



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

JOÃO LEVI OLIVEIRA SANTOS

**DEFINIÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLINTOSSOLOS PÉTRICOS
PARA A CULTURA DA SOJA (*Glycine Max L.*)**

**PALMAS
2026**

JOÃO LEVI OLIVEIRA SANTOS

**DEFINIÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLINTOSSOLOS PÉTRICOS
PARA A CULTURA DA SOJA (*Glycine Max L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Agrônômica da
Unidade *Campus* Palmas, do Instituto
Federal do Tocantins, como exigência à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Agrônômica.

Orientador: Dr. Edvaldo Vieira Pacheco
Sant`Ana.

Coorientador: Dr. Rodrigo Estevam Munhoz
de Almeida.

**PALMAS
2026**

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

S237d Santos, João Levi Oliveira
DEFINIÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLINTOSSOLOS
PÉTRICOS PARA A CULTURA DA SOJA (Glycine Max L.) / João Levi
Oliveira Santos. – Palmas, TO, 2026.
45 p. : il.

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

Orientador: Dr. Edvaldo Vieira Pacheco Sant'ana.

Coorientador: Dr. Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida

1. Plintossolo Pétrico. 2. Soja (Glycine max L.). 3. Manejo. I. Sant'ana,
Edvaldo Vieira Pacheco. II. Almeida, Rodrigo Estevam Munhoz de. 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

JOÃO LEVI OLIVEIRA SANTOS

DEFINIÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLINTOSSOLOS PÉTRICOS PARA A CULTURA DA SOJA (GLYCINE MAX)

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: 08 de junho de 2026

BANCA AVALIADORA

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

Profa. Dr. Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida
Embrapa

Prof. Me. José Eustáquio Canguçu Leal
IFTO - Campus Palmas - TO



Documento assinado eletronicamente por **Jose Eustaquio Canguçu Leal, Servidor**, em 08/06/2026, às 17:03, 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 **Rodrigo estevam Munhoz de Almeida, Usuário Externo**, em 12/06/2026, às 12:21, 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 **Edvaldo Vieira Pacheco Santana, Coordenador**, em 15/06/2026, às 10:33, 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 **3208702** e o código CRC **5C8EF917**.



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 23236.012291/2026-68

SEI nº 3208702

AGRADECIMENTOS

Toda honra e toda glória sejam dadas a Deus.

Agradeço ao meu orientador Rodrigo Munhoz (Txarli Braun), por ter acreditado em mim e por ter me tornado uma pessoa e um profissional melhor.

Ao meu orientador Edvaldo, por todo o suporte e ajuda em todos os anos de faculdade, muito além de um orientador, um amigo. Obrigado por aceitar fazer parte da minha história e por confiar em mim ao me indicar para ser colaborador do Grupo Michels.

Ao Instituto Federal do Tocantins, pela estrutura de ensino e a todos os professores que fizeram parte da minha formação e me guiaram no caminho da excelência.

À minha família, pelo amor incondicional. Agradeço aos meus pais, Inácio e Sebastiana, os quais fizeram com que o meu sonho se tornasse realidade. Sem o apoio e o amor de vocês, sem dúvida eu não teria chegado até aqui. Agradeço à minha irmã Sara Júlia por ser minha amiga e companheira. Aos meus avós, Francisco (Cazuza) e Maria de Jesus, que sempre me amaram e me apoiaram.

À Embrapa Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas pela oportunidade de estágio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa.

Agradeço aos proprietários da Fazenda Gaivota, por cooperarem com a viabilização do trabalho.

A todos os amigos do TREMA (Turma do Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida) e outros grupos da Embrapa: Beatriz (Belatrix), Geovana (Rodovalho), Sofia (Hortegal), Letícia (Tuca Oliveira), Letícia Marinho (Zula), Samuel (Ki Uña), Águeda (Lagreda), Myria, Tharlysson, Mateus, Francelino e Sérgio. Agradeço por todo o apoio, pelas horas de trabalho, ensinamentos e vivências compartilhadas.

Agradeço à minha companheira de todos os momentos, Maria Cristina, pelo apoio incondicional. Por sempre acreditar em mim, por ser o meu porto seguro, a minha inspiração para ser melhor. Sem você eu não teria chegado até aqui. Te amo.

Agradeço aos amigos que me ajudaram nessa jornada: Pastro Mário e Pastora Liliane, Jorley, Athirson, Ana Luiza, Mariana e Amanda.

Agradeço ao Sr. Antônio, por ser o dono da kitnet onde morei durante toda a faculdade. O senhor foi um grande suporte para mim.

À banca examinadora, em especial ao Me. José Eustáquio, por aceitar o convite.

Muito obrigado!

RESUMO

O cultivo da soja em Plintossolos Pétricos do Cerrado apresenta desafios relacionados à elevada presença de cascalho e à grande variabilidade física do solo. O presente trabalho teve como objetivo determinar a faixa de proporção de cascalho associada ao menor risco produtivo da soja em condições comerciais no estado do Tocantins. O experimento foi conduzido em um talhão comercial de 96 ha no município de Pium–TO, utilizando zonas de manejo delimitadas por condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Foram avaliadas cinco zonas com diferentes teores de cascalho, variando de 59% a 94%. Observou-se redução do eestandee de plantas e da produção de biomassa com o aumento da proporção de cascalho. Entretanto, a maior produtividade foi obtida na zona com 76% de cascalho, alcançando 4.562 kg ha⁻¹. Os resultados demonstram que a produtividade da soja não depende exclusivamente da proporção de cascalho, mas da interação entre disponibilidade hídrica, população de plantas e manejo agrônômico. Assim, a agricultura de precisão e o manejo localizado mostram-se importantes para otimizar o potencial produtivo em Plintossolos Pétricos.

Palavras-chave: Plintossolo pétrico. Soja. Variabilidade espacial. Agricultura de precisão. Produtividade.

ABSTRACT

Soybean cultivation in Petric Plinthosols of the Brazilian Cerrado presents challenges related to the high gravel content and soil physical variability. This study aimed to determine the gravel proportion range associated with lower productive risk for soybean cultivation under commercial conditions in Tocantins state, Brazil. The experiment was conducted in a 96-ha commercial field in Pium-TO using management zones defined by apparent soil electrical conductivity (ECa). Five zones with gravel contents ranging from 59% to 94% were evaluated. Plant stand and biomass production decreased with increasing gravel proportion. However, the highest grain yield was observed in the zone with 76% gravel, reaching 4,562 kg ha⁻¹. The results demonstrate that soybean productivity does not depend exclusively on gravel proportion, but also on the interaction between water availability, plant population, and agronomic management. Therefore, precision agriculture and site-specific management are important tools to optimize soybean productivity in Petric Plinthosols.

Keywords: Soybean. Petric Plinthosol. Gravel. Precision agriculture. Productivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de solos do MATOPIBA.....	10
Figura 2 – Desenvolvimento da soja em Plintossolo Pétrico no município de Pium-TO	17
Figura 3 – Localização da fazenda Gaivota e talhão experimental em Pium-TO.....	20
Figura 4 – Sensor de Condutividade Elétrica aparente	21
Figura 5 – Zonas de cascalho definidas por Condutividade Elétrica aparente (CEa)	24
Figura 6 – Delimitação e numeração das zonas de manejo	25
Figura 7 – Mapa de cascalho confeccionado a partir da porcentagem de cascalho em 376 amostras de solo na profundidade de 0-20 cm	26
Gráfico 1 – Gráfico da população da cultura da soja em função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo	27
Gráfico 2 – Massa seca da cultura da soja em função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo	28
Gráfico 3 – Resposta da produção de massa seca da parte aérea da soja ao gradiente de proporção de cascalho no solo.....	29
Gráfico 4 – Produtividade da cultura da soja função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo.....	30
Gráfico 5 – Resposta da produtividade de grãos da soja ao gradiente de proporção de cascalho no solo	31
Figura 8 – Relação entre o desenvolvimento vegetativo e o rendimento da soja ao longo do gradiente de proporção de cascalho no solo	32
Figura 9 – Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 9 (59% de cascalho).....	33
Figura 10 Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 1 (94% de cascalho).....	34
Figura 11 – Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 5 (76% de cascalho).....	34
Figura 12 – Soja sobre palhada de braquiária ruziziensis em Plintossolo Pétrico	36

SUMÁRIO

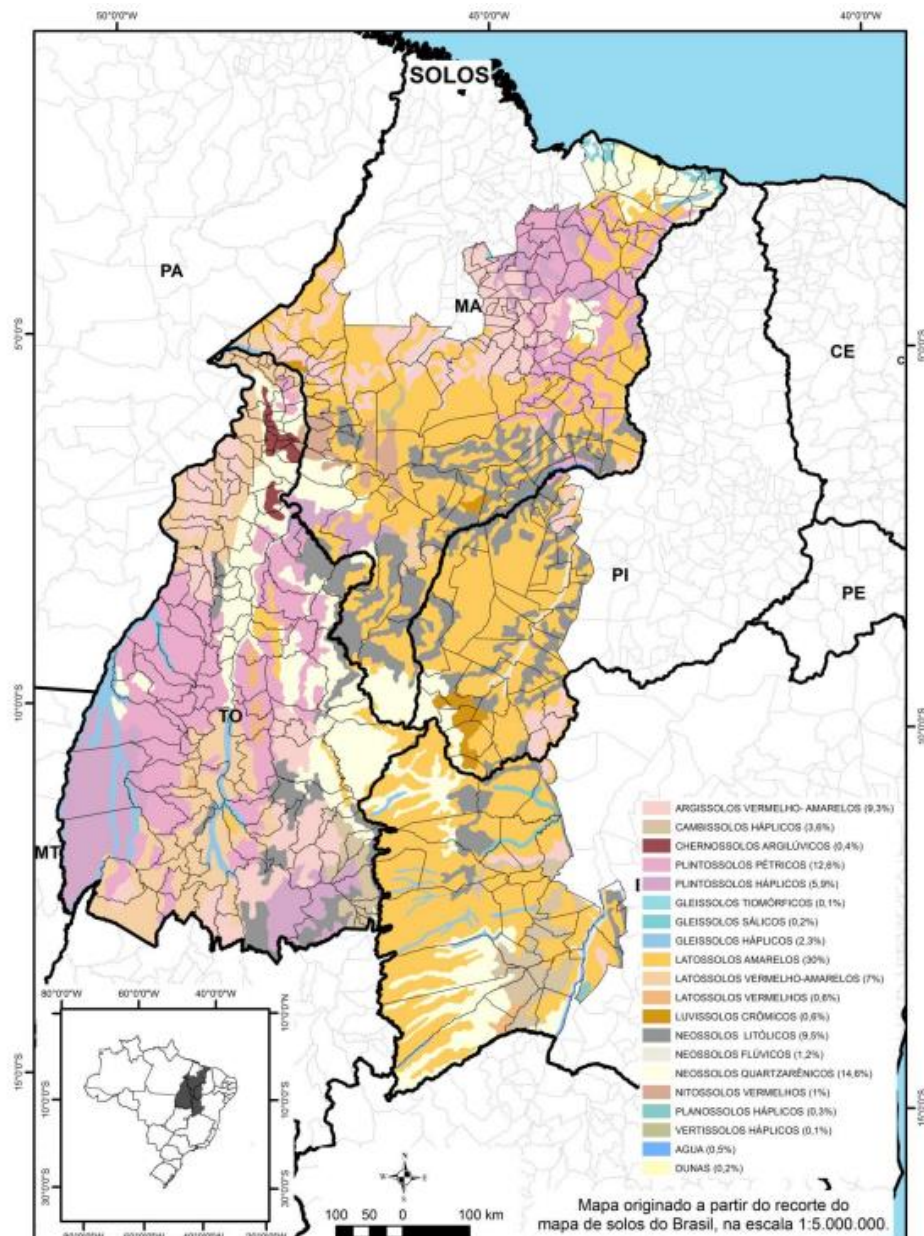
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Problematização	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Justificativa	15
2 DESENVOLVIMENTO	16
2.1 Revisão de Literatura	16
2.1.1 Expansão agrícola no Cerrado	16
2.1.2 Características dos Plintossolos Pétricos	16
2.1.3 Influência da fração grosseira no solo	17
2.1.4 Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade da soja	18
2.1.5 Manejo agrícola em Plintossolos Pétricos	19
2.2 Metodologia	20
2.2.1 Área do estudo	20
2.2.2 Delimitação das zonas com diferentes teores de cascalho	20
2.2.3 Determinação da porcentagem de cascalho na camada de 0–20 cm	21
2.2.4 Implantação e condução da cultura da soja	22
2.2.5 Determinação da produção de massa seca e a produtividade de grãos	22
2.2.6 Análise estatística	23
2.3 Resultados e Discussão	24
2.3.1 Delimitação das zonas com diferentes teores de cascalho	24
2.3.2 Determinação da porcentagem de cascalho na camada de 0–20 cm	25
2.3.3 Implantação e condução da cultura da soja	26
2.3.4 Determinação da produção de massa seca e a produtividade de grãos	27
2.3.5 Relação entre proporção de cascalho e desempenho produtivo da soja	32
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE	41

1. INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura de grãos na região de fronteira agrícola do Brasil Central tem avançado de forma intensa nas últimas décadas, especialmente nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), considerada uma das principais áreas de expansão agrícola do país (ALMEIDA *et al.*, 2023). No estado do Tocantins, esse crescimento ocorreu sobre ambientes edafoclimáticos com elevada variabilidade espacial e limitações físicas importantes ao desenvolvimento das culturas, incluindo áreas ocupadas por Plintossolos Pétricos com presença significativa da fração cascalho em sua composição (ALMEIDA *et al.*, 2023; LUMBRERAS *et al.*, 2015).

Nesse contexto, os Plintossolos Pétricos destacam-se pela ocorrência de horizontes concrecionários ricos em petroplintita, além da elevada presença de cascalho distribuído ao longo do perfil do solo. Esses materiais apresentam elevada densidade e baixa capacidade de retenção hídrica, reduzindo o volume efetivo de solo explorado pelo sistema radicular das plantas e limitando o armazenamento de água disponível (SANTOS *et al.*, 2025; ALMEIDA *et al.*, 2025). Em áreas agrícolas do Tocantins, é comum a ocorrência de elevada variabilidade da proporção de fragmentos grosseiros dentro de um mesmo talhão, criando ambientes produtivos heterogêneos e dificultando a adoção de manejos uniformes (COSTA *et al.*; 2022) (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de solos do MATOPIBA



Fonte: Bolfe, 2015. Legenda: cores distintas representam as classes de solo acompanhadas de suas respectivas porcentagens de ocupação no território.

A presença de fragmentos grosseiros influencia diretamente diversos atributos físicos do solo, incluindo densidade, porosidade, infiltração de água e capacidade de retenção hídrica. Além disso, o aumento da fração cascalhenta reduz proporcionalmente o volume de terra fina responsável pela retenção de água e nutrientes, comprometendo o desenvolvimento radicular e a eficiência de absorção pelas plantas (ALMEIDA *et al.*, 2025). Em condições de déficit hídrico, essas limitações tornam-se ainda mais expressivas, elevando o risco de perdas produtivas em culturas altamente dependentes de adequada disponibilidade de água, como a soja (SANTOS *et al.*, 2022).

A soja (*Glycine max* L.) possui elevada exigência hídrica e nutricional, principalmente durante os estádios reprodutivos relacionados à formação e enchimento de grãos. Dessa forma, restrições físicas do solo podem comprometer significativamente o potencial produtivo da cultura, especialmente em regiões com irregularidade na distribuição das chuvas (BARBOSA *et al.*, 2020). Segundo o IPCC (2022), eventos climáticos extremos e períodos de estiagem tendem a se tornar mais frequentes em regiões tropicais, aumentando a vulnerabilidade de sistemas agrícolas implantados em solos com baixa capacidade de armazenamento de água. Além disso, estudos recentes indicam que a limitação física do solo interfere diretamente na expansão radicular da soja, reduzindo a eficiência de absorção de água e nutrientes em profundidade (CABRAL *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2025).

Estudos conduzidos em áreas comerciais do Tocantins demonstram ampla variação da produtividade da soja em Plintossolos Pétricos, com produtividades oscilando entre aproximadamente 1.600 e 5.200 kg ha⁻¹, dependendo da proporção de cascalho, profundidade efetiva do solo e características granulométricas da fração terra fina (ALMEIDA *et al.*, 2025). Esses resultados evidenciam que pequenas variações na composição física do solo podem gerar diferenças expressivas no desempenho agrônomo da cultura, mesmo sob condições semelhantes de manejo. Segundo Roldão *et al.* (2015), ambientes com elevada restrição física apresentam maior instabilidade produtiva ao longo dos anos agrícolas, principalmente sob ocorrência de veranicos.

Apesar da crescente incorporação desses ambientes à produção agrícola, o manejo das áreas ainda é frequentemente realizado com base em recomendações desenvolvidas para Latossolos do Cerrado, desconsiderando as limitações específicas dos Plintossolos Pétricos. Essa generalização pode resultar em baixa eficiência no uso de insumos, aumento do risco produtivo e redução da sustentabilidade dos sistemas agrícolas implantados nessas áreas (ALMEIDA *et al.*, 2023). Além disso, a ausência de zonas específicas de manejo para os Plintossolos dificulta a adoção de práticas mais adequadas de correção, adubação e manejo hídrico (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Ainda são escassos os estudos que estabelecem limites técnicos relacionados à proporção de cascalho associada ao potencial produtivo da soja em condições comerciais de cultivo. A ausência dessas informações dificulta o planejamento agrícola, a definição de ambientes de manejo e a adoção de estratégias mais adequadas para otimização da produtividade e redução de riscos em áreas com elevada heterogeneidade física (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Dessa forma, ocorre a necessidade do desenvolvimento de estudos que permitam

compreender a relação entre a proporção de fragmentos grosseiros e o desempenho produtivo da soja em Plintossolos Pétricos do Tocantins, contribuindo para a definição de parâmetros técnicos que auxiliem na classificação de ambientes produtivos e no direcionamento de práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis para essas condições de solo.

1.1 Problematização

O avanço da agricultura mecanizada no Tocantins ocorreu de forma acelerada sobre áreas consideradas marginais da agricultura brasileira, incorporando ambientes com elevada ocorrência de solos de difícil manejo como os arenosos e cascalhentos. Em muitos desses locais, a expansão da cultura da soja foi conduzida com base em manejos padronizados, frequentemente adaptados de sistemas produtivos desenvolvidos para Latossolos do Cerrado, sem considerar as limitações específicas dos Plintossolos Pétricos (SANTOS *et al.*, 2025).

Além disso, a ausência de parâmetros técnicos específicos para esses ambientes dificulta a definição de estratégias de manejo mais adequadas. Atualmente, ainda existe pouca informação capaz de indicar quais níveis de cascalho representam limitação moderada ou severa ao cultivo da soja em condições de Cerrado tropical. Essa carência de informações compromete a tomada de decisão relacionada à viabilidade agrícola dessas áreas, ao planejamento do uso do solo e à definição de ambientes de produção com menor risco agrônomo (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Diante disso, é possível observar a necessidade de estabelecer relações mais claras entre a proporção de cascalho e o potencial produtivo da soja, permitindo identificar faixas de maior ou menor aptidão agrícola dentro desses ambientes.

Assim, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: qual é a faixa de proporção de cascalho em Plintossolos Pétricos que permite o cultivo da soja com menor risco produtivo em condições comerciais no estado do Tocantins?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar a faixa de proporção de cascalho em que o cultivo de soja seja recomendado com menor risco produtivo em Plintossolos Pétricos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Delimitar zonas com diferentes teores de cascalho dentro do talhão;
- Determinar a porcentagem de cascalho na camada de 0–20 cm;
- Determinar a produção de massa seca da parte aérea da soja e a produtividade de grãos;
- Determinar a relação entre proporção de cascalho e desempenho produtivo da cultura.

1.3 Justificativa

A realização deste trabalho é importante devido ao avanço da cultura da soja em áreas do Cerrado que apresentam características físicas mais limitantes ao desenvolvimento das plantas, como os Plintossolos Pétricos. Nessas áreas, a elevada presença de cascalho pode reduzir o volume efetivo de solo explorado pelas raízes, além de limitar a retenção de água e nutrientes, fatores que influenciam diretamente o desempenho produtivo da cultura. Apesar da crescente utilização dessas áreas na agricultura, ainda existem poucas informações técnicas que permitam compreender melhor o potencial produtivo desses ambientes em condições comerciais de cultivo.

Dessa forma, este estudo busca gerar informações que auxiliem na compreensão da relação entre a proporção de cascalho no solo e a produtividade da soja, contribuindo para uma avaliação mais precisa do comportamento produtivo dessas áreas. A identificação de ambientes com diferentes níveis de limitação pode auxiliar produtores, técnicos e empresas agrícolas na tomada de decisão, no planejamento do manejo e na definição de estratégias mais adequadas para o uso agrícola dessas áreas do Cerrado.

Além disso, o trabalho possui relevância científica e prática por contribuir com o avanço do conhecimento sobre os Plintossolos Pétricos, solos ainda pouco estudados quando comparados a outras classes mais utilizadas na agricultura brasileira. Assim, os resultados obtidos poderão servir como base para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias que favoreçam o uso mais eficiente e sustentável dessas áreas agrícolas no estado do Tocantins.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de Literatura

2.1.1 Expansão agrícola no Cerrado

A expansão da agricultura no Cerrado brasileiro se intensificou nas últimas décadas devido ao avanço tecnológico, à correção química dos solos e à crescente demanda mundial por grãos, especialmente soja e milho. Nesse contexto, a região do MATOPIBA consolidou-se como uma das principais fronteiras agrícolas do país, apresentando expressivo crescimento da área cultivada e da produção agrícola (BOLFE *et al.*, 2016).

No estado do Tocantins, a incorporação de novas áreas produtivas ocorreu não apenas sobre Latossolos de elevada aptidão agrícola, mas também sobre solos com limitações físicas importantes, incluindo Plintossolos e Neossolos com elevada ocorrência de fragmentos grosseiros (ALMEIDA *et al.*, 2025). Em muitos casos, a expansão agrícola avançou sobre ambientes anteriormente considerados restritivos para produção de grãos, impulsionada pela valorização das terras agrícolas e pela necessidade de ampliação das áreas cultivadas.

Entretanto, a ocupação agrícola desses ambientes exige maior conhecimento sobre o comportamento físico e hídrico dos solos, uma vez que limitações relacionadas à profundidade efetiva, presença de petroplintita e elevada fração cascalhenta podem comprometer o desempenho agrônomo das culturas (ALMEIDA *et al.*, 2025). Dessa forma, compreender as características desses ambientes tornou-se fundamental para o desenvolvimento de sistemas de manejo mais eficientes e sustentáveis.

2.1.2 Características dos Plintossolos Pétricos

Os Plintossolos Pétricos são solos caracterizados pela presença de horizontes concrecionários ricos em petroplintita, formados a partir de processos pedogenéticos relacionados à segregação e endurecimento de compostos de ferro ao longo do perfil do solo (SANTOS *et al.*, 2025). Esses solos apresentam ocorrência frequente em regiões de relevo plano a suavemente ondulado do Cerrado brasileiro, principalmente em áreas sujeitas a alternância entre períodos de saturação e secagem.

Uma das principais características desses solos é a elevada presença de fragmentos grosseiros distribuídos no perfil, frequentemente associados à ocorrência de concreções

ferruginosas. A proporção desses fragmentos pode variar significativamente dentro de uma mesma área agrícola, resultando em elevada heterogeneidade espacial dos atributos físicos do solo (MOLIN *et al.*, 2020).

Segundo Ramos *et al.* (2022), a presença de elevada fração grosseira reduz o volume de terra fina disponível para retenção de água e nutrientes, além de limitar a profundidade efetiva explorada pelas raízes. Em ambientes agrícolas, essas características podem influenciar diretamente o potencial produtivo das culturas, especialmente em regiões com ocorrência de déficit hídrico durante o ciclo produtivo.

Além disso, os Plintossolos Pétricos geralmente apresentam limitações relacionadas à compactação natural, menor capacidade de armazenamento de água e maior variabilidade de fertilidade ao longo da área cultivada (ALMEIDA *et al.*, 2023). Essas condições tornam o manejo agrícola mais complexo e exigem maior atenção na definição de práticas de correção, adubação e conservação do solo (Figura 2)

Figura 2 – Desenvolvimento da cultura da soja em Plintossolo Pétrico no município de Pium-TO.



Fonte: Acervo do autor. 2024.

2.1.3 Influência da fração grosseira no solo

A fração grosseira do solo corresponde ao conjunto de partículas com diâmetro superior a 2 mm, incluindo cascalhos, concreções ferruginosas e fragmentos minerais presentes no perfil

do solo. Nos plintossolos do Cerrado, o aumento da proporção de fragmentos grosseiros está diretamente relacionado à redução da capacidade de retenção de água e nutrientes, uma vez que diminui o volume efetivo de terra fina responsável pela maior parte das reações químicas e físicas do solo (SANTOS *et al.*, 2025).

Além da redução da capacidade de armazenamento hídrico, a elevada fração cascalhenta interfere na densidade do solo, na porosidade total e na dinâmica da infiltração de água. Em muitos casos, áreas com maior proporção de cascalho apresentam rápida drenagem e menor disponibilidade hídrica às plantas durante períodos de estiagem (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Outro fator importante está relacionado ao desenvolvimento radicular das culturas. Solos com elevada presença de petroplintita e concreções ferruginosas podem restringir o aprofundamento das raízes, reduzindo a capacidade das plantas em explorar camadas mais profundas do perfil para absorção de água e nutrientes (ALMEIDA *et al.*, 2025). Em culturas anuais como a soja, essa limitação pode comprometer o desenvolvimento vegetativo e reduzir o potencial produtivo, principalmente em anos com irregularidade pluviométrica. (SANTOS *et al.*, 2025).

A variabilidade espacial da fração grosseira também representa um desafio para o manejo agrícola, pois áreas com diferentes níveis de restrição física frequentemente recebem o mesmo manejo agrônomo, desconsiderando diferenças na capacidade produtiva do ambiente (MOLIN *et al.*, 2020).

2.1.4 Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade da soja

A soja é uma cultura altamente dependente da disponibilidade adequada de água ao longo do ciclo produtivo, principalmente para o estabelecimento da cultura permitindo uma germinação uniforme e durante os estádios de reprodutivos relacionados à floração, formação de vagens e enchimento de grãos. Déficits hídricos nesses períodos podem provocar redução significativa da produtividade devido à estande de plantas mal estabelecido, limitação fotossintética, abortamento floral e redução no enchimento de grãos (BARBOSA *et al.*, 2020).

Em Plintossolos Pétricos, os efeitos da irregularidade climática tendem a ser mais expressivos devido à menor capacidade de retenção de água desses solos. Estudos realizados em áreas comerciais do Tocantins demonstraram grande variação da produtividade da soja em ambientes com diferentes proporções de cascalho, indicando forte relação entre atributos físicos do solo e estabilidade produtiva da cultura (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Além disso, ambientes com maior restrição física frequentemente apresentam menor

eficiência no aproveitamento de fertilizantes e menor capacidade de recuperação das plantas em períodos de estresse hídrico (ALMEIDA *et al.*, 2023). Dessa forma, o conhecimento da relação entre características físicas do solo e comportamento produtivo da soja torna-se essencial para definição de ambientes agrícolas mais estáveis.

2.1.5 Manejo agrícola em Plintossolos Pétricos

O manejo agrícola em plintossolos exige estratégias específicas capazes de minimizar os efeitos das limitações físicas sobre o desenvolvimento das culturas. Entre as práticas mais utilizadas destacam-se o manejo conservacionista, o uso de plantas de cobertura, a manutenção da palhada e a adoção de sistemas integrados de produção, visando maior proteção do solo e melhoria das condições físicas superficiais (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Além disso, o uso de sementes em taxa variável pode representar uma alternativa importante para o manejo de áreas com elevada variabilidade física, como os Plintossolos Pétricos. Essa tecnologia permite ajustar a população de plantas de acordo com o potencial produtivo de cada ambiente, reduzindo a competição por água e nutrientes em áreas mais restritivas. Em solos com maior proporção de cascalho e menor retenção hídrica, a adequação da densidade de plantas pode contribuir para maior estabilidade produtiva e melhor eficiência no uso dos insumos (MOLIN *et al.*, 2020; BAIO *et al.*, 2024).

Entretanto, mesmo com a adoção de práticas conservacionistas, a presença elevada de cascalho continua representando um fator limitante importante em muitos ambientes agrícolas do Cerrado. Por esse motivo, a definição de ambientes de manejo baseada nas características físicas do solo tem sido considerada uma alternativa importante para aumentar a eficiência produtiva e reduzir riscos agrícolas (ALMEIDA *et al.*, 2025).

Nesse contexto, estudos voltados à identificação de faixas de proporção de cascalho associadas ao potencial produtivo da soja podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais adequadas de uso e manejo dos Plintossolos Pétricos. Essas informações podem auxiliar produtores e técnicos na tomada de decisão relacionada à expansão agrícola e ao planejamento sustentável do uso da terra.

2.2 Metodologia

2.2.1 Área do estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Gaivota, localizada no município de Pium-TO, nas coordenadas 10°13'34" S e 49°14'50" W, a aproximadamente 250 m de altitude. O solo da área experimental é classificado como Plintossolo Pétrico Concrecionário, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2023).

A área experimental foi composta por um talhão comercial de aproximadamente 96 ha, com histórico de cultivo de soja e milho safrinha nos últimos quatro anos agrícolas (Figura 3).

Figura 3 – Localização da fazenda Gaivota e talhão experimental em Pium-TO



Fonte: Almeida. 2025.

2.2.2 Delimitação das zonas com diferentes teores de cascalho

A delimitação das zonas de manejo foi realizada entre os dias 18/07/2024 e 21/08/2024 por meio de sistema de mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), operado pela empresa Cropman (Figura 4). O equipamento realizou leituras georreferenciadas ao longo do talhão, permitindo identificar a variabilidade espacial do solo a partir das diferenças de resposta elétrica. Posteriormente, os dados foram processados em software específico para geração das zonas homogêneas de manejo, associadas principalmente às variações nos atributos

físicos do solo, como teor de cascalho, profundidade efetiva e capacidade de retenção de água. A utilização da condutividade elétrica aparente do solo é amplamente empregada na agricultura de precisão devido à sua relação com características físicas e químicas do solo, auxiliando na identificação da variabilidade espacial do ambiente produtivo (SUDDUTH *et al.*, 2020).

Figura 4 – Sensor de Condutividade Elétrica aparente



Fonte: Cropman. 2024.

Esse sistema de análise entrega uma delimitação de zonas porém não define especificamente o que tem de diferente dentro das zonas, para isso é necessário a realização de coletas a campo para uma melhor definição do que pode estar criando essas zonas, se são características químicas ou físicas desse solo.

2.2.3 Determinação da porcentagem de cascalho na camada de 0–20 cm

Para determinação da porcentagem de cascalho, foram realizadas amostragens de solo na camada de 0–20 cm em malha rígida georreferenciada, com densidade amostral de 3,9 pontos por hectare, totalizando 384 pontos distribuídos sistematicamente na área experimental.

As amostras coletadas foram acondicionadas e encaminhadas para processamento, onde inicialmente foi determinada a massa total de cada amostra. Posteriormente, as amostras foram peneiradas em malha de 2 mm para separação da fração terra fina e da fração grosseira (cascalho). Após a separação, cada fração foi pesada individualmente em balança de precisão para determinação da porcentagem de cascalho e terra fina em relação à massa total da amostra.

Com os dados obtidos da porcentagem de cascalho, foram elaborados mapas de variabilidade espacial da área experimental utilizando os pontos georreferenciados de amostragem. A partir dessas informações, foram delimitadas zonas com diferentes teores de cascalho dentro do talhão.

As zonas delimitadas foram utilizadas para instalação das parcelas experimentais e para avaliação do comportamento produtivo da cultura da soja em diferentes condições físicas do solo.

2.2.4 Implantação e condução da cultura da soja

A semeadura da soja cultivar Olimpo foi realizada no dia 22 de outubro de 2024, seguindo o manejo adotado pelo produtor da área. A cultura foi implantada utilizando população de 280.000 plantas ha^{-1} e espaçamento de 0,45 m entre linhas.

A adubação de base foi composta por 200 kg ha^{-1} de KCl e 280 kg ha^{-1} da formulação 05-35-00. O manejo nutricional complementar foi realizado com aplicação total de 580 g ha^{-1} de micronutrientes, parcelados entre a dessecação e aplicações foliares durante o desenvolvimento da cultura.

Aos 21 dias após a semeadura (DAS), foram demarcadas as parcelas experimentais dentro de cada zona de manejo. Cada parcela foi composta por oito linhas de sete metros de comprimento, totalizando área de 25 m^2 , com quatro repetições por zona experimental.

A avaliação de estande foi realizada aos 36 DAS, por meio da contagem de plantas em cinco metros das duas linhas centrais de cada parcela.

2.2.5 Determinação da massa seca e a produtividade de grãos

A produção de massa seca da parte aérea foi determinada aos 79 DAS, durante o estágio fenológico R1 da cultura da soja. Para realização da avaliação, foi coletada a biomassa presente em 1 m^2 dentro da área útil de cada parcela experimental.

Após a coleta, as amostras foram identificadas e encaminhadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Posteriormente, as amostras foram pesadas em balança de precisão para determinação da massa seca da parte aérea, sendo os resultados expressos em kg ha^{-1} .

A colheita foi realizada aos 118 DAS, no dia 17 de fevereiro de 2025. A área útil colhida correspondeu às duas linhas centrais de cada parcela, utilizando cinco metros de comprimento,

totalizando 4,5 m² de área avaliada por parcela.

Após a colheita, as plantas foram trilhadas e os grãos encaminhados ao laboratório para determinação da massa e aferição da umidade. A produtividade de grãos foi corrigida para 13% de umidade e posteriormente convertida para kg ha⁻¹.

2.2.6 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) após a verificação dos pressupostos de homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, estruturado em esquema fatorial 5 X 6, composto por cinco zonas de manejo (caracterizadas pelas proporções contínuas de cascalho de 59%, 65%, 76%, 88% e 94%) e seis estratégias de adubação de cobertura, com quatro repetições.

Diante da ausência de interação significativa ($p > 0,05$) entre os fatores Zona de Manejo e Adubação para as variáveis analisadas, procedeu-se ao desdobramento isolado dos efeitos dos fatores principais. As zonas foram analisadas como tratamentos qualitativos e, adicionalmente, como um gradiente quantitativo de proporção de cascalho no solo.

Os dados foram avaliados por meio de dois critérios complementares:

a) Teste de Agrupamento de Médias: Utilizou-se o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade para a discriminação categórica e formação de grupos de similaridade entre as zonas;

b) Análise de Regressão Polinomial: Ajustaram-se modelos de regressão de segundo grau por meio do método dos mínimos quadrados, relacionando as variáveis biológicas da cultura (Y) em função da variação contínua da porcentagem de cascalho no solo (X), cujo poder de explicação das equações foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2).

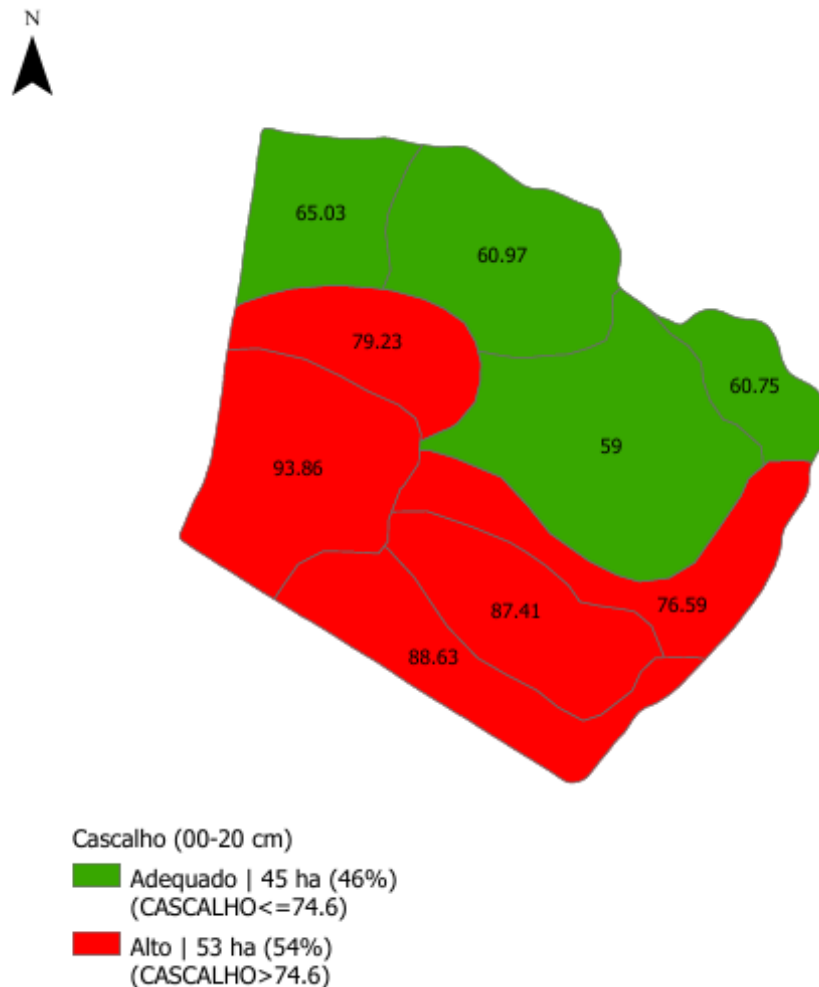
As análises estatísticas, o cálculo do Coeficiente de Variação (CV) experimental e a elaboração dos gráficos foram realizados com o auxílio do software R versão 4.5.2 (R Core Team, 2025), utilizando pacotes como tidyverse para manipulação de dados, ExpDes.pt e ScottKnott para os testes biométricos, e ggplot2 associado ao ggtext para a renderização gráfica de alta resolução. O script completo utilizado encontra-se disponibilizado no Apêndice.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Delimitação das zonas com diferentes teores de cascalho

Após o levantamento em campo, o software delimitou a existência de nove zonas distintas dentro do talhão, caracterizadas por diferentes proporções de cascalho (Figura 5). Essas zonas foram definidas com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), a qual apresentou forte relação com a distribuição de fragmentos grosseiros. Foi observada a maior concentração de cascalho na porção sul do talhão, enquanto a região norte apresentou menores teores, com variação entre 59% e 94% de cascalho. Esse comportamento espacial evidencia a heterogeneidade típica de Plintossolos Pétricos, onde a distribuição de concreções ferruginosas ocorre de forma irregular no perfil e na paisagem.

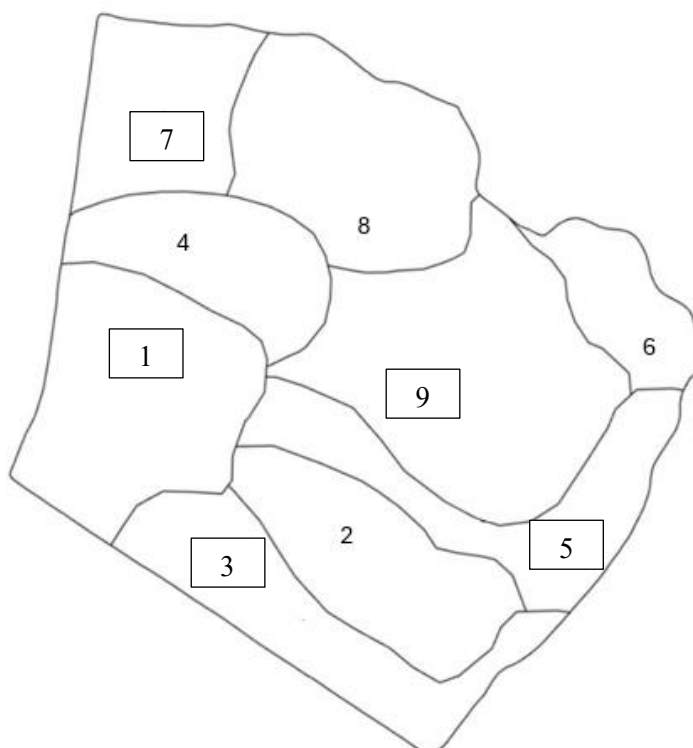
Figura 5 – Zonas de cascalho definidas por Condutividade Elétrica aparente (CEa)



Fonte: Cropman. 2024. Legenda: zonas com colocação verde possuem menores porcentagens de cascalho, zonas em vermelho representam zonas com mais cascalho.

As zonas foram numeradas para facilitar a condução experimental (Figura 6), permitindo a seleção de cinco áreas representativas (zonas 1, 3, 5, 7 e 9), com teores de cascalho de 94%, 88%, 76%, 65% e 59%, respectivamente.

Figura 6 – Delimitação e numeração das zonas de manejo



Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: zonas demarcadas com retângulo representam as zonas onde o experimento foi conduzido.

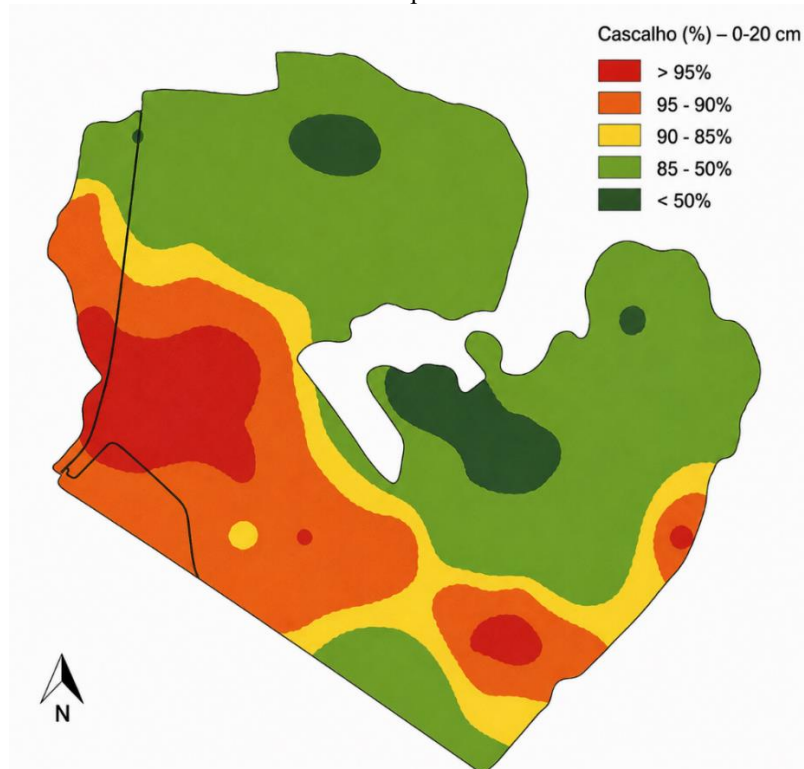
Estudos recentes indicam que a utilização da CEa como ferramenta de zoneamento é eficiente para identificar variações físicas do solo, especialmente relacionadas à textura e presença de fragmentos grosseiros (SUDDUTH *et al.*, 2020).

2.3.2 Determinação da porcentagem de cascalho na camada de 0–20 cm

Para validação das zonas delimitadas por CEa, realizou-se amostragem de solo em grid sistemático. A porcentagem de cascalho variou de 34% a 97%, confirmando elevada variabilidade espacial dentro do talhão.

A menor concentração de fragmentos grosseiros foi observada na região norte, enquanto os maiores teores concentraram-se na porção sul da área experimental (Figura 7).

Figura 7 – Mapa de cascalho confeccionado a partir da porcentagem de cascalho em 376 amostras de solo na profundidade de 0-20 cm



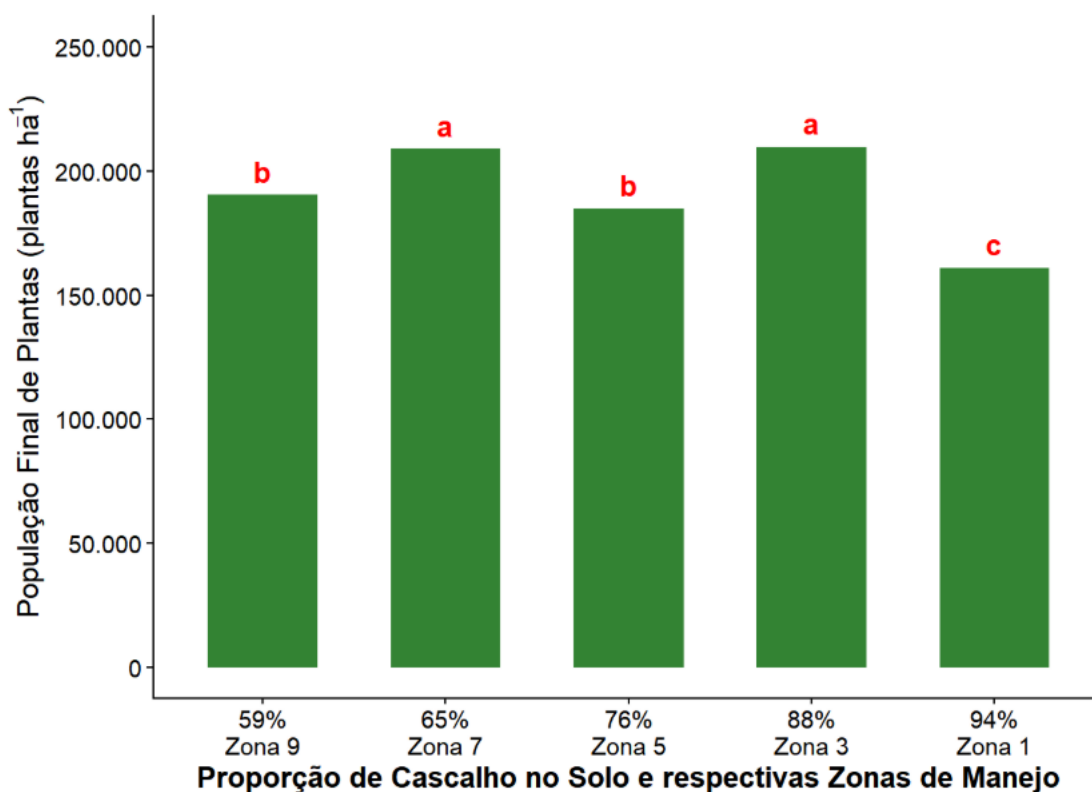
Fonte: Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida. 2025. Legenda: a distribuição reforça a consistência dos dados obtidos por sensores indiretos.

A comparação entre o mapa gerado por CEa e o mapa obtido por amostragem direta demonstrou alta correspondência espacial, validando a aplicação dessa tecnologia para delimitação de zonas de manejo. Segundo Sudduth *et al.* (2022) a CEa é fortemente influenciada pela fração fina do solo, sendo inversamente relacionada ao aumento de cascalho, o que explica sua eficiência na identificação dessas zonas.

2.3.3 Implantação e condução da cultura da soja

A população final de plantas diferiu significativamente entre as zonas de manejo, formando três grupos distintos pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Gráfico da população da cultura da soja em função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo



Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A menor população foi observada na Zona 1 (94% de cascalho), enquanto as maiores populações ocorreram nas Zonas 3 (88%) e 7 (65%).

Entretanto, no presente estudo, essa estratégia foi aplicada de forma uniforme em todo o talhão, incluindo áreas com menor teor de cascalho, o que pode ter influenciado negativamente o desempenho em determinadas zonas.

A presença elevada de cascalho interfere diretamente na fase de emergência da cultura, podendo provocar: aumento da temperatura superficial do solo; redução da retenção de água e menor contato solo-semente (DAL SANTOS *et al.*, 2024)

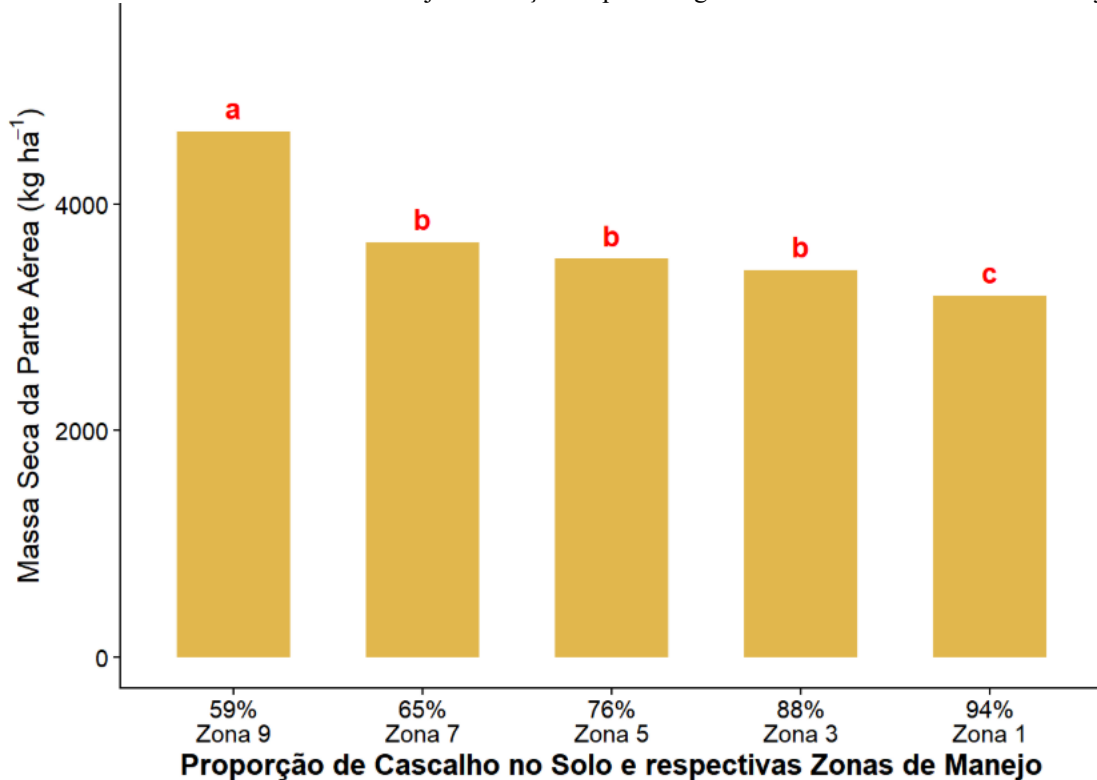
Esses fatores podem resultar em danos fisiológicos às sementes, como a desnaturação de proteínas e morte do embrião em condições de alta temperatura (KUMAR *et al.*, 2021).

2.3.4 Determinação da produção de massa seca e a produtividade de grãos

Para a produção de massa seca, a análise de variância indicou efeito significativo das zonas de manejo sobre a produção de massa seca, observando-se diferenças entre grupos de

zonas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Massa seca da cultura da soja em função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo



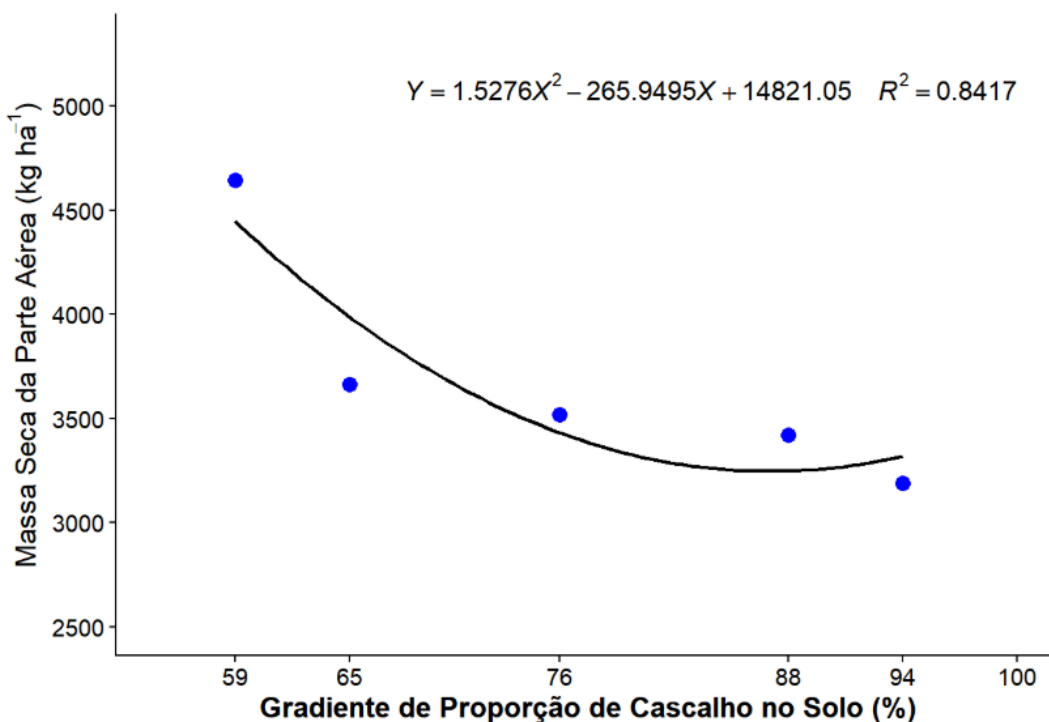
Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

As médias de MS variaram de 4.600 kg ha⁻¹ na zona 9, com menor teor de cascalho (59%), até 3.200 kg ha⁻¹ na zona 1, com maior teor (94%).

Com o objetivo de descrever a tendência da resposta da cultura ao gradiente de cascalho, foi ajustado um modelo de regressão quadrática com as médias de massa seca produzida em cada zona em função da proporção de cascalho no solo (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Resposta da produção de massa seca da parte aérea da soja ao gradiente de proporção de

cascalho no solo.

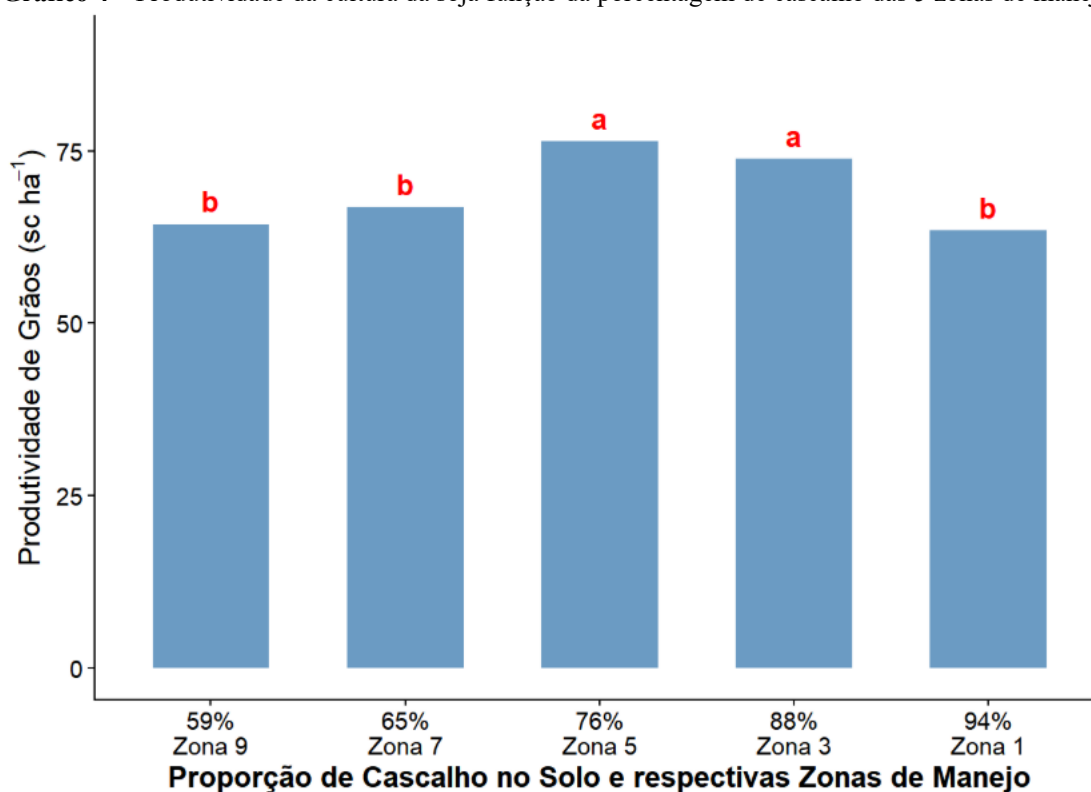


Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: A curva representa o ajuste de regressão quadrática obtido a partir das médias das zonas de manejo. Os pontos correspondem aos valores médios observados em cada zona avaliada ao longo do gradiente de cascalho.

Observou-se redução da produção de massa seca com o aumento da proporção de cascalho no solo, indicando que ambientes com maior conteúdo de fragmentos grosseiros tendem a restringir o desenvolvimento vegetativo da cultura.

Esse comportamento está relacionado ao menor desenvolvimento vegetativo em condições de estresse hídrico e térmico, comuns em solos com elevada fração grosseira, os quais apresentam baixa capacidade de retenção de água e nutrientes (ALMEIDA *et al.*, 2025; BARBOSA *et al.*, 2020). Além disso, zonas com maior população de plantas apresentaram maior produção de biomassa, possivelmente devido à intensificação da competição intraespecífica.

A produtividade de grãos foi significativamente influenciada pelas zonas de manejo ($p < 0,001$) (Gráfico 4).

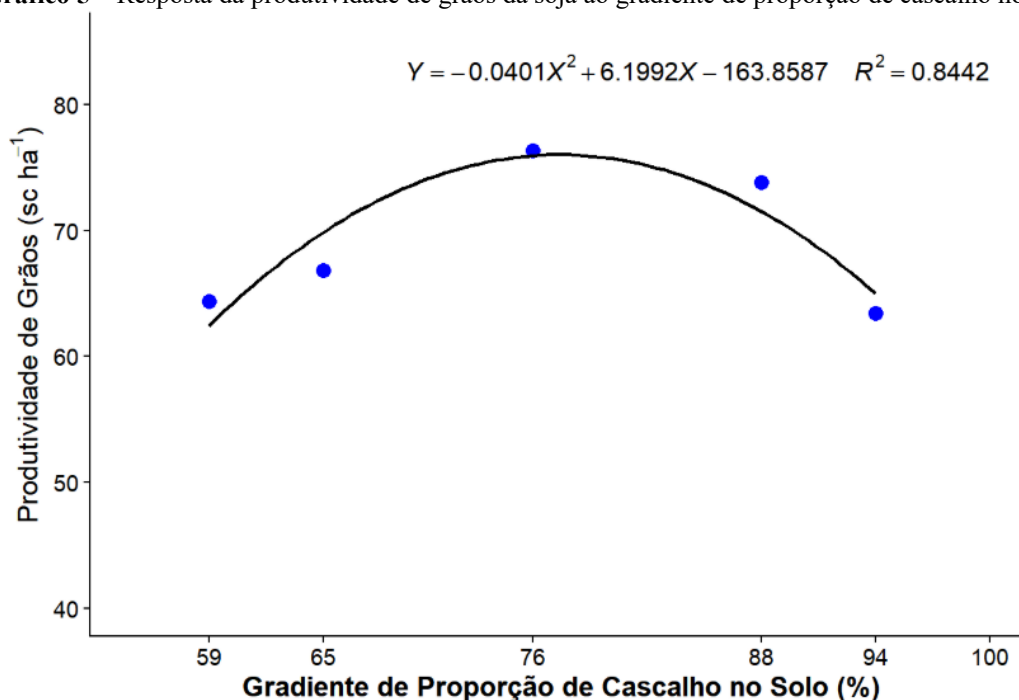
Gráfico 4 – Produtividade da cultura da soja função da porcentagem de cascalho das 5 zonas de manejo

Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: : Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

As Zonas 3 (88%) e 5 (76%) apresentaram as maiores produtividades, formando o grupo superior pelo teste de Scott-Knott, enquanto as Zonas 1 (94%), 7 (65%) e 9 (59%) compuseram o grupo de menor rendimento. Observou-se que zonas com teores extremos (baixo e alto cascalho) apresentaram produtividades semelhantes, enquanto as zonas intermediárias obtiveram maiores rendimentos.

Além da comparação de produtividade entre as zonas de manejo, foi realizada análise de regressão utilizando as médias de produtividade obtidas em cada zona em função da proporção de cascalho no solo (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Resposta da produtividade de grãos da soja ao gradiente de proporção de cascalho no solo



Fonte: Acervo do autor. 2026. Legenda: os pontos representam as médias observadas em cada zona de manejo, enquanto a curva corresponde ao ajuste de regressão quadrática obtido em função da proporção de cascalho no solo.

O ajuste do modelo permitiu descrever a tendência da resposta da cultura ao gradiente de cascalho, possibilitando uma interpretação mais integrada dos efeitos desse atributo físico sobre o rendimento da soja.

Esse resultado indica que a produtividade da soja não depende exclusivamente da proporção de cascalho presente no solo, mas da interação entre fatores como estande de plantas, disponibilidade hídrica, profundidade efetiva do solo e arquitetura da cultura. Em ambientes com elevada restrição física, pequenas alterações no estabelecimento inicial podem modificar significativamente a competição intraespecífica por água, luz e nutrientes, influenciando diretamente o desenvolvimento vegetativo e o rendimento final da cultura. Além disso, áreas com menor teor de cascalho e maior potencial produtivo podem apresentar redução da eficiência produtiva quando submetidas a populações excessivas, devido ao aumento da competição entre plantas e maior predisposição ao acamamento.

Resultados semelhantes foram observados por Balbinot Junior *et al.* (2015), que relatam que a resposta produtiva da soja varia conforme as condições ambientais e a densidade de plantas adotada, destacando que populações elevadas nem sempre resultam em maiores produtividades. Da mesma forma, estudos conduzidos por Campos *et al.* (2022) em Plintossolos do Tocantins demonstraram que o desempenho produtivo da soja está fortemente associado à disponibilidade hídrica e às limitações físicas do solo, especialmente em ambientes com elevada

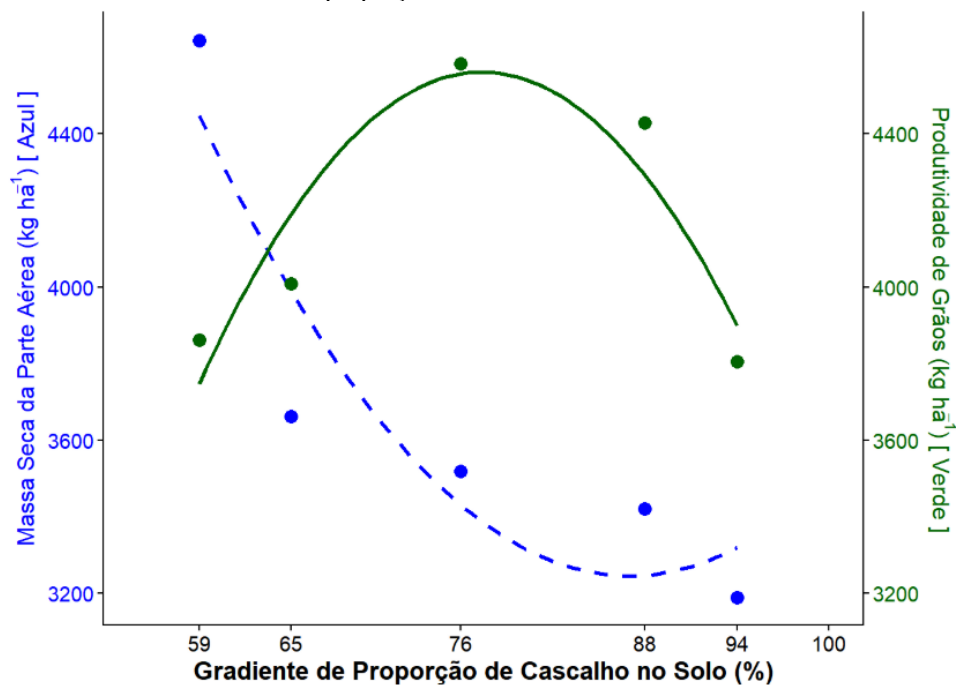
presença de concreções ferruginosas e baixa capacidade de retenção de água.

2.3.5 Relação entre proporção de cascalho e desempenho produtivo da cultura

Apesar da pequena diferença entre os ambientes extremos avaliados, 59%, 65% e 94% de teor de cascalho, as produtividades dessas zonas não se diferiram estatisticamente. Por outro lado, as zonas intermediárias apresentaram produtividades superiores e formaram grupo estatisticamente distinto pelo teste de Scott-Knott.

A análise conjunta da produção de massa seca e da produtividade de grãos evidencia que a resposta da soja ao gradiente de cascalho não ocorreu de forma linear (Figura 8).

Figura 8 – Relação entre o desenvolvimento vegetativo e o rendimento da soja ao longo do gradiente de proporção de cascalho no solo



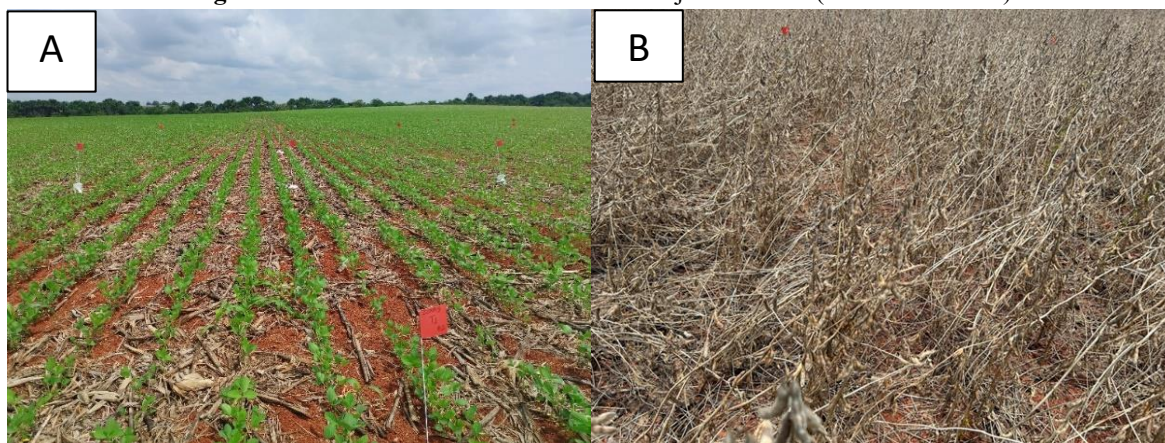
Fonte: Acervo do autor, 2026. Legenda: Os pontos representam os valores médios observados em cada zona de manejo. As curvas correspondem aos ajustes de regressão quadrática para massa seca da parte aérea e produtividade de grãos, evidenciando diferentes padrões de resposta da cultura em ambientes com distintas proporções de cascalho.

Observa-se que os ambientes com menor proporção de cascalho apresentaram maior produção de biomassa, enquanto as maiores produtividades foram registradas em zonas com teores intermediários de cascalho. Por outro lado, ambientes com elevada proporção de cascalho apresentaram redução simultânea da biomassa e da produtividade.

Na zona com menor proporção de cascalho, a elevada produção de biomassa da parte aérea (4.600 kg ha⁻¹), associada ao maior eestandee de plantas, favoreceu intensa competição

intraespecífica por luz, estimulando maior crescimento em altura e reduzindo a resistência estrutural das plantas. Como consequência, observou-se ocorrência de acamamento (Figura 9), comprometendo a interceptação luminosa, dificultando a colheita mecanizada e reduzindo o potencial produtivo da cultura.

Figura 9 – Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 9 (59% de cascalho)

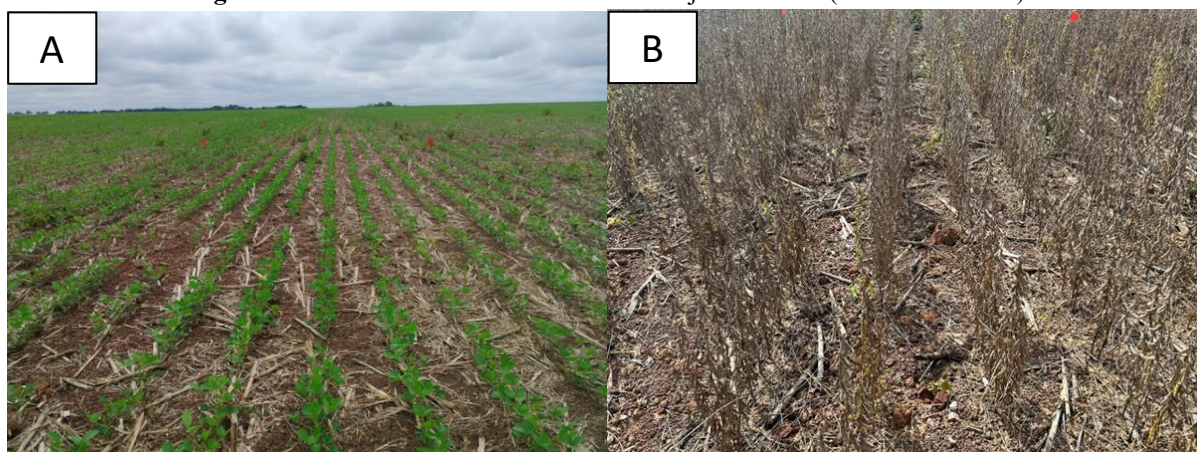


Fonte: Acervo do autor. 2024. Legenda: (A) estágio V3/V4 aos 21 dias após a semeadura; (B) estágio R9 aos 118 dias após a semeadura.

Resultados semelhantes foram descritos por Balbinot Junior *et al.* (2015), que relatam que populações excessivas de plantas podem aumentar a competição intraespecífica e favorecer o acamamento, principalmente em ambientes com elevada disponibilidade hídrica e alto crescimento vegetativo. Moro *et al.* (2021) também observaram que alterações na densidade populacional influenciam diretamente os componentes de rendimento da soja e o comportamento fisiológico da cultura em diferentes ambientes produtivos.

Por outro lado, a zona com maior teor de cascalho apresentou menor produção de biomassa (3.200 kg ha^{-1}), evidenciando limitação ao desenvolvimento vegetativo em função das restrições físicas e hídricas impostas pelo ambiente (Figura 10).

Figura 10 – Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 1 (94% de cascalho)



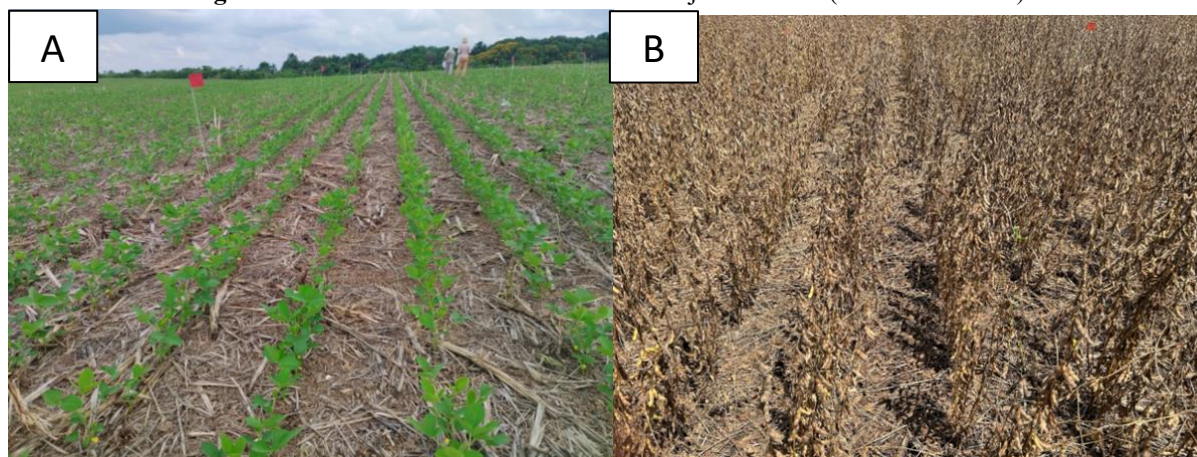
Fonte: Acervo do autor. 2024. Legenda: (A) estágio V3/V4 aos 21 dias após a semeadura; (B) estágio R9 aos 118 dias após a semeadura.

A elevada presença de fragmentos grosseiros reduz o volume efetivo de terra fina responsável pela retenção de água e nutrientes, aumentando a vulnerabilidade das plantas ao estresse hídrico e térmico, especialmente em períodos de irregularidade pluviométrica.

Campos *et al.* (2022) destacam que Plintossolos com elevada presença de concreções ferruginosas apresentam menor capacidade de retenção hídrica e maior limitação ao desenvolvimento da soja, principalmente sob ocorrência de veranicos. De forma semelhante, Almeida *et al.* (2025) relata que ambientes com elevada fração cascalhenta apresentam comportamento produtivo instável, em função da menor disponibilidade de água às plantas e da maior restrição ao crescimento radicular.

A maior produtividade foi observada na zona com 77% de cascalho, alcançando 4.562 kg ha⁻¹, equivalentes a 76 sacas ha⁻¹ (Figura 11).

Figura 11 – Desenvolvimento da cultura da soja na Zona 5 (76% de cascalho)



Fonte: Acervo do autor. 2024. Legenda: (A) estágio V3/V4 aos 21 dias após a semeadura; (B) estágio R9 aos 118 dias após a semeadura.

Esse resultado indica que, nas condições avaliadas, teores intermediários de cascalho proporcionaram melhor equilíbrio entre desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura, reduzindo simultaneamente os efeitos do acamamento e das limitações severas de disponibilidade hídrica observadas nos ambientes extremos. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da definição de ambientes de manejo em áreas com elevada variabilidade espacial, evidenciando que a adoção de estratégias localizadas de manejo pode contribuir para maior estabilidade produtiva e melhor aproveitamento do potencial agrícola dos Plintossolos Pétricos.

Entretanto, isso não significa que as demais áreas apresentem maior ou menor aptidão agrícola, mas sim que cada zona possui características específicas que exigem manejos diferenciados dentro do mesmo talhão. Em áreas de Plintossolos Pétricos com mais de 85% de cascalho, observam-se limitações ao desenvolvimento da soja, principalmente devido à baixa retenção de água, maior temperatura do solo e restrição ao crescimento radicular. Nessas condições, o menor volume de terra fina reduz a capacidade de armazenamento de água e nutrientes, aumentando a vulnerabilidade das plantas aos efeitos de veranicos e altas temperaturas, fatores que comprometem o crescimento vegetativo, a manutenção da área foliar e o enchimento de grãos. Mesmo apresentando capacidade produtiva, essas áreas possuem maior risco para produção de grãos, especialmente em condições de déficit hídrico prolongado (ALMEIDA *et al.*, 2025; CAMPOS *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2022).

Além disso, ambientes com elevada restrição física tendem a apresentar maior instabilidade produtiva entre safras, tornando o retorno econômico da produção agrícola mais dependente das condições climáticas de cada ano agrícola. Segundo Lumbreras *et al.* (2015), solos com limitações físicas no MATOPIBA apresentam maior sensibilidade às variações climáticas, especialmente em sistemas agrícolas conduzidos de forma intensiva. Nessas condições, a adoção de sistemas alternativos, como a Integração Lavoura-Pecuária, pode representar uma estratégia mais sustentável e economicamente viável para o aproveitamento dessas áreas (STANCZYK *et al.*, 2023). Sistemas integrados favorecem maior cobertura do solo, incremento de matéria orgânica e melhoria gradual da estrutura física do ambiente, contribuindo

A utilização de plantas de cobertura nessas áreas promovem uma maior estabilidade produtiva ao longo do tempo, em especial plantas cobertura com elevado potencial de produção de biomassa, como os capins. O aporte contínuo de biomassa sobre a superfície do solo contribui para a manutenção da umidade, redução da amplitude térmica, incremento dos teores

de matéria orgânica e melhoria gradual dos atributos físicos do solo. Além disso, a presença de um sistema radicular diversificado favorece a formação de bioporos e aumenta a infiltração e o armazenamento de água no perfil, reduzindo os efeitos das restrições impostas pela elevada proporção de cascalho. Estudos conduzidos por Almeida et al. (2025) destacam que o uso de plantas de cobertura em ambientes restritivos do Cerrado representa uma importante ferramenta para aumentar a resiliência dos sistemas produtivos, promovendo maior estabilidade produtiva e melhor aproveitamento dos recursos hídricos ao longo das safras (Figura 12)

Figura 12 – Soja sobre palhada de braquiária *ruziziensis* em Plintossolo Pétrico.



Fonte: Acervo do autor. 2025.

Por outro lado, as zonas com menor porcentagem de cascalho apresentam elevado potencial produtivo; contudo, o manejo uniforme da população de plantas pode intensificar a competição intraespecífica por luz, água e nutrientes, favorecendo o crescimento excessivo em altura e aumentando a predisposição ao acamamento, reduzindo o rendimento final da cultura (MORO et al., 2021; BALBINOT JUNIOR et al., 2015).

Os resultados obtidos demonstram que a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo exerce forte influência sobre o comportamento produtivo da soja, evidenciando que áreas fisicamente distintas não devem receber o mesmo manejo agrônomo. Dessa forma, práticas como ajuste de população de plantas, manejo localizado de fertilizantes e definição de

ambientes específicos de produção tornam-se ferramentas importantes para otimizar o potencial produtivo de cada zona. Além disso, a utilização de ferramentas de agricultura de precisão permite identificar ambientes com diferentes potenciais produtivos, contribuindo para maior eficiência no uso de insumos e redução dos riscos produtivos em áreas heterogêneas (MOLIN *et al.*, 2021; SUDDUTH *et al.*, 2020).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstraram que a proporção de cascalho exerce influência significativa sobre o desenvolvimento da cultura da soja em Plintossolos Pétricos, afetando o estande de plantas, a produção de biomassa e o comportamento produtivo da cultura. Entretanto, verificou-se que a produtividade não depende exclusivamente do teor de cascalho, mas da interação entre atributos físicos do solo, disponibilidade hídrica, população de plantas e manejo adotado em cada ambiente.

A utilização da condutividade elétrica aparente do solo mostrou-se eficiente para identificar a variabilidade espacial da área e delimitar zonas de manejo com diferentes características físicas. A validação dessas zonas por meio da determinação da porcentagem de cascalho confirmou a elevada heterogeneidade presente no talhão, evidenciando a necessidade de estratégias de manejo específicas para cada ambiente produtivo.

A maior produtividade foi obtida na zona com teor intermediário de cascalho (76%), indicando que ambientes extremos, tanto com baixa quanto com alta proporção de fragmentos grosseiros, podem apresentar limitações ao rendimento da soja. Nas áreas com menor teor de cascalho, o elevado estande e a maior produção de biomassa favoreceram a ocorrência de acamamento, enquanto nas áreas com maior teor de cascalho as restrições hídricas e físicas limitaram o desenvolvimento vegetativo da cultura.

Dessa forma, conclui-se que teores de cascalho superiores a 85% aumentam o risco produtivo da soja em Plintossolos Pétricos, enquanto ambientes com proporções intermediárias apresentam maior estabilidade produtiva. Os resultados reforçam a importância da agricultura de precisão, o uso de plantas de cobertura para aporte de biomassa e da definição de ambientes específicos de manejo, contribuindo para a utilização mais eficiente dos recursos, redução dos riscos produtivos e melhor aproveitamento do potencial agrícola dessas áreas no estado do Tocantins.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. E. M. et al. **Os desafios da produção agrícola em Plintossolos Pétricos**. In: TÓPICOS EM CIÊNCIA DO SOLO. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025. v. 13, p. 463–500.
- ALMEIDA, R. E. M.; CUSTÓDIO, D. P.; OLIVEIRA, S. M.; LIMA, L. S.; COSTA, R. V.; CAMPOS, L. J. M. **Recommendation of soil fertilization with copper and zinc for soybean crops grown in Petric Plinthosol**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 53, e20210722, 2023. DOI: 10.1590/0103-8478cr20210722.
- BAIO, F. H. R. et al. **A new proposal for soybean plant estande: variation based on the law of the minimum and spatial variability**. 2024.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. **Densidade de plantas na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 36 p. (Documentos, 364).
- BARBOSA, J. R. et al. **Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no Cerrado piauiense**. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 14, n. 4, p. 4200–4210, 2020.
- BOLFE, E. L. et al. **Matopiba em crescimento agrícola: aspectos territoriais e socioeconômicos**. Campinas: Embrapa, 2016.
- BOLFE, E. L. (coord.). **Organização de um banco de dados geoespaciais e elaboração de planos de informações sobre aspectos físico-bióticos, de logística e infraestrutura, conservação, unidades de paisagem e aptidão, expansão e intensificação agrícola da região do MaToPiBa**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2015. 120 p. Relatório Técnico.
- CABRAL, C. R. et al. **Identificação de cultivares de soja para tolerância aos estresses hídrico e salino durante a fase de estabelecimento da plântula**. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá, v. 15, n. 4, p. 1–20, 2022.
- CAMPOS, L. J. M. et al. **Produtividade de cultivares de soja em Plintossolos e Latossolos do Tocantins**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 21 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).
- COSTA, C. M. S. et al. **Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico no Cerrado sob cultivo da soja em sistema plantio direto**. 2022. Dissertação/Trabalho acadêmico – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Selvíria, 2022.
- CROPMAN SOLOS & PLANTAS. **Mapeamento da fertilidade do solo por zonas de manejo e diagnóstico de compactação de solo: Fazenda Gaivota, Talhão 02**. Pium, TO, 2024. Relatório técnico.
- DAL SANTO, T. S. et al. **Produtividade da soja em Latossolo Vermelho e Plintossolo Pétrico concrecionário no Cerrado**. *Agri-Environmental Sciences*, Palmas, v. 10, e024006, 2024

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; BARROS, A. H. C.; AGLIO, M. L. D.; OLIVEIRA, R. **Potencialidades e limitações ao uso agrícola de solos do MATOPIBA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. *Anais [...]*. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

MOLIN, J. P. **Preceitos básicos da agricultura de precisão no Brasil**. *Revista Cultivar Máquinas*, Pelotas, 2020.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

MORO, F. S. et al. **Influência da densidade de plantas nos componentes de rendimento da soja**. *Tecno-Lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 25, n. 2, p. 314–319, 2021.

RAMOS, M. R. et al. **Recomendação de adubação e calagem em Plintossolos Pétricos concrecionários com base na terra fina, é adequada?** In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2022. *Anais [...]*, 2022.

ROLDÃO, A. F. **Influência do fenômeno veranico na produtividade da soja na mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba-MG**. *Estudos Geográficos*, Rio Claro, 2015.

SANCHES, G. M. et al. **Soil electrical conductivity as a tool for site-specific management in tropical soils**. *Geoderma Regional*, v. 29, 2022.

SANTOS, G. O.; MARTINS, G. R.; BLAT, N. R.; MENDONÇA, L. B. **Disponibilidade hídrica e as anomalias climáticas no cultivo de soja e milho no Cerrado**. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, Gurupi, v. 10, n. 3, p. 214–222, 2022. DOI: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v10n3.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

SILVA, A. A. P. et al. **O preparo profundo do solo reduziu as limitações físicas ao crescimento radicular das culturas**. 2025. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2025.

STANCZYK, V. R. **Sustentabilidade na integração lavoura, pecuária e floresta**. 2023.

SUDDUTH, K. A. et al. **Applications of soil electrical conductivity in precision agriculture**. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, v. 6, n. 1, 2020.

APÊNDICE – Script utilizado para processamento e análise estatística dos dados

```

```{r}

Pacotes

library(readxl)
library(tidyverse)
library(car)
library(emmeans)
library(ExpDes.pt)
library(ggplot2)
library(ggpubr)
library(rstatix)
library(ggpmisc)
library(ScottKnott)
library(ggtext)
windowsFonts(Arial = windowsFont("Arial"))

arquivo <- "ExpZonasNBS_Soja2024-2025_atualizado08-01-26.xlsx"

Produtividade (sc/ha)

dados_prod <- read_excel(arquivo, sheet = "Produtividade", range =
"B4:J124") %>%
 select(Zona, Adubacao = `Adubação`, Bloco, Prod_kg_ha = `Prod (kg/ha)`,
 Prod_sc_ha = `Prod (sc/ha)`) %>%
 filter(!is.na(Zona)) %>%
 mutate(
 Zona_cat = as.factor(Zona),
 Adubacao = as.factor(Adubacao),
 Bloco = as.factor(Bloco),
 Prod_kg_ha = as.numeric(Prod_kg_ha),
 Prod_sc_ha = as.numeric(Prod_sc_ha),
 Cascalho_perc = case_when(Zona == 1 ~ 94, Zona == 3 ~ 88, Zona == 5
~ 76, Zona == 7 ~ 65, Zona == 9 ~ 59),
 Cascalho_fator = as.factor(Cascalho_perc)
)

--- Pressupostos e ANOVA ---
modelo_fatorial <- aov(Prod_sc_ha ~ Zona_cat * Adubacao + Bloco, data =
dados_prod)
cat("\n=== PRESSUPOSTOS E ANOVA: PRODUTIVIDADE ===\n")
print(shapiro.test(residuals(modelo_fatorial)))
print(leveneTest(Prod_sc_ha ~ Zona_cat, data = dados_prod))
print(summary(modelo_fatorial))

--- Teste de Scott-Knott ---
cat("\n--- SCOTT-KNOTT: PRODUTIVIDADE ---\n")
sk_prod_fatorial <- fat2.dbc(dados_prod$Zona_cat, dados_prod$Adubacao,
dados_prod$Bloco, dados_prod$Prod_sc_ha, mcomp = "sk")

Estruturação das Médias para os Gráficos
medias_prod_zona <- dados_prod %>%
 group_by(Cascalho_perc, Cascalho_fator) %>%

```

```

 summarise(Prod_media = mean(Prod_sc_ha, na.rm = TRUE), .groups = "drop")
 %>%
 arrange(Cascalho_perc) %>%
 mutate(Letra = c("b", "b", "a", "a", "b")) # Mapeamento do SK ordenado
 por % de cascalho

Barras Scott-Knott (Estatística de Tratamentos)
grafico_prod_barras <- ggplot(medias_prod_zona, aes(x = Cascalho_fator,
y = Prod_media)) +
 geom_col(fill = "steelblue", width = 0.6, alpha = 0.8) +
 geom_text(aes(label = Letra), family = "Arial", size = 4.5, fontface =
"bold", color = "red", vjust = -0.6) +
 scale_x_discrete(labels = c("59"="59%\nZona 9","65"="65%\nZona
7","76"="76%\nZona 5","88"="88%\nZona 3","94"="94%\nZona 1")) +
 scale_y_continuous(limits = c(0, 90)) +
 labs(x = "Proporção de Cascalho no Solo e respectivas Zonas de Manejo",
y = expression("Produtividade de Grãos (sc ha-1)")) +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11, lineheight
= 0.85),
 axis.text.y = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.title = element_text(face = "bold", size = 13))
print(grafico_prod_barras)

Regressão Polinomial (Tendência Quantitativa)
grafico_prod_reg <- ggplot(medias_prod_zona, aes(x = Cascalho_perc, y =
Prod_media)) +
 geom_point(size = 3, color = "blue") +
 geom_smooth(method = "lm", formula = y ~ poly(x, 2, raw = TRUE), color
= "black", se = FALSE, linewidth = 0.8) +
 annotate("text", x = 100, y = 83, label = "italic(Y) == -
0.0401*italic(X)^2 + 6.1992*italic(X) - 163.8587~~~~italic(R)^2 ==
0.8442", parse = TRUE, family = "Arial", size = 4.2, hjust = 1) +
 scale_x_continuous(breaks = c(59, 65, 76, 88, 94, 100), limits = c(55,
100)) +
 coord_cartesian(ylim = c(40, 85), clip = "off") +
 labs(x = "Gradiente de Proporção de Cascalho no Solo (%)", y =
expression("Produtividade de Grãos (sc ha-1)")) +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.text.y = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.title = element_text(face = "bold", size = 13),
 plot.margin = margin(t = 25, r = 10, b = 10, l = 10))
print(grafico_prod_reg)

População (ESTANDE)

dados_pop <- read_excel(arquivo, sheet = "Estande e SPAD", range =
"B4:J124") %>%
 select(Zona, Adubacao = `Adubação`, Bloco, Pop_ha = contains("pop"))
%>%
 filter(!is.na(Zona)) %>%
 mutate(
 Zona_cat = as.factor(Zona), Adubacao = as.factor(Adubacao), Bloco =
as.factor(Bloco), Pop_ha = as.numeric(Pop_ha),

```

```

 Cascalho_perc = case_when(Zona == 1 ~ 94, Zona == 3 ~ 88, Zona == 5
~ 76, Zona == 7 ~ 65, Zona == 9 ~ 59),
 Cascalho_fator = as.factor(Cascalho_perc)
)

modelo_anova <- aov(Pop_ha ~ Zona_cat + Adubacao + Bloco, data =
dados_pop)
cat("\n=== PRESSUPOSTOS, ANOVA E SCOTT-KNOTT: POPULAÇÃO ===\n")
print(shapiro.test(residuals(modelo_anova)))
print(leveneTest(Pop_ha ~ Zona_cat, data = dados_pop))
print(summary(modelo_anova))

sk_pop <- SK(modelo_anova, which = "Zona_cat", sig.level = 0.05)
print(summary(sk_pop))

dados_grafico_pop <- dados_pop %>%
 group_by(Cascalho_perc, Cascalho_fator) %>%
 summarise(Pop_media = mean(Pop_ha, na.rm = TRUE), .groups = "drop") %>%
 arrange(Cascalho_perc) %>%
 mutate(Letra = c("b", "a", "b", "a", "c"))

Barras Scott-Knott para População
grafico_pop_barras <- ggplot(dados_grafico_pop, aes(x = Cascalho_fator,
y = Pop_media)) +
 geom_col(fill = "darkgreen", width = 0.6, alpha = 0.8) +
 geom_text(aes(label = Letra), family = "Arial", size = 4.5, fontface =
"bold", color = "red", vjust = -0.6) +
 scale_x_discrete(labels = c("59" = "59%\nZona 9", "65" = "65%\nZona
7", "76" = "76%\nZona 5", "88" = "88%\nZona 3", "94" = "94%\nZona 1")) +
 scale_y_continuous(limits = c(0, 250000), labels =
scales::comma_format(big.mark = ".")) +
 labs(x = "Proporção de Cascalho no Solo e respectivas Zonas de Manejo",
y = expression("População Final de Plantas (plantas ha^-1*")")) +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11, lineheight
= 0.9),
 axis.text.y = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.title = element_text(face = "bold", size = 13))
print(grafico_pop_barras)

Massa seca (MS R5)

dados_massa <- read_excel(arquivo, sheet = "MS R5", range = "B4:J124")
%>%
 select(Zona, Adubacao = `Adubação`, Bloco, MS_g = `MS (g)`, MS_kg_ha =
contains("kg/ha")) %>%
 filter(!is.na(Zona)) %>%
 mutate(
 Zona_cat = as.factor(Zona), Adubacao = as.factor(Adubacao), Bloco =
as.factor(Bloco),
 MS_g = as.numeric(MS_g), MS_kg_ha = as.numeric(MS_kg_ha),
 Cascalho_perc = case_when(Zona == 1 ~ 94, Zona == 3 ~ 88, Zona == 5
~ 76, Zona == 7 ~ 65, Zona == 9 ~ 59),
 Cascalho_fator = as.factor(Cascalho_perc)
)

modelo_anova_massa <- aov(MS_kg_ha ~ Zona_cat + Adubacao + Bloco, data =
dados_massa)

```

```

cat("\n=== PRESSUPOSTOS, ANOVA E SCOTT-KNOTT: MASSA SECA ===\n")
print(shapiro.test(residuals(modelo_anova_massa)))
print(leveneTest(MS_kg_ha ~ Zona_cat, data = dados_massa))
print(summary(modelo_anova_massa))

sk_massa <- SK(modelo_anova_massa, which = "Zona_cat", sig.level = 0.05)
print(summary(sk_massa))

cv_massa <- (sqrt(summary(modelo_anova_massa)[[1]][["Residuals", "Mean
Sq"]]) / mean(dados_massa$MS_kg_ha, na.rm = TRUE)) * 100
cat("\n>>> CV da MS:", round(cv_massa, 2), "%\n")

medias_massa_zona <- dados_massa %>%
 group_by(Cascalho_perc, Cascalho_fator) %>%
 summarise(Massa_media = mean(MS_kg_ha, na.rm = TRUE), .groups = "drop")
%>%
 arrange(Cascalho_perc) %>%
 mutate(Letra = c("a", "b", "b", "b", "c"))

Barras Scott-Knott para Massa Seca
grafico_massa_barras <- ggplot(medias_massa_zona, aes(x = Cascalho_fator,
y = Massa_media)) +
 geom_col(fill = "goldenrod", width = 0.6, alpha = 0.8) +
 geom_text(aes(label = Letra), family = "Arial", size = 4.5, fontface =
"bold", color = "red", vjust = -0.6) +
 scale_x_discrete(labels = c("59"="59%\nZona 9", "65"="65%\nZona
7", "76"="76%\nZona 5", "88"="88%\nZona 3", "94"="94%\nZona 1")) +
 scale_y_continuous(limits = c(0, 5500)) +
 labs(x = "Proporção de Cascalho no Solo e respectivas Zonas de Manejo",
y = expression("Massa Seca da Parte Aérea (kg ha-1)")) +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11, lineheight
= 0.80),
 axis.text.y = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.title = element_text(face = "bold", size = 13))
print(grafico_massa_barras)

Regressão Polinomial para Massa Seca
grafico_massa_reg <- ggplot(medias_massa_zona, aes(x = Cascalho_perc, y
= Massa_media)) +
 geom_point(size = 3, color = "blue") +
 geom_smooth(method = "lm", formula = y ~ poly(x, 2, raw = TRUE), color
= "black", se = FALSE, linewidth = 0.8) +
 annotate("text", x = 100, y = 5100, label = "italic(Y) ==
1.5276*italic(X)^2 - 265.9495*italic(X) + 14821.0544~~~~italic(R)^2 ==
0.8417", parse = TRUE, family = "Arial", size = 4.2, hjust = 1) +
 scale_x_continuous(breaks = c(59, 65, 76, 88, 94, 100), limits = c(55,
100)) +
 coord_cartesian(ylim = c(2500, 5300), clip = "off") +
 labs(x = "Gradiente de Proporção de Cascalho no Solo (%)", y =
expression("Massa Seca da Parte Aérea (kg ha-1)")) +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.text.y = element_text(color = "black", size = 11),
 axis.title = element_text(face = "bold", size = 13),
 plot.margin = margin(t = 25, r = 10, b = 10, l = 10))
print(grafico_massa_reg)

```

```
Análise Conjunta- TENDÊNCIA GLOBAL
```

```
df_relatorio_prod <- dados_prod %>% group_by(Cascalho_perc) %>%
summarise(Prod_media_relat = mean(Prod_kg_ha, na.rm = TRUE), .groups =
"drop")
df_relatorio_massa <- dados_massa %>% group_by(Cascalho_perc) %>%
summarise(Massa_media_relat = mean(MS_kg_ha, na.rm = TRUE), .groups =
"drop")
df_grafico_combinado <- inner_join(df_relatorio_prod,
df_relatorio_massa, by = "Cascalho_perc")

grafico_combinado <- ggplot(df_grafico_combinado, aes(x = Cascalho_perc))
+
 geom_point(aes(y = Massa_media_relat), size = 3, color = "blue") +
 geom_smooth(aes(y = Massa_media_relat), method = "lm", formula = y ~
poly(x, 2, raw = TRUE), color = "blue", se = FALSE, linewidth = 1, linetype
= "dashed") +
 geom_point(aes(y = Prod_media_relat), size = 3, color = "darkgreen") +
 geom_smooth(aes(y = Prod_media_relat), method = "lm", formula = y ~
poly(x, 2, raw = TRUE), color = "darkgreen", se = FALSE, linewidth = 1)
+
 scale_y_continuous(name = expression("Massa Seca da Parte Aérea (kg
ha^-1*") [Azul]"), sec.axis = sec_axis(~., name =
expression("Produtividade de Grãos (kg ha^-1*") [Verde]))) +
 scale_x_continuous(breaks = c(59, 65, 76, 88, 94, 100), limits = c(55,
100)) +
 labs(x = "Gradiente de Proporção de Cascalho no Solo (%)") +
 theme_classic(base_family = "Arial") +
 theme(axis.text.x = element_text(color = "black", size = 11),
axis.text.y = element_text(color = "blue", size = 11),
axis.title.y = element_text(color = "blue", face = "bold", size
= 12),
axis.text.y.right = element_text(color = "darkgreen", size =
11),
axis.title.y.right = element_text(color = "darkgreen", face =
"bold", size = 12),
axis.title.x = element_text(face = "bold", size = 13))
print(grafico_combinado)
```

```
R.version.string
```

```
...
```