



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

LUAN ARAÚJO DE SOUZA

**EFEITO DA PRESENÇA DE CASCALHO SUPERFICIAL NA PRODUTIVIDADE
DA SOJA (*Glycine max* (L.) EM ÁREA AGRÍCOLA NO MUNICÍPIO DE
MIRACEMA DO TOCANTINS – TO**

PALMAS

2026

LUAN ARAÚJO DE SOUZA

**EFEITO DA PRESENÇA DE CASCALHO SUPERFICIAL NA PRODUTIVIDADE
DA SOJA (*Glycine max* (L.) EM ÁREA AGRÍCOLA NO MUNICÍPIO DE
MIRACEMA DO TOCANTINS – TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso Superior Bacharelado
em Engenharia Agrônômica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins - Campus Palmas - TO, como
exigência à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Agrônômica.

Orientador: Dr. Edvaldo Vieira Pacheco
Santana

Coorientador: Dr. Bruno Machado Carneiro

PALMAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

D278e de Souza, Luan Araújo
EFEITO DA PRESENÇA DE CASCALHO SUPERFICIAL NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max* (L.) EM ÁREA AGRÍCOLA
NO MUNICÍPIO DE MIRACEMA DO TOCANTINS – TO / Luan Araújo
de Souza. – Palmas, TO, 2026.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2026.

Orientador: Dr. Edvaldo Vieira Pacheco Sant’ana
Coorientador: Dr. Bruno Machado Carneiro

1. Casacalho Superficial. 2. Produtividade de Soja. 3. Agricultura de
Precisão. I. Sant’ana, Edvaldo Vieira Pacheco. II. Carneiro, Bruno Machado.
III. Título.

CDD 630

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e
pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS - TO
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

LUAN ARAUJO DE SOUZA

EFEITO DA PRESENÇA DE CASCALHO SUPERFICIAL NA PRODUTIVIDADE DA SOJA (*Glycine max* (L.) EM ÁREA AGRÍCOLA NO MUNICÍPIO DE MIRACEMA DO TOCANTINS – TO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior Bacharelado em Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - *Campus* Palmas - TO, como exigência à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Aprovado em: 11 de junho de 2026

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Edvaldo Vieira Pacheco Sant'Ana
IFTO - Campus Palmas - TO

Prof. Dr. Bruno Machado Carneiro
IFTO - Campus Palmas - TO

Prof. Dr. Thomas Vieira Nunes
IFTO - Campus Palmas - TO



Documento assinado eletronicamente por **Edvaldo Vieira Pacheco Santana, Coordenador**, em 11/06/2026, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Machado Carneiro, Servidor**, em 11/06/2026, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thomas Vieira Nunes, Servidor**, em 11/06/2026, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3214504** e o código CRC **4AF40EF0**.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS

Campus Palmas 310 Sul, Av. LO 5, s/n, esquina com a Avenida NS 10 - Plano Diretor Sul — CEP 77021-090 Palmas/TO - portal.iftto.edu.br — reitoria@iftto.edu.br

Referência: Processo nº 23236.012597/2026-14

SEI nº 3214504

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que foi meu alicerce nessa jornada, que me deu tudo o que precisei para concluir isso de maneira justa e fiel a Ele. Sem Ele, nada disso teria acontecido, e foi quem me apoiou em todos os momentos em que precisei.

Agradeço à minha família, base da minha formação. À minha mãe, Jeanne Gonzaga de Araújo, que cuidou de mim durante toda minha vida, se dedicando ao máximo pelo meu sucesso e se desdobrando para que eu conseguisse alcançar meus objetivos, muitas vezes deixando de lado sua saúde, seu tempo e seu descanso para apoiar ao máximo seus filhos. Ao meu pai, Manoel dos Santos Souza trabalhando muito para proporcionar uma vida de qualidade para nossa família e sempre me ensinando o valor do esforço, da honestidade e da responsabilidade. À minha irmã, Layla Araújo de Souza, que sempre me apoiou nas minhas decisões, sempre me disse o quanto acreditava em mim e confiou no meu conhecimento.

Aos meus avós, Agripina Gonzaga de Araújo e Manoel Damazio de Araújo, que sempre me apoiaram e confiaram em mim, sendo fundamentais para minha formação e servindo de exemplo de pessoas para mim. À minha avó, Edna Santos Souza, que mesmo de longe sempre se preocupou comigo e com minha família.

À Maisa Lissandra Nascimento Souza da Silva, que foi minha companheira durante toda a jornada acadêmica, dividindo momentos felizes e difíceis, compartilhando noites de sono perdidas estudando, e que teve carinho, paciência e um cuidado especial por mim.

À Agropecuária Jatobá, que apoiou o trabalho fornecendo todos os dados necessários para a realização deste projeto.

Ao professor Edvaldo Santana, que me acolheu como orientando e foi fundamental, com suas orientações e colocações, para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do cascalho superficial na produtividade da soja em áreas de Plintossolos no estado do Tocantins utilizando ferramentas de agricultura de precisão. O estudo foi realizado em glebas comerciais de produção de soja, onde foram feitas classificações visuais dos níveis de cascalho superficial e posteriormente relacionadas com os mapas de produtividade da cultura. Foram definidos pontos amostrais georreferenciados e separadas classes de cascalho conforme a intensidade de fragmentos grosseiros observados no solo. Os dados de produtividade foram obtidos por meio de mapas gerados durante a colheita e analisados com auxílio de ferramentas estatísticas, incluindo análise de variância, teste de Tukey e regressão linear. Os resultados mostraram tendência de redução da produtividade nas áreas com maior presença de cascalho superficial. As classes menos cascalhentas apresentaram maiores médias produtivas, enquanto as áreas com maior incidência de fragmentos grosseiros apresentaram os menores rendimentos. A análise estatística indicou diferença significativa entre as classes avaliadas, demonstrando relação entre os atributos físicos do solo e o desempenho produtivo da cultura. As ferramentas de agricultura de precisão permitiram identificar a variabilidade espacial existente nas glebas e auxiliaram na interpretação da distribuição da produtividade em função da ocorrência de cascalho superficial. Os resultados obtidos contribuem para ampliar as informações sobre o comportamento produtivo da soja em áreas de Plintossolos do Cerrado tocantinense e podem auxiliar no planejamento do manejo agrícola em ambientes com elevada heterogeneidade física.

Palavras chaves: Soja. Cascalho superficial. Plintossolos. Agricultura de precisão. Fração grosseira. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of surface gravel on soybean yield in Plinthosol areas in the state of Tocantins using precision agriculture tools. The study was carried out in commercial soybean production fields, where visual classifications of surface gravel levels were performed and later related to crop yield maps. Georeferenced sampling points were defined and gravel classes were separated according to the intensity of coarse fragments observed in the soil. Yield data were obtained through maps generated during harvest and analyzed using statistical tools, including analysis of variance, Tukey test, and linear regression. The results showed a tendency for yield reduction in areas with higher presence of surface gravel. The less gravelly classes presented higher yield averages, while areas with greater incidence of coarse fragments showed lower yields. Statistical analysis indicated significant differences between the evaluated classes, demonstrating a relationship between soil physical attributes and crop productive performance. Precision agriculture tools allowed the identification of spatial variability within the fields and assisted in the interpretation of yield distribution according to the occurrence of surface gravel. The results contribute to expanding information about soybean productive behavior in Plinthosol areas of the Cerrado region in Tocantins and may assist in agricultural management planning in environments with high physical heterogeneity.

Keywords: Soybean. Surface gravel. Plinthosols. Precision agriculture. Coarse fragments. Spatial variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da área cultivada com soja no estado do Tocantins entre as safras 2014/2015 e 2023/2024.....	12
Figura 2 – Distribuição dos Plintossolos no estado do Tocantins.....	17
Figura 3 - Localização da fazenda Jatobá.....	22
Gráfico 1 - Precipitação acumulada mensal durante o período (outubro de 2025 a março de 2026), registrada pelo software Zeus Farmer pelo sistema Agrotec, em Miracema/TO.....	23
Figura 4 - Pontos de coleta.....	25
Figura 5 - Etapa de coleta manual das amostras de solo.....	26
Figura 6 - Procedimento de peneiramento das amostras de solo em laboratório.....	27
Figura 7 - Pontos de coleta talhão G1.....	31
Figura 9 - Pontos de coleta talhão G2B.....	33
Figura 10 - Pontos de coleta talhão G3A.....	34
Figura 11 – Distribuição espacial dos atributos químicos do solo nas glebas avaliadas.....	37
Gráfico 2 - Média da produtividade da soja.....	41

LISTA DE TABELAS

Quadro 1: Classes de classificação da fração grosseira do solo utilizadas na avaliação qualitativa.....	28
Quadro 2: Distribuição das classes de fração grosseira do solo nas glebas avaliadas.....	34
Quadro 3 – Produtividade média da soja nas glebas avaliadas.....	38
Tabela 1 - Estatística descritiva da produtividade da soja em função das classes de cascalho....	40
Tabela 2 - Análise de variância.....	42
Tabela 3 - Teste de Tukey.....	43
Tabela 4 - Teste global da regressão.....	44
Tabela 5 - Teste de Shapiro-Wilk.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. DESENVOLVIMENTO.....	11
2.1 Revisão de literatura.....	11
2.1.1. Importância da cultura da soja no Brasil e no Tocantins.....	11
2.1.2. Fatores determinantes da produtividade da soja.....	13
2.1.3. Atributos físicos do solo e suas funções na cultura da soja.....	14
2.1.4. Frações granulométricas do solo: definição e classificações.....	15
2.1.5. Solos Plintossolos: características e sua distribuição no Tocantins.....	16
2.1.6. Impacto do cascalho superficial nos atributos físicos e hídricos do solo.....	18
2.1.7. Variabilidade espacial do solo e agricultura de precisão.....	19
2.1.8. Integração solo-produtividade: uso de mapas de colheita na avaliação de manejo.....	20
3. METODOLOGIA.....	22
3.1. Caracterização da Área de Estudo.....	22
3.2. Definição dos Pontos Amostrais.....	23
3.3 Coleta das Amostra de Solo.....	25
3.4 Procedimento Laboratorial das Amostras.....	26
3.5 Classificação da fração grosseira do solo.....	27
3.6 Obtenção e Processamento dos Dados de Produtividade.....	28
3.7 Análise estatística.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Distribuição espacial da fração grosseira do solo.....	30
4.2 Distribuição espacial dos atributos químicos do solo.....	35
4.3 Produtividade da cultura da soja.....	37
4.4. Análise estatística da produtividade da soja em função das classes de cascalho.....	40
4.4.1 Estatística descritiva das classes de cascalho.....	40
4.4.2 Análise de variância (ANOVA).....	42
4.4.4 Regressão linear entre cascalho e produtividade.....	44
4.4.5 Verificação dos pressupostos estatísticos.....	45
5. CONCLUSÃO.....	46

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* L.) é uma das principais commodities agrícolas do mundo, desempenhando papel estratégico na segurança alimentar e no fornecimento de matéria-prima. No Brasil, a safra 2024/25 consolidou o país como líder mundial na produção, com área cultivada de aproximadamente 47,3 milhões de hectares, produtividade média de 3.622 kg ha⁻¹ e produção estimada em 171,48 milhões de toneladas (CONAB, 2026). A obtenção de altas produtividades está diretamente relacionada, entre outros fatores, às condições do solo e ao manejo adotado nas áreas agrícolas (Brandão et al., 2013).

Assim, a obtenção de altas produtividades é cada vez mais necessária, especialmente diante da valorização das terras agrícolas, que nos últimos anos apresentaram aumento expressivo de preço, elevando os custos de produção e exigindo maior eficiência no uso das áreas cultivadas (Scot Consultoria, 2025). A rentabilidade dos sistemas produtivos passa a depender diretamente do desempenho das lavouras, exigindo a adoção de práticas que maximizem o aproveitamento das áreas cultivadas (Hirakuri;Lazzarotto, 2014).

Segundo Taiz et al. (2017), a Lei do Mínimo estabelece que o desenvolvimento das plantas é limitado pelo fator mais restritivo, de modo que a deficiência em qualquer componente do sistema produtivo compromete o rendimento final das lavouras. Além disso, estudos demonstram que a produtividade da soja está diretamente relacionada ao manejo integrado desses fatores, envolvendo condições edafoclimáticas e práticas de manejo adotadas (Fageira, 2009).

No caso dos atributos físicos, aspectos como densidade, porosidade e estrutura do solo estão relacionados ao desenvolvimento das plantas, principalmente por influenciarem a dinâmica da água, a aeração e o crescimento radicular (EMBRAPA, 2017). Nesse contexto, Andreotti et al. (2010) destacam que os atributos físicos do solo apresentam relação com a produtividade, podendo influenciar o desenvolvimento das plantas conforme suas condições.

Em regiões produtoras do estado do Tocantins, é comum a ocorrência de diferentes classes de solos, com destaque para os Plintossolos, que ocupam cerca de 35,3% da área total do estado (Leite et al., 2024). A presença dessas frações na camada superficial evidencia a necessidade de melhor compreensão de suas características e de sua influência no desempenho das culturas, especialmente da soja, uma vez que podem limitar o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água no solo (Resende et al., 2014).

No entanto, ainda são limitados os estudos que avaliam de forma direta como a presença de cascalho superficial influencia a produtividade da soja, especialmente nas condições edafoclimáticas do estado do Tocantins.

O presente estudo tem como objetivo avaliar essa relação, buscando gerar informações que possam auxiliar no manejo das áreas agrícolas. Será realizado em uma propriedade produtora de soja no estado do Tocantins, onde serão avaliados diferentes níveis de cascalho na camada superficial do solo. Para isso, serão analisados dados de produtividade da cultura, com o intuito de verificar a relação entre a presença dessa fração e o desempenho das lavouras.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

2.1.1. Importância da cultura da soja no Brasil e no Tocantins

A soja é destacada como uma das principais culturas agrícolas destinadas ao atendimento da demanda mundial por alimentos, sendo considerada um dos grãos mais versáteis devido à sua ampla utilização tanto na alimentação humana quanto na produção de ração animal (Rosanova et al., 2022).

A expansão da sojicultura no território brasileiro está associada, sobretudo, à adequação das condições edafoclimáticas, com destaque para o domínio do Cerrado e áreas de transição agrícola. Nesse contexto, regiões como o Sul do Maranhão, Sul do Piauí, Oeste da Bahia e o estado do Tocantins têm se consolidado como importantes fronteiras agrícolas, em função da regularidade do regime pluviométrico e do elevado potencial de incorporação de áreas produtivas, favorecendo a consolidação da cultura da soja (Andrade, 2020).

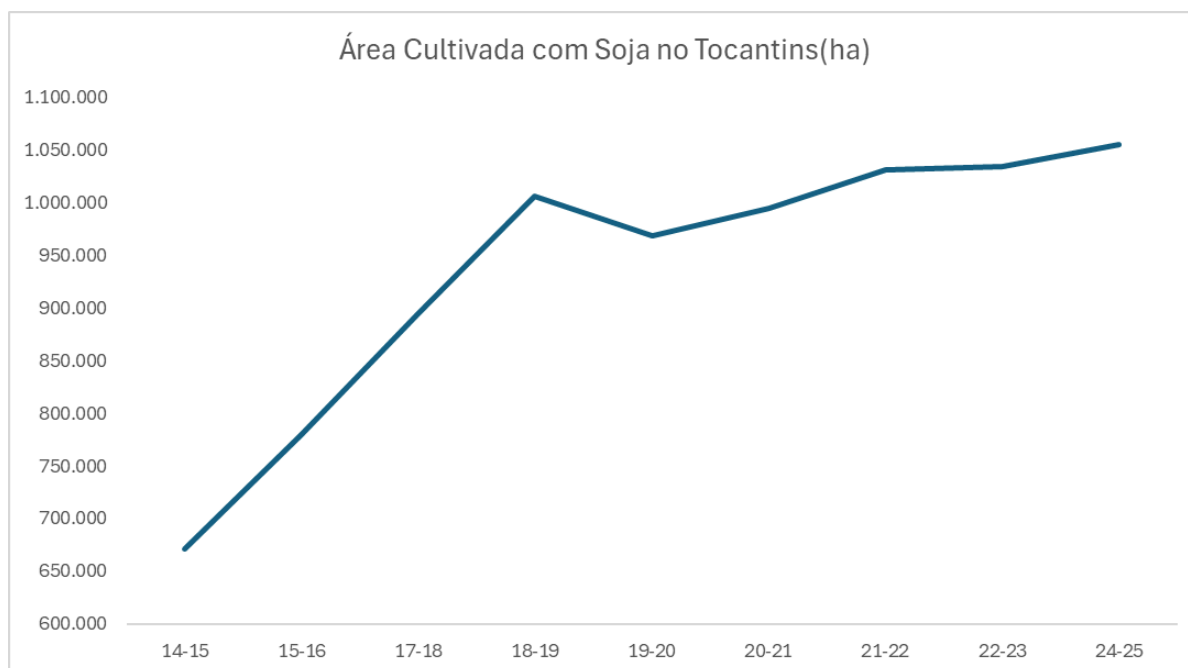
O crescimento do cultivo de soja no estado do Tocantins tem se mostrado significativo, quando considerado o período compreendido entre as safras de 2015/2016 a 2023/2024, das quais a área de produção evoluiu de 870,8 mil ha para 1.456,7 mil ha respectivamente (CONAB, 2024). No estado do Tocantins, a soja é a principal cultura em termos de participação do Produto Interno Bruto (PIB) (Faria et al., 2018).

Silva et al. (2023) afirmam que o Tocantins apresenta elevado potencial agrícola, considerando que aproximadamente 60% da superfície do estado é composta por solos

agricultáveis, dos quais mais de 25% possuem condições favoráveis para produção. Esse cenário pode ser observado na expansão da área destinada ao cultivo da soja ao longo dos últimos anos.

Com base nos dados do MapBiomas apresentados na Figura 1, observa-se o crescimento expressivo da área cultivada com soja no estado do Tocantins ao longo das últimas dez safras. Esse avanço evidencia o processo de expansão da atividade agrícola no estado, impulsionado por condições edafoclimáticas favoráveis, pela incorporação de novas áreas produtivas e pelo fortalecimento da região do MATOPIBA como importante fronteira agrícola nacional.

Figura 1 – Evolução da área cultivada com soja no estado do Tocantins entre as safras 2014/2015 e 2023/2024



Fonte: MapBiomas (2026)

O estado do Tocantins destaca-se como o maior produtor de grãos da região Norte do Brasil. Na safra 2023/2024, a área cultivada com soja atingiu aproximadamente 1,46 milhão de hectares, com produção estimada em cerca de 4,6 milhões de toneladas (CONAB, 2024). Esses dados evidenciam a relevância da sojicultura para a economia estadual e demonstram o potencial produtivo da cultura na região.

Diante disso, o avanço da sojicultura no estado reforça a necessidade de estudos relacionados aos fatores que influenciam a produtividade das lavouras, especialmente aqueles associados às características físicas do solo e à variabilidade espacial das áreas agrícolas.

2.1.2. Fatores determinantes da produtividade da soja

O desenvolvimento da cultura da soja e o rendimento dos grãos são influenciados por condições ambientais, como fotoperíodo, temperatura e umidade relativa do ar, fatores que apresentam variações conforme a época do ano e a latitude da região produtora (Camargo, 2006). Além das condições ambientais, a obtenção de elevados rendimentos também depende da interação entre a cultura, o ambiente de cultivo e o manejo adotado na lavoura, sendo esses fatores fundamentais para o desempenho da soja (Câmara; Heiffig, 2000).

Thomas et al. (2010) afirmam que o potencial produtivo da soja é definido geneticamente, porém o rendimento final da cultura depende diretamente das condições enfrentadas pela lavoura ao longo do ciclo produtivo, uma vez que fatores limitantes podem interferir no desenvolvimento das plantas e reduzir a produção de grãos. Nesse contexto, Krzyzanowski et al. (2008) destacam que práticas adequadas de manejo auxiliam na redução desses impactos, permitindo melhor aproveitamento dos recursos ambientais pela cultura.

Além dos fatores climáticos, genéticos e de manejo, os atributos físicos do solo também exercem influência significativa sobre o desenvolvimento da cultura e sobre o potencial produtivo da soja. Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo responsável por reter e fornecer água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas. Dessa forma, torna-se fundamental a existência de um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, visando maximizar o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Tormena et al., 2002).

A adoção de práticas de manejo adequadas, aliada ao controle eficiente dos fatores de produção, exerce influência direta sobre o desempenho da cultura e sobre a qualidade dos grãos produzidos. Nesse sentido, Santos et al. (2017) destacam que, em razão da relevância da sojicultura para o Brasil, a compreensão desses fatores é essencial para a otimização do rendimento das lavouras e a melhoria da qualidade da produção agrícola. Entre os fatores relacionados ao desempenho produtivo da soja, destacam-se os atributos físicos do solo, responsáveis pela dinâmica hídrica, aeração e crescimento radicular das plantas.

2.1.3. Atributos físicos do solo e suas funções na cultura da soja

Os atributos físicos do solo exercem influência direta sobre o desenvolvimento radicular das culturas e, conseqüentemente, sobre sua produtividade (Silva et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2006). As propriedades físicas do solo estão relacionadas à capacidade de absorção e retenção de água, circulação de ar e resistência oferecida à penetração das raízes das plantas (Penteado, 2007).

Nesse contexto, a quantificação de atributos como densidade e porosidade do solo é fundamental para avaliações relacionadas ao manejo agrícola, permitindo identificar condições adequadas ao desenvolvimento radicular, bem como possíveis problemas de compactação (Ramirez-Lopez et al., 2008; Strudley et al., 2008).

Entre os atributos físicos do solo, a textura é como um dos principais indicadores da qualidade e do potencial produtivo das áreas agrícolas (Cox; Lins, 1984; Wang et al., 2005), juntamente com a integração entre atributos físicos, químicos e biológicos, fundamentais ao adequado desenvolvimento das culturas (Roming et al., 1995; SANCHEZ et al., 2003).

A relação entre textura do solo e produtividade agrícola tem sido amplamente discutida na literatura, evidenciando forte correlação entre essa característica física e o desempenho das culturas, além de sua relevância para a avaliação da aptidão agrícola dos solos (Miranda; Volkweiss, 1981; Van Laar, 1981).

Pouca importância tem sido atribuída aos atributos físicos do solo, sendo a produtividade frequentemente relacionada apenas às condições químicas. Entretanto, estudos recentes direcionados aos parâmetros edáficos demonstram relação direta entre a compactação do solo e a redução da produtividade agrícola, especialmente em sistemas de plantio direto. Em áreas conduzidas sob sistema de semeadura direta, observa-se aumento da densidade do solo superficial, resultando em maior resistência à penetração radicular, também denominada índice de cone (Viacheslav; Molin, 2006).

O condicionamento físico do solo influencia diretamente o desenvolvimento das plantas, pois alterações na umidade afetam atributos como aeração, condutividade hidráulica e resistência à penetração radicular. Esses atributos estão relacionados à produtividade das culturas e podem ser favorecidos por práticas que aumentam a macroporosidade, a infiltração de água e a porosidade de aeração do solo (Esteves et al., 2020; Scotti et al., 2020).

Entre os fatores diretos a disponibilidade de água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração das raízes, os quais influenciam processos fisiológicos importantes, como fotossíntese, crescimento radicular e desenvolvimento foliar. Já os fatores indiretos incluem atributos como textura, agregação, porosidade e densidade do solo, que interferem na retenção de água, na aeração e na resistência mecânica do solo, refletindo diretamente sobre o desempenho produtivo das culturas (Silva; Nogueira Junior, 2001).

2.1.4. Frações granulométricas do solo: definição e classificações

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), a granulometria corresponde à distribuição das partículas minerais que compõem o solo, sendo representada principalmente pelas frações areia, silte e argila, diferenciadas conforme o diâmetro das partículas. A proporção entre essas frações define o grupamento textural do solo, atributo de grande importância para a interpretação de suas características físicas e do seu comportamento no ambiente.

Segundo Donagemma et al. (2016), Solos com maiores teores de areia tendem a apresentar maior permeabilidade e menor retenção de água e nutrientes, enquanto aqueles com maiores teores de argila possuem maior superfície específica e maior capacidade de retenção hídrica e adsorção de nutrientes.

Já os solos siltosos apresentam comportamento intermediário, embora geralmente sejam mais suscetíveis à erosão devido à menor estabilidade estrutural. Assim, a composição granulométrica influencia diretamente aspectos relacionados ao manejo, à dinâmica da água no perfil e ao potencial de uso agrícola dos solos (Santos et al., 2018).

Atributos físicos como textura, densidade do solo, porosidade e estabilidade dos agregados, juntamente com a matéria orgânica do solo, influenciam diretamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal, afetando a expansão das raízes e, conseqüentemente, a produtividade final (Montanari et al., 2015). Por essa razão, esses atributos podem ser considerados indicadores da qualidade física do solo, uma vez que, associados ao estudo da variabilidade espacial, possibilitam o monitoramento de áreas submetidas à interferência antrópica e que necessitam de práticas adequadas de manejo (Aquino et al., 2014).

A compactação do solo é um processo complexo que afeta as relações físicas, químicas e biológicas responsáveis pelo desenvolvimento e pela produtividade das culturas (Håkansson; Medvedev, 1995). Entre os principais impactos da compactação destacam-se a

redução da porosidade, a limitação da infiltração de água e a restrição ao crescimento radicular.

A soja é considerada uma cultura sensível à compactação do solo, uma vez que esse processo compromete seu desenvolvimento radicular devido ao impedimento mecânico, à baixa aeração e à menor absorção de água e nutrientes, ocasionando reduções significativas na produtividade (Beutler; Centurion, 2003).

2.1.5. Solos Plintossolos: características e sua distribuição no Tocantins

No estado do Tocantins, há ampla ocorrência de Plintossolos, classe de solo identificada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, apresentando grande representatividade no território estadual (Santos et al., 2018).

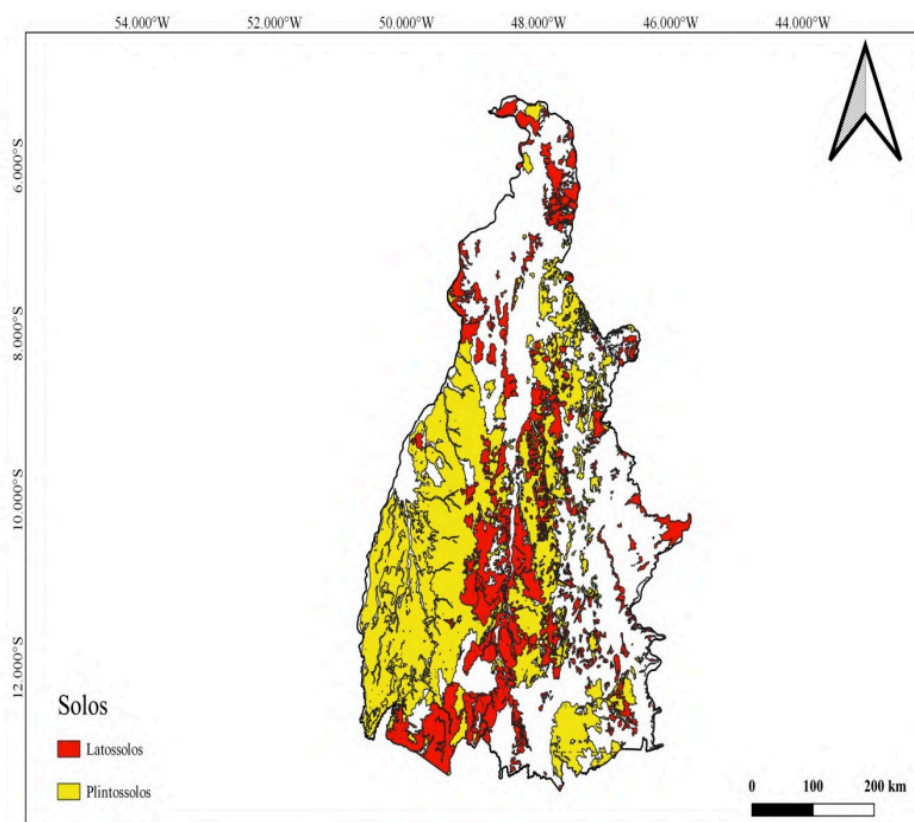
Segundo a Secretaria da Agricultura, Pecuária e Aquicultura, Tocantins é novo polo da agricultura no Brasil, por se tratar de uma área com metade do território com potencial de agricultura, o estado possui área aproximada de 278.420,70 km² e clima tropical.

A Figura 2 demonstra a ampla ocorrência dos Plintossolos no estado do Tocantins, evidenciando a relevância dessa classe de solo no contexto agrícola estadual. A elevada presença desses solos reforça a necessidade de estudos relacionados às limitações físicas impostas pela fração cascalhenta e seus impactos sobre a produtividade da soja.

De acordo com Daugherty & Arnold (1982), os Plintossolos apresentam elevada variabilidade morfológica em função das características da fração cascalhenta, que pode apresentar diferentes níveis de cimentação e intemperismo. A origem desse material também varia entre processos ligados à evolução laterítica e à ferruginização do saprolito.

A gênese desses solos está relacionada à oscilação do lençol freático e à concentração de ferro no perfil, promovendo intensa ferruginização e formação de petroplintitas, sendo comum a ocorrência de concreções ferruginosas e materiais endurecidos que compõem a fração grosseira do solo, denominada cascalho, definida como partículas minerais com diâmetro superior a 2 mm presentes no perfil do solo (Campos et al., 2025).

Figura 2 – Distribuição dos Plintossolos no estado do Tocantins.



Fonte: Seplan (2015)

Os Plintossolos Pétricos apresentam proporções consideráveis de cascalho no perfil do solo, sendo considerados solos com excesso de fração grosseira e apresentam limitações ao manejo agrícola, podendo limitar o potencial produtivo das culturas devido ao menor volume de solo explorado pelas raízes e à baixa retenção de água. Segundo Almeida et al. (2023), o excesso de cascalho nos Plintossolos altera a dinâmica dos nutrientes no solo, uma vez que grande parte do volume é ocupada por material inerte, incapaz de reter e trocar nutrientes com a solução do solo, influenciando diretamente as relações solo-planta e o manejo da fertilidade em áreas agrícolas cultivadas sobre Plintossolos Pétricos.

Os Plintossolos são considerados de acordo com o sistema de aptidão agrícola e capacidade de uso, como solos frágeis, imperfeitamente drenados, ou seja, apresentando-se com baixa ou mesmo sem aptidão agrícola (Franceschette, et al, 2013).

Essa classe de solo se tornou característico do cerrado, estando presente em grande parte do centro oeste do estado do Tocantins, o que impõe limitações ao manejo agrícola nessas áreas já que sua aptidão e uso são classificados de maneira diferente dos demais e suas

características e atributos físicos não são favoráveis para a produção de grãos conforme preconizado pelos agricultores que atuam no quadrante agrícola do estado do Tocantins (Seplan 2005).

A Plintita é um material que contém argila, quartzo, baixo teor de matéria orgânica e alto teor de ferro e alumínio. Estima-se que os Plintossolos representem mais de 7% do território brasileiro (Santos et al., 2011).

Os Plintossolos são compostos principalmente por ferro, silício, alumínio e manganês. Esses elementos existem principalmente no solo na forma de sesquióxidos e óxidos hidratados. A plintita geralmente carece de metais alcalinos e metais alcalino-terrosos. (Asiamah; Dedzoe; 1999).

2.1.6. Impacto do cascalho superficial nos atributos físicos e hídricos do solo

A presença de cascalho superficial nos solos agrícolas pode interferir diretamente no desenvolvimento das culturas, principalmente em razão das alterações promovidas nos atributos físicos e hídricos do solo. Santos et al. (2022) e Teixeira (2022) relatam que áreas com elevada ocorrência de fragmentos grosseiros apresentam limitações relacionadas à retenção de água, ao crescimento radicular, à disponibilidade de nutrientes e às operações mecanizadas, fatores que interferem diretamente no potencial produtivo das lavouras.

Solos com elevada proporção de fragmentos grosseiros apresentam menor volume efetivo de terra fina, reduzindo a capacidade de armazenamento hídrico no perfil do solo e a disponibilidade de água às plantas, principalmente em períodos de déficit hídrico. Silva e Nogueira Junior (2001) destacam que alterações nos atributos físicos do solo influenciam diretamente o desenvolvimento radicular das culturas, enquanto Reis et al. (2020) ressaltam a elevada sensibilidade da soja às oscilações na disponibilidade hídrica ao longo do ciclo produtivo. Em condições de veranico, comuns nas regiões de Cerrado, essas limitações podem comprometer o desempenho fisiológico das plantas e favorecer a redução da produtividade.

A elevada presença de cascalho superficial também pode dificultar operações mecanizadas, aumentando o desgaste de implementos agrícolas e reduzindo a eficiência das práticas de manejo. Almeida et al. (2023) e Campos et al. (2025) destacam que áreas com maior concentração de concreções ferruginosas apresentam limitações relacionadas à

profundidade efetiva do solo e ao crescimento das raízes, restringindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas.

Santos et al. (2022) e Teixeira (2022), avaliando áreas de Plintossolos e solos concrecionários, observaram redução da produtividade da soja em ambientes com elevada presença de fragmentos grosseiros, associando esses resultados às limitações físicas impostas ao desenvolvimento radicular e à dinâmica hídrica do solo. Em condições de baixa disponibilidade hídrica, essas limitações tendem a se intensificar, refletindo diretamente na variabilidade produtiva das lavouras.

Apesar das limitações impostas pela presença de cascalho superficial, áreas com ocorrência de Plintossolos vêm sendo incorporadas à produção agrícola no Cerrado. A variabilidade espacial da fração grosseira nesses ambientes resulta em áreas com diferentes condições físicas e potenciais produtivos, tornando necessário o uso de ferramentas capazes de auxiliar na identificação dessas variações dentro da lavoura.

2.1.7. Variabilidade espacial do solo e agricultura de precisão

De acordo com Vieira (2004), a variabilidade espacial dos solos sempre existiu e deve ser considerada sempre que a amostragem de campo for realizada, pois pode indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado quanto ao manejo, possibilitando maior detalhamento das áreas agrícolas.

Em solos cascalhentos, a variabilidade espacial dos atributos físicos e hídricos costuma ser elevada devido à distribuição irregular da fração grossa no solo. Segundo Severiano et al. (2013), áreas com maior presença de cascalho apresentam menor disponibilidade de água, limitações ao crescimento radicular e maior sensibilidade aos efeitos dos veranicos, fatores que podem afetar diretamente o desenvolvimento das culturas. A elevada densidade e a baixa porosidade observadas nesses solos dificultam o armazenamento de água e tornam o manejo agrícola mais desafiador. (Klein & Câmara, 2007; Vieira & Klein, 2007).

A variabilidade espacial observada nos Plintossolos Pétricos do Tocantins está influenciada pelas diferenças morfológicas, à proporção entre terra fina e fração grosseira e à profundidade efetiva dos perfis. Segundo Campos et al. (2025), esses solos apresentam elevada heterogeneidade quanto à distribuição de cascalhos, concreções ferruginosas e

horizontes litoplínticos, fatores que influenciam diretamente a retenção de água, drenagem e potencial produtivo das áreas agrícolas.

O uso de ferramentas da agricultura de precisão, como amostragens georreferenciadas, mapas de produtividade e definição de zonas de manejo, permite identificar a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo e das culturas, auxiliando no detalhamento das áreas agrícolas, na tomada de decisão e na melhor utilização dos recursos disponíveis (Mulla & Schepers, 1997; Pierce & Nowak, 1999).

Estudos demonstram que os atributos físico-hídricos do solo apresentam dependência espacial, influenciando diretamente características relacionadas à retenção de água, densidade e estrutura do solo (Reichert et al., 2007). O conhecimento da variabilidade espacial é fundamental para o manejo mais preciso das áreas agrícolas, sendo a agricultura de precisão uma importante ferramenta para otimização do gerenciamento das propriedades rurais e melhoria da eficiência produtiva (Grego & Vieira, 2005; Werner, 2007).

A análise da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em áreas com ocorrência de Plintossolos Pétricos possibilita identificar ambientes com diferentes potenciais produtivos, contribuindo para avaliações mais detalhadas da relação entre a presença de cascalho superficial e a produtividade da soja.

2.1.8. Integração solo-productividade: uso de mapas de colheita na avaliação de manejo

O Mapeamento da produtividade é um processo de registro de fluxo de grãos, através do mecanismo de colheita da máquina, ao mesmo tempo em que é registrada a localização no campo. Segundo Dampney & Moore (1999) numa certa colhedora comercial, as medidas são tomadas aproximadamente a cada 3 segundos, resultando em mais de 500 pontos por ha. Técnicas de interpolação são usadas para gerar o mapa de produtividade, usualmente na forma de linhas de contorno preenchidas por cores. Conforme os autores, o mapeamento da produtividade é geralmente aceito como o ponto de entrada em agricultura de precisão.

Segundo Lemainski (2007), a Agricultura de Precisão (AP) consiste em ferramentas de gerenciamento agrícola cujo objetivo é aumentar a eficiência produtiva com base no manejo diferenciado de áreas e subáreas agrícolas. De acordo com Knob (2006), a AP se baseia em um conjunto de técnicas que explora a variabilidade do terreno por meio de

informações georreferenciadas da área, principalmente em relação aos atributos químicos, físicos, biológicos e de produtividade.

A geração de mapas de produtividade exige certa sofisticação para a obtenção dos dados essenciais. O mapa é composto por um conjunto de pontos, em que cada ponto representa uma pequena porção da lavoura delimitada pela largura da plataforma da colhedora e pela distância entre as duas leituras. Coletam-se, entre outros dados, a quantidade de grãos colhidos naquele ponto, a umidade dos grãos, os parâmetros da área, como largura da plataforma de corte e velocidade de deslocamento, além da posição georreferenciada do ponto.

De acordo com Molin (2007), o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras. Sendo assim, a determinação da variabilidade é mais facilmente visualizada a partir da produtividade expressa, podendo assim, ser associado com outros fatores que podem estar interferindo na expressão do potencial de rendimento da cultura.

Dados de produtividade expressos por mapas são fundamentais, pois a interpretação da variabilidade presente nas lavouras é evidenciada nos mapas de produtividade, permitindo identificar relações de causa e efeito (MAPA, 2011).

Com a possibilidade de subdividir os hectares da propriedade em microáreas para análise de produtividade e fertilidade do solo mais minuciosas, surgem estratégias como semeadura de sementes e aplicação de fertilizantes em taxas variáveis, o que resulta na otimização das operações e, conseqüentemente, na economia de recursos (EMBRAPA, 2018).

A variabilidade espacial do solo constitui um dos principais fundamentos da agricultura de precisão, pois os atributos físicos, químicos e hídricos apresentam distribuição heterogênea nas áreas agrícolas, influenciando diretamente o desenvolvimento das culturas e a produtividade das lavouras (Hauschild, 2013). Nesse contexto, o uso de mapas de produtividade, ferramentas de geoprocessamento e sistemas de posicionamento global possibilita a identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos, contribuindo para a adoção de práticas de manejo mais eficientes e compatíveis com as condições específicas de cada ambiente agrícola (Nunes, 2018).

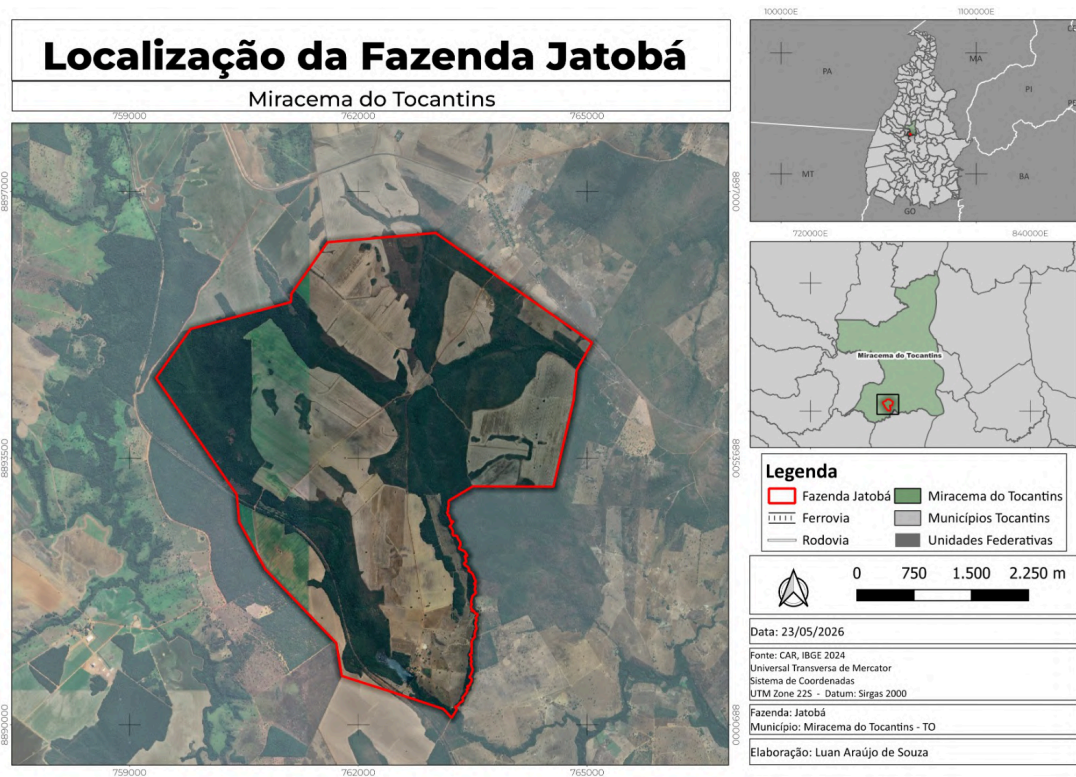
Dessa forma, a agricultura de precisão permite compreender a relação entre os atributos do solo e o desempenho das culturas, favorecendo intervenções localizadas e o uso mais racional dos insumos agrícolas (Balafoutis et al., 2017). A análise da variabilidade espacial torna-se fundamental em áreas com diferenças texturais e presença de cascalho superficial, uma vez que essas condições podem interferir na dinâmica da água, no desenvolvimento radicular e, consequentemente, na produtividade da soja (Silva;Nogueira Junior, 2001).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Miracema do Tocantins, na propriedade Agro Jatobá, entre as coordenadas geográficas de latitude $10^{\circ}01'31,50''$ S e longitude $48^{\circ}36'11,56''$ W (Figura 3). A propriedade encontra-se inserida em região produtora de soja e apresenta ocorrência de solos com elevada presença de frações grosseiras na camada superficial.

Figura 3 - Localização da fazenda Jatobá.

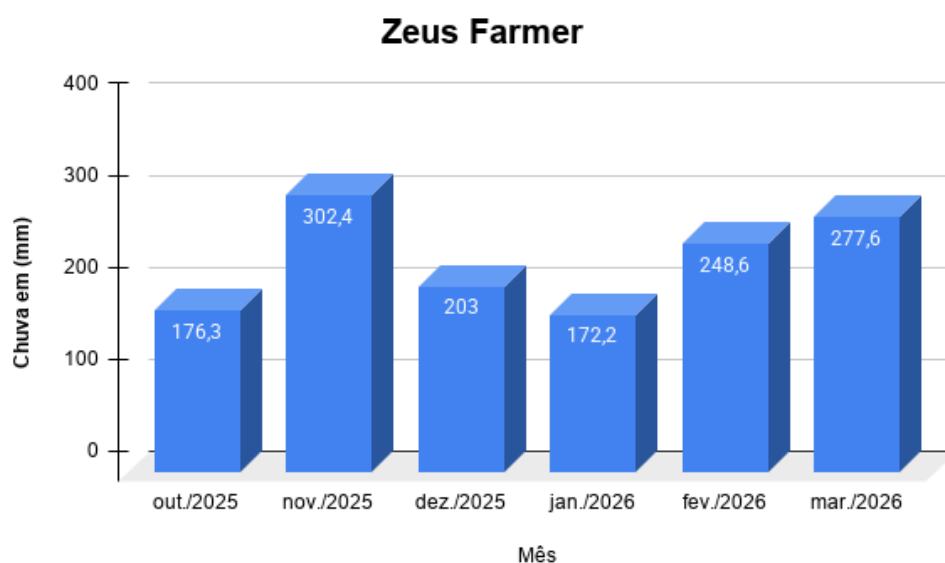


Fonte: Autor (2026)

O clima do Tocantins é Tropical do tipo Aw, segundo as classificações de Köppen, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco. Apresenta forte sazonalidade, com chuvas concentradas entre novembro e abril, enquanto o período de estiagem ocorre de maio a outubro (Collicchio; Rocha, 2019).

Na propriedade agrícola onde está situada a área de estudo são coletados diariamente os dados de precipitação pluviométrica, estando disponíveis os valores referentes ao período do ano agrícola estudado, ou seja, de outubro de 2025 a março de 2026, cujas médias mensais estão compiladas no gráfico 1.

Gráfico 1 - Precipitação acumulada mensal durante o período (outubro de 2025 a março de 2026), registrada pelo software *Zeus Farmer* pelo sistema Agrotec, em Miracema/TO.



Fonte: Autor (2026)

3.2. Definição dos Pontos Amostrais

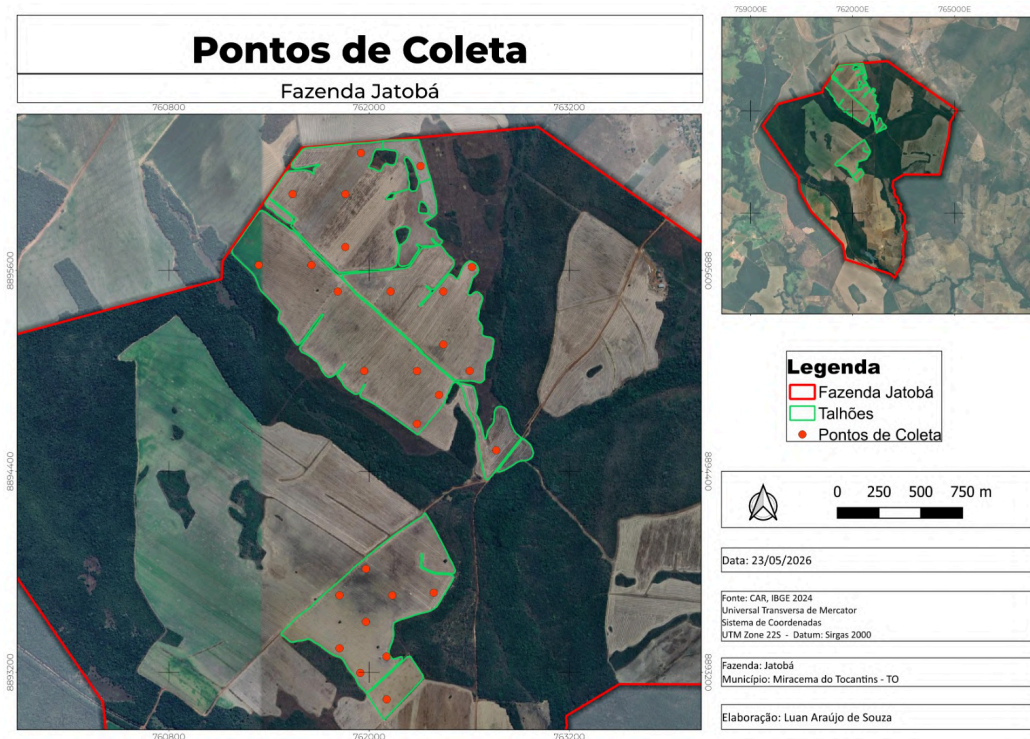
Os limites dos talhões utilizados no estudo foram delimitados no Google Earth Pro, com posterior exportação dos arquivos em formato KML contendo as áreas experimentais. Em seguida, os arquivos foram importados para o software QGIS, ambiente no qual ocorreu a organização e o processamento espacial das áreas avaliadas. Após a importação, foi realizada a conversão dos arquivos em camadas vetoriais, permitindo a definição dos polígonos correspondentes a cada talhão experimental. Também ocorreu a conferência do sistema de coordenadas e o ajuste das camadas para garantir compatibilidade espacial entre os arquivos

inseridos no projeto. Com os polígonos devidamente estruturados, utilizou-se a ferramenta de geração de pontos aleatórios do QGIS, configurada para distribuir os pontos exclusivamente dentro dos limites de cada talhão.

A definição dos pontos amostrais ocorreu por meio de amostragem aleatória simples, metodologia baseada na distribuição automática de coordenadas ao longo de toda a área experimental. Inicialmente, definiu-se a quantidade de pontos necessária para cada talhão e, posteriormente, o software realizou a geração automática das posições amostrais, promovendo distribuição espacial mais homogênea e reduzindo concentrações excessivas em regiões específicas da área. Após a geração, realizou-se a conferência visual da disposição dos pontos no mapa, seguida da exportação das coordenadas para utilização durante as coletas em campo. A adoção desse procedimento proporcionou maior padronização na definição dos locais amostrais e maior representatividade espacial das áreas avaliadas Vieira (2000).

Os pontos foram definidos a partir da extensão do software Qgis, onde foi exportado arquivo em shapefile da área da fazenda recortado os talhões de interesse e utilizando a extensão para distribuir dentro das 4 glebas de maneira aleatória (Oliveira et al., 2021), com aproximadamente 1 ponto a cada 7,5 ha a distância entre os pontos amostrais, metodologia adotada com referência na Embrapa (2018) que diz que a amostragem de solo deve ser feita para levantamento textural com 1 ponto a cada 5 ha, foi adotado 1 ponto a cada 7,5 por conta das condições de ciclo da cultura instalada na safrinha que dificultou o deslocamento dentro do talhão para a realização das coletas dos pontos amostrais (Figura 4).

Figura 4 - Pontos de coleta.



Fonte: Autor (2026)

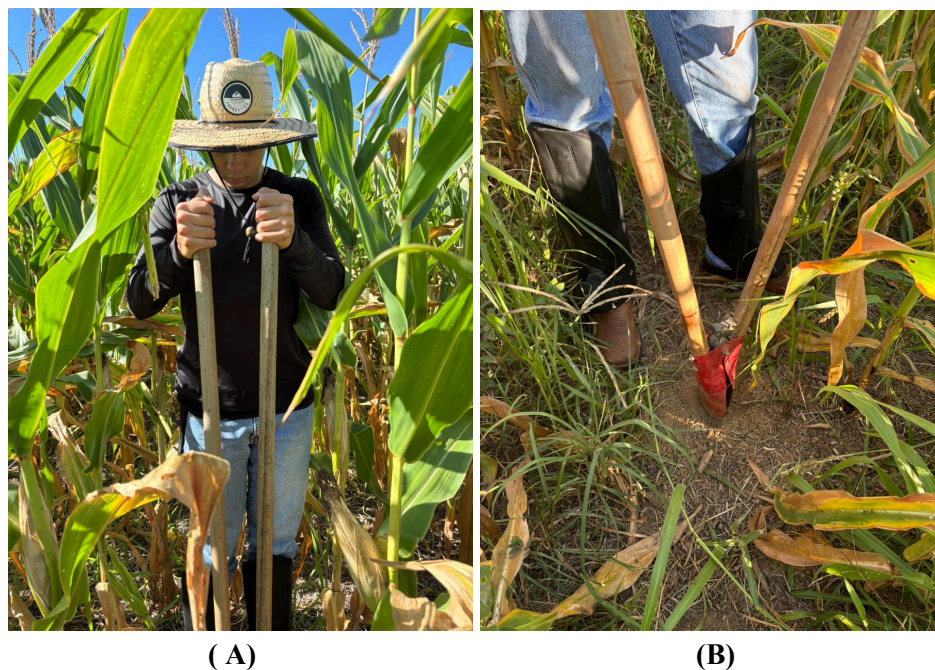
3.3 Coleta das Amostras de Solo

Os pontos amostrais foram georreferenciados em campo com auxílio de receptor GPS, sendo distribuídos de forma a representar a variabilidade espacial da área de estudo. Posteriormente, os dados coletados foram organizados e processados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS (Oliveira et al., 2021). A partir das informações obtidas em campo, realizou-se a espacialização das classes de cascalho por meio da interpolação dos pontos amostrais (De Oliveira et al., 2018).

As coletas de solo foram realizadas por meio de escavação manual utilizando cavadeira, na profundidade de 0–20 cm, correspondente à camada superficial do solo (figura 5). As amostras foram coletadas em quatro glebas distribuídas na área de estudo, adotando-se densidade amostral de aproximadamente um ponto a cada 7,5 hectares, conforme recomendações da Embrapa (2021).

No total, foram obtidas 27 amostras de solo, todas identificadas de acordo com o ponto de coleta, com massa aproximada de 1 kg cada. Essas amostras foram utilizadas para a avaliação da fração grosseira do solo e sua relação com a produtividade da cultura da soja.

Figura 5 - Etapa de coleta manual das amostras de solo.



Fonte: Autor (2026)

3.4 Procedimento Laboratorial das Amostras

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de solos, pertencente ao Instituto Federal do Tocantins, localizado em Palmas, Tocantins. Nesse laboratório foram conduzidos os procedimentos de preparo, separação e análise granulométrica das amostras de solo.

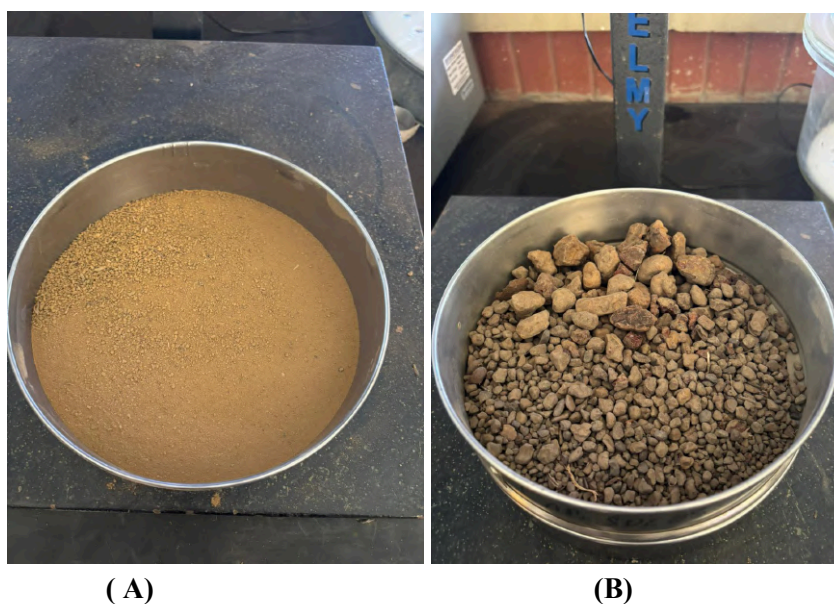
As amostras de solo coletadas em campo foram submetidas a processamento laboratorial com o objetivo de separação e quantificação das frações granulométricas. Inicialmente, todo o material foi seco ao ar livre, em temperatura ambiente, até atingir massa constante, garantindo a padronização das condições de umidade e evitando interferências nas análises físicas.

Após a secagem, as amostras foram desagregadas manualmente, com o intuito de romper torrões sem alterar a estrutura dos grãos minerais. Em seguida, procedeu-se à peneiração utilizando peneira com abertura de malha de 2 mm, conforme metodologia

padronizada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), 5ª edição (EMBRAPA 2018).

Esse procedimento permitiu a separação entre a fração terra fina (partículas com diâmetro inferior a 2 mm) (figura A) e a fração grosseira ou cascalho (partículas entre 2 mm e 20 mm) (figura B). As frações obtidas foram devidamente quantificadas e registradas para posterior análise estatística e correlação com os dados de produtividade da cultura da soja.

Figura 6 - Procedimento de peneiramento das amostras de solo em laboratório.



Fonte: Autor (2026)

3.5 Classificação da fração grosseira do solo

A quantificação do cascalho foi realizada com base na proporção em massa dessa fração em relação à amostra total, sendo os resultados expressos em g kg^{-1} . Os teores de fragmentos grosseiros foram classificados em: não cascalhenta ($< 80 \text{ g kg}^{-1}$), pouco cascalhenta ($80 \text{ a } < 150 \text{ g kg}^{-1}$), cascalhenta ($150 \text{ a } 500 \text{ g kg}^{-1}$) e muito cascalhenta ($> 500 \text{ g kg}^{-1}$), conforme estabelecido pelo SiBCS (Santos et al., 2018).

As classes do SiBCS foram utilizadas como base para a atribuição de notas qualitativas, variando de 1 a 4, com a finalidade de permitir a comparação estatística entre diferentes níveis de ocorrência da fração grosseira e a produtividade da cultura da soja.

As classes estabelecidas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos foram utilizadas como ferramenta de agrupamento para fins comparativos, não representando uma quantificação contínua da fração grosseira.

Quadro 1: Classes de classificação da fração grosseira do solo utilizadas na avaliação qualitativa.

Notas da Avaliação Qualitativa	Classificação SIBCS
1	< 80 g de cascalho
2	≥ 80 g e < 150 g de cascalho
3	≥ 150 g e < 500 g de cascalho
4	≥ 500 g de cascalho

Fonte: Autor (2026)

3.6 Obtenção e Processamento dos Dados de Produtividade

Os dados operacionais de colheita foram obtidos por meio da plataforma John Deere® Operations Center, utilizada para monitoramento e armazenamento das informações geradas pelas colhedoras durante a operação de colheita. Foram utilizados dados georreferenciados de produtividade para elaboração dos mapas e análises espaciais da área estudada.

Os dados de produtividade da cultura da soja foram obtidos por meio de mapas gerados durante a colheita mecanizada, utilizando colhedora equipada com monitor de produtividade John Deere®, modelo S550, com sistema Generation 4. Os dados foram coletados durante a operação, considerando informações georreferenciadas de rendimento ao longo da área. Posteriormente, os mapas de produtividade foram exportados e processados em ambiente SIG, no software QGIS, passando por etapas de filtragem e organização dos dados, visando à remoção de inconsistências e à padronização das informações para análise espacial (Passos et al., 2025).

A partir dos dados obtidos, foi realizada a sobreposição espacial entre os mapas de distribuição da fração grosseira e os mapas de produtividade da cultura da soja, em ambiente SIG, utilizando o software QGIS. Essa etapa permitiu o cruzamento das informações,

possibilitando a análise da produtividade em função das diferentes classes de cascalho estabelecidas na área de estudo.

3.7 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas no software Jamovi versão 2.7 (2026), obtido por meio do site oficial do programa. O Jamovi é um software estatístico gratuito e de código aberto, amplamente utilizado em pesquisas científicas devido à sua facilidade de uso e à ampla variedade de ferramentas estatísticas disponíveis (Alghami; Hussin, 2022). Inicialmente, realizou-se a análise descritiva dos dados de produtividade da soja e das classes de cascalho superficial, utilizando média, desvio padrão e coeficiente de variação, visando caracterizar a variabilidade dos dados observados na área experimental, sendo o software escolhido por permitir a execução de análises descritivas, univariadas e multivariadas de forma prática e confiável (Marek et al., 2023).

Os pontos foram numerados de acordo com numeração padrão da fazenda de pontos já utilizados para análise de solo para agricultura de precisão para manter um padrão com os dados já obtidos de fertilidade (Terram, 2025).

A separação das amostras em classes de cascalho permitiu comparar o comportamento produtivo da cultura da soja em diferentes níveis de presença de fração grosseira no solo. A comparação entre as médias das classes ocorreu por análise de variância (ANOVA), metodologia escolhida pela necessidade de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os grupos avaliados, para verificar a existência de diferenças estatísticas entre os grupos avaliados e analisar o comportamento da produtividade da soja em função das classes de cascalho superficial.

A ANOVA, desenvolvida pelo britânico *Sir Ronald Fisher*, é um procedimento estatístico utilizado para comparar médias de duas ou mais populações. Martins (2008) a definiu como um método capaz de verificar se um determinado fator, no caso uma variável independente, produziria alguma influência sobre alguma variável de interesse – a variável dependente.

Após identificação de significância a partir do Teste F, as médias foram comparadas entre si pelo de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparação múltipla das médias, permitindo identificar quais classes apresentaram diferenças estatísticas entre si.

A relação entre cascalho superficial e produtividade da soja foi avaliada por regressão linear, metodologia utilizada para verificar a tendência de comportamento da produtividade em função do aumento da fração grosseira do solo. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o grau de ajuste do modelo aos dados observados.

A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, procedimento necessário para validação dos pressupostos das análises paramétricas aplicadas no estudo (Silva e Azevedo, 2016).

Os dados espaciais foram processados no software QGIS para elaboração dos mapas temáticos, interpolação espacial e sobreposição dos mapas de produtividade e distribuição do cascalho superficial, permitindo análise da variabilidade espacial da área experimental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Distribuição espacial da fração grosseira do solo

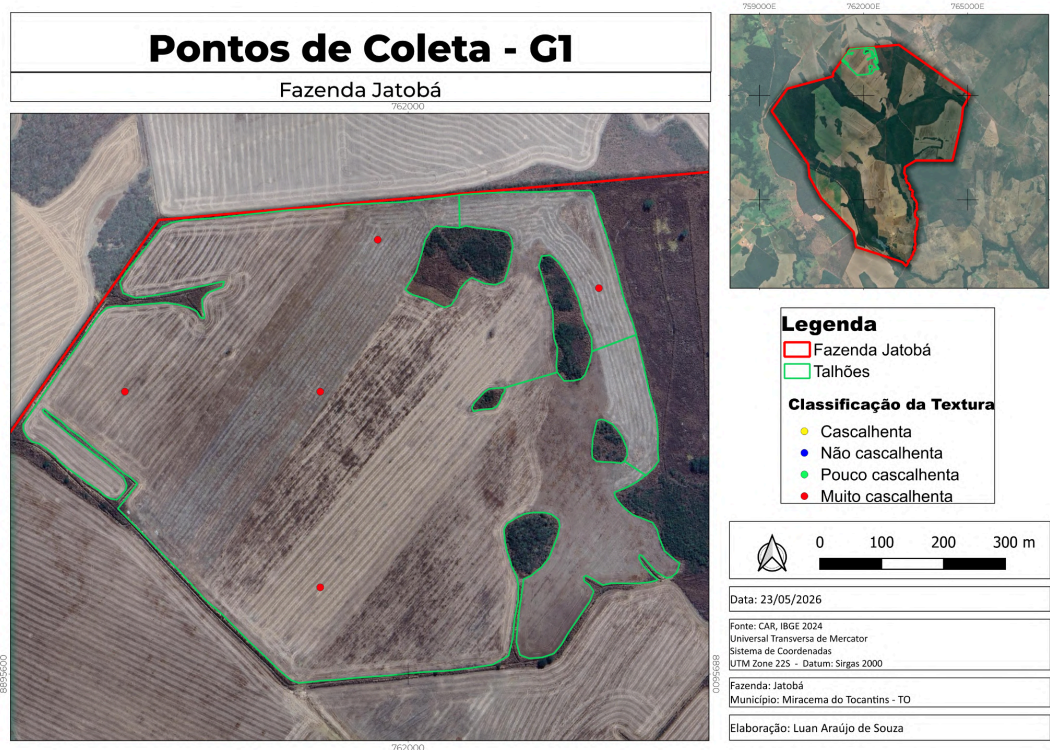
A distribuição espacial da fração grosseira nas áreas avaliadas apresentou elevada variabilidade entre as glebas estudadas, evidenciando comportamento heterogêneo dos fragmentos grosseiros na área experimental, conforme demonstrado no Quadro 2, condição compatível com a elevada complexidade dos atributos físicos dos Plintossolos presentes na região e frequentemente observada em áreas de Cerrado com ocorrência de concreções ferruginosas (Campos et al., 2025).

Para facilitar a interpretação visual da distribuição espacial da fração grosseira, as classes de cascalho foram representadas por diferentes cores nos mapas temáticos, sendo a classe não cascalhenta representada pela cor azul, a classe pouco cascalhenta pela cor verde, a classe cascalhenta pela cor amarela e a classe muito cascalhenta pela cor vermelha, permitindo a identificação da variabilidade espacial dos fragmentos grosseiros e a distinção entre os diferentes níveis de ocorrência de cascalho nas glebas avaliadas.

A gleba G1 (Figura 7) apresentou maior uniformidade na distribuição da fração grosseira, com predominância da classe muito cascalhenta em todos os pontos avaliados, característica que evidencia menor variabilidade espacial em relação às demais áreas estudadas e demonstra a elevada ocorrência de fragmentos grosseiros ao longo de toda a

gleba, comportamento compatível com os processos pedogenéticos responsáveis pela formação dos Plintossolos da região.

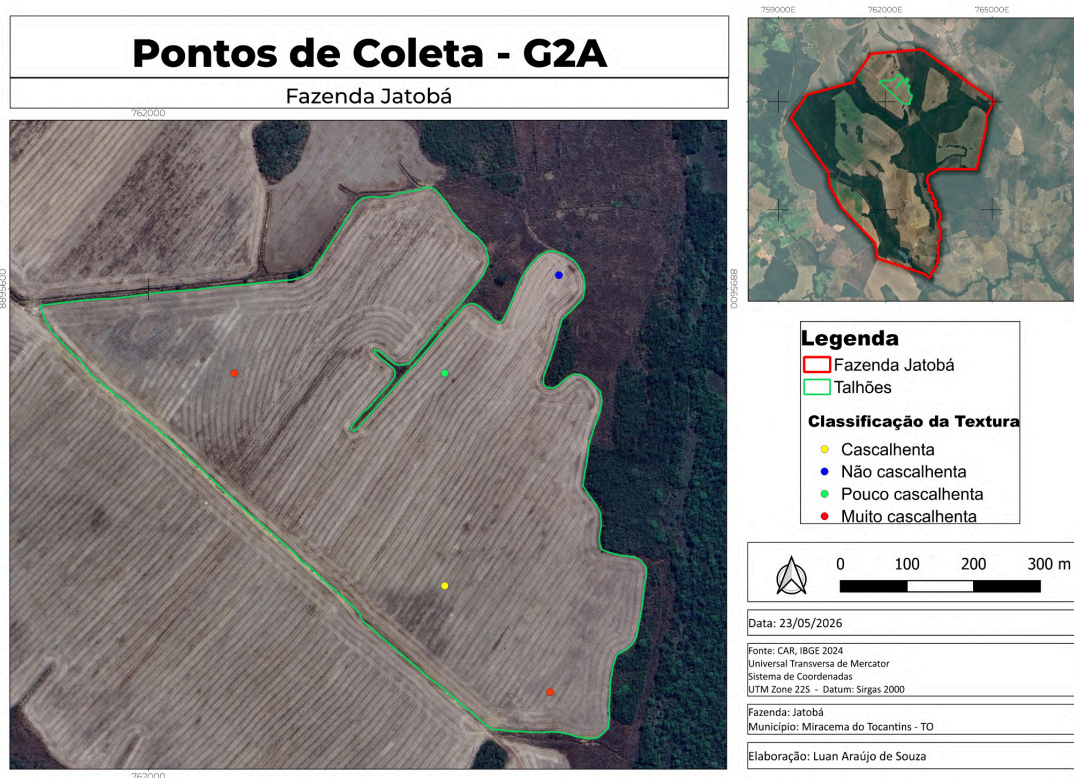
Figura 7 - Pontos de coleta talhão G1



Fonte: Autor (2026)

A gleba G2A (Figura 8) apresentou distribuição mais heterogênea das classes de cascalho, com ocorrência de diferentes níveis de fragmentos grosseiros ao longo da área, condição que evidencia elevada variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e demonstra a existência de ambientes com características distintas dentro do mesmo talhão, comportamento frequentemente relatado para solos do Cerrado (Almeida et al., 2023).

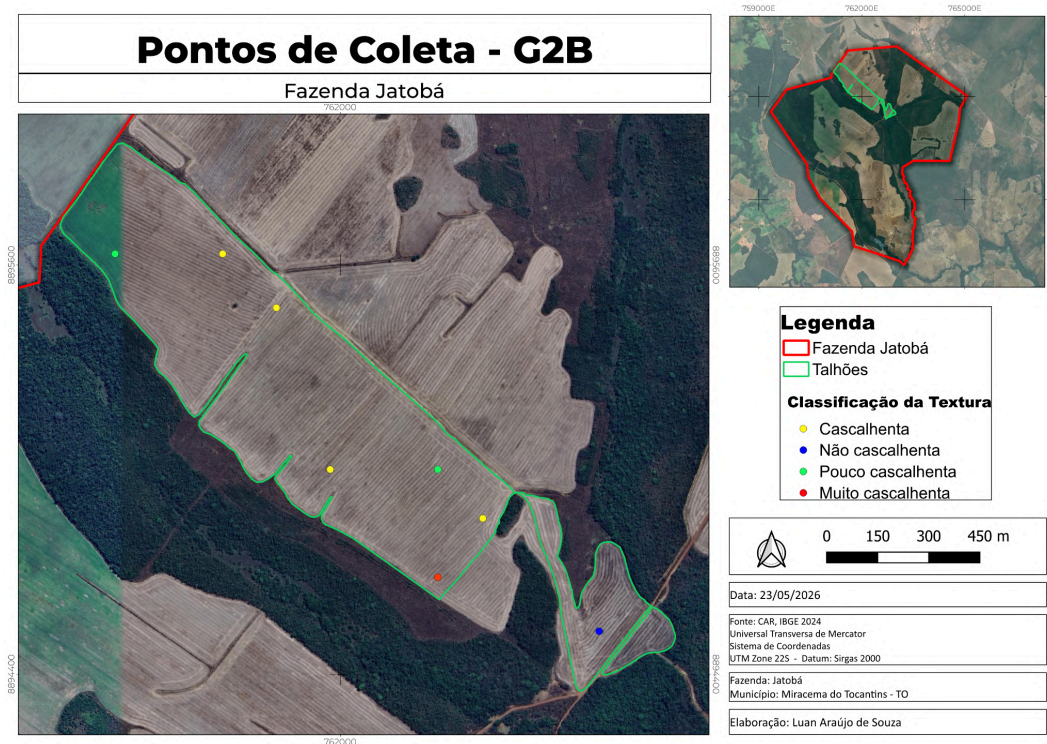
Figura 8 - Pontos de coleta talhão G2A



Fonte: Autor (2026)

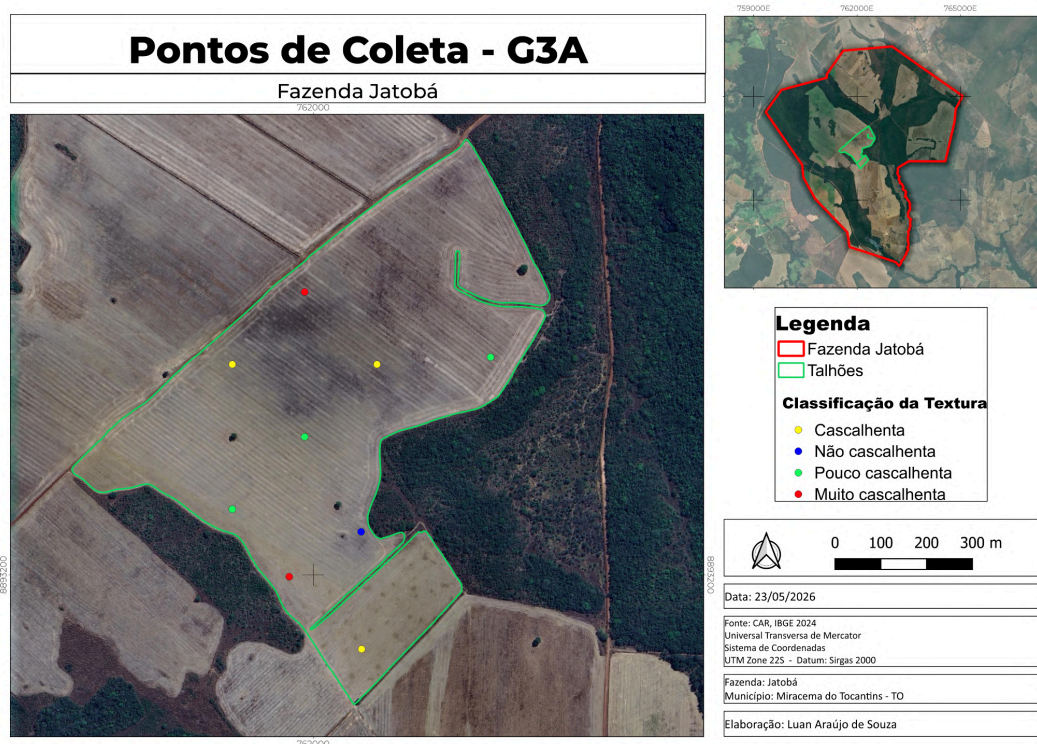
Na gleba G2B (Figura 9) ocorreu predominância da classe cascalhenta, embora a presença das demais classes demonstra que a distribuição dos fragmentos grosseiros não ocorre de maneira uniforme, fato que contribui para a formação de ambientes com características físicas distintas e reforça a heterogeneidade espacial existente na área estudada.

Figura 9 - Pontos de coleta talhão G2B



Fonte: Autor (2026)

A gleba G3A (Figura 10) apresentou distribuição mais equilibrada entre as classes avaliadas, com participação expressiva das classes pouco cascalhenta e cascalhenta e ocorrência pontual das classes extremas, resultado que evidencia elevada variabilidade espacial da fração grosseira e demonstra a complexidade dos atributos físicos dos solos presentes na área experimental.

Figura 10 - Pontos de coleta talhão G3A

Fonte: Autor (2026)

É possível observar a predominância das classes cascalhenta e muito cascalhenta nas quatro glebas avaliadas. Destaca-se a gleba G1, que apresentou elevado teor de cascalho, com todos os cinco pontos amostrais classificados como nota 4. As demais glebas também apresentaram altos índices de cascalho superficial, porém com distribuição mais heterogênea entre as classes avaliadas.

Quadro 2: Distribuição das classes de fração grosseira do solo nas glebas avaliadas.

Gleba	Não cascalhenta (1)	Pouco Cascalhenta (2)	Cascalhenta (3)	Muito Cascalhenta (4)
G1	0	0	0	5
G2A	1	1	1	2
G2B	1	2	4	1
G3A	1	3	3	2

Fonte: Autor (2026)

Essa variabilidade demonstra que, mesmo em áreas com elevada presença de fragmentos grosseiros, existe heterogeneidade espacial na constituição física do solo da área estudada, evidenciando variações no teor de cascalho entre os diferentes pontos amostrados em concordância com Almeida (2023).

A distribuição irregular do cascalho superficial está relacionada aos processos pedogenéticos característicos dos Plintossolos, especialmente à presença de concreções ferruginosas e materiais endurecidos no perfil do solo, conforme discutido por Campos et al. (2025).

Em períodos de menor disponibilidade hídrica, essas limitações tornam mais evidentes, podendo comprometer o desempenho produtivo da soja. Segundo Silva e Nogueira Junior (2001), alterações nos atributos físicos do solo podem afetar diretamente o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Os resultados obtidos reforçam a importância do uso de ferramentas de agricultura de precisão e geotecnologias na identificação da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, permitindo maior detalhamento das áreas agrícolas e subsidiando práticas de manejo localizadas.

4.2 Distribuição espacial dos atributos químicos do solo

De acordo com McBratney et al. (2003), a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo pode ser identificada e modelada por meio de métodos geoestatísticos e do mapeamento digital de solos. Nesse contexto, os mapas apresentados na Figura 11 evidenciaram variabilidade espacial da capacidade de troca catiônica (CTC), do pH, da saturação por bases e dos teores de fósforo entre as glebas avaliadas, demonstrando diferenças nas condições químicas da área experimental e reforçando a influência da heterogeneidade do solo sobre o potencial produtivo das áreas agrícolas.

A distribuição espacial da CTC apresentou predominância de valores médios a elevados em determinados setores da área experimental, indicando maior capacidade de retenção de nutrientes e melhor disponibilidade para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Entretanto, áreas com elevada presença de fragmentos grosseiros podem apresentar redução do volume efetivo de terra fina, diminuindo a superfície de retenção de cátions e

influenciando a dinâmica química do solo, comportamento observado em setores específicos da Figura 11 (Silva et al., 1994).

Os valores de pH apresentaram predominância nas faixas entre 5 e 6, consideradas adequadas para o desenvolvimento da soja, embora tenha sido observada variabilidade espacial desse atributo entre as glebas avaliadas, conforme representado na Figura 11. Além disso, áreas com elevada fração grosseira podem apresentar menor retenção de água e nutrientes, afetando indiretamente a dinâmica química do solo e a disponibilidade de elementos essenciais às plantas, demonstrando relação entre os atributos químicos mapeados e as limitações físicas observadas nas áreas com maior ocorrência de cascalho superficial (Taiz et al., 2017).

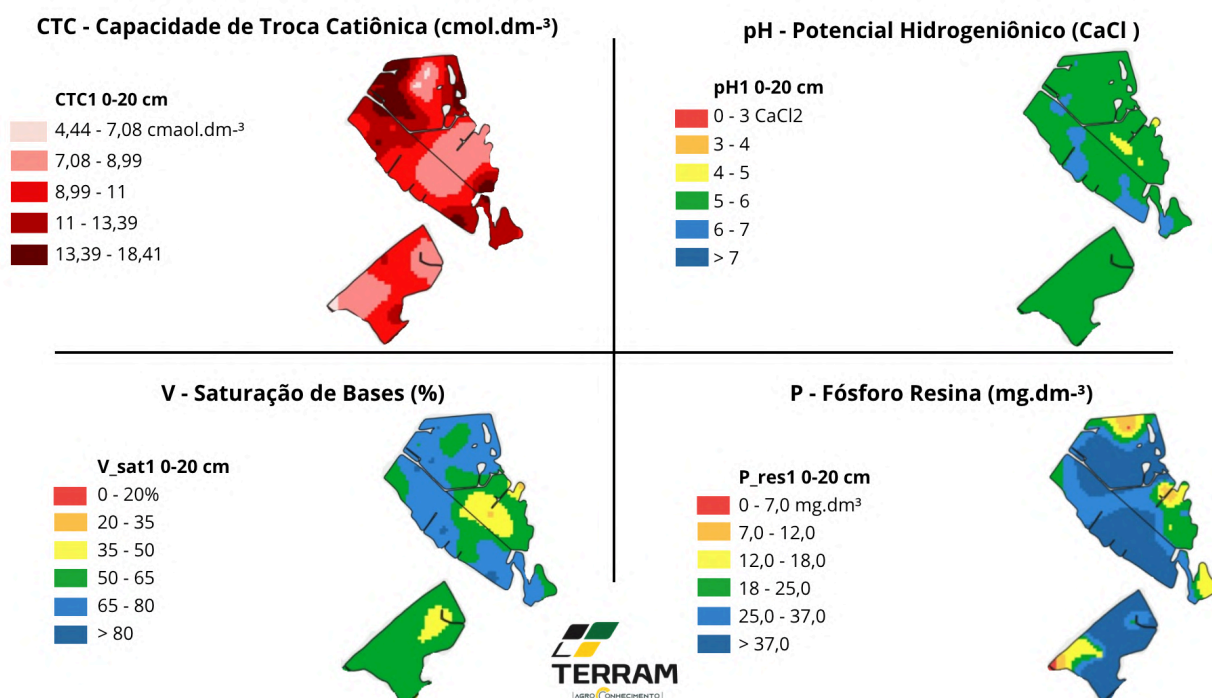
A saturação por bases apresentou distribuição espacial heterogênea, com predominância de valores médios a altos em parte da área experimental, indicando condições químicas favoráveis ao desenvolvimento agrícola, conforme observado na Figura 11. A saturação por bases considerada adequada para a camada de 0–20 cm é de aproximadamente 70%, enquanto para a camada de 20–40 cm recomenda-se valor em torno de 40%. Contudo, em ambientes com elevada presença de cascalho superficial, a redução do volume efetivo de solo pode limitar o armazenamento de nutrientes e restringir o aproveitamento desses elementos pelas plantas, influenciando diretamente o potencial produtivo das glebas avaliadas (Cantarella et al., 2022).

Os teores de fósforo disponíveis apresentaram elevada variabilidade espacial entre as glebas avaliadas, evidenciando diferenças relacionadas ao manejo agrícola e à dinâmica química do solo, conforme apresentado na Figura 11. Em áreas com maior ocorrência de fragmentos grosseiros, a menor profundidade efetiva do solo e as limitações ao desenvolvimento radicular podem comprometer a absorção de fósforo pela cultura. Além disso, aplicações superficiais associadas à baixa mobilidade do fósforo em solos altamente intemperizados favorecem sua concentração nas camadas superficiais e escassez em profundidade, influenciando diretamente o potencial produtivo das áreas agrícolas avaliadas (Santos et al., 2008).

Do mesmo modo, as diferenças observadas nos atributos químicos do solo corroboram Campagnaro et al. (2025), que destacam a influência dos fatores ambientais e das tecnologias empregadas sobre o rendimento e a qualidade dos grãos de soja, demonstrando que a

variabilidade espacial dos atributos do solo pode impactar diretamente o desempenho produtivo das áreas agrícolas avaliadas.

Figura 11 – Distribuição espacial dos atributos químicos do solo nas glebas avaliadas.



Fonte: TERRAM Agro Conhecimento, adaptado pelo autor (2025).

Os mapas são fundamentais porque representam tanto uma condição de uma área de interesse quanto a prescrição dos insumos necessários para gerenciar uma condição particular de determinada área (Pierce & Nowak, 1999).

4.3 Produtividade da cultura da soja

A produtividade da cultura da soja apresentou variabilidade entre as glebas avaliadas, evidenciando diferenças no potencial produtivo da área de estudo. Os dados de produtividade foram obtidos a partir dos mapas gerados pelo monitor de produtividade GEN 4 instalado na colheitadeira John Deere S550 que gera mapas de colheita em tempo real que são exportados para o Operation Center (Deere & Company, 2026).

A maior produtividade média foi observada na gleba G3A (Quadro 3), com rendimento de 4,7 t ha⁻¹, enquanto a menor produtividade ocorreu na gleba G1, com média de

3,4 t ha⁻¹. As glebas G2A e G2B apresentaram comportamento intermediário, com produtividades de 4,1 e 3,8 t ha⁻¹, respectivamente.

Quadro 3 – Produtividade média da soja nas glebas avaliadas

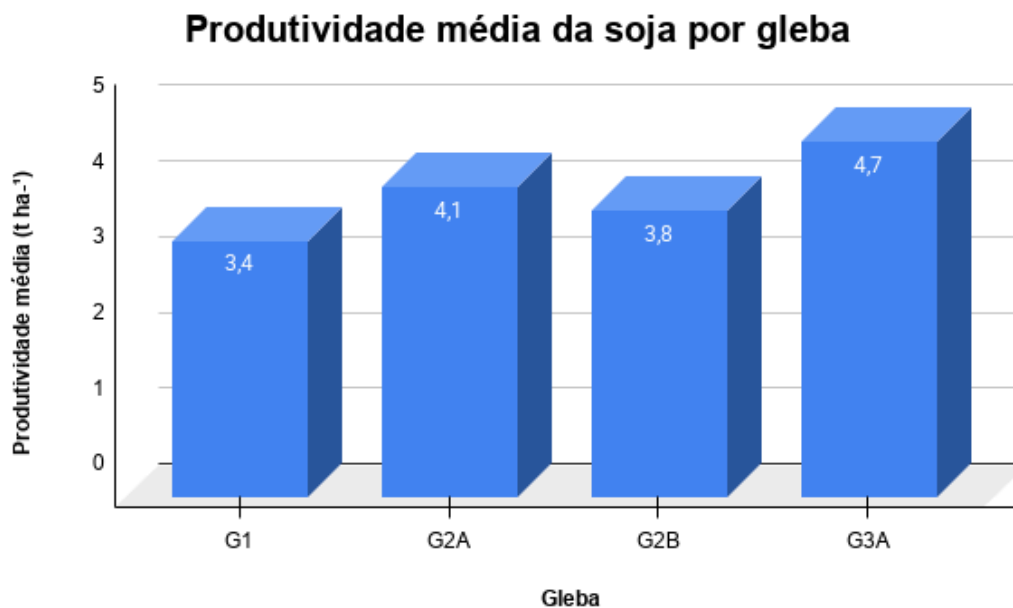
Gleba	Produtividade média (t ha⁻¹)
G1	3,4
G2A	4,1
G2B	3,8
G3A	4,7

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

A diferença entre as glebas demonstra a ocorrência de variabilidade espacial da produtividade agrícola na área estudada, condição frequentemente observada em sistemas agrícolas manejados sob agricultura de precisão. Essa variabilidade pode estar associada às diferenças nos atributos físicos do solo, especialmente à distribuição da fração grosseira superficial (Grego; Vieira, 2005; Werner, 2007).

A variabilidade observada no gráfico 1 pode estar associada às limitações físicas impostas pela presença de fragmentos grosseiros no solo, os quais reduzem o volume efetivo de terra fina disponível às plantas, comprometendo a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento radicular da cultura. Esse comportamento está de acordo com estudos realizados por Santos et al. (2022) e Teixeira (2022), que verificaram redução da produtividade da soja em áreas com elevada ocorrência de fração grosseira em Plintossolos do Cerrado.

Gráfico 1 - Comparação da produtividade média da cultura da soja nas glebas avaliadas.

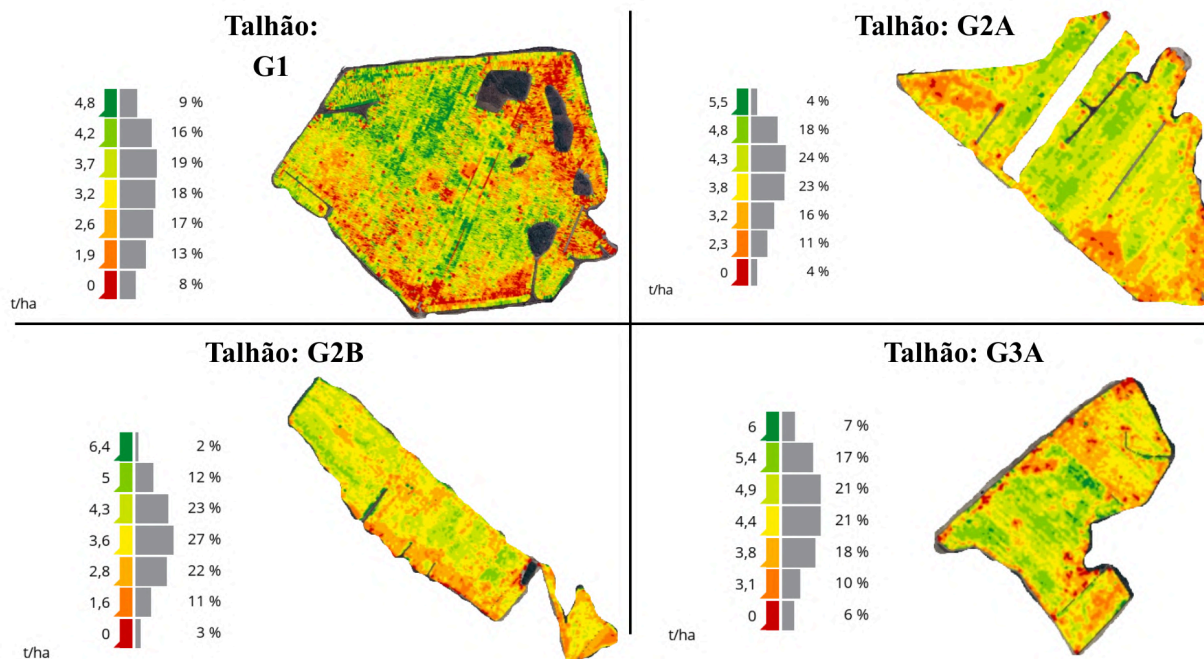


Fonte: Dados da pesquisa (2026)

Os mapas de produtividade permitiram identificar a distribuição espacial do rendimento da cultura da soja nas glebas avaliadas, evidenciando a ocorrência de ambientes com diferentes potenciais produtivos ao longo da área experimental (Figura 12). Segundo Molin (2002), os mapas de produtividade são considerados a alternativa mais completa para discriminar a variabilidade espacial das lavouras.

Nos Plintossolos, essas restrições físicas tendem a ser ainda mais importantes devido à ocorrência de concreções ferruginosas e materiais endurecidos no perfil do solo. Campos et al. (2025) destacam que esses solos apresentam elevada heterogeneidade física, condição que dificulta o manejo agrícola e contribui para maior variabilidade produtiva dentro das áreas cultivadas.

Os mapas evidenciaram elevada variabilidade espacial da produtividade, com ocorrência de zonas de maior e menor rendimento dentro das glebas avaliadas.

Figura 12 – Mapa de produtividade da soja.

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

4.4. Análise estatística da produtividade da soja em função das classes de cascalho

4.4.1 Estatística descritiva das classes de cascalho

As maiores médias de produtividade da soja foram observadas nas áreas com menor presença de cascalho superficial. A classe 1 apresentou produtividade média de 4,85 t ha⁻¹, enquanto a classe 4 apresentou média de 3,88 t ha⁻¹. As classes 2 e 3 apresentaram valores intermediários e comportamento semelhante entre si (Tabela 1).

Tabela 1 - Estatística descritiva da produtividade da soja em função das classes de cascalho.

Descritivas de Grupo					
	Notas de Cascalho	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Produtividade de Soja	4	10	3.88	0.8829	0.2792
	3	8	4.54	0.8501	0.3006
	2	7	4.57	0.6317	0.2388
	1	2	4.85	0.0707	0.0500

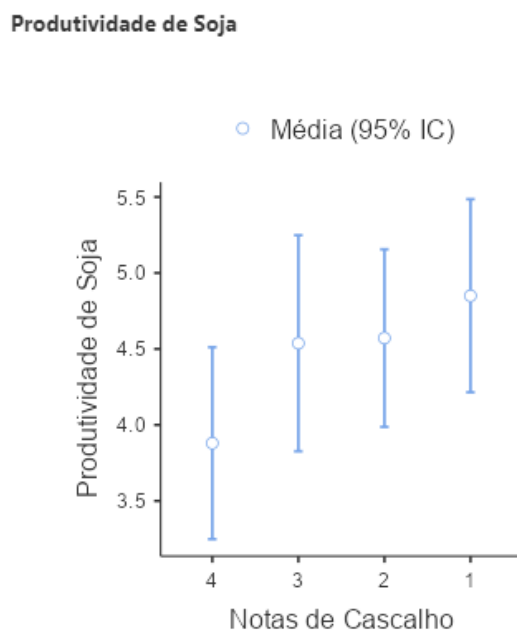
Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Esse comportamento indica possível influência do cascalho superficial sobre as condições físicas do ambiente radicular e sobre a disponibilidade hídrica do solo. Também foi observada maior variabilidade produtiva nas classes 3 e 4, fato relacionado à heterogeneidade espacial das áreas avaliadas, conforme observado por Nogueira Junior (2001).

As classes intermediárias apresentaram pequena diferença entre as médias de produtividade, evidenciando comportamento semelhante entre si, enquanto os extremos das classes avaliadas apresentaram maior diferença numérica, com maiores rendimentos associados às áreas com menor ocorrência de fragmentos grosseiros e menores médias registradas nas áreas mais cascalhentas. Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al. (2022) e Teixeira (2022), os quais verificaram redução da produtividade da soja em áreas com elevada ocorrência de fração grosseira em Plintossolos do Cerrado.

O comportamento apresentado no gráfico de médias (Gráfico 2) acompanhou os resultados obtidos na estatística descritiva, reforçando a tendência de redução da produtividade em ambientes com maiores níveis de cascalho superficial, embora a diferença entre as classes intermediárias tenha sido menos evidente, fato que demonstra a elevada variabilidade existente dentro dos grupos avaliados.

Gráfico 2 - Média da produtividade da soja.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

4.4.2 Análise de variância (ANOVA)

Com base nas classes qualitativas de cascalho estabelecidas para o estudo, a variável produtividade da soja foi comparada entre os diferentes grupos por meio da análise de variância, conforme descrito por Martins (2008). A ANOVA apresentou diferença global entre as classes de cascalho para a produtividade da cultura ($p = 0,032$), conforme apresentado na Tabela 2, indicando comportamento distinto entre os grupos avaliados.

Tabela 2 - Análise de variância.

ANOVA a um fator (Welch)				
	F	gl1	gl2	p
Produtividade de Soja	4.07	3	12.4	.032

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

As diferenças observadas entre as médias das classes reforçam a tendência de menores produtividades nas áreas com maior ocorrência de fragmentos grosseiros, resultado frequentemente associado às limitações físicas impostas ao solo, como a redução do volume efetivo de terra fina, menor retenção de água e restrições ao desenvolvimento radicular. Essas características assumem maior importância em períodos de deficiência hídrica e encontram respaldo em estudos conduzidos por Almeida (2023), Santos et al. (2022) e Teixeira (2022), os quais relataram redução do rendimento da soja em áreas com elevada ocorrência de fração grosseira em Plintossolos do Cerrado.

Entretanto, a significância observada na análise de variância deve ser interpretada com cautela, uma vez que os testes complementares não confirmaram de forma consistente diferenças entre pares específicos de médias. Além disso, a elevada variabilidade existente dentro das próprias classes qualitativas de cascalho e a influência simultânea de fatores físicos, químicos, biológicos e de manejo sobre a produtividade da soja dificultam a atribuição exclusiva das diferenças observadas à presença de fragmentos grosseiros no solo, uma vez que o desempenho produtivo da cultura resulta da interação entre diversos componentes do ambiente de produção (Dalchiavon; Carvalho, 2012;; Gelain et al., 2021; THomas et al., 2010)

4.4.3 Teste de comparação de médias (Tukey)

Segundo Gomes (2009), a identificação de significância na análise de variância torna necessária a aplicação de testes de comparação múltipla, permitindo verificar diferenças entre pares específicos de médias. No presente estudo, o teste de Tukey a 5% não identificou diferenças estatísticas entre os grupos avaliados, uma vez que os valores de p permaneceram acima de 0,05 (Tabela 3).

Tabela 3 - Teste de Tukey.

Teste Post-Hoc de Tukey – Produtividade de Soja					
		4	3	2	1
4	Diferença média	—	-0.657	-0.6914	-0.970
	valor-p	—	.323	.313	.410
3	Diferença média		—	-0.0339	-0.313
	valor-p		—	1.000	.959
2	Diferença média			—	-0.279
	valor-p			—	.971
1	Diferença média				—
	valor-p				—

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A ausência de significância entre os pares de médias esteve associada à elevada variabilidade existente dentro das classes de cascalho e ao reduzido número de observações em algumas categorias, principalmente na classe 1, condição relacionada à predominância natural de ambientes cascalhentos na região estudada (Seplan, 2015).

Mesmo sem diferença estatística entre os pares de médias, a comparação entre os extremos das classes avaliadas revelou diferença numérica de aproximadamente 0,97 t ha⁻¹ entre as classes 1 e 4, indicando tendência de menores produtividades nas áreas com maior ocorrência de fragmentos grosseiros, resultado semelhante ao descrito por Almeida (2023).

Além disso, a utilização de classes qualitativas de cascalho pode ter contribuído para o aumento da variabilidade dentro dos grupos, uma vez que amostras com diferentes teores de fragmentos grosseiros podem ser agrupadas em uma mesma classe, reduzindo a sensibilidade das análises estatísticas quantitativas.

As classes 2 e 3 apresentaram comportamento produtivo semelhante, sugerindo que níveis intermediários de cascalho superficial podem apresentar resposta menos evidente sobre a produtividade da cultura.

4.4.4 Regressão linear entre cascalho e produtividade

A análise de regressão linear apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 18,6%, indicando que apenas uma parcela da variabilidade observada na produtividade da soja esteve associada às classes de cascalho avaliadas (Tabela 4). O comportamento da reta de regressão indicou tendência de redução da produtividade com o aumento da ocorrência de fragmentos grosseiros, embora a magnitude dessa relação tenha sido limitada.

Tabela 4 - Teste global da regressão.

Medidas de Ajustamento do Modelo						
Modelo	R	R^2	Teste ao Modelo Global			
			F	gl1	gl2	p
1	0.432	0.186	1.76	3	23	.183

Nota. Models estimated using sample size of N=27

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

O baixo coeficiente de determinação evidencia a influência conjunta de fatores físicos, químicos, biológicos e de manejo sobre o desempenho produtivo da cultura, característica comum em estudos conduzidos em condições de campo, nos quais a produtividade da soja resulta da interação entre diversos componentes do ambiente de produção (Dalchiavon; Carvalho, 2012; Gelain et al., 2021)

Dessa forma, o cascalho superficial não deve ser interpretado como o único fator determinante da produtividade, mas sim como um dos componentes que contribuem para sua variação. Além disso, mesmo sem elevada capacidade explicativa do modelo, se observa tendência de redução produtiva nas áreas com maior ocorrência de cascalho superficial, resultado coerente com a literatura, que descreve limitações físicas e hídricas em solos com maior presença de fragmentos grosseiros (De Almeida et al., 2020).

Apesar dessa tendência observada nos dados, o teste estatístico não apresentou significância para afirmar que o cascalho, isoladamente, foi responsável pelas diferenças de produtividade entre as áreas avaliadas. Isso pode ser explicado pelo baixo número de pontos amostrais, fazendo com que outros fatores como já dito possam ter influenciado na análise estatística das classes texturais e mesmo que os números mostrem que quanto mais cascalho menor a produtividade estatisticamente a variação do mesmo foi pouco responsável para isso.

4.4.5 Verificação dos pressupostos estatísticos

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apresentou valor de $p = 0,901$, indicando distribuição normal dos resíduos e atendimento aos pressupostos necessários para aplicação

das análises paramétricas realizadas no estudo. A verificação da normalidade dos dados é fundamental para dar suporte estatístico à análise de variância e demais testes paramétricos, permitindo inferências estatísticas confiáveis quando os pressupostos são atendidos e há tamanho amostral adequado, conforme descrito por Wooldridge (2010).

Tabela 5 - Teste de Shapiro-Wilk

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)	
Estatística	p
0.982	.901

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Esse resultado demonstra que os modelos estatísticos aplicados apresentaram adequação para interpretação dos dados obtidos na área experimental mesmo com o número reduzido de pontos amostrais em algumas classes de cascalho, fator que pode ter influenciado a variabilidade dos resultados estatísticos. Segundo Thomas et al. (2010), a produtividade da soja é influenciada por diversos fatores relacionados ao solo, clima e manejo, não estando associada exclusivamente à presença de fragmentos grosseiros. Ou seja, os resultados permitiram identificar comportamento consistente de menor produtividade em áreas com maior ocorrência de cascalho superficial.

5. CONCLUSÃO

Em suma, os resultados indicaram tendência de maiores produtividades da soja em áreas com menor ocorrência de cascalho superficial. Embora a análise de variância tenha apresentado diferença global entre as classes avaliadas, os demais testes estatísticos não confirmaram essa relação de forma consistente, evidenciando a influência conjunta de outros fatores físicos, químicos, biológicos e de manejo sobre a produtividade da cultura.

A elevada variabilidade dentro das classes qualitativas de cascalho e a reduzida representatividade das áreas com menor ocorrência de fragmentos grosseiros limitaram a sensibilidade de parte das análises estatísticas realizadas. Dessa forma, a presença de cascalho superficial não deve ser interpretada como o único fator responsável pela variabilidade produtiva observada nas glebas estudadas.

As ferramentas de agricultura de precisão permitiram melhor compreensão da heterogeneidade produtiva das áreas avaliadas, contribuindo para a identificação da variabilidade espacial e reforçando a importância da avaliação dos atributos físicos do solo em ambientes com elevada ocorrência de fragmentos grosseiros.

Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre o comportamento produtivo da soja em áreas de Cerrado com presença de cascalho superficial no Tocantins. Além disso, evidenciam a necessidade do desenvolvimento de metodologias quantitativas para avaliação da fração grosseira, associadas a maior densidade amostral, visando aumentar a precisão das análises estatísticas e ampliar a compreensão da relação entre os fragmentos grosseiros e a produtividade da soja.

REFERÊNCIAS

ALGTHAMI, N. M. J.; HUSSIN, N. Meta-Analytic Evidence for Board Characteristics as Correlates of Firm Performance Among Saudi Arabian Businesses. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, Islamabad, v. 12, n. 6, 4 jun. 2022. DOI: 10.6007/IJARBSS/v12-i6/13886.

ALMEIDA, R. E. M. et al. Uso agrícola dos Plintossolos Pétricos do oeste do estado do Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2023, Brasília, DF. Anais [...]. Brasília, DF: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2023. p. 815. Acesso em: 21 maio 2026.

ALMEIDA, R. E. M. et al. Recommendation of soil fertilization with copper and zinc for soybean crops grown in Petric Plinthosol. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 53, n. 4, e20210722, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210722>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/F7wLxWkM3v7bXv9x4WJm7Ks/>. Acesso em: 21 maio 2026.

CAMPAGNARO, N.; NEVES, E. das; BRUM, E. V. P.; DIPPLE, F. L.; BARCELOS, A. I. H. A produtividade da soja e seu resultado associado às condições ambientais: revisão de literatura. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, [S. l.], v. 23, n. 1, p. e8807, 2025. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/8807>.

CANTARELLA, Heitor et al. *Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo (Boletim 100)*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. 489 p.

ANDRADE, A. M. Análise prospectiva do sistema produtivo da soja no estado do Tocantins, considerando cenários de recursos hídricos e climatológicos. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020. Disponível em:

<http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/5857/1/Andre%20de%20Moura%20Andrade%20-%20Disserta%20a7%20a3o.pdf>. Acesso em: 17 maio 2026.

BALAFOUTIS, A. et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, v. 9, n. 8, p. 1339, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/8/1339>. Acesso em: 23 maio 2026.

BORGES, M. C. R. Z.; NOGUEIRA, K. B.; ROQUE, C. G.; BARZOTO, G. R. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade da soja em diferentes sistemas de preparo após o consórcio sorgo-brachiaria. *Acta Iguazu*, Cascavel, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/23261>. Acesso em: 20 maio 2026.

CAMPOS, D. S. et al. Plintossolos pétricos do Tocantins. In: FONTANA, A.; LOSS, A.; PEDRON, F. A. (org.). *Compêndio de solos do Brasil*. Santa Maria, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025. v. 2, p. 146-170. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1178440/1/PlintossolosPetricosTocantins.pdf>. Acesso em: 21 maio 2026.

Colheitadeira S550. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/s%3a9rie-s/s550/>. Acesso em: 25 maio 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/24. 12. levantamento. Brasília, DF, v. 11, n. 12, set. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 02 maio 2026.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541–552, 2012. Disponível em: [Artigo Semina UEL](#). Acesso em: 28 maio 2026.

DAUGHERTY, L.A. & ARNOLD, R.W. Mineralogy and iron characterization of plinthic soils on alluvial landforms in Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1244-1252, 1982.

DE ALMEIDA, R. E. M. et al. Expansão agrícola em áreas de difícil manejo: cultivo em solos com cascalho. 2020.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [s.l.], v. 51, n. 9, p.1003-1020, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900001>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Dados econômicos da soja. Londrina: Embrapa Soja, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 17 maio 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 2018.

FARIA, L. A. et al. Características agronômicas de soja cultivadas na região central do Tocantins em diferentes épocas de semeadura. *Journal of Bioenergy and Food Science*, Macapá, v. 3, n. 5, p. 85-96, 2018. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/4ed6/53d246ebf8cc52bd779bb00ff505052acf4a.pdf>. Acesso em: 05 maio 2026.

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. Disponível em: Google Books – Curso de Estatística Experimental. Acesso em: 28 maio 2026.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>. Acesso em: 23 maio 2026.

HAUSCHILD, F. E. G. Técnicas de agricultura de precisão para definição de zonas de manejo de solo. 2013. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/>. Acesso em: 23 maio 2026.

MAREK, J.; MAJ, E.; PRZYBYLA, O. K.; SKRZYNSKI, W.; PASICZ, K.; FABISZEWSKA, E.; PRUSZYNSKI, A.; ROWINSKI, O. The impact of studying on the hippocampal volume in medical students and its correlation with the results of the Final Medical Examination: a single-centre, prospective observational cohort study. *Polish Journal of Radiology*, Warsaw, v. 88, p. 22–30, 16 jan. 2023. DOI: 10.5114/pjr.2023.124433.

MARTINS, G. A. *Estatística geral e aplicada*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008. ISBN9788522441723.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, v.97, p.293-327, 2000.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. Engenharia Agrícola, v.22, p.83-92, 2002

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (ed.). The state of site-specific management for agriculture. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1997. p. 1-18.

NUNES, J. C. Aplicações de geotecnologias na agricultura de precisão. 2018.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy, San Diego, v. 67, p. 1-85, 1999.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. Tópicos de Ciência do Solo, [s. l.], v. 5, p. 49-134, 2007. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Compacta%C3%A7%C3%A3o+do+solo+em+sistemas+agropecu%C3%A1rios+e+florestais%3A+Identifica%C3%A7%C3%A3o%2C+efeitos%2C+limites+cr%C3%ADticos+e+mitiga%C3%A7%C3%A3o&btnG=. Acesso em: 20 maio 2026.

ROSANOVA, C. et al. A expansão do agronegócio da soja no Tocantins: contextualização dos impactos e mudanças no desenvolvimento regional. In: OPEN SCIENCE RESEARCH IV. 1. ed. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 158-167. DOI: <https://doi.org/10.37885/220609176>. Acesso em: 14 maio 2026.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, J. R. et al. Avaliação da produtividade da soja em Latossolo e Plintossolo Pétrico Concrecionário no município de Porangatu-GO. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – [s. l.], 2022. Acesso em: 19 maio 2026.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos et al. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. Ciência Rural, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 576-586, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782008000200049>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>. Acesso em: 07 abr. 2024

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

SILVA, A. P.; NOGUEIRA JUNIOR, J. B. Avaliação de atributos físicos do solo relacionados ao desenvolvimento das plantas. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. Qualidade física do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p. 1-14.

SILVA, R. A.; DALCHIAVON, F. C. Déficit de armazenagem da produção agrícola do Tocantins. *Revista Ipecege*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 19-27, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2018.1.19>. Disponível em: <https://www.revista.ipecege.com/Revista/article/view/181>. Acesso em: 10 maio 2026.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, p. 541-547, 1994.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, n. 39, p. 3733-3740, 2016.

Taiz, L., E. Zeiger, I.M. Moller. & A. Murphy. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed Editora.

TEIXEIRA, D. S. Cultivo de soja em solos cascalhentos no Cerrado Goiano. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2022. Acesso em: 20 maio 2026.

THE JAMOVİ PROJECT. Jamovi. Version 2.7. Sydney: Jamovi, 2025. Software. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 11 maio 2026.

VIEIRA, S. R. Análise da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico em Campinas. Campinas, 2004. 57 f. Relatório FAPESP 02/02863-3.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 1, p. 1-53, 2000

WOOLDRIDGE, J. M. Introdução à econometria: uma abordagem moderna. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.