

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JOSÉ CARLOS NOGUEIRA ALVES JUNIOR

**VARIAÇÃO POPULACIONAL DE SOJA EM
FUNÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE
MENOR FERTILIDADE POTENCIAL**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JOSÉ CARLOS NOGUEIRA ALVES JUNIOR

**VARIAÇÃO POPULACIONAL DE SOJA EM
FUNÇÃO DE ZONAS DE MANEJO DE
MENOR FERTILIDADE POTENCIAL**

Orientador(a): Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2025



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: José Carlos Nogueira Alves Junior

ORIENTADOR: Dr. Fabio Henrique Rojo Baio

TÍTULO: Variação populacional de soja em função de zonas de manejo de menor fertilidade potencial.

AVALIADORES:

Prof. Dr. Fabio Henrique Rojo Baio Prof.
Dr. Cassiano Garcia Roque
Prof. Dr. Jorge Gonzalez Aguilera

Chapadão do Sul, 18 de agosto de 2025.

**NOTA
MÁXIMA
NO MEC**

**UFMS
É 10!!!**



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Henrique Rojo Baio, Professor do Magisterio Superior**, em 18/08/2025, às 08:15, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

**NOTA
MÁXIMA
NO MEC**

**UFMS
É 10!!!**



Documento assinado eletronicamente por **Cassiano Garcia Roque, Professor do Magisterio Superior**, em 18/08/2025, às 08:18, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

**NOTA
MÁXIMA
NO MEC**

**UFMS
É 10!!!**



Documento assinado eletronicamente por **Jorge González Aguilera, Usuário Externo**, em 18/08/2025, às 09:42, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5808479** e o código CRC **79DC627D**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Avenida Engenheiro Douglas Ribeiro Parialeão, nº 5167 Fone: (67) 3562-6351

CEP 79560-000 - Chapadão do Sul - MS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ser o direcionamento em minha vida com papel de importância protagonista, a minha família pela rigidez na cobrança aos estudos que me tornou quem sou hoje, a minha esposa pelo incentivo e apoio em buscar um novo título, e aos professores da UFMS que permearam este trabalho, bem como meu orientador Dr. Fábio Henrique Rojo Baio .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município do Campus de Chapadão do Sul da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.....	9
Figura 2. Gráfico de pluviosidade e temperatura média durante a safra de 2024 na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. campus de Chapadão do Sul.....	10
Figura 3. Mapa da disponibilidade de potássio (A) e mapa da CTC (B).....	11
Figura 4. Mapa de populações de plantas semeadas em tecnologia VRT.....	12
Figura 5. Variabilidade espacial da produtividade (A), Altura da planta (B) e Altura da 1ª vagem (C) apresentadas nas diferentes unidades de manejo semeadas com variação populacional da cultura da soja (low, mean and high populations), e comparativo das médias dos tratamentos para essas variáveis.....	17
Figura 6. Mapas de variabilidade espacial do índice de vegetação NDVI (A), SAVI (B) e massa seca de raiz (C), apresentadas nas diferentes unidades de manejo semeadas com variação populacional da cultura da soja (low, mean and high populations), e comparativo das médias dos tratamentos para essas variáveis.....	19
Figura 7. Rede de correlação de Pearson entre variáveis altura da 1ª vagem (1ªVA), altura da planta (ALT), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), massa seca de raiz (RAIZ), produtividade kg ha ⁻¹ (PROD), taxa de assimilação líquida de CO ₂ (A), condutância estomática (GS), eficiência do uso da água (WUE) e Índice de vegetação por diferença normalizada da borda vermelha (NDRE).as linhas verdes indicam correlações positivas, enquanto linhas vermelhas indicam correlações negativas.....	20
Figura 8. Análise de variáveis canônicas em função de povoamentos vegetais variando entre 200.000 plantas ha ⁻¹ (população baixa), 240.000 plantas ha ⁻¹ (população média) e 280.000 plantas ha ⁻¹ (população alta).....	21

LITA DE TABELAS

Tabela 1. Análise estatística descritiva dos valores medidos para os atributos do solo CTC (capacidade de troca de cátions); V (saturação de bases); interpretação dos níveis de nutrientes B (baixo); A (adequado) e H (alto).....11

Tabela 2. Quadro de Análise de variância das variáveis altura da 1ª vagem (1ªVA), altura da planta (ALT), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), massa seca de raiz (RAIZ), produtividade kg ha⁻¹ (PROD), taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (GS), concentração intercelular de CO₂ (CI), Taxa de transpiração (E), eficiência do uso da água (WUE).....15

RESUMO

A soja (*Glycine max*) é uma leguminosa de extrema importância para economia brasileira e busca-se o incremento de produtividade para suprir as demandas globais. O objetivo do trabalho consiste em definir uma metodologia para semeadura em VRT (Variable Rate Technology) baseada a lei do mínimo e correlacionar a sinergia entre variação espacial de atributos do solo com a produtividade de diferentes estandes de plantas de soja. O experimento foi realizado no campus de Chapadão do Sul-MS. Os tratamentos consistiram na semeadura variando 20% a mais, 20% a menos e no recomendado pelos fabricantes do material genético, ou seja, semeado em VRT. A área foi semeada em zonas de acordo com a identificação do elemento mais limitante potássio (K), juntamente com a CTC. As zonas de manejo que continham maiores limitações receberam a variação de 20% a mais de sementes. Os resultados foram tratados por meio de estatística multivariada. A variabilidade espacial do K, que foi definida como limitante, influenciou a variabilidade espacial da produtividade de grãos em 4.907,84 kg ha⁻¹. No entanto, o aumento da população de plantas na zona que continha maior limitação comprometeu a produtividade de grãos, como consequência da competição intraespecífica, além de se ter oneração dos custos de produção, pelo aumento do insumo sementes.

Palavras-chave: Tecnologia, taxa variável, agricultura de precisão, variabilidade espacial, geoestatística.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max*) is a legume of extreme importance to the Brazilian economy, seeking to increase productivity to meet global demands. The objective of this study is to define a methodology for sowing using VRT (Variable Rate Technology) based on the law of the minimum and to correlate the synergy between spatial variation in soil attributes and the productivity of different areas of soybean plants. The experiment was conducted at the Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul, campus. Treatments consisted of sowing rates varying by 20% more, 20% less, and not recommended by the genetic material manufacturers, i.e., sown using VRT. The area was sown in zones according to the identification of the most limiting element, potassium (K), along with the CTC. The management zones contained greater variations of 20% more seeds. The results were analyzed using multivariate statistics. The spatial variability of K, which was defined as limiting, influenced the spatial variability of grain yield by 4,907.84 kg ha⁻¹. However, the increase in the plant population in the zone with the greatest limitations compromised grain yield as a consequence of intraspecific competition, in addition to increasing production costs due to increased seed consumption.

Palavras-chave: Technology, variable rate, precision agriculture, spatial variability, geostatistics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Local.....	10
2.2 Caracterização da área experimental	11
2.3 Delineamento experimental	13
2.4 Aquisição das variáveis.....	14
2.5 Análises estatísticas	15
3 RESULTADOS	16
4 DISCUSSÃO	23
5 CONCLUSÕES.....	25
REFERÊNCIAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda mundial por alimentos, um dos maiores desafios na agricultura é a produção sustentável, seja no âmbito ambiental, social ou econômico. É necessário o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a tomada de decisões dos agentes de mercado de modo preciso e ágil, demandando um conjunto de informações claras que retratem a realidade do ambiente agrícola, desde a semeadura até a colheita (SAMPAIO et al., 2021).

Com uma extensa abrangência territorial, o Brasil conta com solos heterogêneos de diferentes classificações, essa variabilidade de solos já é considerada para correção e adubação de solos, mas é pouco considerada para determinar o estande ideal de plantas de soja (LEONARDO et al., 2025; OLIVEIRA et al., 2024). Assim como o fertilizante, a semente é um insumo de maior valor agregado, e a otimização desse insumo pode reduzir os custos de produção e tornar a atividade ainda mais atrativa para o agricultor (MELO et al., 2024; MENEZES et al., 2023).

O número de plantas por unidade de área afeta a competição intraespecífica, resultando em uma disputa pelos recursos disponíveis no ambiente, afetando a fenologia da planta, incluindo a expressão da produtividade. A recomendação para a população de plantas vem sendo ajustada ao longo dos anos devido às alterações genéticas, anatômicas e bioquímicas nas cultivares, além das práticas de manejo (DÖRR et al., 2023).

A informação referente às populações de sementes a serem semeadas deve ser buscada junto aos melhoristas do material vegetal, entretanto, essa recomendação é feita de modo generalista e não considera as variabilidades dos solos (OLIVEIRA et al., 2024). Porém, atualmente, o posicionamento de variedades, somente com uma população em toda a área não vem entregando produtividades esperadas, visto que cada microrregião possui uma recomendação mais assertiva, considerando outros fatores como clima, nível de investimento e solos (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2020).

O estudo da semeadura em VRT (*Variable Rate Technology*) é crucial para compreender como as taxas de semeadura variável e fixa influenciam na produtividade de soja (MOURA et al., 2020). De acordo com Melo et al. (2017), as zonas de manejo podem ser definidas com base em diversas informações, como o mapa de colheita das safras anteriores, matéria orgânica do solo, textura do solo, relevo, índices de vegetação das culturas e condutividade elétrica aparente do solo. Conforme os dados apresentados por Baio et al. (2024), o produtor já pode ter garantia de que, com a diminuição da

população de plantas, pode-se ter produtividades elevadas em torno de 10% a mais, desde que em áreas de alta fertilidade potencial, permitindo menores custos de produção.

Os nutrientes encontrados na solução do solo são de vital importância para o desenvolvimento saudável das plantas somados a outros fatores para alcançarem sua máxima produtividade (TAIZ et al., 2017). Liebig, um químico que ganhou destaque em sua obra que ficou conhecida como, lei do mínimo, mostra que o potencial produtivo é condicionado por todos os elementos em níveis ideais, uma vez que determinado nutriente em condição limitante restringe a produtividade da cultura (VIANNA e NETO, 2022).

Ainda existem poucos trabalhos que correlacionam o uso da lei do mínimo para determinar zonas de manejo em taxas variadas de semeadura (BAIO et al., 2024). Este mesmo autor afirma que é preciso determinar as condições restritivas da produtividade da cultura no determinado talhão, e utilizar a variabilidade espacial desse fator para ajustar o estande de plantas.

Assim, o pilar central para o desenvolvimento deste trabalho busca entender e identificar qual seria a melhor variação populacional da cultura da soja em zonas de baixa fertilidade potencial, visto que essa questão não foi muito bem elucidada nos trabalhos citados anteriormente, tendo-o como uma solução de qual a melhor variação populacional de sementes de soja para esta zona de baixa fertilidade potencial (MOURA et al., 2020; BAIO et al., 2024; OLIVEIRA et al., 2024).

A hipótese deste trabalho questiona sobre a variação de população de sementes de soja ao ser correlacionada com os fatores limitantes encontrados nos solos e nas denominadas zonas de baixa fertilidade potencial, tendo essas características de variabilidade espacial mapeadas.

É crucial colaborar com as tomadas de decisões dos produtores rurais, no quesito de determinar a população adequada de sementes em suas áreas, possibilitando maior lucratividade, como também desenvolver um papel mais sustentável economicamente. Também com um papel de fomento para o produtor rural investir em novas tecnologias, trazendo a prática de VRT para o dia a dia do produtor e desmistificando essa tecnologia que pode ser usada em seu benefício próprio (MOURA et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2024).

O objetivo deste trabalho foi definir qual a melhor estratégia de variação populacional no cultivo de soja quando semeadas em solos que possuam variabilidade espacial com zonas de menor fertilidade potencial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local

O presente trabalho foi desenvolvido durante a safra 2024/25 na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, município de Chapadão do Sul – MS, sob as coordenadas geográficas latitude 18°46'49" Sul e longitude 52°38'51" Oeste, com uma altitude local de 810 m (Figura 1). O solo do local foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (SANTOS et al., 2018) recorrente em grande parte dos solos do cerrado, com características de elevado intemperismo e baixa atividade da argila (SOUSA e LOBATO, 2004). O solo do campo experimental é de característica argilosa (de 415 a 490 g kg⁻¹). A instalação da área foi realizada em outubro de 2024, de acordo com a recomendação para o material genético.

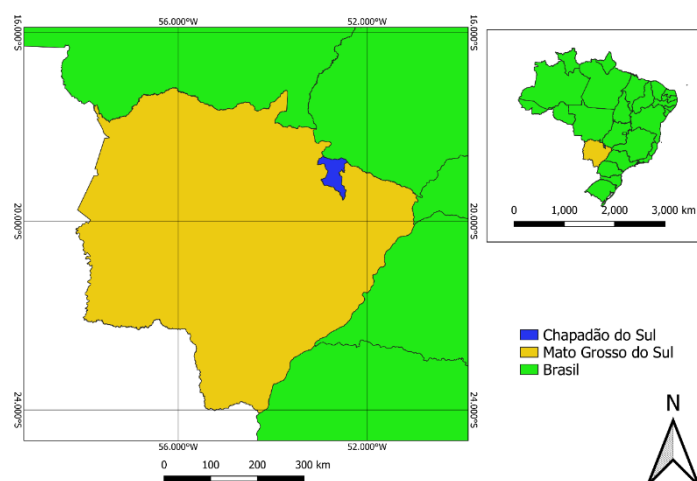


Figura 1. Localização do município do Campus de Chapadão do Sul da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Segundo ALVARES et al. (2013), o clima local é classificado com um tropical úmido, com chuvas durante o verão e seca durante o inverno, com temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual entre 1600 a 1800 mm. Não ocorreram intempéries que prejudicassem o adequado desenvolvimento das plantas, assim como não ocorreram condições de restrição hídrica.

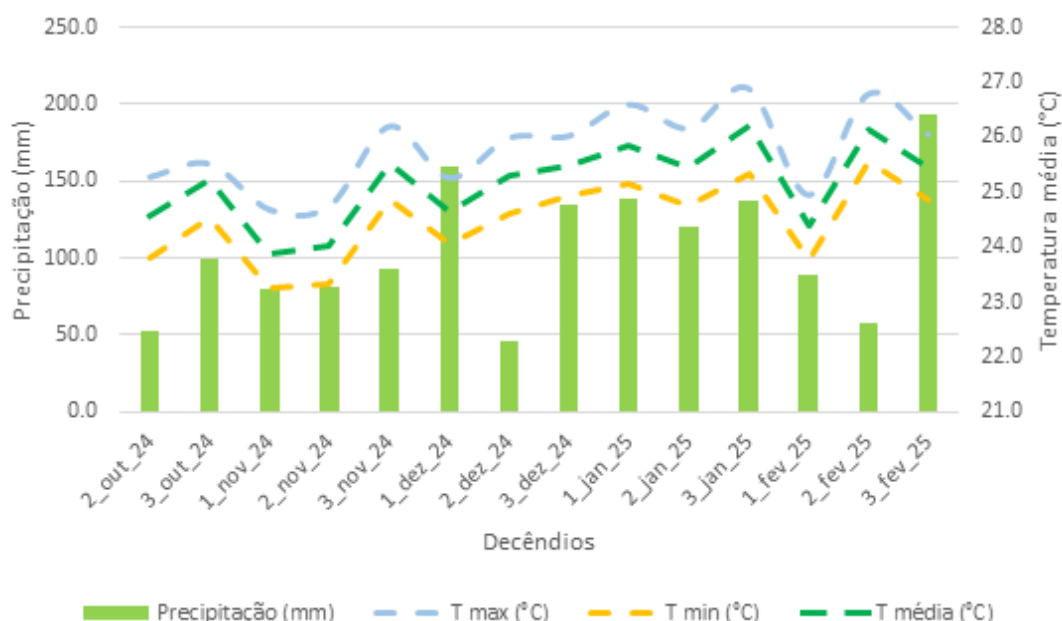


Figura 2. Gráfico de pluviosidade (mm) e temperatura média (°C) em períodos de dez dias em cada mês durante a safra de 2024 na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. campus de Chapadão do Sul.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As características meteorológicas dessa safra foram obtidas por meio de uma estação automatizada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada no município de Chapadão do Sul – MS. O regime de chuvas foi ideal para o bom desenvolvimento da cultura, com acumulados acima de 50 mm por decêndio.

2.2 Caracterização da área experimental

As características físicas e químicas do solo foram identificados através de amostragem pontual, coletando oito pontos como subamostras, formando uma amostra composta em uma grade quadrática pré definida de 20 m de lado e na profundidade de 0-0,2 m. Os atributos avaliados foram: teor de argila, macronutrientes, saturação de bases (V%) - com alvo em 55%; pH; e capacidade de troca catiônica (CTC). O uso de corretivos e fertilizantes foi por meio de correlação da produtividade esperada em 4500 kg ha⁻¹ (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2020). A área foi cultivada em sistema de cultivo mínimo.

Analizando a Tabela 1, o nutriente que apresentou menor teor no solo, segundo à lei do mínimo, foi o K (TANG e RILEY, 2021). O elemento em questão apresentou menor teor relativo recomendado para a cultura da soja, comparativamente aos outros elementos

analisados e seus níveis adequados para a cultura. Assim, houve variabilidade espacial nos teores de K no solo, assim como a CTC (BAIO et al., 2024; MOURA et al., 2020).

Tabela 1. Análise estatística descritiva dos valores medidos para os atributos do solo CTC (capacidade de troca de cátions); V (saturação de bases).

	ph	Ca	Mg	K	CTC	V	Argila
	-	cmol dm ⁻³		mg dm ⁻³	cmol dm ⁻³	%	
Média	5,35	3,02	0,98	52,88	8,21	50,48	46,1
Mínima	4,92	1,96	0,63	37,35	7,48	33,17	41,5
Máxima	5,75	3,74	1,26	61,97	9,03	61,23	49
Coeficiente de variação (%)	7,77	31,07	32,73	23,52	9,5	29,98	5,00
Adequado	5,2	4,3	1,3	130	-	50	-
Discrepância (%)	- 2,67	-29,69	-24,62	-55,97	-	1	-

* CTC (capacidade de troca de cátions); e V (saturação de bases),

A variabilidade espacial desses atributos foi utilizada para a recomendação da variação da população de soja, onde a zona de manejo contendo baixos teores de K e CTC foi semeada com duas populações de soja, de forma subdividida com população maior e população média. Essa subdivisão na zona de baixa fertilidade potencial foi estabelecida com o objetivo do entendimento sobre qual variação populacional seria a mais adequada para estas zonas de manejo.

A

B

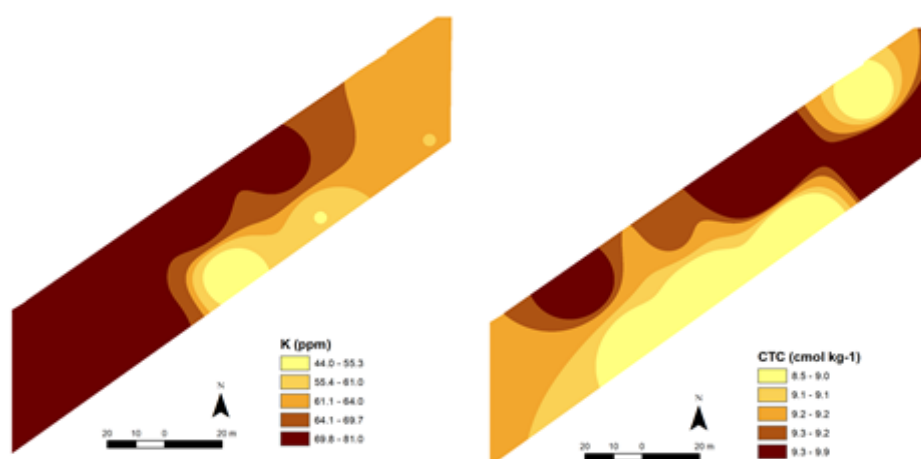


Figura 3. Mapa da disponibilidade de potássio (A) e mapa da CTC (B).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi definido com base em blocos casualizados. Cada zona de manejo ou tratamento estatístico recebeu 10 pontos amostrais georreferenciados, para posterior elaboração dos mapas, totalizando 40 pontos amostrais. A área experimental de 1 ha, foi semeada com estande de plantas variáveis, segundo a tecnologia VRT - (Variable Rate Technology). A cultivar de soja semeada foi a Soy Combate IPRO (GNS 7400 IPRO), pertencente ao grupo de maturação 7.4 e crescimento indeterminado (NEUMAIER et al., 2020). Foram semeadas diferentes populações em cada zona de recomendação (baseada na variabilidade espacial dos teores de K e CTC). A variação populacional da soja foi: baixo – 200.000 sementes ha^{-1} ; médio (recomendado para cultivar) – 240.000 sementes ha^{-1} ; alto 280.000 sementes ha^{-1} e o campo cultivado com população fixa recomendada pelo fornecedor da semente (240.000 sementes ha^{-1}) foi cultivado ao lado do talhão contendo os tratamentos experimentais.

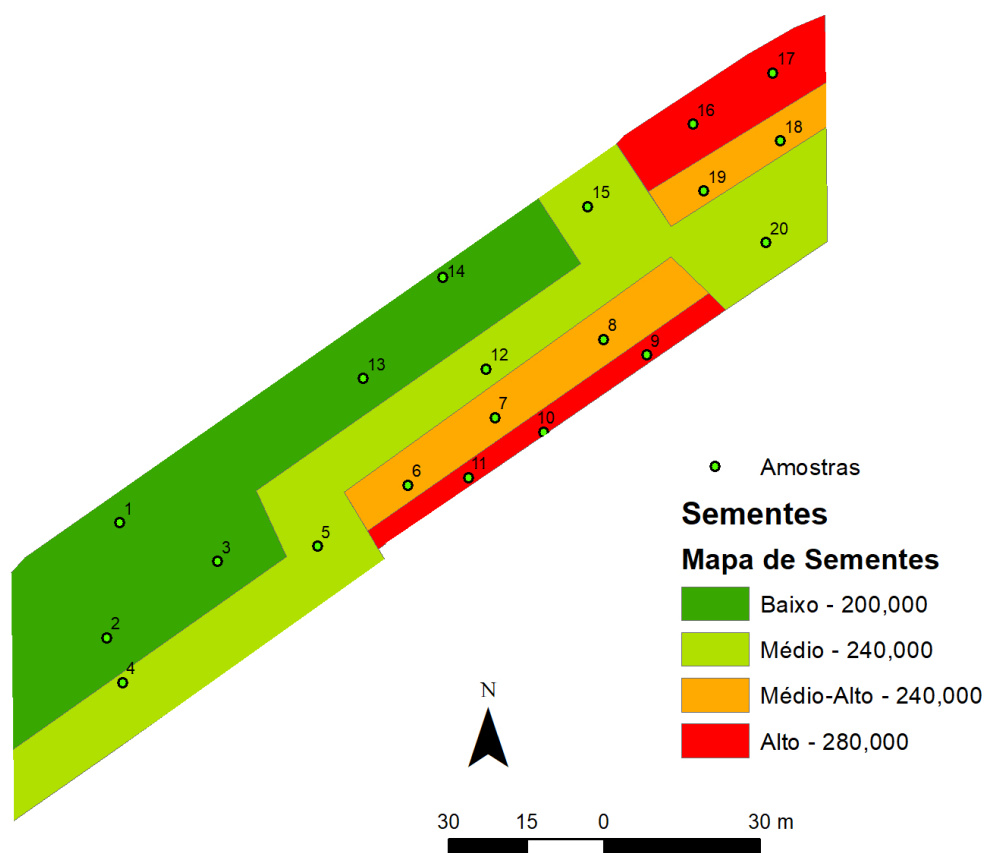


Figura 4. Mapa de populações de plantas semeadas em tecnologia VRT.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A aplicação de calcário foi realizada em outubro na recomendação de 1.000 kg ha⁻¹, buscando elevação da saturação por bases até 55% (SOUSA e LOBATO, 2004). A adubação de base na semeadura foi realizada com a aplicação do fertilizante NPK (00-25-15), na recomendação de 300 kg ha⁻¹, aplicado no sulco pela própria semeadora. A semeadura foi realizada por meio de uma semeadora Jumil modelo pop, com dosador de semente vertical por vácuo, no espaçamento entre linhas de 0,5 m. As relações de transmissão da semeadora foram ajustadas a cada zona de manejo, afim de obter o estande de plantas já pré definido.

No estágio fenológico V4 da cultura foi realizado a aplicação da adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ do cloreto de potássio (60% - K) (NEUMAIER et al., 2020). Os demais tratamentos fitossanitários foram aplicados perante monitoramentos e identificando os níveis de controle para as pragas e doenças, de acordo as práticas da região.

2.4 Aquisição das variáveis

O estande de plantas foi quantificado nos pontos amostrais aos 10 dias após a emergência (DAE), coincidindo exatamente em estágio fenológico V2 da cultura da soja (NEUMAIER et al., 2020), a fim de estabelecer o real estande de plantas germinadas. Foi realizada a pesagem de raízes (RAIZ, g) coletadas nos pontos amostrais quando a cultura estava no estágio R5. As raízes foram coletadas por meio de escavação entre as linhas e respeitando sua integridade. Após a coleta foi feita a lavagem das raízes com uso de uma peneira de malha fina, para que não se perdesse raízes finas, alocadas em sacos de papel e destinado para secagem em estufa com ventilação forçada a 105 °C por 24 h. Então, foram pesadas com balança digital de precisão com quatro casas decimais. Assim, pode-se saber como se desenvolveu o sistema radicular das plantas dispostas em diferentes populações e avaliar possíveis competições intraespecíficas.

Os índices de vegetação foram mensurados em dois momentos fenológicos da cultura, em V8 e em R5, através do uso de uma câmera multiespectral instalada em um RPA (aeronave remotamente pilotada) SenseFly eBee RTK. Dessa maneira, foi possível avaliar a saúde e o desenvolvimento das plantas assim dizendo, dispostas neste ambiente de variação populacional. Os voos foram realizados às 9 h, em momento de plena luz, e a 75 m de altitude local, permitindo a resolução espacial das imagens de 0,08 m. O RPA

foi equipado com câmera multiespectral Parrot Sequoia para registro de imagens, para analisar a massa vegetal da cultura instalada e após vincular com os outros atributos fenológicos analisados. As imagens coletadas pelo equipamento foram corrigidas por meio de calibração radiométrica utilizando uma placa reflexiva padronizada. A ortorretificação foi executada com o software Pix4D versão 4.1.22. Imagens de reflectância multiespectral foram obtidas para o verde ($550\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$), vermelho ($660\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$), borda vermelha ($735\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$) e infravermelho próximo (NIR, $790\text{ nm} \pm 40\text{ nm}$), permitindo calcular os índices de vegetação (IV) mais comumente usados: NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) e NDRE (Índice de Borda Vermelha por Diferença Normalizada) (SILVA et al., 2025; TEODORO et al., 2021). Os mapas foram gerados através da interpolação pelo inverso da distância ao quadrado.

As variáveis fisiológicas, taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (GS), eficiência do uso da água (WUE), foram analisadas a partir de trocas gasosas foram obtidas através do (*Infrared Gas Analyzer* – IRGA, modelo Li6400XT (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), obtidas da primeira folha plenamente desenvolvida, análises estas que foram feitas entre 8:00 h e 10:00 h, no período da manhã, com ausência de nuvens e temperatura de $26\text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar entre 60 e 80%.

A colheita foi realizada de forma manual nos mesmos pontos amostrais georreferenciados das avaliações anteriores. A amostragem para o cálculo da produtividade foi realizada através da colheita das plantas localizadas em parcelas contendo 4 linhas de 3 m de comprimento. Também foi mensurada a altura de plantas (ALT, cm) com uso de fita métrica a partir da superfície do solo, assim como a altura da inserção da primeira vagem (1°VA , cm). As amostras debulhadas foram pesadas e umidade corrigida para 13% e determinada a produtividade (PROD, kg ha^{-1}). Após a coleta dos dados, os mesmos foram processados e normalizados e após os mapas foram interpolados.

2.5 Análises estatísticas

Avaliando o nível de significância para ter uma comparação de rendimento entre os tratamentos foi executada uma análise de variância. A correlação de Pearson pensada e desenvolvida para se ter uma visualização clara da interação entre tratamentos, onde a relação distância entre os pontos é proporcional ao valor irrefutável da correlação entre

estes pontos (BHERING e TEODORO, 2021). Após também foi executada a estatística multivariada e análise das variáveis canônicas, avaliando a interrelação entre as variáveis. Estas mesmas variáveis foram submetidas isoladamente ao teste de comparação de médias de Duncan a 5% de probabilidade. E as análises foram feitas a partir do software Rbio (BHERING, 2017).

3 RESULTADOS

Na Tabela 2, onde é apresentado o quadro de análise de variância, pode-se notar que todas as variáveis apresentaram tratamentos aos quais diferiram estatisticamente.

Tabela 2. Quadro de Análise de variância das variáveis altura da 1ª vagem (1ºVA), altura da planta (ALT), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), massa seca de raiz (RAÍZ), taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (GS), eficiência do uso da água (WUE) e Índice de vegetação por diferença normalizada da borda vermelha (NDRE), e produtividade (PROD).

FV	1º VA (cm)	ALT (cm)	NDVI	SAVI	RAÍZ (g)
Tratamento	42,99*	20,17*	3,965*	1,997*	33,15*
Média	14,23	93,76	0,83	0,79	3,09
CV (%)	8,60	2,59	3,43	3,23	5,14

FV	A ($\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	GS ($\text{mol H}_2\text{O}$ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	WUE ($\mu\text{mol CO}_2$ / $\text{mmol H}_2\text{O}$)	NDRE	PROD (kg ha^{-1})
Tratamento	52,96*	3,23*	62,58*	20,37*	11,03*
Média	20,80	1,39	2,19	0,35	4907,84
CV(%)	12,28	20,34	10,89	4	9,03

* significativo e ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F à 5% de probabilidade, FV: Fontes de variação; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5 apresenta os mapas de variabilidade espacial de produtividade, altura da planta e altura da inserção da primeira vagem, respectivamente, de acordo com fundamentos da agricultura de precisão em cada zona de manejo. As produtividades (Figura 5A2) mensuradas nas diferentes zonas de manejo apresentaram diferença estatística, porém se obtiveram maiores médias onde se semeou populações médias de sementes de soja. Se destacando também no teste de comparação de médias. Obteve-se menores médias de produtividade na zona onde se semeou altas populações. Nesta mesma zona de manejo de altas populações, observa-se que a altura das plantas (Figura 5B2) foram maiores em relação às zonas de manejo que contiveram baixa população de plantas de soja. A zona de baixa fertilidade, a qual recebeu uma população média de plantas, apresentou a maior altura, se destacando no teste de comparação de médias.

Pode-se observar (Figura 5B2) o aumento da população de plantas de soja na zona de baixa fertilidade respondeu mais ao ciclo vegetativo em relação ao reprodutivo. Podendo ser devido à competição entre plantas nesta zona de manejo, e comparando-o com a zona de média população de soja, as plantas conseguiram manter o equilíbrio entre desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

O mesmo padrão apresentado para altura de plantas, pode ser observado para a variável altura de inserção da primeira vagem (Figura 5C2) na zona de baixa fertilidade, a qual recebeu uma população média de plantas, e apresentou maior altura de inserção da primeira vagem, se destacando de todas outras médias no teste de comparação de médias, a baixa população de plantas obteve a menor média em altura da inserção da primeira vagem.

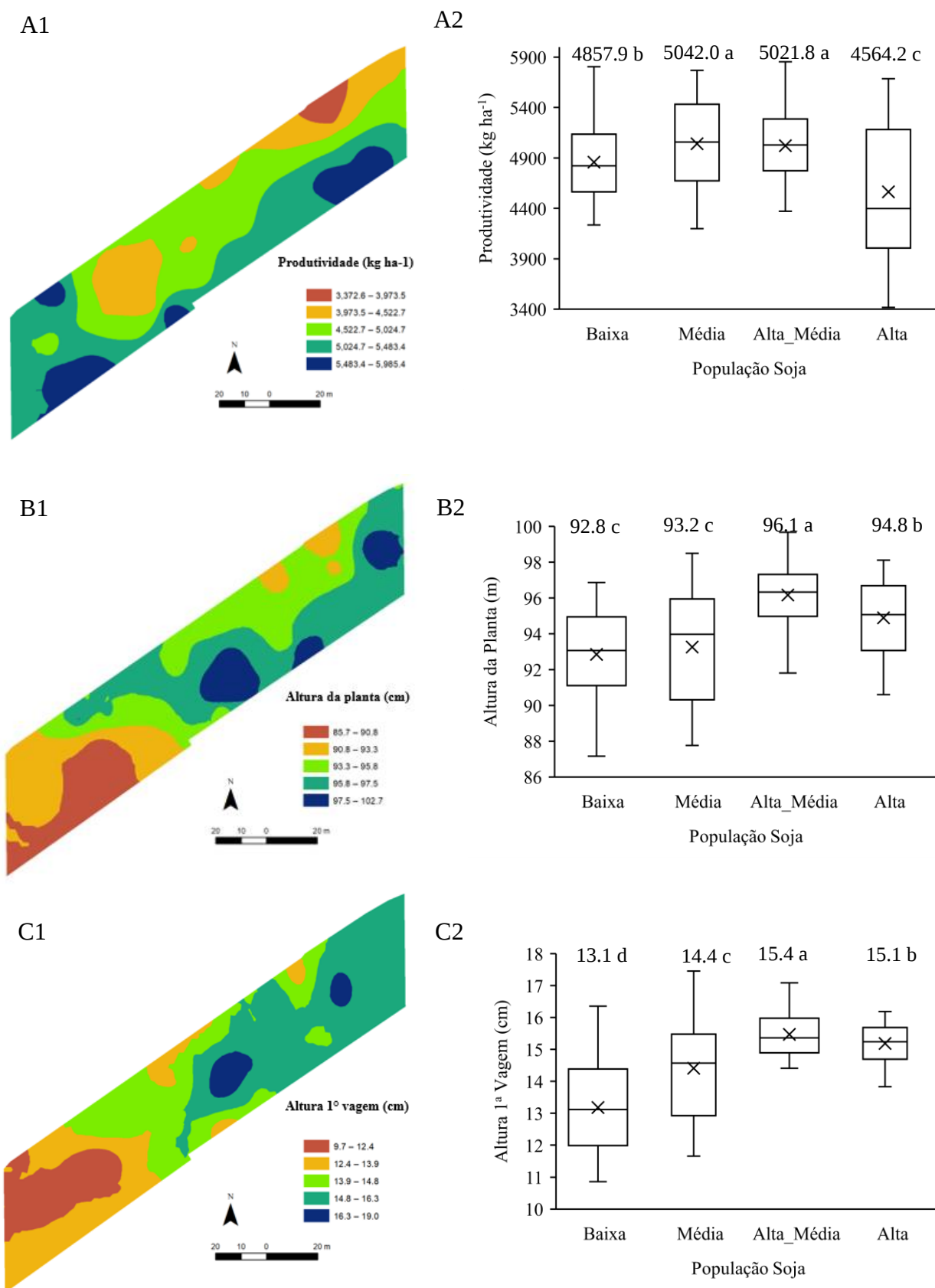


Figura 5. Variabilidade espacial da produtividade (A), Altura da planta (B) e Altura da 1^o vagem (C) apresentadas nas diferentes unidades de manejo semeadas com variação

populacional da cultura da soja (baixa, média e altas populações), e comparativo das médias dos tratamentos para essas variáveis.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O NDVI difere entre as zonas de manejo (Figura 6A). A zona de manejo de baixa fertilidade, que recebeu maior população de plantas, não apresentou diferença da zona de baixa população de plantas, quando analisadas pelo teste de comparação de médias, porém a baixa população de plantas obteve a maior média. O fator que está correlacionado a esse dado é justamente o estresse causado pela competição intraespecífica, com perdas no crescimento e vigor das plantas.

A variável SAVI (Figura 6B2), pode-se avaliar uma similaridade gráfica com o NDVI, onde a zona de alta população apresentou maior média, mostrando que nas fases iniciais já era possível identificar maior massa vegetal. Na variável massa de raiz seca (Figura 6C2), pode-se avaliar que as zonas de alta população e média população de plantas em zona de baixa fertilidade potencial tiveram médias semelhantes, como também foram as menores médias dos tratamentos, a maior média de massa seca de raiz foi da zona de baixa população de plantas, diferindo dos demais quando analisado o teste de comparação de médias.

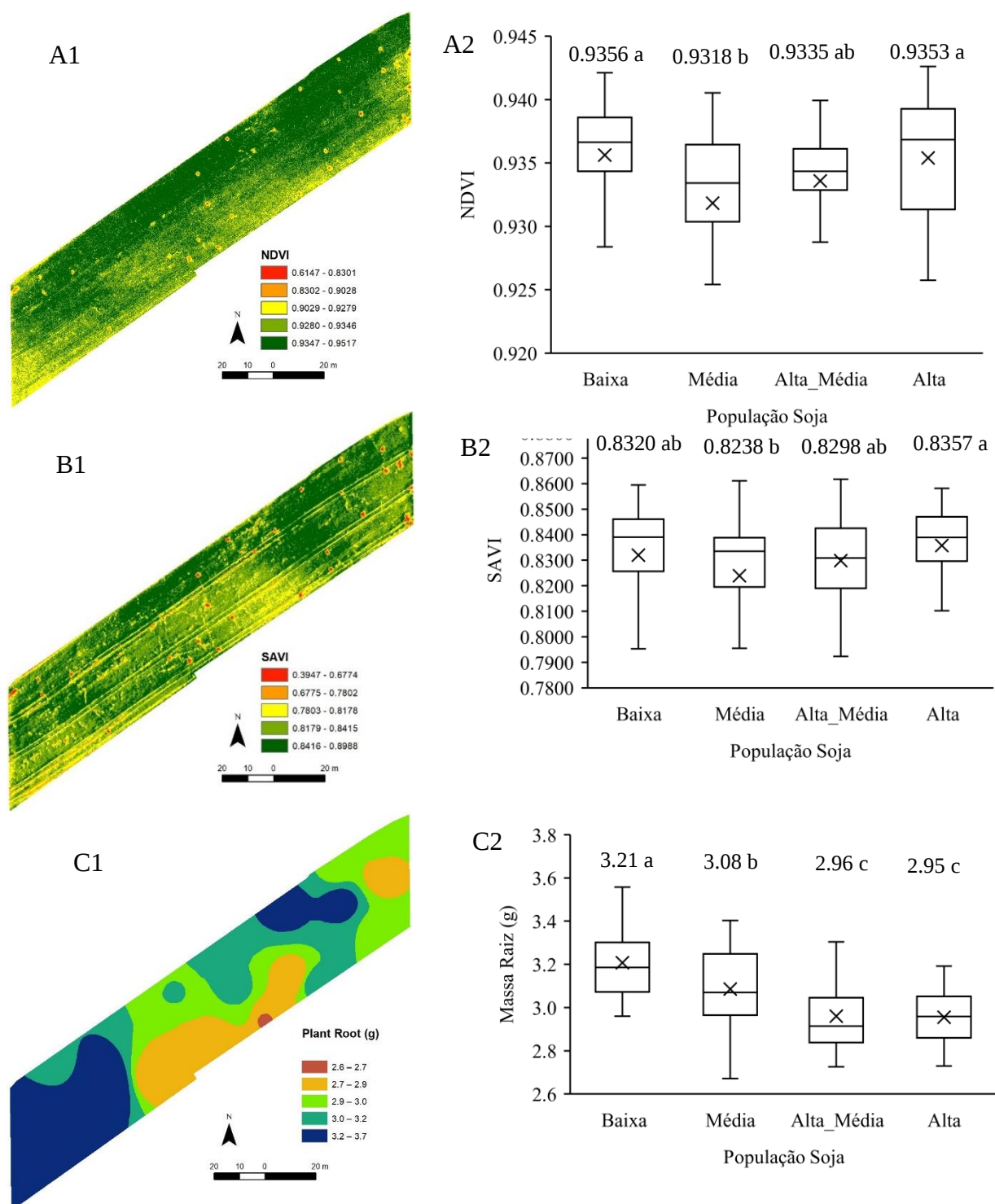


Figura 6. Mapas de variabilidade espacial do índice de vegetação NDVI (A), SAVI (B) e massa seca de raiz (C), apresentadas nas diferentes unidades de manejo semeadas com variação populacional da cultura da soja (baixa, média e altas populações), e comparativo das médias dos tratamentos para essas variáveis.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pela avaliação da rede de correlação de Pearson entre as variáveis observadas (Figura 7), pode-se verificar que a variável produtividade apresentou relação positiva com taxa de assimilação líquida de CO₂, eficiência do uso da água. Todavia, essa mesma variável (PROD) apresentou relação negativa quando comparada aos índices de vegetação NDVI, SAVI e NDRE. Os índices de vegetação apresentaram relação positiva entre si, visto que são variáveis que se complementam. A altura de inserção de primeira vagem obteve correlação positiva com altura da planta, logo, a produtividade não esteve correlacionada com estas duas variáveis, a assimilação de CO₂ e eficiência do uso da água estiveram fortemente correlacionadas indicando boas atividades fotossintéticas.

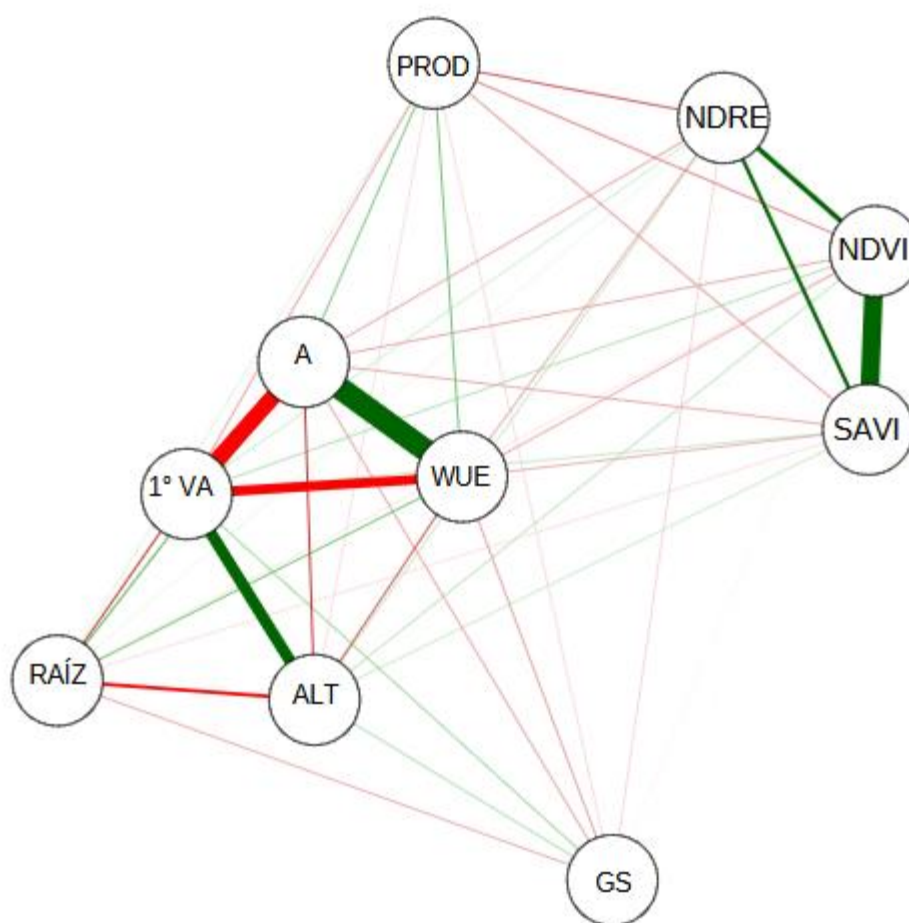


Figura 7. Rede de correlação de Pearson entre variáveis altura da 1ª vagem (1ºVA), altura da planta (ALT), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), massa seca de raiz (RAÍZ), produtividade kg ha⁻¹ (PROD), taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (GS), eficiência do uso da água (WUE) e Índice de vegetação por diferença normalizada da borda

vermelha (NDRE). as linhas verdes indicam correlações positivas, enquanto linhas vermelhas indicam correlações negativas.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As variáveis canônicas (Figura 8), demonstram que a variabilidade dos tratamentos VRT afetou as variáveis, o agrupamento de dados da variação de média população afetaram positivamente a produtividade e condutância estomática, já o agrupamento de dados referentes a alta população e média população na zona de baixa fertilidade, puxaram negativamente os valores de NDVI, NDRE, NDVI, altura de planta e altura de inserção de 1º vagem, divergindo opostamente ao conjunto de dados que melhor representou a produtividade, ou seja, a média população. Já a baixa população influenciou os resultados das variáveis assimilação de CO₂, eficiência do uso da água e massa seca de raiz.

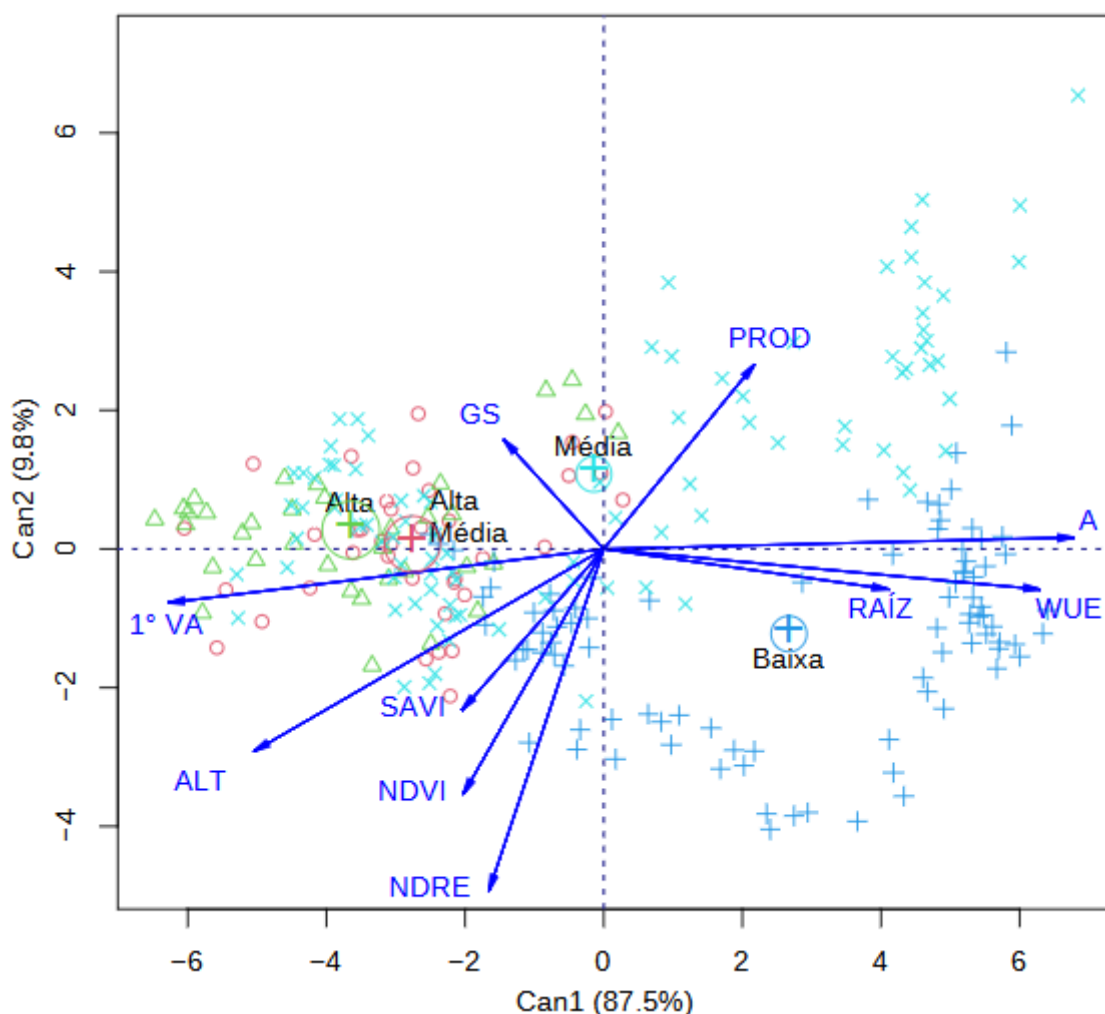


Figura 8. Análise de variáveis canônicas em função de povoamentos vegetais variando entre 200.000 plantas ha^{-1} (população baixa), 240.000 (população média) e 280.000 plantas ha^{-1} (população alta).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4 DISCUSSÃO

As produtividades analisadas neste trabalho apresentam como é possível detalhar o manejo de populações de plantas devido a um bom mapeamento da área. A variação populacional de soja já foi pautada e explorada em alguns trabalhos anteriores (MACHADO et al., 2018; MOURA et al., 2020). De acordo com os dados experimentais obtidos e analisados, é possível se respaldar na lei do mínimo, para buscar respostas a essa questão. A prática de semeadura em VRT vem sendo estudada ao longo dos anos, porém, com pouca clareza quando se trata das variáveis e das características particulares estudadas neste trabalho.

De acordo com Baio et al. (2024) é possível determinar zonas de manejo conforme a variabilidade espacial dos nutrientes disponíveis no solo, permitindo a identificação de qual nutriente é o limitante para alcançar potenciais produtividades, e ainda ressalta que cada zona de manejo deve ser estudada de maneira focada para maior assertividade no estabelecimento dessas zonas de manejo e qual variação populacional utilizar.

A produtividade média da cultura da soja mensurada nas zonas de manejo em VRT foi de 4.907,84 kg ha^{-1} , por outro lado, a zona de controle com população recomendada pelos desenvolvedores em população fixa obteve média de produtividade da cultura da soja de 4.200 kg ha^{-1} . A população de plantas é um fator fitotécnico primordial para um posicionamento que almeja produtividades (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2020), porém, é comumente utilizada uma população fixa de determinada variedade de soja para todo o talhão, não levando em consideração a variação espacial dos atributos deste solo que definem a produtividade da cultura, muitas das vezes essas áreas não são mapeadas e nem se quer se saber, se há alguma limitação nutricional neste solo.

A população mediana amplamente usada se encaixa bem quando deparado com solos mais restritivos e quando estes solos não são mapeados, ou seja, em situações em que não se conhece as limitações deste solo, a população mediana obtém maiores incrementos de produtividade. Da mesma maneira que seria um erro variar a população de plantas sem conhecer os atributos de determinado solo.

O aumento da população de plantas de soja em zonas de baixa fertilidade responde mais ao ciclo vegetativo em relação ao reprodutivo, segundo Rodigheri et al., (2020), o fator que está correlacionado a esse dado é justamente o estresse causado pela competição intraespecífica, com perdas no crescimento e vigor das plantas e comparando-o com a zona de média população de soja, as plantas conseguiram manter o equilíbrio entre desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

As altas produtividades de soja sempre sofreram os efeitos do ambiente, visto que depende fortemente de radiação solar, condição térmica, condição fotoperiódica e principalmente precipitação adequada, fatores estes que podem afetar o desenvolvimento saudável das sementes semeadas, diminuindo a população final de plantas (NEUMAIER et al., 2020). Portanto, sempre que algum desses fatores acima citados são menos absorvidos pela planta, a mesma tem mudanças deletérias em seu crescimento vegetativo, assim como pode-se observar os resultados de massa seca de raiz, altura de plantas, altura da inserção da primeira vagem e por fim produtividade de grãos, justificando o estiolamento de plantas, como maneira de aumentar sua absorção e conversão de energia, resultado esse de uma competição intraespecífica.

O ambiente pode afetar a produtividade bem como o material genético semeado pode não ter características de plasticidade fenotípica, de maneira que não responde a variação de população, impossibilitando a semeadura VRT, mesmo que com toda a área mapeada (LIMA et al., 2017).

Ao manter a população mediana de plantas na zona de baixa fertilidade potencial obteve-se melhores resultados em altura da 1ª vagem, altura de plantas e produtividade muito semelhante a outra zona de média população em área de média fertilidade. Dessa forma, é possível manter as populações médias recomendadas pelos fabricantes onde existem restrições nutricionais para se ter melhores produtividades, dessa forma não se tem a falsa sensação que aumentando a população de plantas se tem maior produtividades. O autor Oliveira Junior et al., (2020) ressalta que maiores populações podem causar o acamamento das plantas a depender da variedade de soja, resultado de crescimento acentuado da competição intraespecífica das plantas, dependendo da prostração dos ramos pode ocorrer a interrupção dos feixes vasculares e sobreposição de folhas.

Para se realizar uma semeadura VRT, é necessário o mapeamento da CTC juntamente com o mapa do nutriente que se encontra em restrição, visto que a CTC se trata de um número potencial não representando a real disponibilidade de nutrientes, quando analisado na perspectiva de saturação de K na CTC (BAIO et al. 2024).

De acordo com Oliveira Junior et al., (2020), a cultura da soja chega a exportar cerca de 20 kg de K por tonelada de grãos. O K é responsável por diversas funções nas plantas como na condutância estomática, ativação enzimática e translocação do fotoassimilados permitindo maior peso e qualidade de grãos (TAIZ et al., 2017). É certo que as recomendações de adubação potássica estão um pouco desatualizadas quanto a região dos cerrados, quando se almeja 3600 kg ha⁻¹ (SOUSA e LOBATO, 2004).

Aumentar a população de plantas em zonas de baixa CTC potencial e baixos níveis de K, não resulta significativamente, onera os custos e não reflete produtividade, aumenta o risco de maior incidência de pragas e doenças devido ao dossel super desenvolvido e sem assertividade nos alvos de aplicações, e por fim gerenciar o risco de acamamento na fase mais importante da cultura, o estágio reprodutivo (OLIVEIRA et al., 2024).

5 CONCLUSÕES

É possível determinar zonas de manejo segundo os fundamentos da agricultura de precisão para ser semeada a soja em VRT. Considerando a variabilidade espacial dos nutrientes existentes no solo que podem estar limitando o máximo potencial produtivo da cultura, obtendo o incremento de produtividade. Na determinada parcela em específico deste trabalho, a variação espacial da disponibilidade do K que estava limitante no solo, afetou a variabilidade espacial do incremento de grãos.

O aumento da população de plantas em zonas de manejo com maiores limitações, diminui a produtividade de grãos de soja nessas respectivas áreas. Entretanto, populações médias recomendadas, nessas mesmas zonas, podem incrementar melhores desenvolvimentos de plantas, refletindo em maior produtividade de grãos.

REFERÊNCIAS

BAIO, F. H. R.; GAVA, R.; TEODORO, L. P. R.; ALVAREZ, R. de C. F.; ALVES, M. E. M.; SANTANA, D. C.; CAMPOS, C. N. S.; CÂNDIDO, A. C. da S.; TEODORO, P. E. A New Proposal for Soybean Plant Stand: Variation Based on the Law of the Minimum. **Plants**, v. 13, n. 22, 2024.

BHERING, L. L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform SOFTWARE/DEVICE RELEASE. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, p. 187–190, 2017.

BHERING, L. L.; TEODORO, P. E. ESTATÍSTICA EXPERIMENTAL NO RBIO. Curitiba: **Brazil Publishing**, 2021.

DÖRR, C. S.; PINZ, E. R.; BRATZ, I. S.; SPINELLI, V. M.; MARTINS, A. B. N.; DREWS, G. K.; MAGANO, D. A.; PANOZZO, L. E. Densidade de plantas e desempenho produtivo da soja. **Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)**, v. 14, n. 10, p. 18821–18831, 2023.

LEONARDO, W.; DA SILVA, C.; OLIVEIRA, L.; SANTOS, D.; ROSARIA DE SOUSA, K. Manejo e fertilidade do solo: abordando a temática através de uma revisão de literatura. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 2, n. 1, 2025.

LIMA, N.; SODRÉ, G.; LIMA, H.; PAIVA, S.; KAIOWÁ, A.; COUTINHO, A. Plasticidade Fenotípica. **Revista de Ciência Elementar**, v. 5, n. 2, 2017.

MACHADO, M. V. M.; MAGGI, M. F.; SOUZA, E. G. de; CAMICIA, R. G. da M.; AMARANTE, R. R. do. Application of Plant Densities in Management Units in the Soybean Cultivation. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 6, p. 319, 2018.

MELO, B. M. R. de; PAGLIS, C. M.; OLIVEIRA, M. S. de; R. TEIXEIRA, M. B.; M. DA SILVA, J. S.; F. LIMA, D. F. Zonas de manejo em função de propriedades de solo, relevo e produtividade da lavoura cafeeira. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 2, 2017.

MELO, M. P.; COSTA, K. S. de Q.; BOUSSE, G. P.; VAZ, C. F.; OLIVEIRA, C. F. de; MELO, N. C.; MORAES, F. K. C. Importância da agricultura de precisão para a eficiência da produção agrícola: uma revisão. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 5, p. e6760, 2024.

MENEZES, B. M. B. de; FRANCO, C.; MELO, S. B. X. de; ANDRADE, M. G. F. de. Os efeitos da pandemia da covid-19 nos custos de produção de soja transgênica em municípios brasileiros. **SciELO Preprints**, 2023

MOURA, S. S.; FRANCA, L. T.; PEREIRA, V. S.; TEODORO, P. E.; BAIO, F. H. R. Seeding rate in soybean according to the soil apparent electrical conductivity. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. e20181112, 2020.

NEUMAIER, N.; RENATO, J.; FARIAS, B.; LIMA NEPOMUCENO, A.; MERTZ-HENNING, L. M.; SALVADOR, J.; FOLONI, S.; ALEXANDRA, L.; MORAES, C.;

LUIZ, S.; CAPÍTULO, G. **Estádios fenológicos da soja Ecofisiologia da soja**. [S. l]: 2020.

OLIVEIRA, J. T. de; BAIO, F. H. R.; SILVA, E. E. da; MOURA, S. S. de; VALENTE, D. S.; TEODORO, P. E. Spatial autocorrelation of soybean plant populations and physical attributes of Oxisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, 2024.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. de; CASTRO, C. de. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. **Embrapa soja**, p. 133–184, 2020.

RODIGHERI, G.; FONTANA, D. C.; SCHAPARINI, L. P.; MENDES, A. P. da S. F.; DALMAGO, G. A. Análise espectro-temporal DE NDVI e área da soja cultivada frente ao La Niña de 2012. **Agrometeoros**, v. 27, n. 1, 2020.

SAMPAIO, M. I. R.; KUNZ, A.; HILLEBRAND, F. L.; ZAMBERLAN, J. F.; IDALINO, F. D. Análise dos índices de vegetação NDVI e NDRE em imagens obtidas por meio de sensor embarcado em um RPAS para as culturas da soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) irrigados. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 4, p. 350–362, 2021.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; FILHO, J. C. de A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. [S. l.]: Embrapa, 2018.

SILVA, C. S.; SANTANA, D. C.; BAIO, F. H. R.; SERON, A. C. da S. C.; ALVAREZ, R. de C. F.; TEODORO, L. P. R.; JUNIOR, C. A. da S.; TEODORO, P. E. High-Precision Phenotyping in Soybeans: Applying Multispectral Variables Acquired at Different Phenological Stages. **AgriEngineering**, v. 7, n. 2, 2025.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. **Repositório de informação tecnológica da embrapa**, v. 2, p. 416, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. [S. l.]: Artmed Editora, 2017.

TANG, J.; RILEY, W. J. Finding Liebig's law of the minimum. **Ecological Applications**, v. 31, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eap.2458>

TEODORO, P. E., TEODORO, L. P. R., BAIO, F. H. R., DA SILVA JUNIOR, C. A., DOS SANTOS, R. G., RAMOS, A. P. M., PINHEIRO, M. M. F., OSCO, L. P., GONÇALVES, W. N., CARNEIRO, A. M., JUNIOR, J. M., PISTORI, H., SHIRATSUCHI, L. S. Predicting Days to Maturity, Plant Height, and Grain Yield in Soybean: A Machine and Deep Learning Approach Using Multispectral Data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 22, 2021.

VIANNA, C. A. F. J.; NETO, P. da C. P. JUSTUS VON LIEBIG NO SÉCULO XIX: UM AUXILIADOR DA INDÚSTRIA AGRÍCOLA NACIONAL. In: **Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil - Volume 4**. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2022. v. 17, p. 263–280.

