, resistência mecânica do solo à penetração (RP), qualidade visual da estrutura do solo (VESS) e a produtividade de grãos. O tráfego de máquinas promoveu degradação progressiva da estrutura física do Neossolo Quartzarênico, resultando em reduções de 7% a 10% na PT e de até 35% na macroporosidade, com acréscimos de 5% a 7% na D_s . Nos tratamentos T8 e T16, a RP ultrapassou o limite crítico de 2,5 MPa, associando-se aos piores escores estruturais obtidos via VESS. O tratamento T2 (duas passadas) proporcionou a maior produtividade média de grãos (923 kg ha⁻¹), caracterizando o efeito de compactação benéfica em solo arenoso, ao passo que o tratamento T1 obteve o menor rendimento (572 kg ha⁻¹). A inoculação das sementes com *B. aryabhattai* incrementou de forma significativa a produtividade do gergelim em 22% (838 kg ha⁻¹ contra 687 kg ha⁻¹ do controle não inoculado), atuando como um fator aditivo e independente do nível de compactação. Todavia, a inoculação microbiana não foi capaz de mitigar os efeitos deletérios da compactação severa (T8 e T16). Conclui-se que o Neossolo Quartzarênico apresenta alta suscetibilidade à compactação pelo tráfego de máquinas, e que a eficácia biotecnológica de *B. aryabhattai* como promotora de crescimento e produtividade é dependente da manutenção de condições estruturais mínimas que evitem o colapso do sistema poroso do solo.

Palavras-chave: *Sesamum indicum* L., física do solo, impedimento mecânico, bactérias promotoras de crescimento vegetal.

ABSTRACT

Sesame (*Sesamum indicum* L.) has been expanding as an important second-crop alternative in the Center-West region of Brazil. However, the intensive mechanized traffic associated with agricultural operations can lead to soil compaction, limiting root development and physical crop yield, especially in sandy soils with low structural resilience. This study aimed to evaluate the effects of different soil compaction levels and inoculation with *Bacillus aryabhattai* on the physical attributes of a Quartzipsamment (Neossolo Quartzarênico) and the productive performance of sesame. The experiment was conducted at the Cassilândia University Unit (UEMS), in a randomized block design with split-plots and three replications. The main plots consisted of five compaction levels induced by tractor passes (T0: zero, T1: one, T2: two, T8: eight, and T16: sixteen passes), while the subplots comprised the absence and presence of seed inoculation with *B. aryabhattai*. Soil bulk density (Ds), particle density (Dp), total porosity (TP), macro- and microporosity, soil mechanical resistance to penetration (PR), visual evaluation of soil structure (VESS), and grain yield were evaluated. Machinery traffic promoted progressive degradation of the physical structure of the Quartzipsamment, resulting in reductions of 7% to 10% in TP and up to 35% in macroporosity, with increases of 5% to 7% in Ds. In the T8 and T16 treatments, PR exceeded the critical limit of 2.5 MPa, which was associated with the poorest structural scores obtained via VESS. The T2 treatment (two passes) provided the highest average grain yield (923 kg ha⁻¹), characterizing the effect of beneficial compaction in sandy soil, whereas the T1 treatment obtained the lowest yield (572 kg ha⁻¹). Seed inoculation with *B. aryabhattai* significantly increased sesame yield by 22% (838 kg ha⁻¹ versus 687 kg ha⁻¹ for the non-inoculated control), acting as an additive and independent factor of the compaction level. However, microbial inoculation was not able to mitigate the deleterious effects of severe compaction (T8 and T16). It is concluded that Quartzipsamments have high susceptibility to compaction by machinery traffic, and the biotechnological efficacy of *B. aryabhattai* as a growth and yield promoter depends on maintaining minimal structural conditions to prevent the collapse of the soil pore system.

Keywords: *Sesamum indicum* L., soil physics, mechanical impedance, plant growth-promoting bacteria.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1.	Localização das áreas estudadas.....	13
2.2.	Aspectos climáticos	14
2.3.	Caracterização experimental e plano experimental	14
2.4.	Amostragem de solo	15
2.5.	Determinações físicas do solo	16
2.5.1.	Densidade do solo (Ds)	16
2.5.2.	Densidade de partículas (Dp)	16
2.5.3.	Porosidade total (PT)	16
2.5.4.	Microporosidade.....	16
2.5.5.	Macroporosidade	17
2.5.6.	Análise granulométrica	17
2.5.7.	Determinações químicas do solo	17
2.5.8.	Resistência à penetração em Campo.....	17
2.6.	Análise visual da estrutura do solo	18
2.7.	Colheita da cultura.....	19
2.8.	Análise estatística	19
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1.	Atributos físicos do solo	20
3.1.1.	Porosidade total	20
3.1.2.	Microporosidade.....	21
3.1.3.	Macroporosidade	23
3.1.4.	Densidade do solo.....	24
3.2.	Análise Visual da Estrutura do solo (VESS)	26
3.3.	Resistência à penetração (RP)	30
4.	CONCLUSÃO.....	35
5.	REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma oleaginosa tradicional, valorizada pelo alto teor nutritivo e pela ampla demanda nos mercados nacional e internacional (ARRIEL; FERREIRA, 2020). Globalmente, a cultura destaca-se pela ampla distribuição, sendo cultivada em 74 países em mais de 13 milhões de hectares (FAO, 2022). No Brasil, sua produção tem crescido devido à adaptabilidade da espécie a regiões semiáridas, consolidando-se como alternativa viável em ambientes com baixa disponibilidade hídrica. A cultura expandiu-se especialmente no Centro-Oeste, onde passou a ocupar grandes áreas como segunda safra, com o Mato Grosso despontando como principal produtor nacional (Altenhofen & Lima, 2024).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025), a região Centro-Oeste produziu 399,4 mil toneladas de gergelim na safra 2024/25, um aumento de 10,55% em relação à safra anterior. Esse avanço resulta da ampliação da área cultivada, do aprimoramento do manejo e da maior demanda. A produtividade também cresceu, passando de 547 para 657 kg ha⁻¹, reforçando o potencial produtivo da cultura sob manejo adequado e a importância da adoção de tecnologias eficientes.

Com a expansão da cultura do gergelim em segunda safra, especialmente no Centro-Oeste, intensifica-se o tráfego de máquinas e implementos, muitas vezes em condições inadequadas de umidade. Esse cenário aumenta a pressão mecânica sobre o solo e torna o sistema mais suscetível à compactação, sobretudo em ambientes arenosos da região.

A compactação do solo constitui uma das principais limitações físicas ao desenvolvimento das plantas, resultando da intensificação do uso de máquinas e implementos agrícolas, que aumenta a pressão exercida sobre o perfil e provoca alterações estruturais significativas. O tráfego contínuo de máquinas e implementos de maior porte favorece a compactação em diferentes profundidades, elevando a densidade do solo e a resistência à penetração, ao mesmo tempo em que reduz a macroporosidade, a conectividade dos poros e o potencial de água disponível para as plantas (Moraes; Bertollo; Debiassi, 2020; Stefanoski *et al.*, 2013).

Para culturas oleaginosas de raiz pivotante, como o gergelim, valores de resistência à penetração na faixa de 2,0 a 2,5 MPa já representam limiar crítico para a limitação do crescimento radicular, conforme demonstrado em estudos com espécies morfológicamente semelhantes (Oliveira *et al.*, 2016).

Esses efeitos tornam-se ainda mais críticos nos Neossolos Quartzarênicos, predominantes no bolsão sul-mato-grossense. A compactação assume relevância ainda maior devido às características intrínsecas desses solos. Por apresentarem textura arenosa, com estrutura pouco desenvolvida e agregação praticamente inexistente, esses solos sofrem compactação sobretudo pelo rearranjo de partículas, pelo colapso dos pontos de contato e pela redução acentuada dos macroporos estruturais. Esses processos físicos provocam queda abrupta da permeabilidade saturada, diminuição da difusão de oxigênio e redução do volume de água facilmente disponível, restringindo a aeração, o fluxo hídrico e o crescimento radicular de maneira mais intensa do que em solos de textura mais fina (Mbarki *et al.*, 2023)

Nesse cenário, a utilização de microrganismos promotores de crescimento (MPCs) surge como estratégia promissora para mitigar restrições físicas impostas pela compactação. Entre esses microrganismos destaca-se *Bacillus aryabhattai*, capaz de promover o crescimento vegetal ao estimular o desenvolvimento radicular, aumentar a absorção de água e nutrientes e conferir maior tolerância a estresses ambientais (Galindo *et al.*, 2018; Hungria; Nogueira; Araujo, 2013; Xiao-ying *et al.*, 2015). A inoculação de sementes com *B. aryabhattai* favorece a formação de biofilme radicular, contribuindo para manter a hidratação das raízes e melhorar a interação solo-planta (Oliveira, 2025)

Além disso, *B. aryabhattai* é reconhecida por sintetizar fitormônios, como o ácido indolacético (AIA), solubilizar fósforo, ativar enzimas antioxidantes e melhorar a estrutura física do solo, promovendo condições mais favoráveis ao enraizamento (Singh *et al.*, 2020 ; May *et al.*, 2019). Estudos recentes indicam que inoculantes à base de *Bacillus aryabhattai* e outras bactérias da mesma família contribuem positivamente para o crescimento inicial de plantas sob estresse hídrico e para o desenvolvimento do sistema radicular, mesmo em ambientes desfavoráveis (Chen *et al.*, 2021; Rana *et al.*, 2022).

Embora estudos recentes demonstrem o potencial do *Bacillus aryabhattai* na promoção do crescimento vegetal sob estresse hídrico, ainda são escassas as pesquisas que investigam sua capacidade de mitigar os efeitos da compactação sobre atributos físicos do solo como densidade, porosidade e resistência à penetração em culturas oleaginosas, especialmente o gergelim cultivado em Neossolos Quartzarênicos degradados fisicamente na região do bolsão sul-mato-grossense. Nesse contexto, torna-se relevante avaliar se a inoculação com esta rizobactéria pode atuar como estratégia complementar de manejo para viabilizar a produção em áreas com histórico de compactação.

Face ao exposto, buscando obter subsídios para desenvolver estratégias de manejo para o cultivo da cultura do gergelim, as hipóteses desta pesquisa são: (i) o incremento do tráfego de máquinas promove a degradação progressiva da estrutura física do Neossolo Quartzarênico, com consequente redução da produtividade do gergelim; (ii) a inoculação com *B. aryabhattai* atenua os efeitos deletérios da compactação, melhorando a porosidade e o crescimento radicular; e (iii) em condições de compactação severa, os benefícios biológicos do inoculante são sobrepostos pelo estresse físico imposto pelo tráfego.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes intensidades de tráfego de trator e da inoculação com *Bacillus aryabhattai* sobre os atributos físicos do solo, a resistência à penetração, a qualidade estrutural avaliada pelo método VESS e a produtividade do gergelim em Neossolo Quartzarênico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização das áreas estudadas

O experimento foi conduzido em áreas pertencentes à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia, localizada nas coordenadas geográficas de 19°05'46.2" S e 51°48'52,6" W, a uma altitude de 516 m. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico (SANTOS *et al.*, 2018), situado no município de Cassilândia - MS. A caracterização granulométrica da área experimental é apresentada na Tabela 1.

Tabela – 1. Caracterização granulométrica da área experimental.

Prof. (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Dp (g.dm ⁻³)	Classe textural
0,00 – 0,10	5,0	5,6	89,4	2,60	Arenoso
0,10 – 0,20	3,3	8,9	87,8	2,62	Arenoso

Todas as análises foram determinadas conforme a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017). Classificação de acordo com Departamento de Agricultura dos EUA (USDA), Dp: Densidade de partículas.

2.2. Aspectos climáticos

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região apresenta clima tropical com estação seca de inverno (Aw)(Alvares *et al.*, 2013). A temperatura média anual é de 24,1 °C, e a precipitação média anual é de 1521 mm.

Durante a condução do experimento (safrinha de 2025), foram monitoradas a temperatura e a precipitação pluviométrica, cujos resultados são mostrados na Figura 1.

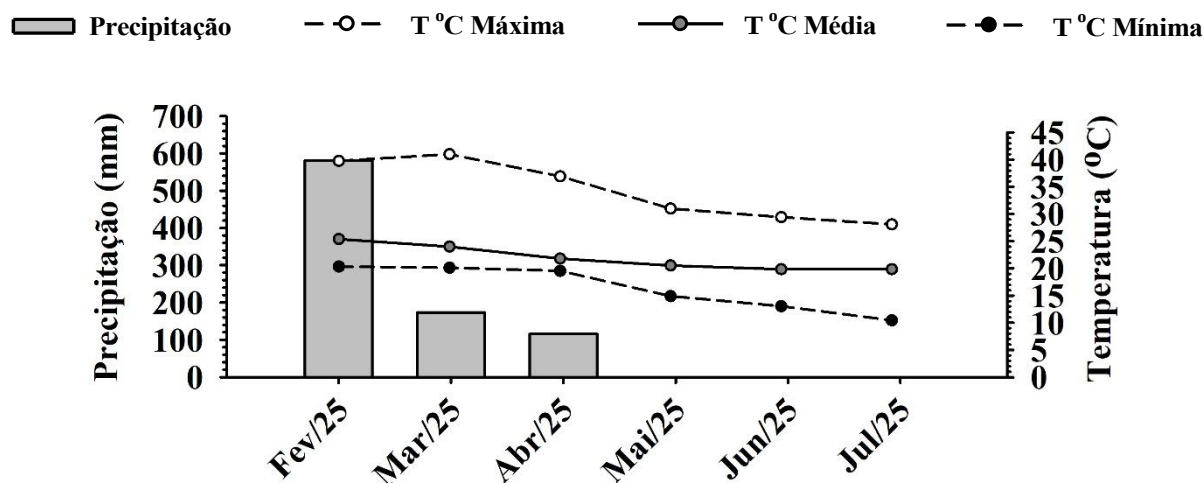


Figura 2 - Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura (°C) mensal durante o ciclo da cultura do gergelim, no município de Cassilândia-MS.

2.3. Caracterização experimental e plano experimental

Antes da implantação do experimento, realizou-se a calagem para correção da acidez do solo, com base na análise química, e, posteriormente, a correção da fertilidade, seguindo as recomendações propostas por (Sousa; Lobato, 2004), com base na análise química da área (Tabela 2).

Tabela – 2. Resultados da análise de solo na camada de 0,0-0,20 m.

pH	M.O.	P resina	Al ³⁺	H+Al	Na	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³					mmolc/dm ³				
6,6	12	13	0	11	-	0,5	28	9	38	49	77

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas, com dimensões de 15,0 m de comprimento e 6,3 m de largura, corresponderam a cinco níveis de compactação obtidos por meio do

tráfego de um trator agrícola New Holland, modelo TL 85 E, com tara de 3.410 Mg, correspondendo a: T0 – ausência de compactação; T1 – uma passada; T2 – duas passadas; T8 – oito passadas; e T16 – dezesseis passadas do trator no mesmo local, abrangendo toda a superfície do solo da parcela experimental. Esses tratamentos foram aplicados na primeira etapa do projeto, conforme descrito por (Júnnyor et al., 2015).

As subparcelas foram constituídas pela inoculação ou não das sementes de gergelim com *Bacillus aryabhattai*. A inoculação das sementes com *Bacillus aryabhattai* foi realizada com o inoculante comercial líquido Acta Ary, na dose de 10 mL kg de semente. As sementes após serem pesadas foram colocadas em saco plástico e posteriormente aplicado o inoculante com auxílio de uma pipeta graduada e agitado de forma a garantir a homogeneidade do inoculante sobre a superfície das sementes. Após a aplicação do inoculante, realizou-se a semeadura do gergelim em cada subparcela, seguindo as recomendações técnicas para a cultura.

A cultivar de gergelim utilizada no experimento foi a K3, a abertura dos sulcos foi realizada com semeadora e a semeadura foram realizadas manualmente, utilizando-se 5 sementes por metro linear espaçadas em 0,45 m entre linhas.

A adubação de plantio foi realizada à lanço utilizando-se o formulado 05 - 24 - 12 (N-P-K) na dose de 10,52 kg do adubo em área total. A adubação de cobertura foi realizada aos 15 e 30 dias após a semeadura utilizando-se 160 g de KCL e 440 g de uréia em doses parceladas.

Os tratamentos fitossanitários adotados na área foram a capina manual evitando que a presença de plantas invasoras influenciasse os diferentes tratamentos de compactação do solo agindo como plantas descompactadoras, visto que algumas plantas invasoras apresentam sistema radicular agressivo.

2.4. Amostragem de solo

Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, utilizando-se trado holandês, e amostras indeformadas em anéis volumétricos de Uhland, com 6,4 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, totalizando quatro amostras por subparcela (dois locais de amostragem × duas profundidades). As amostras foram acondicionadas em filmes plásticos para preservação até a realização das análises químicas e físico-hídricas do solo.

2.5. Determinações físicas do solo

2.5.1. Densidade do solo (Ds)

A densidade do solo (Ds) foi determinada em cada amostra pelo método do anel volumétrico, por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume do anel, conforme a equação 1.

$$D_s = m.s.s/V_t \quad (1)$$

sendo:

Ds = densidade do solo (g.cm⁻³);

m.s.s = peso do solo seco;

Vt = volume total.

2.5.2. Densidade de partículas (Dp)

A densidade de partículas (Dp) foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado (TEIXEIRA *et al.*, 2017), conforme a equação 2.

$$D_p = (M_{bs} - M_b) / [50 - (M_{bsa} - M_{bs}) / D_a] \quad (2)$$

sendo:

Dp = densidade de partículas do solo (g.cm⁻³);

Mbsa = massa do balão + solo + álcool (g);

Mbs = massa do balão + solo (g);

Mb = massa do balão (g);

Da = Densidade do álcool.

2.5.3. Porosidade total (PT)

A porosidade total (PT, dm³ dm⁻³) foi calculada a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas, (TEIXEIRA *et al.*, 2017), segundo a equação 3.

$$PT = [1 - (D_s/D_p)] \quad (3)$$

2.5.4. Microporosidade

A microporosidade foi determinada conforme metodologia de Teixeira *et al.* (2017), submetendo-se as amostras à tensão de -6 kPa.

$$M_i = (a-b)/c \quad (4)$$

sendo:

M_i = Microporosidade ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
 a = massa do conjunto amostra (anel, tecido e elástico) após equilíbrio em -6 kPa (g);
 b = massa do solo seco em 105 °C (g);
 c = volume total da amostra (cm^3).

2.5.5. Macroporosidade

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017)

$$M_a = (P_t - M_i)$$

sendo:

M_a = macroporosidade ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
 P_t = porosidade total ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
 M_i = microporosidade ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

2.5.6. Análise granulométrica

A distribuição das partículas por tamanho foi determinada via agitação rápida (10.000 rpm), utilizando-se NaOH 1N como dispersante químico em contato por 24 horas. As partículas de areia (2,00–0,05 mm) foram quantificadas por tamisagem; as de argila (<0,002 mm) pelo método da pipeta; e o silte (0,05–0,002 mm) foi determinado por diferença entre o conteúdo total e os teores de areia e argila, conforme metodologia de Teixeira et al. (2017).

2.5.7. Determinações químicas do solo

As amostras deformadas foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), e a caracterização química foi realizada conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

2.5.8. Resistência à penetração em Campo

Para o diagnóstico resistência à penetração do solo, foram realizados testes de penetrometria durante o ciclo da cultura, utilizando um penetrômetro semi-automatizado da marca DLG, modelo 2000, cujo haste apresenta 0,0128 m de diâmetro basal do cone e

ângulo de penetração de 30°, conforme norma ASAE S.313.3. Dessa forma tornou-se possível a obtenção de valores de resistência mecânica do solo à penetração (RP) a cada milímetro do solo.

Para tanto, foi delimitada uma malha de amostragem de avaliação da resistência mecânica do solo à penetração, contendo 13 pontos na superfície do solo em intervalos iguais, desde o ponto inicial (Pi) até o ponto final (Pf). Foram realizados testes de penetrometria até 0,40 metros de profundidade dos perfis, perfazendo uma grade de amostragem contendo 780 células por perfil em cada parcela (13 pontos superficiais x 60 pontos de avaliação em profundidade).

2.6. Análise visual da estrutura do solo

Para análise visual da estrutura do solo, foram coletadas amostras na camada superficial do solo (0,25 m). Com o auxílio de uma pá reta foram abertas, em cada tratamento, três minitrincheiras com 0,35 m de largura x 0,45 m de comprimento x 0,30 m de profundidade, para a extração dos blocos de solo. Os blocos de solo foram cuidadosamente retirados e analisados em campo. Para a avaliação procedeu-se à separação de camadas de solo com diferenças estruturais. Para cada camada a avaliação da estrutura apoiou-se na aparência, na resistência e nas características das unidades estruturais de blocos de solo, sendo definida por cinco escores visuais (Ev) para a classificação da qualidade: de Ev=1 (melhor qualidade estrutural) a Ev=5 (pior qualidade estrutural). A Figura 2 exemplifica a atribuição de escores e o cálculo do escore final conforme a chave de classificação de Ball et al. (2007). Os resultados da Análise Visual da Estrutura do Solo foram comparados por meio de gráficos de boxplot.

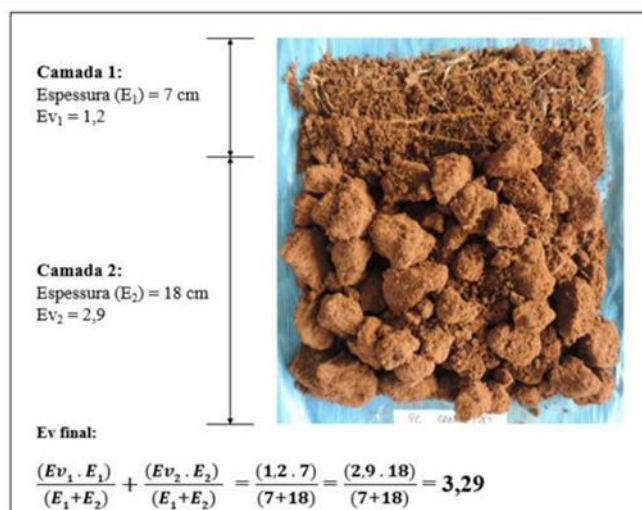


Figura 2 - Exemplo da aplicação da metodologia para obtenção do escore visual (Ev) pelo método de Ball et al. (2007).

2.7. Colheita da cultura

A colheita do gergelim foi realizada manualmente aos 100 dias após a emergência quando as plantas já se encontravam em maturidade fisiológica. A produtividade de grãos do gergelim foi obtida extrapolando-se a produção da área útil da parcela para um hectare, considerando-se a umidade padrão de 13%.

Para a realização da extrapolação, os grãos foram inicialmente pesados e, em seguida, levados à estufa a 75 °C por 72 horas. Após esse período, realizou-se nova pesagem dos grãos juntamente com o recipiente, com o objetivo de calcular a umidade em base úmida. Esse procedimento permite determinar a quantidade de água presente nos grãos em relação à massa total antes da secagem.

2.8. Análise estatística

Os resultados dos atributos físicos do solo e das variáveis produtivas da cultura foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de t de Student (LSD) a 5% de probabilidade. As análises serão realizadas utilizando-se o software estatístico Sisvar versão 5.6 para Windows (Ferreira, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Atributos físicos do solo

Os resultados demonstraram que diferentes níveis de compactação promoveram alterações significativas nos atributos físicos do solo, influenciando na distribuição de poros e densidade do solo, independentemente da posição de amostragem e da inoculação com *Bacillus aryabhattai* (Tabela 3). A compactação do solo promove alterações significativas na qualidade física do ambiente edáfico, principalmente na camada superficial, onde ocorre maior concentração das pressões exercidas pelo tráfego de máquinas agrícolas. Entre os principais efeitos da compactação estão a redução do espaço poroso, o aumento da densidade do solo e as modificações na distribuição dos poros, fatores que comprometem a infiltração de água, as trocas gasosas e o crescimento radicular das culturas (Marré Biazatti *et al.*, 2022).

3.1.1. Porosidade total

Tabela 3 – Porosidade total nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do Neossolo Quartzarênico cultivado com gergelim sob diferentes intensidades de tráfego.

Tratamentos	Posição de amostragem	Inoculação		Médias
	LP	C	S	
0-10 cm				
T0	0,41Aa	0,43Aa	0,39Ab	0,41A
T1	0,37Ba	0,37Ba	0,38Aa	0,37B
T2	0,36Ba	0,39Ba	0,36Aa	0,37B
T8	0,37Ba	0,38Ba	0,38Aa	0,38B
T16	0,36Ba	0,38Ba	0,37Aa	0,38B
CV(%)	7,13			
10-20 cm				
T0	0,43Aa	0,42Aa	0,40Aa	0,41A
T1	0,38Ba	0,37Ba	0,37Ba	0,37B
T2	0,37Ba	0,39Ba	0,34Bb	0,37B
T8	0,36Ba	0,37Ba	0,36Ba	0,36B
T16	0,37Ba	0,36Ba	0,39Aa	0,37B
CV(%)	8,25			

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste LSD a 5% de probabilidade. LP = linha de plantio; C = com inoculação; S = sem inoculação.

A porosidade total apresentou maiores resultados no tratamento sem compactação (T0), diferindo dos tratamentos submetidos à compactação (Tabela 3). De

maneira geral, o aumento da intensidade da compactação promoveu redução na porosidade total entre 7 e 10%, evidenciando a degradação estrutural do solo na camada superficial. Diferenças entre as condições com e sem inoculação sobre esse atributo foram observadas principalmente em condições sem estresse físico. A redução da porosidade total em solos compactados é frequentemente relatada na literatura como consequência da aproximação das partículas sólidas e da reorganização estrutural do solo sob pressão mecânica. Esse comportamento resulta na diminuição dos espaços vazios, especialmente dos macroporos, considerados fundamentais para a movimentação de água e ar no perfil do solo (Mondal; Chakraborty, 2022).

Na camada de 10–20 cm, os efeitos da compactação persistiram na subsuperfície (Tabela 4). A porosidade total apresentou maiores resultados no tratamento sem compactação (T0), enquanto os tratamentos com maiores níveis de tráfego agrícola apresentaram redução de 10 e 12%, respectivamente, evidenciando continuidade dos efeitos da compactação nas camadas subsuperficiais do solo. Diferenças na inoculação foram observadas pontualmente, principalmente no tratamento T0 e T2 (Tabela 4).

A compactação do solo em camadas subsuperficiais promove alterações importantes na qualidade física do solo, principalmente na distribuição do sistema poroso e no aumento da densidade do solo (Colombi *et al.*, 2019). Em profundidades entre 10 e 20 cm, os efeitos do tráfego mecanizado tendem a ser mais persistentes devido à menor capacidade de recuperação estrutural do solo nessa região do perfil (Keller *et al.*, 2021). A compressão das partículas sólidas reduz a continuidade dos poros e compromete processos relacionados à infiltração de água, difusão gasosa e desenvolvimento radicular (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021).

3.1.2. Microporosidade

Tabela 4 – Microporosidade nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do Neossolo Quartzarênico cultivado com gergelim sob diferentes intensidades de tráfego.

Tratamentos	Posição de amostragem	Inoculação		Médias
	LP	C	S	
		0-10 cm		
T0	0,25Ba	0,21Bb	0,26Aa	0,24A
T1	0,21Ba	0,22Ba	0,23Ba	0,23A
T2	0,22Ba	0,22Ba	0,24Ba	0,23B
T8	0,26Aa	0,28Aa	0,24Ba	0,26B
T16	0,22Ba	0,21Ba	0,21Ba	0,21B
CV(%)	15,11			

10-20 cm				
T0	0,22Ba	0,22Ba	0,26Aa	0,24B
T1	0,23Ba	0,25Ba	0,18Bb	0,21B
T2	0,23Ba	0,23Ba	0,24Aa	0,23B
T8	0,25Ba	0,26Aa	0,25Aa	0,26A
T16	0,21Ba	0,20Ba	0,22Ba	0,21B
CV(%)	16,99			

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste LSD a 5% de probabilidade. LP = linha de plantio; C = com inoculação; S = sem inoculação

Para microporosidade na camada de 0 a 10 cm, verificou-se comportamento variável entre os tratamentos, com tendência de incrementos em alguns níveis de compactação, especialmente no tratamento T8, que apresentou aproximadamente 13% de aumento em relação ao tratamento sem compactação (T0) (Tabela 3). Esse comportamento sugere que a compactação promove rearranjo estrutural do solo, reduzindo os macroporos e aumentando proporcionalmente os microporos. Em contrapartida, o tratamento T16 apresentou redução de aproximadamente 12% da microporosidade em comparação ao T0 e cerca de 19% em relação ao T8. A inoculação com *Bacillus aryabhattai* influenciou a microporosidade no tratamento sem compactação, em que a área sem inoculação apresentou maior valor em relação à área com inoculação.

As alterações na microporosidade em áreas compactadas estão associadas ao rearranjo estrutural do sistema poroso. Em níveis moderados de compactação, a redução dos macroporos pode resultar no aumento proporcional dos microporos, favorecendo a retenção de água no solo. Entretanto, em condições mais severas de compactação, ocorre compressão excessiva da matriz do solo, afetando inclusive os microporos e reduzindo a capacidade de armazenamento e disponibilidade hídrica (Bareta Junior *et al.*, 2021).

A microporosidade na profundidade de 10 a 20 cm apresentou comportamento variável entre os tratamentos, destacando-se o tratamento T8, que apresentou incremento de aproximadamente 8% em relação ao tratamento sem compactação (T0) e cerca de 24% em relação ao tratamento T16 (Tabela 4). Esse comportamento sugere rearranjo estrutural do sistema poroso em função da compactação, promovendo aumento proporcional dos microporos. Em relação às posições de amostragem, o tratamento T8 também se destacou por apresentar maiores resultados de microporosidade, principalmente nas condições com inoculação, evidenciando influência da compactação associada à redistribuição dos poros do solo.

Em contrapartida, o tratamento T16 apresentou os menores resultados médios de microporosidade, indicando possível compressão excessiva da matriz do solo em maiores

níveis de compactação. Além disso, diferenças entre condições com e sem inoculação foram observadas em alguns tratamentos, principalmente em T0, T1 e T8 (Tabela 4).

Em níveis moderados de compactação, a redução dos macroporos pode resultar no aumento proporcional dos microporos, favorecendo a retenção de água no solo. Entretanto, em condições de maior intensidade de compactação, pode ocorrer compressão excessiva da matriz do solo, comprometendo inclusive os poros menores e reduzindo a disponibilidade hídrica às plantas (Zhu *et al.*, 2024).

3.1.3. Macroporosidade

Tabela 5 – Macroporosidade nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do Neossolo Quartzarênico cultivado com gergelim sob diferentes intensidades de tráfego.

Tratamentos	Posição de amostragem	Inoculação		Médias
	LP	C	S	
0-10 cm				
T0	0,17Aa	0,21Aa	0,13Ab	0,17A
T1	0,17Aa	0,15Ba	0,15Aa	0,15B
T2	0,17Aa	0,17Ba	0,12Aa	0,14B
T8	0,13Aa	0,10Ca	0,14Aa	0,12B
T16	0,17Aa	0,17Ba	0,16Aa	0,16A
CV(%)	28,51			
10-20 cm				
T0	0,21Aa	0,20Aa	0,14Ca	0,17A
T1	0,15Ba	0,13Bb	0,19Aa	0,16A
T2	0,14Ba	0,16Ba	0,10Ca	0,13B
T8	0,11Ba	0,10Ba	0,11Ca	0,11B
T16	0,16Ba	0,15Ba	0,17Ba	0,16A
CV(%)	38,29			

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste LSD a 5% de probabilidade. LP = linha de plantio; C = com inoculação; S = sem inoculação

Para macroporosidade na profundidade de 0 a 10 cm, o tratamento sem compactação (T0) apresentou melhor condição estrutural, enquanto T8 apresentou os menores valores 11% de macroporosidade, valores próximos ao considerado limitante para as plantas (10%) (Tabela 3). A diminuição dos macroporos evidencia restrição à circulação de água e ar no solo, característica típica de ambientes compactados. Além disso, diferenças entre inoculação e posição de amostragem foram observadas em alguns tratamentos, indicando influência conjunta dos fatores avaliados sobre a manutenção da estrutura porosa. A macroporosidade é considerada um dos atributos mais sensíveis à compactação, pois os poros de maior diâmetro são os primeiros a sofrer deformação sob

pressão mecânica. A redução desses poros compromete a infiltração de água, a difusão de oxigênio e o crescimento das raízes, podendo limitar o desenvolvimento das culturas agrícolas (Suzuki *et al.*, 2022).

Para a profundidade de 10 a 20 cm, a macroporosidade apresentou redução nos tratamentos submetidos à compactação, sendo T8 o tratamento com menores resultados médios (11%), apresentando redução de aproximadamente 35% em relação ao tratamento sem compactação (Tabela 4). A diminuição dos macroporos evidencia restrição à infiltração de água e à circulação de ar no solo, características típicas de ambientes compactados.

Os tratamentos T1 e T16 apresentaram resultados intermediários (16%), enquanto T0 apresentou melhor macroporosidade (17%) (Tabela 4). O tratamento T0 apresentou diferenças entre as posições de amostragem, com maiores resultados nas condições LP (21%) e C em relação à EL (13%). No tratamento T1, foram observadas diferenças entre as condições de inoculação, especialmente na posição C, enquanto em T2 houve diferença na condição sem inoculação, que apresentou menor macroporosidade em relação às demais combinações. Já os tratamentos T8 e T16 apresentaram comportamento mais uniforme entre as posições de amostragem e inoculação (Tabela 4). A macroporosidade é considerada um dos atributos mais sensíveis à compactação, pois os poros de maior diâmetro sofrem deformação mais rapidamente sob pressão mecânica (Colombi *et al.*, 2019).

3.1.4. Densidade do solo

Tabela 6 – Densidade do solo nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do Neossolo Quartzarênico cultivado com gergelim sob diferentes intensidades de tráfego.

Tratamentos	Posição de amostragem	Inoculação		Médias
	LP	C	S	
0-10 cm				
T0	1,56Aa	1,51Aa	1,62Ab	1,57A
T1	1,64Aa	1,67Ba	1,65Aa	1,66B
T2	1,62Aa	1,62Ba	1,69Aa	1,66B
T8	1,62Aa	1,65Ba	1,65Aa	1,65B
T16	1,62Aa	1,64Ba	1,67Aa	1,65B
CV(%)	4,92			
10-20 cm				
T0	1,52Aa	1,55Aa	1,59A	1,57A
T1	1,64Ba	1,66Ba	1,67Ba	1,66B

T2	1,67Ba	1,61Ba	1,74Bb	1,68B
T8	1,68Ba	1,68Ba	1,69Ba	1,68B
T16	1,68Ba	1,69Ba	1,62Aa	1,65B
CV(%)	4,99			

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste LSD a 5% de probabilidade. LP = linha de plantio; C = com inoculação; S = sem inoculação

A densidade do solo apresentou comportamento inverso ao da porosidade total e macroporosidade, com incremento nos tratamentos compactados em comparação ao solo sem compactação. Na profundidade de 0 a 10 cm os maiores níveis de densidade foram observados nos tratamentos T8 e T16, demonstrando maior compactação da camada superficial do solo, enquanto T0 manteve os menores valores de Ds (Tabela 3). A inoculação com *Bacillus aryabhattai* promoveu poucas alterações consistentes sobre esse atributo, indicando que os efeitos da compactação foram predominantes sobre a densidade do solo na camada de 0–10 cm.

O aumento da densidade do solo é outro efeito característico da compactação, decorrente da compressão das partículas sólidas e da redução do volume de poros. Valores elevados de densidade podem limitar o crescimento das raízes, reduzir a infiltração de água e favorecer condições de menor aeração do solo. Estudos recentes demonstram que o aumento da densidade na camada superficial está diretamente associado ao tráfego mecanizado e ao uso contínuo do solo sem práticas adequadas de manejo físico (Marré Biazatti et al., 2022).

Na profundidade de 10 a 20 cm, os tratamentos submetidos ao tráfego de máquinas apresentaram aumento de aproximadamente 5 a 7% na densidade do solo em comparação ao T0, demonstrando maior adensamento da camada subsuperficial (Tabela 4). O tratamento T8 apresentou os maiores resultados médios de densidade do solo, enquanto T0 apresentou os menores valores. A inoculação com *Bacillus aryabhattai* promoveu poucas alterações consistentes sobre esse atributo, indicando predominância dos efeitos mecânicos da compactação sobre a densidade do solo na camada de 10–20 cm (Tabela 4).

Valores elevados de densidade podem restringir o crescimento das raízes, reduzir a infiltração de água e aumentar a resistência mecânica do solo, comprometendo a eficiência do sistema radicular na absorção de água e nutrientes (Colombi et al., 2019). Além disso, a compactação subsuperficial pode reduzir o funcionamento físico e biológico do solo, afetando diretamente a produtividade agrícola (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021).

A utilização de microrganismos promotores de crescimento, como *Bacillus aryabhattai*, tem sido investigada como alternativa para mitigar efeitos de estresses abióticos e contribuir para melhoria da qualidade do solo (Sousa et al., 2023). Espécies do gênero *Bacillus* apresentam potencial para produção de polissacarídeos e substâncias relacionadas à agregação das partículas do solo, favorecendo a estabilidade estrutural e o crescimento vegetal (Deng *et al.*, 2022). Além disso, esses microrganismos podem atuar na adaptação das plantas sob condições de estresse ambiental, contribuindo indiretamente para maior exploração radicular e funcionamento do sistema solo-planta (Sousa et al., 2023).

Este estudo apresenta uma contribuição inédita ao caracterizar de forma integrada os efeitos de diferentes intensidades de tráfego sobre atributos físicos em duas profundidades (0–10 e 10–20 cm) de um Neossolo Quartzarênico, avaliando simultaneamente a interação com *Bacillus aryabhattai*. Poucos trabalhos analisaram a progressão estruturada da compactação em solos arenosos cultivados com gergelim e praticamente nenhum incorpora simultaneamente a variação posicional, a ação microbiana e a comparação entre camadas.

3.2. Análise Visual da Estrutura do solo (VESS)

O uso de análises visuais para avaliar a qualidade do solo e a estrutura possibilita um rápido, seguro e econômico fornecimento de informações necessárias para a implantação de projetos agrícolas, além de ser simples e de aplicação prática com baixo grau de subjetividade quando comparada a outros métodos (Vogel et al., 2016).

De acordo com a metodologia, sistemas que apresentem escores entre 1 e 3 são solos com condições aceitáveis de manejo e qualidade física do solo. Se o escore estiver acima de 3 indica a necessidade de modificações de manejo para que o sistema se torne produtivo e sustentável.

A caracterização dos escores VESS em função de diferentes intensidades de tráfego em Neossolo Quartzarênico constitui um avanço relevante, pois poucos estudos avaliaram a progressão estrutural da compactação nesse tipo de solo sob cultivo de gergelim.

A análise visual da estrutura do solo evidenciou alterações consistentes em resposta ao aumento da intensidade de tráfego mecanizado (Figura 3). Os escores da análise visual da estrutura do solo (Ev) variaram de forma sistemática entre os

tratamentos, revelando degradação estrutural progressiva conforme o número de passadas aumentou.

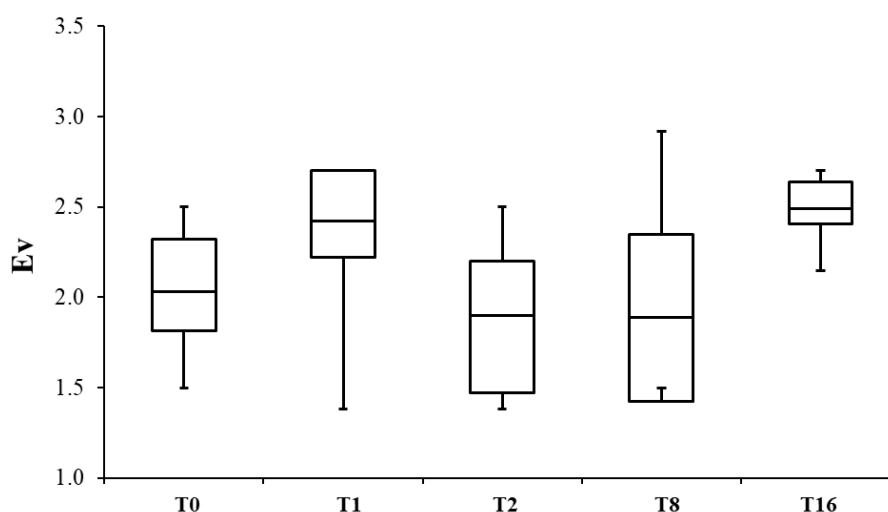


Figura 3 - Boxplot das médias dos escores da análise visual da estrutura do solo para cada tratamento.

O tratamento sem compactação (T0) apresentou escores médios próximos de 2, apresentando menor amplitude dos escores e maior uniformidade estrutural, o que indicou boa qualidade estrutural e adequada continuidade do sistema poroso, condição amplamente associada à funcionalidade física do solo (Ball; Batey; Munkholm, 2007). Em contraste, T1, T2, T8 e, especialmente, T16 apresentaram elevação dos escores (Figura 3), refletindo intensificação da compactação do solo e maior restrição física às raízes.

A maior dispersão observada em tratamentos intermediários, como T1 e T8, revelou elevada heterogeneidade estrutural, padrão atribuído à distribuição irregular das pressões exercidas pelo tráfego e às variações locais na organização dos agregados (Figura 3). Tal comportamento já foi descrito em áreas agrícolas submetidas à compactação mecânica, onde se observam mosaicos estruturais com diferentes graus de restrição física no mesmo perfil (Tuchenhagen *et al.*, 2018). Segundo os autores, essa heterogeneidade pode resultar em zonas com diferentes níveis de restrição física ao crescimento das raízes e movimentação de água no perfil do solo.

Os maiores escores registrados nos tratamentos mais trafegados indicam degradação expressiva da estrutura, associada ao aumento da coesão entre partículas, redução da macroporosidade e diminuição da friabilidade dos agregados, como também relatado por (Cherubin *et al.*, 2016). Esses processos comprometem o ambiente edáfico ao

reduzir infiltração, limitar a difusão de oxigênio e elevar a resistência mecânica ao crescimento radicular (Lipiec; Hatano, 2003). Em Neossolos Quartzarênicos, tais efeitos são intensificados devido à baixa coesão natural e à menor resiliência estrutural desse tipo de solo, resultando em colapso dos macroporos sob pressões moderadas (Hiikansson; Reeder, 1994; Horn; Fleige, 2009).

A avaliação visual da estrutura do solo permitiu identificar padrões espaciais de degradação estrutural pouco documentados para solos arenosos sob cultivo de gergelim. A progressão estrutural da compactação em função do tráfego, observada neste estudo, representa contribuição original, pois estudos anteriores focaram majoritariamente em solos argilosos ou de textura média (Gubiani et al., 2014; Tormena et al., 2002). Os resultados demonstram que a compactação não ocorre de forma homogênea e que ferramentas como o VESS são sensíveis para detectar gradientes estruturais, ampliando a capacidade diagnóstica do manejo.

A comparação entre áreas com e sem aplicação de *Bacillus aryabhattai* evidenciou que a resposta estrutural do solo à inoculação depende do nível de compactação (Figura 4). Em condições sem compactação (T0), a estrutura manteve-se estável, com escores baixos e boa organização física, maior estabilidade dos agregados e menor limitação física ao crescimento radicular (Peixoto et al., 2020).

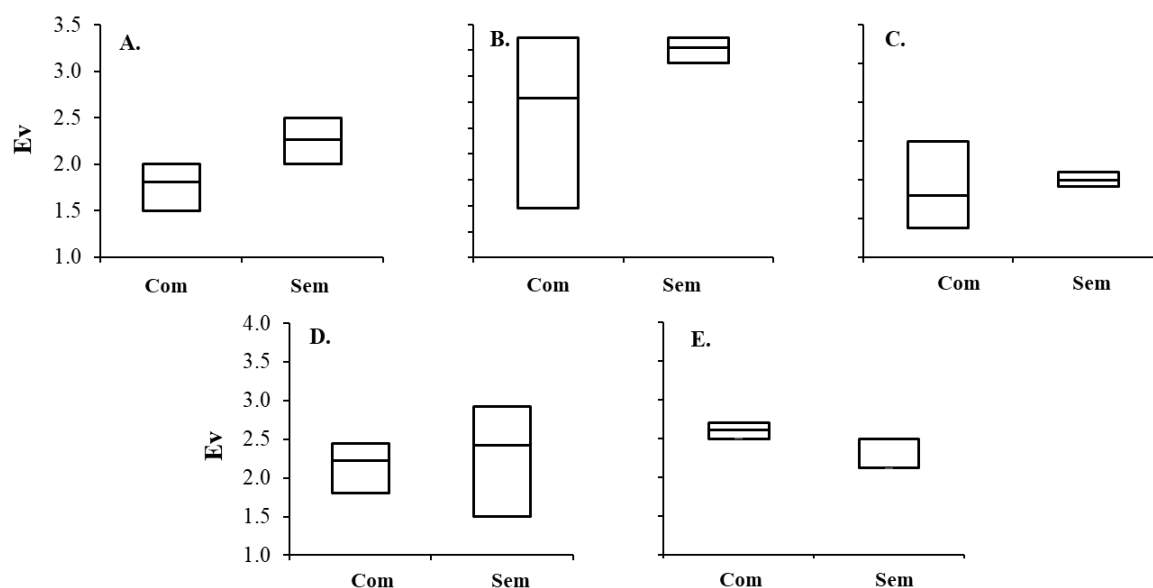


Figura 4 - Boxplot das médias dos escores da análise visual da estrutura do solo para cada tratamento nas áreas com e sem aplicação de *Bacillus aryabhattai*. (A) – T0. (B) – T1. (C) – T2. (D) – T8. (E) – T16.

Entretanto, nos tratamentos submetidos a maiores intensidades de tráfego, os escores elevados mesmo com inoculação sugerem que os possíveis benefícios biológicos

foram superados pela pressão mecânica excessiva. Embora microrganismos do gênero *Bacillus* possam contribuir para agregação das partículas do solo e melhoria da estabilidade estrutural, seus efeitos se tornam limitados quando a compactação alcança níveis que comprometem o sistema poroso (Fernandez-Gnecco et al., 2022).

Embora alguns autores tenham registrado melhoria da agregação do solo e da estabilidade estrutural mediante inoculação microbiana sob estresse físico moderado (Singh et al., 2022), tais benefícios não prevaleceram neste estudo em condições de compactação severa. Adicionalmente, sistemas conservacionistas com maior aporte de matéria orgânica podem mitigar parcialmente os efeitos negativos da compactação (Blanco-Canqui & Lal, 2007), mas esses mecanismos também parecem insuficientes diante do tráfego intenso aplicado em T8 e T16 (Figura 4).

Os resultados da análise visual da estrutura do solo (VESS) demonstraram aumento dos escores visuais (Ev) com o incremento do número de passadas do trator, indicando degradação progressiva da qualidade estrutural do solo. Na condição com inoculação (Figura 5a), os menores valores de Ev foram observados em T0, enquanto os tratamentos T8 e T16 apresentaram maiores escores, indicando maior compactação e comprometimento estrutural do solo.

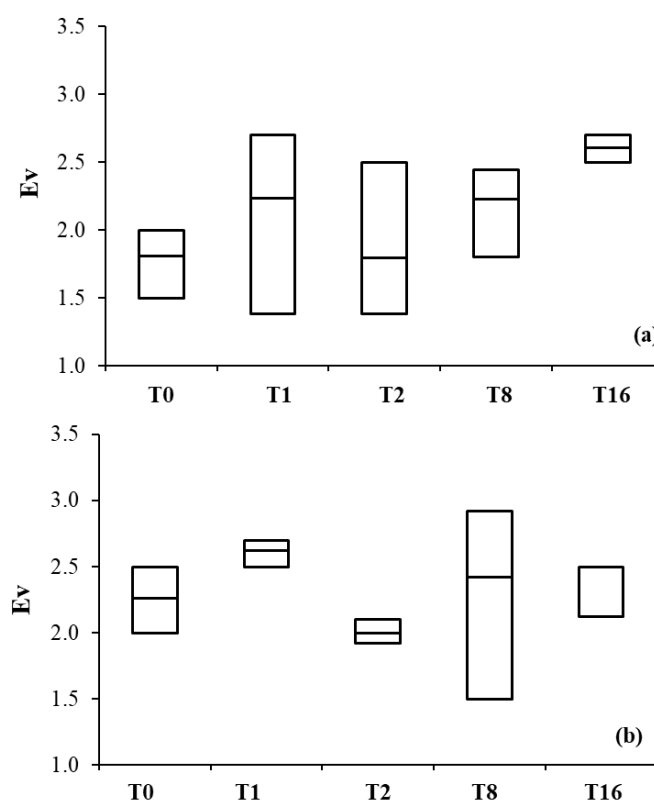


Figura 5 - Boxplot das médias dos escores da análise visual da estrutura do solo de cada subparcela (Com (A) e Sem (B) aplicação de *Bacillus aryabhattai*) dentro de cada tratamento.

Na condição sem inoculação (Figura 5b), observou-se comportamento semelhante, com aumento dos valores de Ev nos tratamentos submetidos a maior intensidade de tráfego, especialmente em T1, T8 e T16. De modo geral, o aumento do número de passadas promoveu piora da estrutura do solo em ambas as condições, refletida pelo aumento dos escores visuais e pela maior heterogeneidade estrutural nos tratamentos mais compactados.

Esse comportamento está diretamente relacionado aos efeitos da compactação mecânica sobre a organização estrutural do solo, promovendo redução da porosidade, aumento da coesão entre partículas e maior resistência física ao crescimento radicular (Keller *et al.*, 2021).

3.3. Resistência à penetração (RP)

A resistência à penetração aumentou progressivamente com o número de passadas do trator, caracterizando intensificação da compactação ao longo do perfil (Figura 6). Esse comportamento foi evidenciado de forma mais clara pelos mapas espaciais, que permitiram identificar zonas contínuas de impedimento mecânico que não seriam detectadas por avaliações pontuais, ampliando a capacidade diagnóstica para fins de manejo.

No tratamento T0, os valores de RP foram baixos e compatíveis com a variabilidade natural do solo; contudo, já em T1 e T2 observou-se incremento moderado na camada de 0–20 cm, indicando compactação inicial. Em T8 e T16, a compactação tornou-se severa, com continuidade vertical dos altos valores de RP e superação do limite crítico para crescimento radicular.

A predominância de valores superiores a 2,5 MPa, especialmente em T16 (Figura 6e), confirma que o tráfego repetitivo promove condições restritivas ao desenvolvimento das raízes, conforme limites já estabelecidos na literatura (Dexter, 1987; Taylor *et al.*, 1966). Esses resultados reforçam que mesmo pequenas intensidades de tráfego alteram de maneira significativa a resistência mecânica do solo, enquanto intensidades mais altas promovem compactação estrutural acentuada.

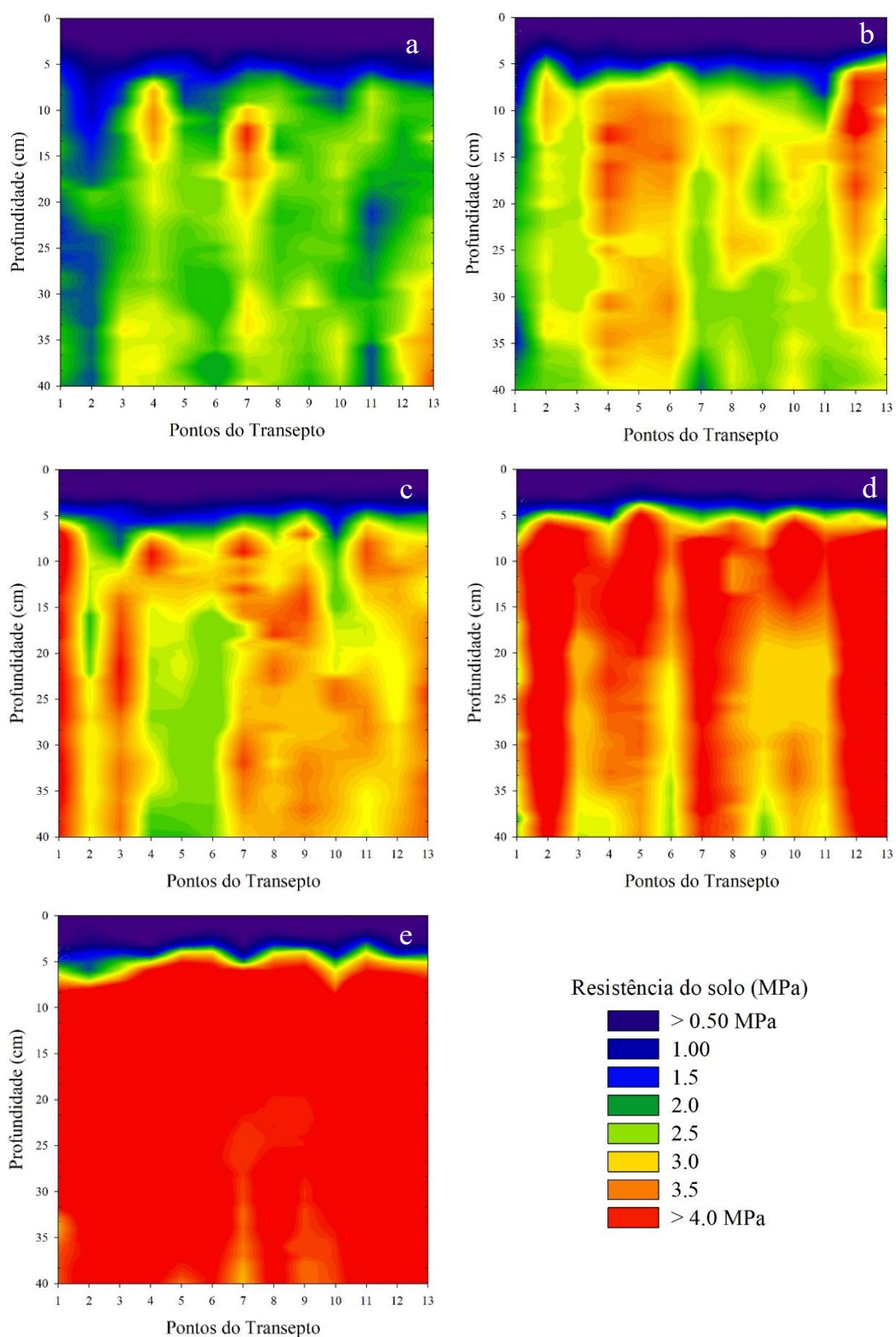


Figura 6 - Mapa de resistência à penetração. (a) - T0 - ausência de compactação; (b) - T1- uma passada; (c) - T2 – duas passadas; (d) - T8 - oito passadas; e (e) - T16 – dezesseis passadas do trator no mesmo lugar.

O aumento de RP observado é explicado pelos mecanismos físicos associados à compactação: aproximação das partículas sólidas, redução do volume total de poros (Hamza & Anderson, 2005) e colapso dos macroporos estruturais, típico de solos de baixa coesão como os Neossolos Quartzarênicos (Hiikansson & Reeder, 1994; Horn & Fleige, 2009). Em solos arenosos, essa perda de continuidade porosa reduz drasticamente a permeabilidade, a difusão de oxigênio e o volume de solo explorável pelas raízes, tornando-os mais suscetíveis ao impedimento mecânico e ao estresse hídrico.

A originalidade deste estudo reside na caracterização espacial contínua da compactação em função de diferentes intensidades de tráfego, algo ainda pouco documentado para solos arenosos sob cultivo de gergelim. Trabalhos anteriores descrevem a variabilidade espacial de RP (Gubiani et al., 2014; Tormena et al., 2002), mas raramente associam esse padrão à evolução progressiva da compactação em Neossolos Quartzarênicos. Os resultados evidenciam que a pressão aplicada pelo tráfego se propaga verticalmente no perfil (Júnnyor et al., 2019), formando zonas compactadas que dificultam a exploração radicular e reduzem a eficiência do uso da água e nutrientes.

A comparação entre tratamentos também mostra que áreas não compactadas apresentaram melhor condição física, com maior continuidade do sistema poroso e menor resistência mecânica às raízes, favorecendo infiltração, aeração e atividade biológica (Batey, 2009). Mesmo assim, pontos isolados de resistência moderada em T0 (Figura 6a) sugerem influência da variabilidade intrínseca ao solo, frequentemente observada em sistemas arenosos (Tuzzin de Moraes et al., 2016).

Além das restrições radiculares, a compactação está diretamente relacionada à redução da infiltração e da condutividade hidráulica, limitando o movimento de água e ar no perfil (Lipiec & Hatano, 2003). Esses efeitos são agravados em solos arenosos, nos quais a perda de macroporos compromete rapidamente a funcionalidade estrutural (Obour & Ugarte, 2021). Por outro lado, sistemas conservacionistas com cobertura vegetal elevada e maior aporte de matéria orgânica demonstram potencial de mitigação, ao promover maior estabilidade estrutural e formação de bioporos (Blanco-Canqui & Lal, 2007; Calonego et al., 2017).

Considerando o avanço recente do gergelim como segunda safra no Centro-Oeste, especialmente em Mato Grosso do Sul, os valores elevados de RP identificados em T8 e T16 (Figura 6d e 6e) mostram que práticas usuais de tráfego podem comprometer a exploração radicular e, conseqüentemente, a produtividade em ambientes arenosos. A continuidade vertical da compactação reduz o volume de solo efetivamente

explorável, limitando a absorção de água e nutrientes, fator crítico para culturas submetidas a períodos de déficit hídrico, como é frequente no cultivo tardio do gergelim.

Em síntese, os resultados demonstram que Neossolos Quartzarênicos apresentam baixa resiliência estrutural ao tráfego, e que a compactação ocorre de forma acelerada mesmo sob poucas passadas. As informações obtidas reforçam a necessidade de manejo criterioso do tráfego em sistemas de segunda safra, destacando a importância de estratégias preventivas para evitar a deterioração física desses solos.

3.4. Produtividade

A produtividade do gergelim foi significativamente afetada pelos níveis de compactação do solo ($p < 0,05$). O tratamento correspondente a duas passagens do trator (T2) resultou na maior produtividade média (923 kg/ha^{-1}), superando o tratamento T1 (572 kg/ha^{-1}), que apresentou o menor rendimento de grãos e situou-se abaixo da média nacional de produtividade da cultura, estimada em 657 kg/ha^{-1} (CONAB, 2025).

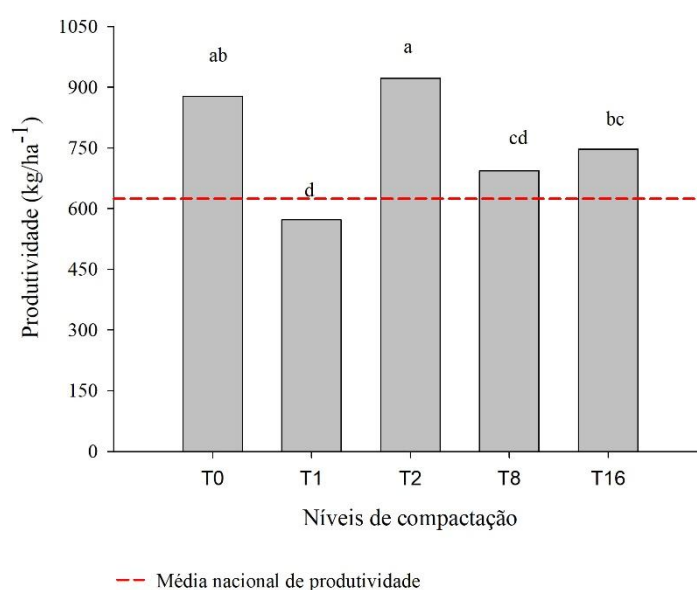


Figura 7 – Produtividade da cultura do gergelim em diferentes níveis de compactação. Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Esses resultados evidenciam que as alterações estruturais do solo decorrentes do tráfego de máquinas exercem um controle físico direto sobre o rendimento fitotécnico do gergelim. A queda de rendimento observada no tratamento com uma passada do trator (T1) está associada à degradação do sistema poroso (redução da macroporosidade e

incremento da densidade do solo), fatores que impõem resistência mecânica ao alongamento radicular. (A restrição física ao crescimento das raízes limita o volume de solo explorado, reduzindo a eficiência de absorção de água e nutrientes Shaheb et al., 2021; Zhu et al., 2024).

Em contrapartida, o incremento produtivo observado no tratamento T2 sugere a ocorrência do fenômeno de densidade ótima ou "compactação benéfica". Desde que a resistência mecânica à penetração não atinja o limite crítico limitante ($> 2,5$ MPa), um ligeiro rearranjo das partículas do solo pode otimizar temporariamente a condutividade hidráulica insaturada e o contato da semente e das raízes com a matriz sólida. Isso favorece a ascensão capilar da água na zona de germinação e o estabelecimento inicial do estande e ainda melhorando a retenção de água, refletindo-se em ganho produtivo final sem causar danos estruturais ao sistema poroso.

Quanto ao fator biológico, a inoculação das sementes com *Bacillus aryabhattai* promoveu um incremento significativo na produtividade de grãos ($p < 0,10$), registrando-se médias de 838 kg/ha^{-1} nas parcelas inoculadas frente a 687 kg/ha^{-1} no controle não inoculado (Figura 8), ou seja, a inoculação promoveu um incremento de 22% na produtividade em relação as sementes que não forma inoculadas.

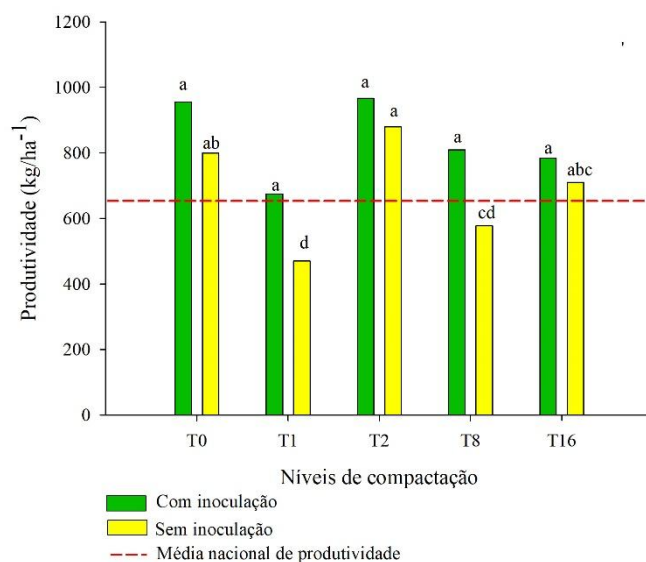


Figura 8 – Produtividade da cultura do gergelim em diferentes níveis de compactação com sementes inoculadas e sem inoculação de *Bacillus aryabhattai*. Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste t a 10% de probabilidade.

Embora a interação entre os fatores (compactação × inoculação) não tenha apresentado significância estatística, o comportamento aditivo do insumo biológico revela-se um achado de elevada relevância prática. Os benefícios fisiológicos promovidos pela bactéria manifestaram-se de forma consistente ao longo dos diferentes ambientes físicos do solo. Esse mecanismo de mitigação do estresse físico é mediado pela capacidade de fitoxinas e fitormônios, como o ácido indolacético (AIA) sintetizado por bactérias do gênero *Bacillus*, em remodelar a arquitetura do sistema radicular (Singh et al., 2022).

Ao estimular o desenvolvimento de ramificações laterais e aumentar a densidade de pelos absorventes, a inoculação compensa plasticamente a restrição mecânica imposta pelo solo adensado. Essa plasticidade radicular assegura a manutenção de taxas satisfatórias de absorção hídrica e nutricional pelas plantas, corroborando os relatos de indução de tolerância ao estresse hídrico descritos por May et al. (2019).

Assim, *B. aryabhattai* consolida-se não apenas como promotor de crescimento, mas como insumo biotecnológico estratégico para conferir resiliência agrônômica a agroecossistemas sob pressão de tráfego agrícola.

4. CONCLUSÃO

O Neossolo Quartzarênico apresenta elevada vulnerabilidade física ao tráfego de máquinas, apresentando um desarranjo estrutural persistente caracterizado pelo aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade, mesmo sob baixa intensidade de passagens do trator (uma passada);

A inoculação das sementes com *Bacillus aryabhattai* atua como uma estratégia biotecnológica eficiente para elevar o teto produtivo do gergelim, atuando de forma consistente e independente da estrutura física do solo;

Em cenários de compactação do solo (acima de oito passadas), as restrições físicas impostas pelo impedimento mecânico do solo sobressaem-se aos benefícios biológicos da inoculação, evidenciando que o insumo biológico não mitiga o colapso estrutural poroso nem substitui as práticas mecânicas de conservação do solo.

5. REFERÊNCIAS

ALTENHOFEN, C. L.; LIMA, I. de L. e. **Qualidade nutricional e bromatológica da silagem de Girassol, Gergelim e Sorgo em sistema de monocultivo e consórcio em Bioma Amazônico**. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA. 2024

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, 6, p. 711–728. 2013.

ARRIEL, N. H. C.; FERREIRA, D. da S. Cultivares de gergelim. . **Em: RETORE, M.; PEZARICO, C. R. (orgs.). Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2020. 4. ed.p. 229–232**

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerkamp test. **Soil use and Management**. v. 23, 4, p. 329–337. 2007

BARETA JUNIOR, E.; SILVA, A. A. P. Da; SENS, T. M. Z. G.; COLECHA, K.; RAMPIM, L.; POTT, C. A. Propriedades físicas do solo em níveis variáveis de compactação do solo. **Research, Society and Development**. v. 10, 2, p. e2341028686. 2021

CASTELO SOUSA, H.; GOMES DE SOUSA, G.; DE ARAÚJO VIANA, T. V.; PRUDÊNCIO DE ARAÚJO PEREIRA, A.; NOJOSA LESSA, C. I.; PIRES DE SOUZA, M. V.; DA SILVA GUILHERME, J. M.; FERREIRA GOES, G.; DA SILVEIRA ALVES, F. G.; PRIMOLA GOMES, S.; BARBOSA DA SILVA, F. D. *Bacillus aryabhattai* Mitigates the Effects of Salt and Water Stress on the Agronomic Performance of Maize under an Agroecological System. **Agriculture (Switzerland)**. v. 13, 6. 2023

CHERUBIN, M.; KARLEN, D.; FRANCO, A.; TORMENA, C.; CERRI, C. E.; DAVIES, C.; CERRI, C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**. v. 267. 2016

COLOMBI, T.; WALDER, F.; BÜCHI, L.; SOMMER, M.; LIU, K.; SIX, J.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; CHARLES, R.; KELLER, T. On-farm study reveals positive relationship between gas transport capacity and organic carbon content in arable soil. **SOIL**. v. 5, 1, p. 91–105. 2019

CONAB. **Levantamento da Safra de Grãos 2024/2025 – 12º levantamento.** Brasília: Conab. 2025

DENG, C.; LIANG, X.; ZHANG, N.; LI, B.; WANG, X.; ZENG, N. Molecular mechanisms of plant growth promotion for methylotrophic *Bacillus aryabhattai* LAD. **Frontiers in Microbiology**. v. 13. 2022

FERNANDEZ-GNECCO, G.; COVACEVICH, F.; CONSOLO, V. F.; BEHR, J. H.; SOMMERMAN, L.; MORADTALAB, N.; MACCARIO, L.; SØRENSEN, S. J.; DEUBEL, A.; SCHELLENBERG, I.; GEISTLINGER, J.; NEUMANN, G.; GROSCHE, R.; SMALLA, K.; BABIN, D. Effect of Long-Term Agricultural Management on the Soil Microbiota Influenced by the Time of Soil Sampling. **Frontiers in Soil Science**. v. 2. 2022

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 35, 6, p. 1039–1042. 2011

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; LUDKIEWICZ, M. G. Z.; ROSA, P. A. L.; TRITAPEPE, C. A. Technical and economic viability of co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars in the Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 22, 1, p. 51–56. 2018

HIKANSSON, I.; REEDER, R. C. **Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response**. [no place]: [no publisher]. 1994. v. 29

HORN, R.; FLEIGE, H. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. **Soil and Tillage Research**. v. 102, 2, p. 201–208. 2009

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and fertility of soils**. v. 49, 7, p. 791–801. 2013

JÚNNYOR, W. da S. G.; SEVERIANO, E. da C.; SILVA, A. G. Da; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R.; MARTINS, B. R. R.; CUSTÓDIO, G. D. Sweet sorghum performance affected by soil compaction and sowing time as a second crop in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, 6, p. 1744–1754. 2015

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; SCHYMANSKI, S. J.; WEISSKOPF, P.; KOESTEL, J.; SOMMER, M.; STADELMANN, V.; BREITENSTEIN, D.; KIRCHGESSNER, N.; WALTER, A.; OR, D. Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. **Soil Science Society of America Journal**. v. 85, 4, p. 1002–1020. 2021

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**. v. 116, 1–2, p. 107–136. 2003

MARRÉ BIAZATTI, R.; BRITO FILHO, E. G. De; BERGAMIN, A. C.; POVODENIAK PAGNUSSAT, E.; DE SOUZA, F. R.; DE ALMEIDA, P. M.; MACHADO DIAS, J. R.; COSTA CAMPOS, M. C.; GOMES DE LIMA, J. M.; ALVES DE OLIVEIRA, S. Effects of the soil compaction on root growth of cover crops in the western Amazon. **Scientia Plena**. v. 18, 7. 2022

MAY, A.; MOREIRA, B. R. A.; MASCARIN, G. M.; VIANA, R. S.; SANTOS, M. S.; SILVA, E. H. F. M.; RAMOS, N. P.; SOARES DE MELO, I. Induction of drought tolerance by inoculation of *Bacillus aryabhattai* on sugarcane seedlings. **Cientifica**. v. 47, 4, p. 400–410. 2019

MBARKI, Y.; GUMIERE, S. J.; CELICOURT, P.; BRÉDY, J. Study of the effect of the compaction level on the hydrodynamic properties of loamy sand soil in an agricultural context. **Frontiers in Water**. v. 5, p. 1255495. 2023

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**. v. 405, p. 115443. 2022

MORAES, M. T. De; BERTOLLO, A.; DEBIASI, H. Impactos da compactação, descompactação e rotação de culturas no SPD. v. 854, p. 63–65. 2020

OLIVEIRA, A. L. P. Déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro comum com inoculação do *Bacillus aryabhattai*. 2025

OLIVEIRA, P. D. De; SATO, M. K.; LIMA, H. V. De; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. Da. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 179, 1, p. 78–87. 2016

PEIXOTO, D.; DA SILVA, L.; MELO, L.; AZEVEDO, R.; ARAÚJO, B.; DE CARVALHO, T.; MOREIRA, S.; CURI, N.; SILVA, B. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**. v. 745, p. 140887. 2020

SANTOS, H. G. Dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. Dos; OLIVEIRA, V. A. De; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. De; ARAUJO FILHO, J. C. De; OLIVEIRA, J. B. De; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: EMPRABA. 2018

SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. **A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production**. [*no place*]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 2021. ISSN: 22341862. DOI: 10.1007/s42853-021-00117-7

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, Edson. **Cerrado : correção do solo e adubação**. 2. ed.: Embrapa Informação Tecnológica. 2004

STEFANOSKI, D.; SANTOS, G.; MARCHÃO, R.; PETTER, F.; PACHECO, L. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 17, p. 1301–1309. 2013

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; ALVES, M. C.; REICHERT, J. M. Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. **Sustainability (Switzerland)**. v. 14, 5. 2022

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMPRABA. 2017

TUCHTENHAGEN, I. K.; DE LIMA, C. L. R.; BAMBERG, A. L.; GUIMARÃES, R. M. L.; PULIDO-MONCADA, M. Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. v. 42. 2018

VOGEL, G. F.; DE SOUZA, N.; DE LIMA¹, A.; ZAROWNI¹, E.; TIAGO BARBOSA¹, G.; FEY¹, R. **METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO**. [*no place*]: [*no publisher*]. [*sem data*]

XIAO-YING, G.; CHUN-E, H.; TAO, L.; ZHU, O. Effect of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on growth of greenhouse tomato and rhizosphere microbial community. **Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)**. v. 22, 3, p. 32–42. 2015

ZHU, X.; PENG, W.; XIE, Q.; RAN, E. Effects of Soil Compaction Stress Combined with Drought on Soil Pore Structure, Root System Development, and Maize Growth in Early Stage. **Plants**. v. 13, 22. 2024