

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

JÚLIA VITÓRIA DA COSTA NEVES

**ANÁLISE DE TRILHA DE ATRIBUTOS AGRONÔMICOS E DA RESISTÊNCIA DO
SOLO À PENETRAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max L.*) EM
SISTEMAS DE CULTIVO CONVENCIONAL E DIRETO**

CHAPADÃO DO SUL-MS
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**ANÁLISE DE TRILHA DE ATRIBUTOS AGRONÔMICOS E DA RESISTÊNCIA DO
SOLO À PENETRAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max* L.) EM
SISTEMAS DE CULTIVO CONVENCIONAL E DIRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Drº. Everton da Silva Neiro



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

AUTOR: Júlia Vitória da Costa Neves

ORIENTADOR: Everton da Silva Neiro

Aprovado pela Banca Examinadora como parte das exigências da disciplina de TCC,
para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo, pelo curso de Bacharelado em Agronomia
da UFMS/CPCS.

Prof. Dr. Everton da Silva Neiro

Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto

Chapadão do Sul, 09 de julho de 2025.

Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. Everton da Silva Neiro

DEDICATÓRIA

*A Deus, por me sustentar em cada passo, me conceder força nos momentos de incerteza e luz
nos dias difíceis.*

*À minha família, base da minha vida, pelo amor incondicional, apoio constante e por
acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei.*

*Ao meu noivo, companheiro fiel, pela paciência, incentivo e por estar ao meu lado em todas
as fases dessa jornada.*

*E aos amigos que, com gestos simples e verdadeiros, tornaram esse caminho mais leve e
cheio de significado.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria, por me conceder forças nos momentos de desafio e serenidade nos dias difíceis.

Aos meus pais, Jamiro e Nilva, por todo amor, sacrifício e apoio incondicional ao longo da minha caminhada.

Ao meu orientador, prof. Dr. Everton Neiro, que desde o início da graduação tem sido mais que um mestre: um verdadeiro amigo. Sua dedicação, ensinamentos e presença constante foram fundamentais para minha formação acadêmica e pessoal.

E aos Professores Drs. Cassiano Roque e Job Oliveira, pela confiança, orientação técnica e contribuição essencial para a realização deste trabalho.

EPIÍGRAFE

"Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens."

Colossenses 3:23

SUMÁRIO

RESUMO.....	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 MATERIAL E MÉTODOS	3
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	6
4 CONCLUSÃO	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação e temperaturas médias durante o período de condução do experimento na safra de 2024/2025 para a cultura da soja	3
Figura 2. Correlação entre os atributos avaliados em SPD	14
Figura 3. Correlação entre os atributos avaliados em SPC	15
Figura 4. Relação entre a produtividade e os demais atributos para o sistema de plantio direto	17
Figura 5. Relação entre a produtividade e os demais atributos para o sistema de plantio convencional	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis estudadas sob SPD	6
Tabela 2. Estatísticas descritivas das variáveis estudadas sob SPC	9
Tabela 3. Estatísticas descritivas da resistência à penetração do solo (MPa) em diferentes profundidades – SPD	11
Tabela 4. Estatísticas descritivas da resistência à penetração do solo (MPa) em diferentes profundidades – SPC	12

RESUMO

A soja é uma cultura agrícola com grande adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas. No entanto, a compactação do solo em solos argilosos e regiões sujeitas a chuvas intensas prejudica o crescimento das plantas e pode reduzir significativamente a produtividade. Este trabalho teve como objetivo avaliar como a produtividade da soja é influenciada por atributos agronômicos e pela resistência do solo à penetração, identificando os efeitos diretos e indiretos dessas variáveis por meio de análise de trilha, em dois sistemas de preparo do solo: sistema de plantio direto e sistema de plantio convencional. Foram analisados: a produtividade da soja, o número de vagens por planta, o número de grãos por planta, a massa de mil grãos e a resistência do solo à penetração, mensurada por um penetrômetro digital da marca Falker (Penetrolog), em profundidades de 0,0 a 0,60 m, com intervalos de 0,05 m. O experimento foi conduzido no campo experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus Chapadão do Sul – MS, sob clima tropical úmido (Aw), entre os meses de setembro de 2024 a fevereiro de 2025. A análise estatística incluiu estatística descritiva, correlações simples, multicolinearidade e análise de trilha, realizadas com os softwares Rbio e GENES. De forma direta e positiva, em ambos os sistemas de preparo do solo, os atributos que melhor representaram a produtividade da soja foram: número de vagens, número de grãos e massa de mil grãos. De forma indireta, observou-se que a resistência do solo à penetração (rp1), na camada de 0,0–0,05 m, sob sistema de plantio direto, influencia negativamente a produtividade. No sistema de plantio convencional, a resistência do solo à penetração (rp4), na camada 0,15-0,20 m, causa influência negativa sobre a produtividade. Dessa forma, à medida que a resistência à penetração do solo nessas determinadas camadas aumenta, o número de vagens, o número de grãos e a massa de mil grãos sofrem impactos negativos e, consequentemente, a produtividade diminui.

Palavras-chave: compactação do solo, penetrometria, desenvolvimento da planta, correlação.

ABSTRACT

Soybean is a crop with high adaptability to various edaphoclimatic conditions; however, soil compaction, particularly in clayey soils and regions with intense rainfall, can hinder plant development and significantly reduce yield. This study aimed to evaluate the influence of agronomic traits and soil penetration resistance on soybean yield, identifying their direct and indirect effects through path analysis under two soil tillage systems: no-tillage and conventional tillage. The variables analyzed included soybean yield, number of pods per plant, number of grains per plant, thousand-grain weight, and soil penetration resistance, measured using a digital penetrometer (Penetrolog, Falker) at depths ranging from 0.0 to 0.60 m, at 0.05 m intervals. The experiment was conducted at the experimental field of the Federal University of Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul Campus (MS), under a humid tropical climate (Aw), from September 2024 to February 2025. Statistical analyses included descriptive statistics, simple correlations, multicollinearity diagnosis, and path analysis using Rbio and GENES software. Results showed that, in both soil tillage systems, the number of pods, number of grains per plant, and thousand-grain weight had a direct and positive influence on soybean yield. A direct relationship indicates that an increase in one variable results in an increase in another, whereas an indirect relationship implies that an increase in one variable causes a reduction in another. An indirect negative effect was observed for soil penetration resistance in the 0.0–0.05 m layer (rp1) under the no-tillage system and in the 0.15–0.20 m layer (rp4) under the conventional system. In both cases, increased penetration resistance negatively affected the yield components, ultimately reducing overall productivity.

Keywords: soil compaction, penetrometry, plant development, correlation.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa de destaque mundial, considerada essencial na produção de proteínas e óleos utilizados tanto na alimentação humana quanto na nutrição animal. Além disso, é amplamente empregada como insumo nas indústrias farmacêutica, de cosméticos e na fabricação de biocombustíveis, como o biodiesel. Os maiores produtores dessa cultura são os Estados Unidos, Brasil, Argentina, China e Índia, que juntos representam aproximadamente 90% do volume global. Apesar da soja apresentar ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, aspectos relacionados ao ambiente, à genética e ao manejo influenciam diretamente a qualidade das sementes e o rendimento da produção (BARBOSA et al., 2024).

O sistema de plantio direto (SPD) é um sistema de manejo onde a semeadura é feita sem fazer preparo do solo convencional (arados e grades), mantendo resíduos vegetais das culturas antecessoras sobre o solo. O sistema baseia-se em três pilares fundamentais: 1- o não revolvimento do solo (restrito à linha de semeadura ou covas para mudas), 2- a cobertura permanente do solo (plantas vivas ou palhadas) e 3- a diversificação de plantas na rotação de culturas (FEBRAPDP, 2022).

No sistema de plantio direto, a ausência do revolvimento do solo associada ao tráfego intenso de máquinas, pode ocasionar a compactação do solo que possivelmente dificulta o manejo do solo, e posteriormente, influencia o desenvolvimento e a produtividade das culturas, pois o sistema radicular da soja possui uma raiz principal e raízes secundárias ao seu entorno, que possuem profundidade de 15 a 180 cm. Caso haja compactação do solo na profundidade de enraizamento da planta e modificação nos atributos físicos do solo, haverá comprometimento de suas características de crescimento e produção (MACHADO, 2021).

O sistema de preparo convencional do solo, caracterizado predominantemente pela utilização de operações mecanizadas como a gradagem e a aração, tem sido amplamente empregado na agricultura em função de sua eficácia na descompactação da camada superficial e na melhoria da aeração do perfil do solo, favorecendo, inicialmente, o desenvolvimento radicular das culturas (HUNAG et al., 2024).

Entre os obstáculos enfrentados no cultivo da soja, destaca-se a compactação do solo, especialmente em solos argilosos e em regiões sujeitas a chuvas intensas. Essa condição prejudica o crescimento das plantas e pode reduzir significativamente a produtividade, além de elevar os custos operacionais (SANTOS et al., 2018). Segundo Basso et al. (2022), esse

fenômeno ocorre quando as partículas do solo são comprimidas umas contra as outras, reduzindo os espaços porosos e a capacidade de retenção de água.

O desempenho produtivo da soja está intimamente ligado à resistência do solo à penetração e à forma como as plantas estão distribuídas no campo. Em pesquisa realizada em Latossolo sob sistema de plantio direto, verificou-se que áreas com maior resistência do solo apresentaram menor rendimento, reflexo de um sistema radicular menos desenvolvido, absorção limitada de água e nutrientes, e menor formação de estruturas reprodutivas como vagens e grãos (OLIVEIRA et al., 2024).

Estimar as perdas de produtividade causadas pela compactação do solo é uma tarefa complexa, pois essa relação depende fortemente da distribuição e do volume das precipitações ao longo do ciclo da cultura. Em certas situações, mesmo com a presença de compactação, os efeitos sobre a produtividade podem ser atenuados se as chuvas forem regulares e suficientes para manter níveis adequados de umidade e oxigenação no solo. Assim, em solos compactados, a associação entre atributos físicos do solo e o rendimento nem sempre é evidente. Para compreender melhor esse impacto, é necessário considerar simultaneamente os atributos físicos do solo, os fatores relacionados às plantas e as condições climáticas (MULAZZANI et al., 2022).

Diante disso, torna-se fundamental investigar as correlações entre características fenotípicas, genéticas e ambientais, bem como a interação entre esses fatores. Nesse contexto, a análise de trilha destaca-se como uma ferramenta estatística robusta para quantificar os efeitos diretos e indiretos de variáveis agronômicas sobre uma característica principal, como a produtividade. Essa metodologia permite calcular coeficientes que indicam o grau de associação entre diferentes atributos, contribuindo para a identificação dos fatores que exercem maior influência no rendimento das culturas. Na cultura da soja, Zuffo et al. (2020) aplicaram essa metodologia e verificaram que o número de vagens por planta, o número de grãos e o peso de mil grãos exerceram efeitos diretos significativos sobre a produtividade, mesmo sob condições de desfolha, reforçando o valor da análise de trilha como ferramenta para o melhoramento e manejo da cultura.

Dessa forma, este trabalho objetivou avaliar como a produtividade da soja é influenciada por atributos agronômicos e pela resistência do solo à penetração, identificando os efeitos diretos e indiretos dessas variáveis por meio de análise de trilha, em dois sistemas de preparo do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no campo experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), localizado no Campus de Chapadão do Sul – MS, durante a safra agrícola 2024/2025. A área experimental está situada nas coordenadas geográficas 18°46'23.0" S e 52°37'13.0" W, com altitude de 813 metros acima do nível do mar. O solo predominante da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, conforme a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tropical úmido do tipo Aw, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.850 mm, com umidade relativa média anual de 64,8%. A temperatura média anual varia entre 13 °C e 28 °C, o que favorece o cultivo de culturas de clima tropical, como a soja. A Figura 1 apresenta as condições que ocorreram no período de desenvolvimento do experimento sendo apresentada a variação diária da temperatura média (°C) e da precipitação (mm) no período compreendido entre 25 de outubro de 2024 e 25 de fevereiro de 2025, correspondente ao ciclo da cultura da soja conduzido na área experimental.

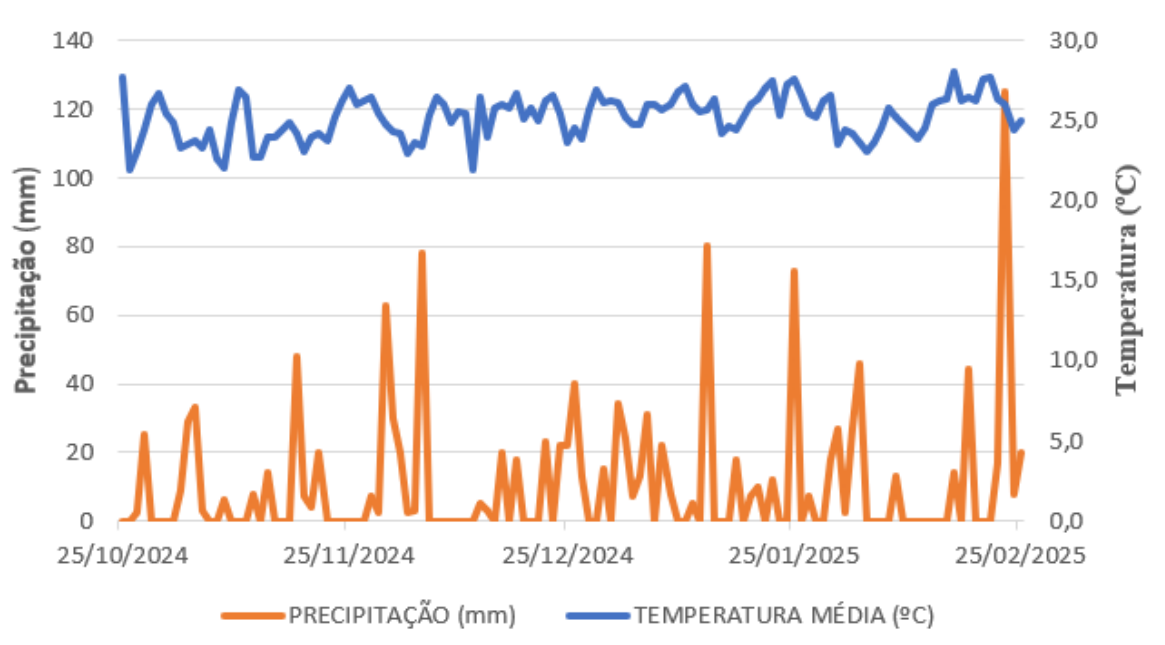


Figura 1. Precipitação e temperaturas médias durante o período de condução do experimento na safra de 2024/2025 para a cultura da soja.

Fonte: INOVAGRI (2025)

De acordo com a Figura 1, durante o período de cultivo (25/10/2024 a 25/02/2025), observou-se que a precipitação total acumulada foi de aproximadamente 1.300 mm, valor superior às exigências hídricas da soja, que variam entre 450 mm e 800 mm ao longo do ciclo, conforme as condições climáticas e edáficas (FARIAS et al., 2007). No entanto, esse volume elevado de chuvas não causou danos à cultura, uma vez que as precipitações foram bem distribuídas ao longo do ciclo da soja. A distribuição regular das chuvas, com picos significativos ao longo do ciclo, favoreceu as fases críticas de desenvolvimento da cultura, como florescimento e enchimento de grãos. Vale destacar que o Latossolo Vermelho distrófico com textura argilosa, presente na área experimental, possui boa capacidade de retenção de água, o que contribuiu para minimizar os efeitos de períodos curtos de déficit hídrico, favorecendo o desenvolvimento das plantas mesmo nos intervalos sem chuvas. É importante ressaltar o pico acentuado de precipitação registrado nos últimos dias antes da colheita, realizada em 25 de fevereiro de 2025, o que pode representar um fator de risco para perdas por deterioração de vagens e grãos, especialmente se a colheita tivesse sido adiada. Entretanto, com a colheita ocorrendo dentro do prazo, foi possível evitar maiores prejuízos decorrentes desse evento climático.

A Figura 1 também mostra que a temperatura se manteve estável, variando entre 21 °C e 28 °C, valores ideais para o bom desenvolvimento da cultura da soja, cuja faixa de temperatura ideal é entre 20 °C e 30 °C (EMBRAPA, 2011).

Em setembro de 2024 a área experimental foi preparada e dividida em dois sistemas de preparo de solo, o sistema de plantio direto (SPD), onde a semeadura foi feita sob a resteva da cultura do milho, e o sistema de plantio convencional (SPC), onde realizou-se uma aração seguida de duas gradagens, no dia 23 de setembro de 2024. A área total possui 1,066 hectares, com dimensões aproximadas de 180 metros de comprimento por 60 metros de largura, que foi dividida ao meio para cada sistema de preparo do solo. No dia 17 de outubro de 2024, foi realizada a aplicação de 1.000 kg ha⁻¹ de calcário em área total, dose estabelecida com base nos resultados da análise de solo.

A semeadura da soja (cultivar Paraguaçu i2x) foi realizada em 25 de outubro de 2024, utilizando uma semeadora Jumil 2670, equipada com caixas individuais para sementes e adubo. As sementes foram previamente tratadas com 300 ml ha⁻¹ de *Bradyrhizobium elkanii*, a fim de garantir a nodulação eficiente e o fornecimento biológico de nitrogênio à cultura.

A adubação de base foi realizada no momento da semeadura, com a aplicação de 300 kg ha⁻¹ do formulado NPK 00-25-15, com proporções de 75 kg de P₂O₅ e 45 kg de K₂O, as

adubações foram realizadas com base nos resultados das análises de solo. A população de sementes foi estabelecida em 15 sementes por metro, e espaçamento de 0,45 m conforme recomendação técnica para a cultivar utilizada.

Durante o desenvolvimento da cultura, foram realizadas aplicações fitossanitárias, a primeira aplicação foi realizada no dia 31/10/2024, utilizando 1,5 kg ha⁻¹ de glifosato (roundup), 0,5 L ha⁻¹ de óleo mineral e 0,5 L ha⁻¹ de fusilade 250 EW. Segunda aplicação dia 21/11/2024, com 1,5 kg ha⁻¹ de glifosato, 1,0 L ha⁻¹ de connect e 0,2 L ha⁻¹ de adjuvante. No dia 29/11/2024 foi realizada a terceira aplicação, utilizando 0,5 L ha⁻¹ de pôquer, 0,2 L ha⁻¹ de ampligo e 0,3 L ha⁻¹ de adjuvante. A quarta aplicação foi realizada dia 06/12/2024 utilizando 0,6 L ha⁻¹ de miravis duo, 0,25 L ha⁻¹ de polytrin e 0,2 L ha⁻¹ de adjuvante.

Dentro de cada sistema foi montada uma malha experimental com 3 linhas. Utilizou-se 5 metros de espaçamento entre as linhas e 10 metros entre os pontos em cada linha. Sendo que, em cada linha foram coletados 12 pontos, totalizando 36 pontos por sistema de preparo de solo. Em cada ponto da malha experimental foram coletadas cinco plantas para avaliação de parâmetros agronômicos, como número de vagens por planta (vag), número de grãos por planta (gra), massa de mil grãos (mil) e produtividade (pro). Além disso, também foram realizadas análises de resistência do solo à penetração (rp) em cada ponto, utilizando o penetrômetro digital da marca Falker (penetrolog). As medições da resistência do solo à penetração foram realizadas em intervalos regulares de 0,05 m, abrangendo a profundidade de 0,0 a 0,60 m. Para fins de análise, estabeleceu-se a nomenclatura das camadas em doze subdivisões consecutivas: rp1 (0,00–0,05 m), rp2 (0,05–0,10 m), rp3 (0,10–0,15 m), rp4 (0,15–0,20 m), rp5 (0,20–0,25 m), rp6 (0,25–0,30 m), rp7 (0,30–0,35 m), rp8 (0,35–0,40 m), rp9 (0,40–0,45 m), rp10 (0,45–0,50 m), rp11 (0,50–0,55 m) e rp12 (0,55–0,60 m).

Para a colheita, foi realizada a dessecação da cultura no dia 13/02/2025, utilizando: Inédito (2 L ha⁻¹), composto por Glufosinato + Carfentrazona, acompanhado do adjuvante LI700 (50 mL ha⁻¹) e óleo nitrogenado (0,5 L ha⁻¹).

A análise estatística dos dados foi realizada com base nos arquivos gerados pelos softwares GENES (CRUZ, 2013) e Rbio (BHERING, 2017). Inicialmente, foi aplicada a estatística descritiva para cada variável. Em seguida, foram calculadas as correlações entre os atributos morfofisiológicos e a produtividade. A matriz de correlações foi utilizada para verificar multicolinearidade entre variáveis, sendo ajustada para garantir a consistência do modelo. Por fim, foi realizada a análise de trilha (path analysis), que permitiu decompor os

efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre a produtividade. Os resultados foram apresentados graficamente por meio de fluxogramas gerados no software GENES.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores descritivos da variável massa de mil grãos, número de vagens por planta, número de grãos por planta e produtividade, incluindo os valores máximo, mínimo, média, desvio padrão, variância, e erro padrão da média, sob SPD.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis estudadas sob SPD.

	MMG (g)	NVP	NGP	PROD. (kg ha ⁻¹)
	(SPD)			
Máximo	192,66	70,80	165,00	3231,14
Mínimo	158,68	42,80	98,20	1066,36
Média	176,08	54,87	127,78	1858,65
Desvio Padrão	7,01	6,89	16,88	498,00
Variância	49,12	47,48	284,89	248004,10
Erro Padrão	1,17	1,15	2,81	83,00

MMG: massa de mil grãos; NVP: número de vagens por planta; NGP: número de grãos por planta; PROD: produtividade; SPD: sistema de plantio direto.

A média de massa de mil grãos observada foi de 176,08 g, valor dentro da faixa esperada para cultivares modernas de soja. De acordo com dados da 39ª Reunião de Pesquisa de Soja – Embrapa Soja (2024), as massas de mil grãos em condições ideais geralmente variam entre 145 g e 185 g, sendo que valores similares ao observado (em torno de 172–176 g) são considerados indicativos de elevada qualidade de grãos em cultivares atuais. O valor máximo registrado foi de 192,66 g e o mínimo de 158,68 g, revelando uma variação de cerca de 34 g entre os extremos, o que pode estar relacionado a variações microambientais, compactação do solo ou desempenho individual das plantas. O desvio padrão de 7,01 g, aliado ao erro padrão da média de 1,17 g, demonstra boa consistência entre os dados coletados nas 36 amostras, conferindo confiabilidade às inferências estatísticas baseadas nesses valores (CRUZ, 2013; BHERING, 2017).

A relação entre a massa de mil grãos e as condições físicas do solo, bem como com a densidade populacional, foi evidenciada por Oliveira et al. (2024), que ao analisarem atributos físicos da soja no Cerrado, identificaram uma correlação significativa entre esses fatores. O estudo mostrou que solos com menor compactação e melhor distribuição de plantas tendem a

favorecer o enchimento de grãos e o aumento da massa individual. Esses achados são coerentes com os dados do presente trabalho, que também evidenciaram variabilidade espacial da massa de mil grãos e sua provável relação com as condições físicas locais do solo.

A média observada de 54,87 vagens por planta indica um bom potencial produtivo da cultura, considerando que o número de vagens está diretamente relacionado à capacidade da planta de formar grãos e, conseqüentemente, ao rendimento final. Esse valor é superior ao encontrado por Dreher et al. (2024), que, em estudo conduzido sob condições agronômicas adequadas, registrou uma média de 42 vagens por planta. A variação entre o mínimo (42,8) e o máximo (70,8) mostra uma variação considerável entre plantas, refletindo diferenças possíveis de manejo, genética e condições ambientais. O desvio padrão (6,89) e a variância (47,48) confirmam essa dispersão dos dados em torno da média. O erro padrão da média (1,15) sugere que a média estimada é precisa e confiável.

O número de vagens por planta representa um dos principais componentes da produtividade da soja, sendo fortemente influenciado pela genética da cultivar, pelo manejo nutricional e pelas condições ambientais, conforme destacado por Pereira et al. (2011). A variabilidade observada pode estar relacionada à disponibilidade de nutrientes e à adaptação da cultivar ao ambiente.

O manejo adequado da adubação nitrogenada pode exercer influência positiva sobre características produtivas de leguminosas, como o número de vagens por planta, a qualidade fisiológica das sementes e o rendimento final da cultura (CRUSCIOL et al., 2003). Embora o estudo tenha sido conduzido com feijão, os resultados são relevantes também para a soja, pois ambas pertencem à família Fabaceae e apresentam respostas semelhantes à disponibilidade de nitrogênio no solo. Isso reforça a importância de uma nutrição equilibrada, mesmo em leguminosas com capacidade de fixação biológica de nitrogênio, para se alcançar maior estabilidade e produtividade. Os autores reforçam que, para maximizar a produtividade, é fundamental considerar o número de vagens em conjunto com outros componentes, como o número de grãos por vagem e massa de mil grãos.

A média de 127,78 grãos por planta indica um bom desempenho da cultura, considerando que o número de grãos é um dos principais componentes da produtividade. A variação entre o valor mínimo (98,2) e o máximo (165,0) mostra que há diferenças importantes entre as plantas, possivelmente relacionadas ao manejo, solo, clima ou material genético.

Assim como o número de vagens, o número de grãos por planta é influenciado por fatores como nutrição, genética e condições ambientais. Estudos de Pereira et al. (2011)

demonstraram que o manejo nutricional adequado pode aumentar o número de vagens e, consequentemente, o número total de grãos por planta, impactando diretamente a produtividade.

A média de 127,78 grãos por planta observada neste estudo representa um desempenho produtivo positivo, mas ainda moderado quando comparado aos valores reportados por Pereira et al. (2011). No estudo deles, conduzido em condições controladas com manejo nutricional adequado, foi relatado um número médio de 142 grãos por planta, resultado diretamente associado ao fornecimento equilibrado de nutrientes à soja, principalmente potássio, fósforo e micronutrientes.

A produtividade média observada neste trabalho foi de 1858,65 kg ha⁻¹, valor que pode ser considerado moderado para a cultura da soja. De acordo com a Embrapa, com base em dados da CONAB do levantamento de maio de 2025, a produtividade média da soja no Brasil na safra 2024/25 foi de cerca de 3 533 kg ha⁻¹ (CONAB, 2025). Esse valor é quase o dobro da produtividade observada neste estudo, que pode ser atribuída a diversos fatores como condições climáticas, manejo do solo e/ou incidência de pragas e doenças.

Estudos realizados em diferentes regiões de Mato Grosso mostraram que a produtividade da soja pode variar entre 2.500 e 3.200 kg ha⁻¹, a depender da cultivar utilizada e das condições climáticas locais, conforme constatado por Roque et al. (2008). Esses valores são substancialmente maiores que os observados no presente estudo, sugerindo que existem possibilidades de incremento produtivo por meio do aprimoramento do manejo, escolha de cultivares e uso de tecnologias agrícolas. Além disso, destacam a importância da correção do solo e manejo nutricional para a maximização da produtividade da soja, ressaltando que solos com deficiência nutricional podem limitar o rendimento final, mesmo com boas condições climáticas. Portanto, a produtividade média encontrada pode ser considerada razoável, porém abaixo do potencial observado em estudos acadêmicos com melhores condições de manejo, indicando margem para melhorias.

A Tabela 2 apresenta os valores descritivos da variável massa de mil grãos de soja, número de vagens por planta de soja, número de grãos por planta de soja e produtividade da soja, incluindo os valores máximo, mínimo, média, desvio padrão, variância, e erro padrão da média, sob SPC.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das variáveis estudadas sob SPC.

	MMG (g)	NVP	NGP	PROD. (kg ha ⁻¹)
	(SPC)			
Máximo	198,24	111,40	251,40	7.098,56
Mínimo	16,66	45,00	102,40	178,47
Média	161,76	75,76	166,93	3.204,70
Desvio Padrão	26,75	16,81	37,75	1.507,84
Variância	715,31	282,73	1.425,37	2.273,59
Erro Padrão	4,46	2,80	6,29	251,31

MMG: massa de mil grãos; NVP: número de vagens por planta; NGP: número de grãos por planta; PROD: produtividade; SPC: sistema de plantio convencional.

A média de 161,76 g para a massa de mil grãos indica um desempenho fisiológico satisfatório da soja sob plantio convencional. Esse valor demonstra que, em média, as plantas conseguiram acumular boa quantidade de matéria seca nos grãos. No entanto, a amplitude elevada entre os valores mínimo (16,66 g) e máximo (198,24 g) sugere grande variabilidade nas condições de desenvolvimento das plantas, o que pode refletir diferenças locais em atributos físicos do solo, como compactação e disponibilidade de água. De acordo com Oliveira et al., (2024), a resistência à penetração do solo é um fator determinante no desempenho produtivo da soja, afetando diretamente características como o número de grãos e a massa de mil grãos. Em seu estudo, conduzido em Latossolo sob plantio direto, os autores verificaram que áreas com maior compactação apresentaram menores valores para essa variável, devido à limitação no crescimento radicular e à menor eficiência na absorção de água e nutrientes.

Apesar das diferenças entre os sistemas de manejo — plantio direto no trabalho de Oliveira et al. (2024) e plantio convencional no presente estudo —, os resultados convergem ao demonstrar que a qualidade física do solo impacta significativamente o enchimento dos grãos. A moderação na variabilidade observada aqui, quando comparada ao estudo anterior, indica que o manejo convencional, quando bem conduzido, pode manter bons níveis de uniformidade, embora com menor estabilidade estrutural a longo prazo.

A média de 75,76 vagens por planta observada sob sistema de plantio convencional representa um valor considerado produtivamente eficiente, indicando bom desenvolvimento das plantas e relativa estabilidade nas condições do ciclo reprodutivo. No entanto, a amplitude entre o mínimo (45 vagens) e o máximo (111,4 vagens) revela variação significativa entre as unidades amostradas, o que pode estar associado a diferenças no microambiente, como compactação do solo, variações na fertilidade, falhas na semeadura e, ainda, interferência de plantas daninhas. A competição dessas espécies com a cultura, especialmente por luz, água e

nutrientes, pode afetar negativamente o florescimento, a formação e o enchimento de vagens, resultando em menor expressão do potencial produtivo em determinadas áreas da lavoura (MELO et al., 2001).

Cultivares de soja, quando cultivadas em condições adequadas, podem formar entre 60 a 100 vagens por planta, variando conforme a densidade de plantas, o manejo adotado e a resposta da cultivar ao ambiente, conforme indicam dados técnicos da EMBRAPA (2011). O valor médio registrado neste estudo posiciona-se dentro dessa faixa, o que reforça o potencial produtivo da área, ainda que a variabilidade observada indique a necessidade de ajustes no manejo para melhorar a uniformidade.

A média de 166,93 grãos por planta reflete um bom desempenho reprodutivo da soja sob sistema de plantio convencional, especialmente quando se considera o potencial médio relatado em estudos agrônômicos. Segundo a EMBRAPA (2011), em cultivares modernas e sob manejo adequado, é comum observar entre 150 e 250 grãos por planta, dependendo do ambiente e do espaçamento adotado. Assim, o valor médio aqui registrado está dentro da faixa produtiva esperada para esse tipo de sistema.

A variação entre o mínimo (102,4 grãos) e o máximo (251,4 grãos), associada a um desvio padrão de 37,75, indica heterogeneidade no desempenho das plantas dentro da área amostrada. Isso pode refletir diferenças em aspectos como uniformidade da emergência, compactação localizada do solo, competição por recursos, falhas no controle de plantas daninhas ou estresses climáticos intermitentes. A Embrapa destaca que, mesmo dentro de uma mesma lavoura, condições microambientais distintas podem impactar diretamente o número de grãos formados, afetando o rendimento final (EMBRAPA, 2011).

A média de 3.204,70 kg ha⁻¹ obtida na área sob plantio convencional indica um nível de produtividade considerado satisfatório para a cultura da soja em condições normais de campo. Trabalhos como o de Doná et al., (2019) relatam que produtividades entre 3.000 e 3.500 kg ha⁻¹ são comuns sob boas condições edafoclimáticas e manejo eficiente da lavoura.

No entanto, o alto desvio padrão (1.507,84 kg ha⁻¹) e a amplitude bastante elevada entre os valores mínimo e máximo evidenciam grande variabilidade na lavoura. Essa oscilação pode estar relacionada à heterogeneidade nas condições físicas do solo, como compactação, densidade aparente e umidade, que influenciam diretamente o crescimento das plantas e a eficiência de absorção de recursos.

A resistência à penetração do solo apresenta relação direta com a produtividade da soja, especialmente em sistemas com manejo mecânico mais intenso, como o plantio convencional,

conforme observado por Oliveira et al. (2024). Áreas com maior compactação apresentaram menor densidade de plantas e menor massa de grãos, refletindo em produtividade inferior.

Mesmo em áreas manejadas sob plantio direto, a variabilidade espacial na resistência do solo pode representar um fator limitante à produtividade da soja, conforme destacado por Marasca et al. (2011). No sistema convencional, onde o revolvimento do solo é mais intenso, essa variabilidade pode ser ainda mais acentuada ao longo do tempo, principalmente devido ao tráfego de máquinas e à exposição direta do solo.

Esses resultados indicam que, embora o SPC possa apresentar boas produtividades médias, a uniformidade do perfil do solo e o controle da compactação são essenciais para garantir estabilidade produtiva.

Na Tabela 3, são apresentados os valores da resistência à penetração do solo (RP) em diferentes profundidades, variando de 0,0 a 0,60 m (RP1-RP12), em área sob sistema de plantio direto. A Tabela traz medidas como valor máximo, mínimo, média, desvio padrão, variância, erro padrão da média e profundidade, para cada camada de 0,5 m.

Tabela 3. Estatísticas descritivas da resistência à penetração do solo (MPa) em diferentes profundidades – SPD.

Variável	Profundidade (m)	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Variância	Erro Padrão
rp1	0,0-0,05	0,331	0,026	0,088	0,0710	0,005	0,012
rp2	0,05-0,10	3,140	0,124	0,749	0,6224	0,387	0,104
rp3	0,10-0,15	2,527	0,429	1,514	0,4563	0,208	0,076
rp4	0,15-0,20	2,753	0,912	1,782	0,4243	0,180	0,071
rp5	0,20-0,25	3,800	1,172	2,077	0,5210	0,271	0,087
rp6	0,25-0,30	3,904	1,178	2,432	0,5547	0,308	0,093
rp7	0,30-0,35	3,417	1,488	2,551	0,5174	0,268	0,086
rp8	0,35-0,40	3,551	1,214	2,447	0,4784	0,229	0,080
rp9	0,40-0,45	3,195	1,200	2,245	0,4133	0,171	0,069
rp10	0,45-0,50	2,912	1,203	2,021	0,3011	0,091	0,050
rp11	0,50-0,55	2,529	1,573	1,880	0,2460	0,061	0,041
rp12	0,55-0,60	2,736	1,343	1,768	0,2973	0,088	0,050

Observa-se um aumento progressivo da RP até a camada de 0,30–0,35 m, que atinge o valor médio mais elevado (2,55 MPa), seguido de uma leve redução nas camadas mais profundas. A partir da profundidade de 0,25 m, os valores médios ultrapassam 2,0 MPa, patamar considerado limitante ao crescimento radicular de culturas como a soja (KLEIN et al., 1998; ROQUE et al., 2008). Esses valores indicam compactação moderada a severa,

principalmente entre 0,20 e 0,45 m, faixa crítica para o desenvolvimento das raízes e absorção de água e nutrientes.

Em estudos conduzidos especificamente em áreas de soja sob plantio direto, Marasca et al. (2011) observaram valores de resistência variando de 2,9 a 4,28 MPa até 0,30 m de profundidade, e ainda que não tenham notado queda direta na produtividade (3887 kg ha^{-1}), os autores destacam o risco de limitações radiculares. Os estudos de Dalchiavon et al. (2011) reforçam que valores superiores a 2,0 MPa apresentam correlação negativa com a produtividade da soja, sendo um alerta para áreas com compactação não visível, mas funcionalmente restritiva. Adicionalmente, Girardello et al. (2017) identificaram que o tráfego de tratores, semeadoras e pulverizadores em áreas sob plantio direto — especialmente em condições de solo úmido — pode intensificar significativamente a compactação entre 0,20 e 0,40 m de profundidade, exatamente onde os maiores valores de RP foram registrados neste estudo.

A Tabela 4 apresenta os dados estatísticos descritivos da resistência do solo à penetração (RP), obtidos em diferentes profundidades, variando de 0,0 a 0,60 m, em área sob SPC. São apresentados os valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão, variância e erro padrão da média, para cada faixa de profundidade, identificada como RP1 a RP12 (0,0-0,60).

Tabela 4. Estatísticas descritivas da resistência à penetração do solo (MPa) em diferentes profundidades – SPC.

Variável	Profundidade (m)	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Variância	Erro Padrão
rp1	0,0-0,05	0,483	0,000	0,159	0,107	0,012	0,018
rp2	0,05-0,10	1,867	0,069	1,003	0,445	0,198	0,074
rp3	0,10-0,15	1,964	0,544	1,411	0,359	0,129	0,060
rp4	0,15-0,20	2,485	0,827	1,720	0,474	0,225	0,079
rp5	0,20-0,25	3,622	1,116	2,110	0,603	0,363	0,101
rp6	0,25-0,30	3,285	1,649	2,362	0,427	0,183	0,071
rp7	0,30-0,35	3,585	1,169	2,511	0,499	0,249	0,083
rp8	0,35-0,40	3,379	0,957	2,423	0,453	0,205	0,076
rp9	0,40-0,45	3,004	1,452	2,168	0,371	0,137	0,062
rp10	0,45-0,50	3,030	1,468	2,077	0,329	0,108	0,055
rp11	0,50-0,55	2,945	1,212	1,963	0,364	0,133	0,061
rp12	0,55-0,60	2,450	1,219	1,799	0,334	0,112	0,056

A análise da resistência à penetração do solo (RP), apresentada na Tabela 4, revela um perfil crescente de compactação ao longo das camadas, com valores médios que variam de 0,16 MPa (0–0,05 m) até 2,51 MPa (0,30–0,35 m). Esse comportamento é típico em sistemas de

plantio convencional, onde há maior revolvimento superficial, mas compactações mais intensas em camadas subsuperficiais, principalmente entre 0,20 e 0,45 m.

Estudos indicam que valores de resistência do solo à penetração (RP) superiores a 2,0 MPa podem representar sérias limitações ao desenvolvimento do sistema radicular da soja. De acordo com Girardello et al. (2014), tais níveis de compactação dificultam a absorção de água e nutrientes, especialmente em condições de déficit hídrico. No presente estudo, observou-se que a maioria das camadas a partir de 0,20 m já apresenta médias de RP acima desse limite crítico, com destaque para as faixas entre 0,25 e 0,45 m, onde foram registrados os maiores níveis de compactação.

A compactação do solo em sistemas de plantio convencional costuma apresentar alta variabilidade espacial da resistência à penetração, o que foi evidenciado neste estudo pelos elevados desvios-padrão observados (exemplo: $RP_5 = 0,60$ MPa). Essa oscilação pode estar relacionada aos resultados heterogêneos nos componentes de produtividade, como o número de grãos e de vagens por planta, conforme apontado por Marasca et al. (2011).

Os valores reduzidos de resistência à penetração nas camadas superficiais (0,0–0,10 m) indicam menor impedimento ao crescimento inicial das raízes, provavelmente em decorrência do revolvimento mecânico promovido pelo preparo do solo. No entanto, essa condição inicial favorável não é suficiente para compensar os efeitos negativos da compactação em profundidade, que restringem o desenvolvimento radicular da soja e limitam o aproveitamento do perfil do solo.

É importante destacar que quanto maior a resistência à penetração, mais difícil é para o sistema radicular da planta explorar camadas mais profundas do solo, o que pode limitar o acesso à água e nutrientes, principalmente em períodos de estiagem. Essa limitação imposta à expansão radicular afeta diretamente o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura, com impacto negativo sobre componentes de rendimento, como número de vagens, número de grãos e massa de mil grãos.

A Figura 2 mostra uma rede de correlações entre variáveis agronômicas e atributos físicos do solo em uma área sob SPD, sendo eles: produtividade (pro), número de grãos (gra), número de vagens (vag), massa de mil grãos (mil), e resistência a penetração (rp) em camadas de 0,0-0,60 m (1-12).

As conexões indicam correlações estatísticas, com linhas verdes representando correlações positivas e linhas vermelhas, negativas. A espessura das linhas demonstra a intensidade da correlação — quanto mais espessa, mais forte é a relação entre os atributos.

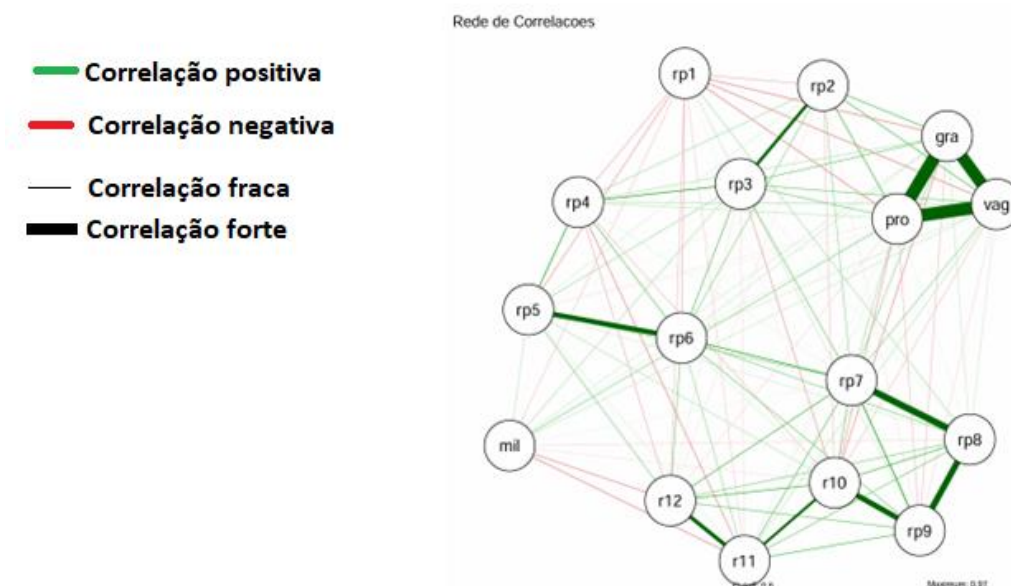


Figura 2. Correlação entre os atributos avaliados em SPD.

Fonte: autores (2025)

A ligação entre número de vagens, número de grãos e produtividade é altamente positiva e com linhas espessas, indicando forte correlação direta. Isso significa que um maior número de vagens tende a resultar em maior número de grãos, e ambos os aspectos impactam diretamente e positivamente a produtividade da soja. Estudo conduzido por Silva et al. (2015) também reforça esse padrão ao demonstrar que cultivares de soja com maior número de vagens por planta apresentaram, de forma consistente, maiores produtividades em ambientes de alta fertilidade, especialmente quando associadas à boa distribuição de plantas na área. Esse padrão corrobora os resultados discutidos anteriormente, em que essas variáveis apresentaram comportamento interdependente sob SPD.

A análise da rede de correlações mostra que a resistência à penetração na camada superficial do solo (rp1) apresenta correlações negativas com variáveis como rp2, rp4, rp5, rp6, rp11 e a massa de mil grãos, indicando uma possível influência indireta sobre os componentes da produtividade. Ainda que essas correlações não sejam intensas, o padrão negativo sugere que maiores valores de compactação superficial estão associados a condições menos favoráveis ao crescimento radicular, o que pode comprometer a absorção de água e nutrientes (REINERT et al., 2008). Essa limitação no desenvolvimento do sistema radicular pode, de forma indireta, impactar negativamente o número de vagens, o número de grãos e, consequentemente, a produtividade, uma vez que essas variáveis apresentaram correlações altamente positivas entre

si. Assim, quanto maior a compactação superficial (rp1), menor tende a ser o desempenho produtivo da soja, mesmo que essa relação ocorra de forma mediada por outros atributos físicos e agronômicos do solo (TORMENA et al., 2007; BEUTLER et al., 2001).

De modo geral a produtividade apresenta uma relação positiva com as resistências a penetrações, uma vez que o solo não apresenta valores altos de compactação (Tabela 5), salvo em alguns pontos de RP, nas camadas mais profundas, como rp7 e rp9.

A Figura 3 apresenta a rede de correlações entre atributos agronômicos da soja e propriedades físicas do solo em uma área manejada sob o SPC. As variáveis analisadas incluem: produtividade (pro), número de grãos (gra), número de vagens (vag), massa de mil grãos (mil) e resistência à penetração do solo (rp), medida em diferentes profundidades, de 0,0 a 0,60 m (rp1 a rp12).

Nesta rede, as linhas conectando os diferentes atributos representam as correlações estatísticas entre eles. As linhas na cor verde indicam correlações positivas. Já as linhas vermelhas indicam correlações negativas. A espessura das linhas reflete a força da correlação: conexões mais espessas representam relações mais intensas, enquanto linhas finas indicam correlações mais fracas ou moderadas.

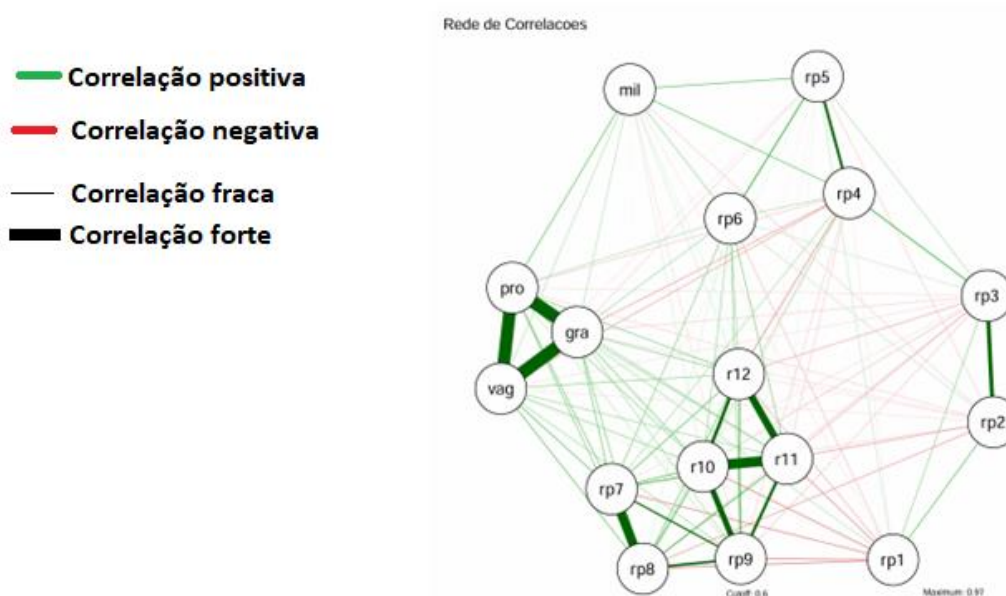


Figura 3. Correlação entre os atributos avaliados em SPC.

Fonte: autores (2025)

Observa-se que as variáveis produtividade, número de grãos e número de vagens compõem um núcleo fortemente correlacionado, evidenciado por linhas verdes espessas,

indicando correlações positivas altas e diretas entre essas variáveis. Essa relação demonstra a dependência mútua entre os componentes de rendimento da cultura, uma vez que o aumento de uma variável está associado ao aumento das outras.

Por outro lado, podemos ver vários pontos de resistência a penetração, que influenciam indiretamente de forma negativa a produtividade, de modo que o crescimento de uma variável está ligado à redução de outra, podemos ver isso nos pontos rp1 a rp6.

Assim, os resultados indicam que a produtividade da soja está mais fortemente associada às características morfofisiológicas da planta (como vagens e grãos), mas pode ser comprometida indiretamente pela presença de camadas compactadas, especialmente a partir dos 0,25 m de profundidade. A alta interdependência entre as camadas rp6 a rp9 reforça a necessidade de adoção de estratégias de manejo que promovam a descompactação do perfil do solo em profundidade, especialmente em áreas manejadas sob sistema convencional, a fim de garantir um ambiente favorável ao pleno desenvolvimento radicular e, por consequência, ao potencial produtivo da cultura.

As plantas geralmente respondem ao aumento da compactação do solo diminuindo o comprimento de suas raízes e reduzindo a formação de raízes laterais, o que compromete a profundidade e o alcance do sistema radicular, além de alterar sua distribuição ao longo do perfil do solo. Os efeitos negativos da compactação sobre o desenvolvimento das plantas variam conforme a espécie cultivada e as características físico-químicas do solo. De modo geral, a compactação nas camadas mais superficiais apresenta maior potencial para limitar o crescimento das raízes do que a compactação em profundidade. Além disso, foi observado que, em solos compactados, a restrição ao crescimento vegetal pode ser atenuada quando há elevada disponibilidade de água, possivelmente porque a resistência máxima que a raiz consegue vencer está relacionada ao turgor gerado na zona de crescimento e à morfologia da extremidade radicular (FRENE et al., 2024).

A Figura 4 ilustra, por meio de um fluxograma, as interações entre atributos físicos do solo e variáveis agronômicas da soja em área sob SPD.

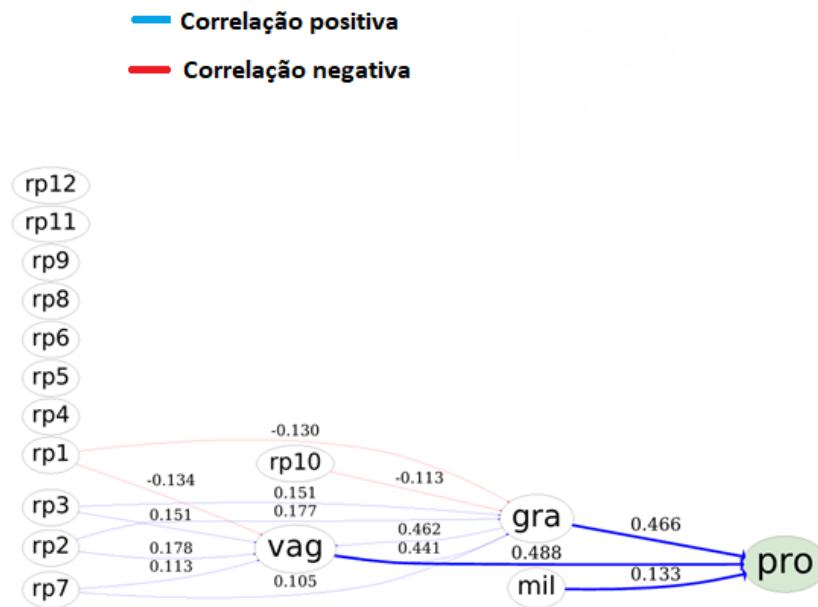


Figura 4. Relação entre a produtividade e os demais atributos para o sistema de plantio direto.
Fonte: autores (2025)

As linhas do fluxograma representado na Figura 4 ilustram as correlações entre os atributos analisados, sendo que as linhas azuis indicam correlações positivas e as linhas vermelhas indicam correlações negativas. A produtividade da soja é fortemente influenciada de forma direta e positiva pelo número de grãos, número de vagens e pela massa de mil grãos, indicando que o aumento desses componentes reprodutivos contribui significativamente para o aumento da produtividade da soja e consequentemente do rendimento final da cultura. De forma indireta, observou-se que a resistência à penetração na camada superficial rp1 exerceu influência negativa sobre o número de grãos e o número de vagens, ou seja, quanto maior o grau de compactação superficial, menor tende a ser o desenvolvimento dessas estruturas, o que, por consequência, compromete a produtividade.

Esse comportamento está de acordo com os resultados de OLIVEIRA et al., (2024), que destacam a forte contribuição dessas variáveis reprodutivas para o rendimento da cultura. Tais relações são visualizadas pelas linhas azuis do fluxograma, que indicam correlação positiva entre os fatores, reforçando a interdependência entre os componentes do rendimento.

A Figura 5 ilustra, por meio de um fluxograma, as interações entre atributos físicos do solo e variáveis agronômicas da soja em área sob SPC. Podemos observar que o número de grãos, o número de vagens e a massa de mil grãos influenciaram de forma direta e positiva na produtividade da soja, demonstrando a forte correlação entre os componentes do rendimento.

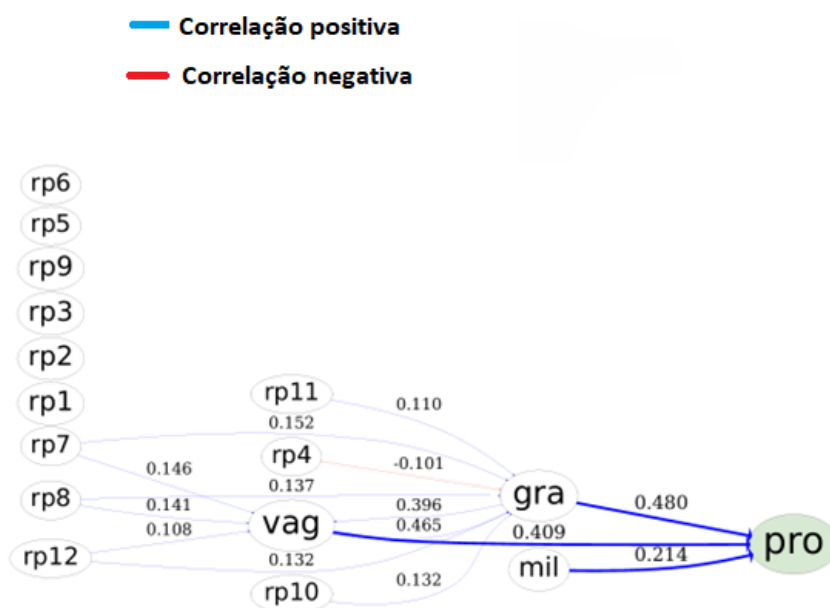


Figura 5. Relação entre a produtividade e os demais atributos para o sistema de plantio convencional.

Fonte: autores (2025)

No SPC, as camadas superficiais de resistência à penetração do solo, representadas por rp1, rp2 e rp3, não apresentaram correlações significativas com as variáveis agronômicas. No entanto, a camada rp4 (0,15–0,20 m de profundidade) mostrou uma influência indireta e negativa sobre o número de grãos, evidenciando que, à medida que a resistência à penetração aumenta nessa profundidade, ocorre uma redução na formação de grãos.

Essa observação é coerente com os resultados apresentados por (OLIVEIRA et al. 2024), os quais apontam que a compactação do solo em camadas intermediárias pode prejudicar o crescimento radicular da soja, dificultando a absorção de água e nutrientes, o que impacta diretamente no desenvolvimento das estruturas reprodutivas da planta, como o número de grãos. O estudo ressalta que áreas com maior densidade do solo ou com impedimentos físicos ao crescimento das raízes apresentaram menor número de vagens e grãos por planta, refletindo negativamente no rendimento final da cultura. Assim, o comportamento observado para RP4 no presente estudo confirma a importância do manejo adequado do perfil do solo, especialmente em profundidades críticas, para garantir o bom desempenho produtivo da soja.

Podemos observar que o número de grãos, número de vagens e a massa de mil grãos influenciaram na produtividade da soja, de forma direta e positiva.

Tanto no SPD e no SPC, o número de grãos, número de vagens e massa de mil grãos influenciam diretamente de forma positiva a produtividade dos grãos de soja. Esses resultados indicam que o aumento desses atributos está fortemente associado ao incremento do rendimento da cultura. No entanto, ao analisar mais profundamente as interações entre as variáveis em cada sistema de manejo, é possível perceber diferenças relevantes quanto aos efeitos da compactação do solo e sua interferência no desenvolvimento da planta. Essas evidências mostram que, embora ambos os sistemas de manejo apresentem componentes reprodutivos como principais determinantes da produtividade, os efeitos da compactação do solo ocorrem em profundidades distintas. No SPD, o impacto é mais evidente na superfície, enquanto no SPC, a limitação ocorre em camadas subsuperficiais.

As resistências RP que não estão chegando linhas nela, não foram significativas a 5% de probabilidade.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os fatores que mais influenciam diretamente a produtividade da soja em ambos os sistemas de manejo (SPD e SPC) são o número de grãos, o número de vagens e a massa de mil grãos, apresentando correlações positivas fortes e consistentes. Esses componentes reprodutivos demonstraram ser determinantes no rendimento final da cultura.

Por outro lado, de forma indireta, a resistência à penetração do solo, especialmente em camadas superficiais (rp1) e em camadas intermediárias (rp4), exerceu influência negativa sobre a produtividade. De modo que, com o aumento da resistência do solo à penetração nessas camadas, há uma redução no número de vagens por planta e no número de grãos, o que impacta diretamente os componentes de rendimento da soja e, conseqüentemente, sua produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 8, n. 1, p. 291–293, 2013. Acesso em: 20 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100001>;
- ARATANI, R. G. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 677-687, 2009. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300020>;
- BARBOSA, A. S. et al. Análise de trilha em cultivares de soja submetidas a tratamento com bioestimulante. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, [S. l.], v. 22, n. 7, p. e5603, 2024. Acesso em: 04 de julho de 2025. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5603>;
- BARRETO, R. C. et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbono loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 132, p. 243-251, 2009. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/235572849_The_impact_of_soil_management_on_a_ggregation_carbon_stabilization_and_carbon_loss_as_CO2_in_the_surface_layer_of_a_Rhod ic_Ferralsol_in_Southern_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/235572849_The_impact_of_soil_management_on_a_ggregation_carbon_stabilization_and_carbon_loss_as_CO2_in_the_surface_layer_of_a_Rhod_ic_Ferralsol_in_Southern_Brazil);
- BASSOI, L. H.; SANTOS, R. F.; DUARTE, A. P. A.; JADOSKI, S. O. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with DSSAT. **Agricultural Systems**, [S.l.], v. 196, p. 103330, 2022. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103330>;
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>;
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 146–151, 2007. Acesso em: 21 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100008>;
- BHERING, L. L. RBIO: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17, p.187-190, 2017. Acesso em: 30 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>;
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: safra 2024/25**, v. 12, n. 9 (nono levantamento), Brasília, junho 2025.
- CRUSCIOL, C. A. C.; LIMA, E. D.; ANDREOTTI, M.; NAKAGAWA, J. Efeito do nitrogênio sobre a qualidade fisiológica, produtividade e características de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 25, n. 1, p. 27–33, 2003. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222003000100017>;

CRUZ, C. D. GENES: software para análise de dados em estatística experimental e em genética quantitativa. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013. Acesso em: 30 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>;

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 480 p. Acesso em: 30 de junho de 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292797696_Modelos_biometricos_aplicados_ao_melhoramento_genetico;

DALCHIAVON, F. C. et al. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no Cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8–19, 2011. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/8351>;

DONÁ, S. et al. Desempenho agrônômico de cultivares de soja no Vale do Paranapanema, safras 2017/18 e 2018/19. **Nucleus**, Edição Especial, 2019. Acesso em: 30 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3738/1982.2278.3626>;

DREHER, D. R. et al. Produtividade de diferentes cultivares de soja. Sinop, MT: **Embrapa Soja**, 2019. 5 p. (Comunicado Técnico, 132). Acesso em: 10 de julho de 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1119776/produtividade-de-diferentes-cultivares-de-soja?utm_source=;

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados econômicos da soja. Londrina: **Embrapa Soja**, 2025. Acesso em: 21 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>;

EMBRAPA. Tecnologia de produção de soja – Região Central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p. (**Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 14**). Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/63093/1/14.pdf>;

EMBRAPA SOJA. Resumos expandidos: 19ª Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, Londrina, PR. Londrina: Embrapa Soja, 2024. (Eventos Técnicos, n. 4). e-ISSN. Acesso em: 10 de julho de 2025. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1166046/1/ETC-4-JA-2024.pdf?utm_source=;

FARIAS, J. R. B; NEPOMUCENO, A. L; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007. (**Circular Técnica, 48**). Acesso em: 20 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>;

FEBRAPDP – Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto. (2022). Evolução da área sob plantio direto no Brasil. Acesso em: 10 de julho de 2025. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/download/14588evolucao-pd-no-bbasil-2021-jpg.jpg>;

FOLLONI, J. S.; SIMONETI, S. L. L.; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**,

v. 30, n.1 p. 49-57, 2006. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100006>;

FRENE, JP, PANDEY, BK E CASTRILLO, G. Sob pressão: elucidando a compactação do solo e seu efeito nas funções do solo. **Plant Soil** 502, 267–278 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>;

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1211–1222, 2014. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: [10.1590/S0100-06832014000400020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020);

GOZUBUYUK, Z. et al. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. **Catena**, v. 118, p. 195-205, 2014. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260807615_Tillage_effects_on_certain_physical_and_hydraulic_properties_of_a_loamy_soil_under_a_crop_rotation_in_a_semi-arid_region_with_a_cool_climate;

HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.4, p.1320-4, 2002. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30501000/HerrickJones2002Penetrometer.pdf>;

HUNAG, Q. et al. The effects of tillage systems and cover crops on soil quality and soybean yield. **Agriculture**, Basel, v. 14, n. 12, p. 2119, 2024. Acesso em: 10 de julho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122119>;

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 154 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111140/tde-20200111-151027/publico/KleinVilsonAntonio.pdf>;

MACHADO, T. M. Níveis de compactação e sistemas de preparo sobre atributos físicos do solo e produtividade da soja. 2021. 73 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021. Acesso em: 10 de julho de 2025. Disponível em: https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-DOCTORADO-AGRONOMIA/Disserta%C3%A7%C3%B5es%20Defendidas/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Thayna%20Mendes%20Machado.pdf?utm_source=;

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Revista Biociências**, Uberlândia, v. 2, p. 239–246, 2011. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7128>;

MELO, H. B. et al. Interferência das plantas daninhas na cultura da soja cultivada em dois espaçamentos entre linhas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 263–271, 2001. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582001000200005>;

MULAZZANI, R. P; GUBIANI, P. I; ZANON, A. J; DRESCHER, Marta Sandra; SCHENATO, Ricardo Bergamo; GIRARDELLO, Vitor Cauduro. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. *Agricultural Systems*, v. 203, p. 103523, dez. 2022. DOI: 10.1016/j.agry.2022.103523

OLIVEIRA, Job T. de et al. Spatial autocorrelation of soybean plant populations and physical attributes of Oxisol. **ResearchGate**, 2024. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e264872>;

PEREIRA, R. G. et al. Sistemas de manejo do solo: soja [*Glycine max* (L.)] consorciada com *Brachiaria decumbens* (STAPF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 44–51, 2011. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.6981>;

REICHERT, J. M. et al. Diagnóstico da compactação do solo. In: CERETTA, C. A.; REICHERT, J. M. (org.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. v. 5, p. 49–94. Acesso em: 21 de junho de 2025. Disponível em: https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/2007_Topicos.pdf;

RODRIGUES, C. K; LOPES, E. da S. Análise espacial da compactação do solo causada pelo sistema de colheita de madeira de árvores inteiras. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 65, n. 3, p. 241–248, 2018. Acesso em: 21 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865030002>;

ROQUE, M. W. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805–1814, 2008. Acesso em: 28 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/cdp3PRYCnj6gXn8VJbJnT7g/?lang=pt>;

SÁ, M. A. C. de et al. Compactação do solo e produtividade da cultura da soja em área irrigada no Cerrado. Planaltina, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Cerrados; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 177. Acesso em: 21 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/572302/1/bolpd177.pdf>;

SANTOS, H. G. dos, et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: **Embrapa**, 2018.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: Soil physical and mechanical aspects. **Soil & Tillage Research**, v.93, p.28-43, 2007. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/150180/eth-29985-02.pdf>;

SANTOS, H. G. dos et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. Acesso em: 20 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>;

SANTOS, M. H. F. dos et al. Estimativa da compactação através da resistência do solo à penetração em solo sob diferentes culturas e mata nativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, n.27, 2015. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: https://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/8mCLLwccCbCMkub_2015-7-20-19-21-22.pdf;

SEIXAS, C. D. S. et al. Tecnologias de produção de soja. Londrina, PR: **Embrapa Soja**, 2020. Acesso em: 20 de junho de 2025. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1123928>;

SILVA, V. R.; REINERT, D. J. REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo vermelho-escuro e de um Podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 24, p. 239-249, 2000. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200001>;

TABOADA, M. A.; ALVAREZ, C. R. Abundância de raízes de milho (*Zea mays* L.) em solos de Argentina sob preparo convencional e plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, p. 769-779, 2008. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/abundancia-de-raizes-de-milho-zea-mays-l-em-solos-de-argentina-sob-preparo-convencional-e-plantio-direto/>;

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v.102, n.1, p.18-22, 1966. Acesso em: 29 de junho de 2025. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1966/07000/soil_strength_root_penetration_relations_for.2.aspx.

VERMA, V.; YADAV, M.S.; KUMAR, A.; GATHIYE, G.S. Correlation and path analysis for seed yield and components traits in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.9, n.1, 2278-2280, 2020.