

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

GABRIEL ALVES GRIS

**ARRANJO POPULACIONAL E CARACTERÍSTICAS DO SOLO  
NA PRODUTIVIDADE E RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA  
DA SOJA**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**ARRANJO POPULACIONAL E CARACTERÍSTICAS DO SOLO  
NA PRODUTIVIDADE E RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA  
DA SOJA**

Trabalho de conclusão de curso,  
apresentado a Universidade Federal  
de Mato Grosso do Sul, como parcial  
para a obtenção do título de  
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique  
Rojo Baio

CHAPADÃO DO SUL - MS

2023



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



#### ATA DE DEFESA FINAL DO TCC

Bacharelado em Agronomia.

Aos treze dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e três, no horário das 07h30 às 09h30, foi realizada a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do acadêmico Gabriel Alves Gris, intitulado Arranjo Populacional e Características do Solo na Produtividade e Resposta Espectral da Cultura da Soja. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio, presidente da Banca Examinadora, constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos e Profa. MSc. Suzany Santos de Moura. A Banca Examinadora avaliou o trabalho e atribuiu a nota média, no valor de 9,0 (nove vírgula zero) sendo o discente considerado aprovado. Encerrados os trabalhos, os Examinadores deram ciência ao examinada da decisão. Proclamada a decisão pelo Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio, presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos. E para constar eu, Anderson Abreu de Jesus, confiro e assino a presente Ata juntamente com os membros da Banca Examinadora.

Chapadão do Sul, 13 de novembro de 2023.

<p>NOTA MÁXIMA NO MEC</p>	<p>UFMS É 10!!!</p>		<p>Documento assinado eletronicamente por Fabio Henrique Rojo Baio, Professor do Magisterio Superior, em 13/11/2023, às 09:04, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do <a href="#">Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020</a>.</p>
<p>NOTA MÁXIMA NO MEC</p>	<p>UFMS É 10!!!</p>		<p>Documento assinado eletronicamente por Suzany Santos de Moura, Professora do Magistério Superior - Substituta, em 13/11/2023, às 09:21, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do <a href="#">Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020</a>.</p>
<p>NOTA MÁXIMA NO MEC</p>	<p>UFMS É 10!!!</p>		<p>Documento assinado eletronicamente por Cid Naudi Silva Campos, Professor do Magisterio Superior, em 13/11/2023, às 15:04, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do <a href="#">Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020</a>.</p>



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](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 4453898 e o código CRC 1C406F04.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus por sempre me dar forças, e à minha família que sempre me apoiou e acreditou no meu potencial.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre atender os meus pedidos, e possibilitar que independentemente das dificuldades, eu pudesse permanecer calmo e resiliente para continuar buscando meus objetivos. Aos meus pais, Adriana e Alberto por me dar todo o suporte e o apoio que precisei para chegar até aqui. A minha namorada, Mirelle, por me apoiar durante esta jornada.

Ao meu orientador Fábio Henrique Rojo Baio por me auxiliar no desenvolvimento do estudo, sendo sempre solícito. A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, por me abrir as portas para o desenvolvimento da pesquisa e qualificação profissional. Aos meus amigos e colegas que cooperaram para o desenvolvimento dessa pesquisa, com dicas e sugestões de melhoria.

## LISTA DE FIGURAS

	Página
01. Figura 1. Implemento utilizado para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo.....	14
02. Figura 2. Precipitação (mm), temperatura (°C) máxima, mínima e média, a cada dez dias, durante a condução do experimento, na cidade de Chapadão do Sul – MS, na safra agrícola de 2022/23.....	16
03. Figura 3. Teste de Duncan entre os diferentes tratamentos de população de soja e sua respectiva massa verde.....	18
04. Figura 4. Correlação espacial entre a avaliação com a ferramenta NDVI em R5.1 (83 DAE) (A) e Produtividade dos tratamentos (B).....	20
05. Figura 5. Rede de Correlação de Pearson, com interação das variáveis MV (massa verde), MG (massa de grãos) e PRO (produtividade) avaliando as diferentes cronologias sob diferentes taxas de semeadura, nos diversos estádios fenológicos. .....	21
06. Figura 6. Rede de Correlação de Pearson, com a interação das variáveis PRO (produtividade), CEa (Condutividade elétrica aparente), K (Potássio), e CTC (Capacidade de troca catiônica).....	22
07. Figura 7. Correlação espacial entre a produtividade dos tratamentos (A) e condutividade elétrica aparente do solo (B).....	22
08. Figura 8. Diferentes tratamentos e sua respectiva produtividade.....	23

## LISTA DE TABELA

	Página
01. Tabela 1. Resultados médios das análises química e física de solo realizadas na área.....	13

## SUMÁRIO

	Página
Resumo.....	9
Abstract .....	10
Introdução .....	11
Material e Métodos .....	13
Resultados e Discussão .....	17
Conclusões .....	24
Referências Bibliográficas. ....	25

## **ARRANJO POPULACIONAL E CARACTERÍSTICAS DO SOLO NA PRODUTIVIDADE E RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA**

**Resumo** - A determinação de uma taxa de semeadura adequada e a formação de um estande de plantas de soja são fatores essenciais para elevar a produtividade das lavouras. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a resposta espectral da cultura da soja sob as condições do solo, bem como em diferentes populações e densidades em estádios fenológicos variados. Foram avaliadas cinco diferentes populações de plantas de soja (162, 200, 250, 260 e 316 milhares de plantas por hectare) em um delineamento estatístico em faixas. Durante o estágio fenológico R5.1, foi observada uma correlação significativa entre a produtividade da soja e a resposta espectral, destacando a importância dessa análise nessa fase do ciclo da cultura. A densidade de semeadura influenciou a estrutura do aglomerado vegetal, resultando em uma redução na massa verde em configurações mais densas devido à competição intraespecífica. A cultivar de soja analisada manteve uma produtividade consistente em diferentes abordagens experimentais, sugerindo limitações econômicas nas taxas de semeadura mais elevadas. A análise precisa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (GNDVI) e a análise da resposta da cultura as propriedades físico-químicas do solo, com base nos dados coletados neste estudo permitirá aos produtores do cerrado brasileiro determinar o período ideal para prognósticos de produtividade, assim como uma melhor referência da cultura a ser manejada em determinadas características de solo. O índice de vegetação GNDVI no estágio fenológico R5.3 obteve forte correlação com a produtividade ao final da extensão do cultivo, bem como foi evidenciado que, pela metodologia estatística de Duncan a 5%, acrescer a população não elevou a produtividade da cultura da soja, demonstrando limitações econômicas desta prática. O trabalho impulsionará a agricultura de precisão, proporcionando maior assertividade na produção e avaliando os efeitos das variações nas taxas de semeadura.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, taxa de semeadura, agricultura de precisão, GNDVI

## **INFLUENCE OF POPULATION ARRANGEMENT AND SOIL CHARACTERISTICS ON SPECTRAL RESPONSE AND PRODUCTIVITY IN SOYBEAN CULTIVATION**

**Abstract** - Determining an appropriate seeding rate and establishing a soybean plant stand are essential factors for increasing crop productivity. The aim of this study was to evaluate the spectral response of soybean crops under varying soil conditions, as well as different populations and densities at various phenological stages. Five different soybean plant populations (162, 200, 250, 260, and 316 thousand plants per hectare) were assessed in a strip-plot statistical design. During the R5.1 phenological stage, a significant correlation was observed between soybean productivity and spectral response, emphasizing the importance of this analysis at this stage of the crop cycle. Seeding density influenced the plant cluster structure, resulting in a reduction in green mass in denser configurations due to intra-specific competition. The analyzed soybean cultivar maintained consistent productivity across different experimental approaches, suggesting economic limitations at higher seeding rates. Precise analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the crop's response to soil physicochemical properties, based on data collected in this study, will enable Brazilian cerrado producers to determine the optimal period for productivity forecasts, as well as better referencing the crop to be managed in specific soil characteristics. The GNDVI vegetation index at the phenological stage R5.3 showed a strong correlation with productivity at the end of the cultivation period. It was also evident, through the Duncan statistical methodology at 5%, that increasing the population did not elevate soybean crop productivity, highlighting economic limitations of this practice. The study will drive precision agriculture, providing greater accuracy in production and assessing the effects of variations in seeding rates.

**Keywords:** *Glycine max*, sowing rate, precision agriculture, GNDVI

## INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max.* L. Merrill) desempenha um papel fundamental no contexto agrícola brasileiro, contribuindo substancialmente para o superávit da balança comercial devido à sua produção e exportação em larga escala (Conab, 2023). Um dos fatores essenciais para otimizar a produtividade de grãos de soja é o arranjo populacional de plantas, que influencia na absorção de luz pelas folhas, no ângulo de inserção foliar e a disposição das folhas na planta (Sangoi et al., 2012). O manejo do arranjo pode ser realizado por meio do controle do espaçamento entre as fileiras de semeadura e pelo número de plantas por metro.

A cultura da soja é altamente adaptável em relação ao arranjo espacial de plantas, resultando em variações no número de ramificações, vagens, grãos por planta e no diâmetro do caule. Embora variações populacionais na faixa de 200 a 500 mil plantas por hectare geralmente não afetem a produtividade de grãos (Embrapa, 2011), essa afirmação requer investigação mais aprofundada, dada a considerável amplitude da variação populacional citada.

A semeadura de soja em taxa variável, utilizando princípios de agricultura de precisão e controladores eletrônicos em semeadoras, pode ser realizada atualmente no mercado, permitindo a variação da população de plantas com base em mapas de prescrição (Silva et al., 2020). As semeadoras têm a capacidade de ajustar a população variando o espaçamento entre as sementes nas fileiras (Li et al., 2016). No entanto, os parâmetros para determinar as taxas de semeadura de soja em um mesmo talhão segundo critérios de variabilidade espacial ainda carecem de objetividade.

Diferenças no arranjo populacional na cultura da soja podem resultar em competição intraespecífica por recursos como água, luz e nutrientes, afetando traços fenológicos e, em última instância, a produtividade (Silva et al., 2022). Em condições de alta demanda hídrica atmosférica ou baixa disponibilidade de água no solo, a planta aciona mecanismos de controle, como o fechamento estomatal, que podem prejudicar a atividade fotossintética e aumentar a temperatura das folhas (Bertolli et al., 2013).

O uso de técnicas de sensoriamento remoto, como câmeras térmicas, desempenha papel crucial na avaliação fenológica de culturas, estimando a produtividade, avaliando o estado nutricional, detectando pragas e doenças, prevendo condições meteorológicas e analisando a necessidade hídrica e o vigor das plantas em locais específicos (Shiratsuchi et al., 2014).

A maneira como as plantas de soja são representadas em imagens de satélite pode mudar dependendo de como as plantas estão organizadas umas em relação às outras. Isso acontece porque a disposição das plantas afeta o crescimento delas e, conseqüentemente, a forma como a luz é refletida e medida pelos sensores remotos.

Dentre os índices de vegetação espectrais, o NDVI (índice de diferença de vegetação normalizado) é amplamente conhecido e permite determinar parâmetros agronômicos, como o índice de área foliar, a porcentagem de cobertura verde, o teor de clorofila e a biomassa verde (Jensen, 2009). Maiores valores do índice de área foliar são observados em tratamentos com maior densidade de plantas de soja por hectare (Heiffig et al., 2006).

A utilização de sensores no mapeamento da Condutividade Elétrica Aparente do Solo (CEa) auxilia na coleta de dados relacionados aos fatores produtivos, especialmente a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) do solo, que pode variar devido à umidade, teor de argila e matéria orgânica (Molin e Tavares, 2019). O mapeamento da CEa do solo oferece vantagens, como agilidade e menor custo na obtenção de dados sobre a variabilidade espacial dos fatores produtivos (Mhango e Kanthu, 2022), bem como está correlacionada com o teor de nutrientes do solo (Farias et al., 2018).

Diferenças no arranjo populacional da soja podem resultar em competição intraespecífica por recursos como água, luz e nutrientes, afetando características fenológicas e, em última instância, a produtividade. Em condições de alta demanda hídrica atmosférica ou baixa disponibilidade de água no solo, a planta aciona mecanismos de controle, como o fechamento estomatal, que podem prejudicar a atividade fotossintética e aumentar a temperatura das folhas, além disso, o uso de sensores no mapeamento da Condutividade Elétrica Aparente do Solo (CEa) auxilia na coleta de dados relacionados a fatores produtivos, e pode eximir de maneira quantificada características físicas do solo que venham a auxiliar com maior previsibilidade os aspectos necessários e resultados possíveis da implantação da cultura da soja sob diferentes ambientes e solos.

Este experimento teve como objetivo a avaliação da resposta espectral da cultura de soja e da sua produtividade em função da relação do arranjo populacional e de teores dos elementos Potássio, Fósforo, Cálcio e Magnésio, bem como a condutividade elétrica aparente (Cea) no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental do Campus da UFMS em Chapadão do Sul/CPCS (18° 46' 44" Sul, 52° 36' 59" Oeste), na safra agrícola de 2022/2023. O clima da região, segundo Köppen é do tipo tropical úmido (Aw), com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O experimento foi implantado em um talhão de 2 ha. O solo da área experimental é classificado como latossolo vermelho argiloso. O campo experimental utilizado foi cultivado seguindo as práticas de preparo de solo convencional e os tratamentos fitossanitários realizados de acordo com a necessidade da cultura (Embrapa, 2011).

Antes da instalação do experimento, foi realizada uma amostragem de solo, na camada de 0-20 cm, para a determinação das características químicas do solo (Tabela 1).

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%	m%	Areia	Silte	Argila
CaCl <sub>2</sub>	-- mg dm <sup>-3</sup> --		----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----								-----%-----		
4,61	22,38	98,13	2,36	0,65	0,16	5,4	3,26	8,66	37,67	4,86	46,5	5	48,5

Tabela 1. Resultados médios das análises químicas e física do solo realizadas na área

Foram coletadas oito amostras pontuais de solo, sendo cada uma composta por oito subamostras coletadas num raio de 2,5 metros. Essas amostras foram usadas na elaboração de um mapa da área, que serviu como base para a criação de novos mapas posteriormente. Estes últimos foram desenvolvidos para avaliar parâmetros como produtividade e massa verde, sendo referenciados aos pontos mais próximos das amostras de solo para a quantificação e mensuração da correlação desses atributos. Foram elaborados mapas ilustrando a variabilidade espacial dos nutrientes pela metodologia de interpolação do inverso do quadrado da distância e utilizando-se o programa ArcGis 10.5. Foram avaliadas as variáveis: macronutrientes; V%; pH; e CTC.

O valor médio das variáveis provenientes das análises de solo serviu como base para interpretação e recomendação de adubação da cultura da soja (Sousa & Lobato, 2004). A aplicação de calcário ocorreu no mês de setembro, utilizando 1,2 toneladas ha<sup>-1</sup>, elevando a saturação por bases do solo a 50% (Sousa & Lobato, 2004). A adubação de plantio foi realizada com fertilizante formulado NPK (4-14-8), na dosagem 400 kg ha<sup>-1</sup>, via sulco pela semeadora. A adubação de cobertura foi realizada em área total com a utilização de Cloreto de Potássio (60% K) na dosagem de 100 kg ha<sup>-1</sup> no estágio fenológico V4 (Licht, 2014) das plantas de soja.

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foi mensurada anteriormente a implantação da cultura em campo, com o auxílio do equipamento Falker, modelo Terram (Figura 2). Um controlador eletrônico foi utilizado para gerenciar a emissão e recepção das cargas elétricas do disco, permitindo a medição da CEa. O valor medido foi associado às coordenadas do sistema global de navegação por satélite (GNSS) do modelo GA 38 da Garmin. O Falker foi tracionado em campo por uma caminhonete. As leituras foram registradas em pontos geolocalizados a cada segundo, enquanto o veículo percorria faixas com intervalos de 20 m sobre o talhão.



Figura 1. Implemento utilizado para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo

Quanto ao modelo experimental, a metodologia empregada foi o delineamento em faixas no talhão, implementando aleatoriedade nas populações estudadas sobre a variabilidade natural do solo na área de estudo. Cada faixa foi semeada com uma determinada população de plantas, sendo o plantio total no talhão conduzido considerando cinco populações de semeadura diferentes: 196, 230, 280, 310 e 364 mil sementes  $ha^{-1}$ , consecutivamente classificadas baseando-se no instrutivo da empresa detentora da cultivar de recomendação de população, como segue: - 30%, - 15%, população recomendada, + 15% e + 30%. Foram coletadas 24 amostras por tratamento, totalizando 120 pontos amostrais no experimento.

A semeadura na área experimental ocorreu em 26 de outubro de 2023, utilizando uma semeadora do modelo Pop do fabricante Jumil. Essa semeadora está equipada com

um sistema dosador de sementes por disco vertical e foi configurada para um espaçamento entre fileiras de semeadura de 0,50 m. A cultivar de soja escolhida para o plantio foi a DM 73I75, caracterizada por seu ciclo de crescimento de duração média, do grupo de maturação 7.3 e hábito de crescimento indeterminado, a qual constava em sua embalagem uma germinação mínima de 95% e vigor de 92%, e incluía tratamento industrial de semente para fungicidas.

A instalação em campo das diferentes populações nos diferentes tratamentos foi realizada por meio da alteração manual das engrenagens, tanto motoras quanto movidas, do mecanismo acionador do disco dosador vertical da semeadora. Portanto, ao alterar a rotação desse disco, altera-se o espaçamento entre sementes.

O estande de plantas foi avaliado 25 dias após a emergência (DAE), quando a cultura estava no estágio fenológico V5. A contagem das plantas foi realizada a cada 5 m em duas linhas centrais de cada faixa experimental. A população mensurada em cada amostra foi extrapolada para o hectare.

Seguindo as técnicas de agricultura de precisão, foi desenvolvida uma avaliação de massa de matéria verde dentre os tratamentos no dia 9 de janeiro de 2023, quando a soja se encontrava em estágio fenológico R4. Foram estabelecidos pontos de coletas amostrais em cada repetição, conferindo em sua totalidade 24 pontos amostrais por tratamento, equivalentes a 72 plantas de soja avaliadas nos mesmos.

A avaliação buscou mensurar massa verde (g) média da parte aérea das plantas referente a população em que se situava, respectivamente, com o auxílio de um GNSS Trimble modelo Nomad para a delimitação dos pontos amostrais a serem georreferenciados e de uma balança digital de mão do tipo gancho para aferir o peso da parte aérea das plantas em cada tratamento.

Os dados das condições climáticas foram monitorados durante o cultivo da cultura (Figura 1). Esses dados foram obtidos através da estação automatizada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), instalada em Chapadão do Sul-MS (18° 48' S e 52° 36' W).

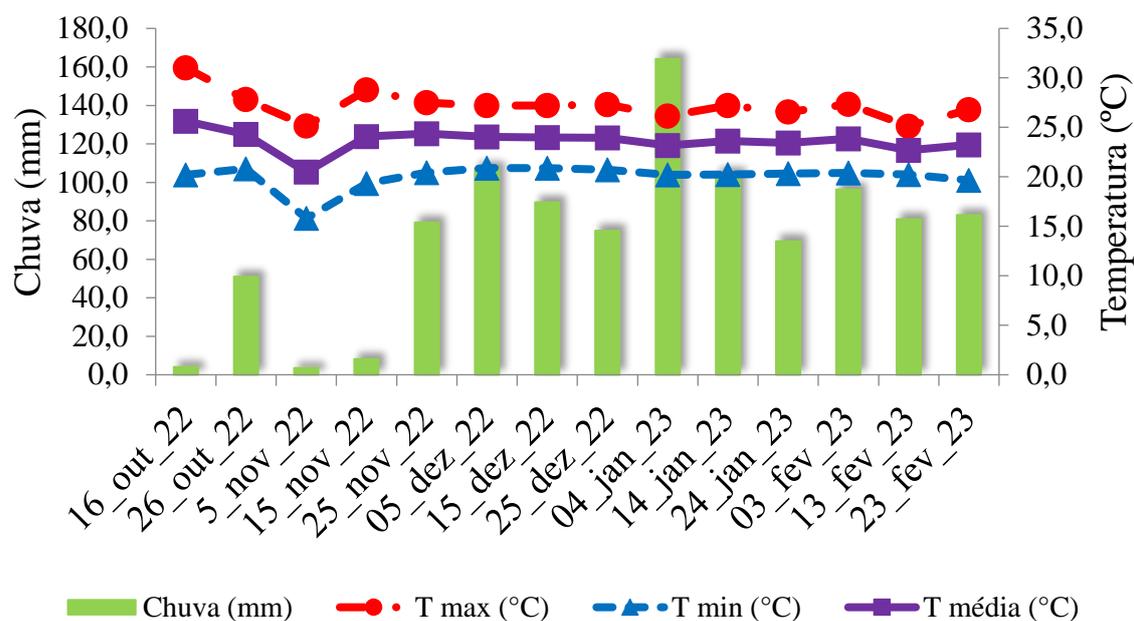


Figura 1. Precipitação (mm), temperatura (°C) máxima, mínima e média, a cada dez dias, durante a condução do experimento, na cidade de Chapadão do Sul-MS, na safra agrícola de 2022/23.

Foram avaliados os índices de vegetação na cultura da soja (IV) em 5 momentos fenológicos do ciclo (em V5, V8, R1, R5 e R7). Foi utilizada uma aeronave remotamente pilotada (ARP) de asa fixa senseFly eBee RTK com controle de voo autônomo. Este equipamento possui controle autônomo de decolagem, plano de voo e pouso. O eBee está equipado com o sensor multiespectral Parrot Sequoia. Foi utilizado um sensor Parrot Sequoia, uma câmera multiespectral para agricultura que usa um sensor de luz do sol e uma câmera RGB adicional de 16 MP para reconhecimento. A calibração radiométrica foi realizada para toda a área, com base no sensor de luminosidade embarcado na ARP e na superfície reflexiva calibrada fornecida pelo fabricante. A ortorretificação foi realizada pelo software Pix4D. Esse programa foi utilizado para corrigir os parâmetros de irradiação solar em relação ao sensor da câmera e do alvo de calibração da refletância.

Foram mensuradas as refletâncias de cada banda do espectro eletromagnético captada pelo sensor multiespectral. O sensor multiespectral apresenta um campo de visão horizontal (HFOV) de 61,9°, campo de visão vertical (VFOV) de 48,5° e campo de visão diagonal (DFOV) de 73,7°. Imagens de reflectância multiespectral foram obtidas para bandas espectrais do verde (550 nm ± 40 nm), vermelho (660 nm ± 40 nm), borda do

vermelho (735 nm  $\pm$  10 nm) e infravermelho próximo (790 nm  $\pm$  40 nm). As informações obtidas nesses comprimentos de onda permitem o cálculo dos mapas de índices de vegetação os quais foram utilizados nas relações entre população e produtividade.

Os IVs calculados foram: NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), NDRE (Índice de Diferença Normalizada Red Edge), GNDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde) e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo).

A colheita da cultura ao final do seu ciclo foi realizada de forma manual em 5 de março de 2023. Foram estabelecidas áreas amostrais (duas fileiras por 2 m) exatamente sobre os mesmos 120 pontos de coleta. Foram tomadas como referência as duas linhas centrais de cada faixa cultivada. Portanto, buscou-se mensurar a variabilidade espacial da produtividade nos diversos tratamentos contendo as diferentes populações de soja. Foi utilizada uma trilhadora de grãos do fabricante Abreu Máquinas Agrícolas, modelo TP SB 01 C.

A análise estatística foi conduzida ao combinar os dados obtidos durante o ciclo da cultura da soja em campo, com as informações de produtividade da colheita da soja. Foi utilizado o software estatístico RBio para produção das análises de variáveis canônicas e rede de correlação de Pearson. As variáveis também foram analisadas individualmente em cada tratamento, aplicando-se o teste de comparação de médias por Duncan a 5%.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Estande final de plantas**

A avaliação do estande de plantas no campo experimental apresentou variação de 161.660 a 316.600 plantas ha<sup>-1</sup>. Esta variação modificou os tratamentos, que apresentaram 82,48% e 86,98% das populações mínimas e máximas (196 e 364 mil sementes ha<sup>-1</sup>) recomendadas, respectivamente. O agrupamento das populações foi realizado de acordo com a semeadura planejada, gerando cinco classes de estandes para a área experimental. O estande indicado pela empresa detentora da cultivar foi de 280.000 plantas ha<sup>-1</sup>. A população variou negativamente em 15,25%, comparando-se ao recomendado pela empresa, apresentando população de 237.304 plantas ha<sup>-1</sup>. A variação de população de plantas pode ter ocorrido devido à qualidade, pureza e vigor das

sementes. Esses fatores, que por serem naturais, não possuem uma correlação exata com aquilo que previamente planeja-se.

Ainda sobre essa variação, provavelmente sofreu influência devido a ocorrências climáticas (Figura 1) não adequadas no período inicial do cultivo, como as altas temperaturas na primeira semana, superiores a 33°C e, principalmente, a baixa pluviosidade, como evidenciado na figura supracitada e que induz a hipótese de falhas germinativas no desenvolvimento das plântulas de soja, conseqüentemente formando um estande de plantas reduzido. Além disso, a variação negativa no estande médio derivou-se de uma correspondência desequilibrada da tabela indicativa da semeadora utilizada (erro da tabela do manual da máquina). Essa ocorrência promoveu variação das engrenagens as quais foram utilizadas para determinada quantidade de sementes por metro, as quais não se mostraram acuradas após a verificação de plântulas emergidas. Considerando-se experimentos em ambientes não controlados, é esperada certa variação na população de plantas.

#### **Avaliação de massa de matéria verde**

Pela avaliação da variabilidade da massa verde da cultura da soja em relação aos tratamentos de populações (Figura 3), constatou-se que o peso médio (g) das plantas foi inversamente proporcional ao seu adensamento, refletindo assim uma elevada massa nos tratamentos em que a taxa de semeadura foi menor, em comparação com aqueles tratamentos de maior adensamento de plantas por hectare.

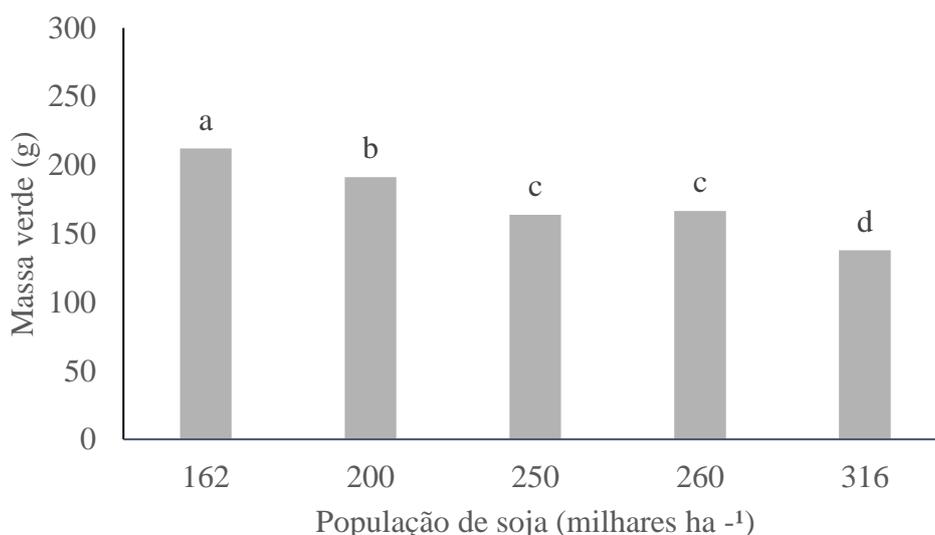


Figura 3. Teste de Duncan entre os diferentes tratamentos de população de soja e sua respectiva massa verde.

Portanto, identifica-se que o tratamento com uma população de 162 mil plantas ha<sup>-1</sup> constituiu-se de plantas com melhor qualidade, baseado na correlação entre seu peso de parte aérea e alguns cofatores como a maior absorção hídrica e maior concentração de nutrientes, que por fim resultaram em uma acrescida produtividade em comparação com outros tratamentos.

O teste de Duncan constatou diferenças significativas dos tratamentos quando relacionado a massa verde, propondo uma regressão desta medida conforme a crescente taxa de semeadura. A variação entre os tratamentos pode ter sido ocasionada pela competição intraespecífica a que as plantas estiveram submetidas de acordo com a população de seu tratamento, fazendo assim com que houvesse menor oferta de água e nutrientes para cada indivíduo quando em uma parcela com maior adensamento. Além de tais, notou-se a competição por luz pelas plantas para a produção de foto assimilados, o que modificou a arquitetura de alguns indivíduos fazendo com que se desenvolvessem de maneira estiolada, sem expressiva formação de massa verde (Heiffig, 2006).

### **Correlação entre resposta espectral e produtividade**

O índice de vegetação referente a resposta espectral que apresentou maior correlação com a produtividade do ensaio foi a que representa a vegetação de diferença normalizada verde (GNDVI). Esse IV (Figura 4A) possui uma faixa de classificação para vegetação entre 0,0 e 1,0, a qual possibilita a qualificação dos tratamentos de acordo com essa métrica.

O GNDVI apresentou durante a extensão do cultivo uma forte correlação com a produtividade, isto pode ser em função da área foliar, sanidade das plantas e coloração das mesmas serem fatores influentes na delimitação ou acréscimo de fatores produtivos dos vegetais.

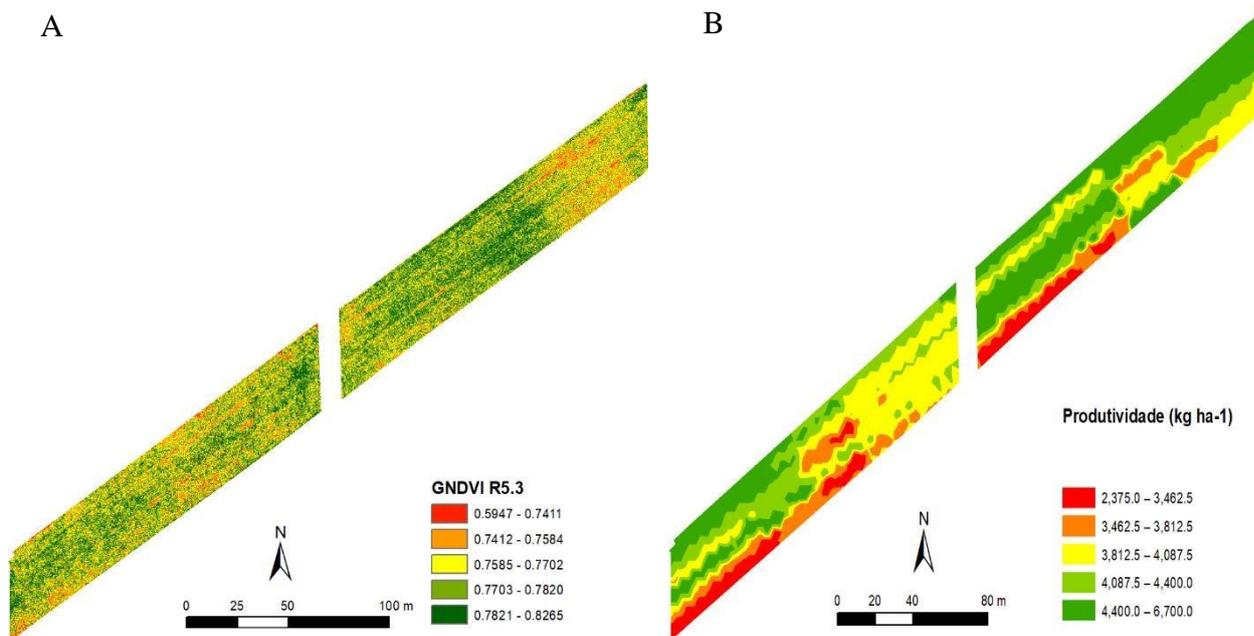


Figura 4. Correlação espacial entre a avaliação com a ferramenta GNDVI em R5.3 (88 DAE) (A) e Produtividade dos tratamentos (B).

Portanto, observou-se no estágio fenológico R5.3 da cultura instalada um bom estado geral da vegetação no campo experimental, no entanto, acompanhada de alternância na classificação GNDVI durante extensão do campo experimental. A maioria dos tratamentos qualificaram-se entre 0,7585 a 0,7820, com esta faixa sendo classificada como uma vegetação moderadamente sadia. Há uma diferenciação quantitativa do índice GNDVI ao final da primeira repetição do tratamento com população de 162 mil plantas  $ha^{-1}$ , o qual mostra-se entre 0,928 e 0,949 e que pode ser correlacionado com a produtividade também dissidente entre os tratamentos, alcançando os maiores parâmetros dentre o mapa. Tal fator, salienta a visualização de uma elevada produção em áreas com plantas menos adensadas, o que reduz a competição intraespecífica e resulta em uma melhor expressão das qualidades e pontualidades genéticas da variedade cultivada.

O uso de ferramentas para medir a resposta espectral na cultura da soja em diferentes estágios fenológicos é crucial para delimitar a população adequada, maximizando o potencial genético das plantas. A variação estratégica na taxa de semeadura revelou impactos no peso da parte aérea e na massa verde, especialmente em tratamentos menos densos.

Segundo a avaliação da Rede de Correlação de Pearson (Figura 5), foi possível posicionar a influência dos índices de vegetação mensurados em cada momento de voo

sobre a cultura e a quantificação da produtividade nos diferentes tratamentos. A utilização de GNDVI e NDRE no estágio fisiológico R5.3 da soja mostraram-se, respectivamente, os mais próximos da produtividade, portanto, maior correlação, seguidos dos índices SAVI em R7, SCCI em R1 e GNDVI em R7.

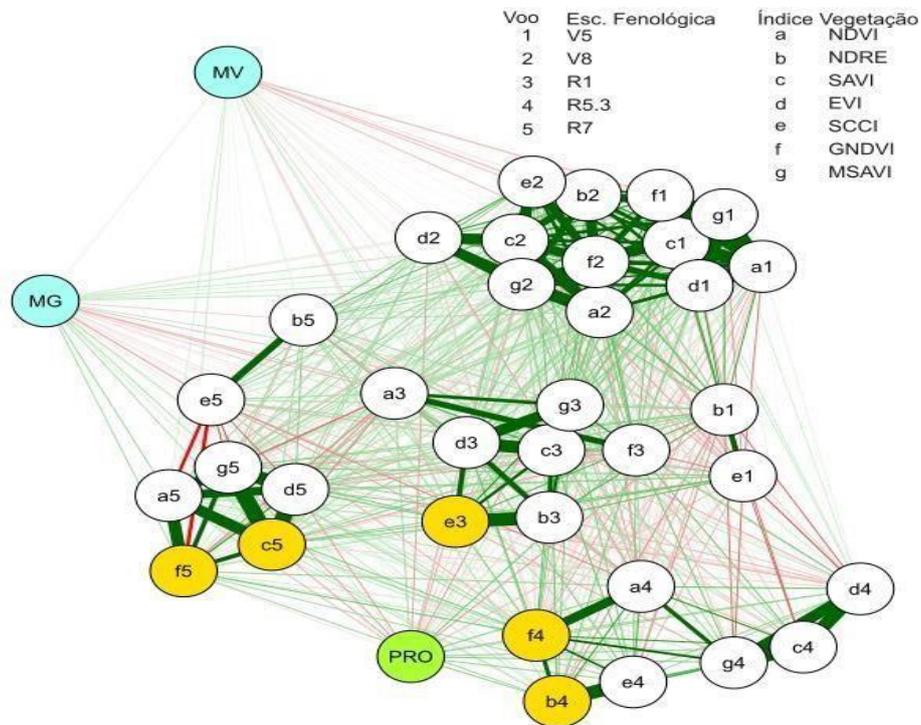


Figura 5. Rede de Correlação de Pearson, com interação das variáveis MV (massa verde), MG (massa de grãos) e PRO (produtividade) avaliando as diferentes cronologias sob diferentes taxas de semeadura, nos diversos estádios fenológicos.

Há a identificação de maiores correlações das avaliações de respostas espectrais com um estágio específico, o R5.3 (Figura 5). Durante este momento fisiológico em plantas de soja, as vagens já possuem de 26% a 50% de granação em um dos quatro últimos nós da haste principal, o que de certa forma induz o estabelecimento da produtividade que será gerada pelas plantas, o que torna a utilização de tais ferramentas nesse estágio fisiológico mais próximo possível da produção, sem que maiores alterações sejam possíveis devido a maturidade da planta.

### Correlação entre características do solo e a produtividade

A produtividade expressou uma correlação positiva com o elemento potássio; condutividade elétrica aparente; massa verde; massa de grãos, e uma correlação negativa com o elemento fósforo (Figura 6).

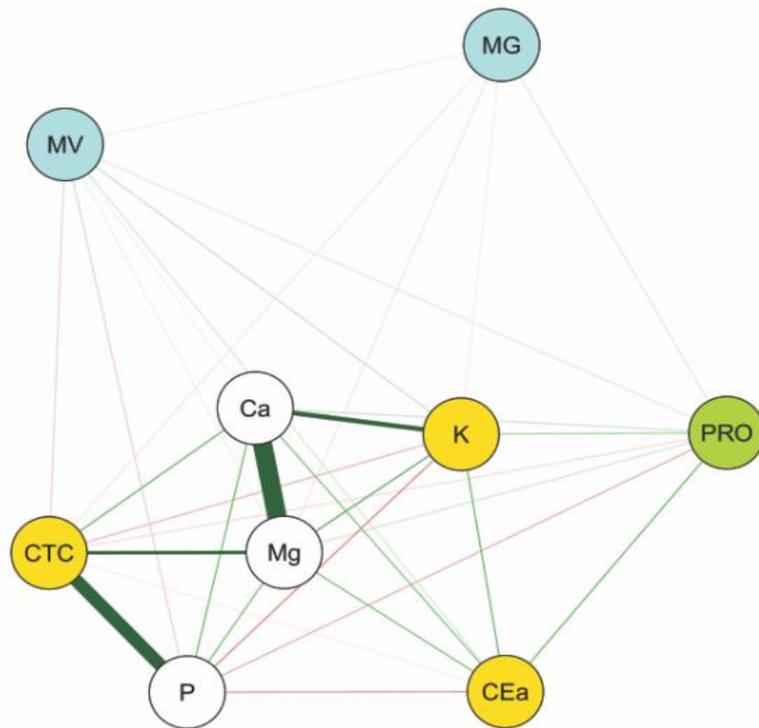


Figura 6. Rede de Correlação de Pearson, com a interação das variáveis PRO (produtividade), CEa (Condutividade elétrica aparente), K (Potássio), e CTC (Capacidade de troca catiônica).

Conforme o aumento da produtividade, a massa dos grãos apresentou relação inversa. Conforme o aumento da produtividade, segundo o mapa de produtividade (Figura 7), a CEa não apresenta relação significativa.

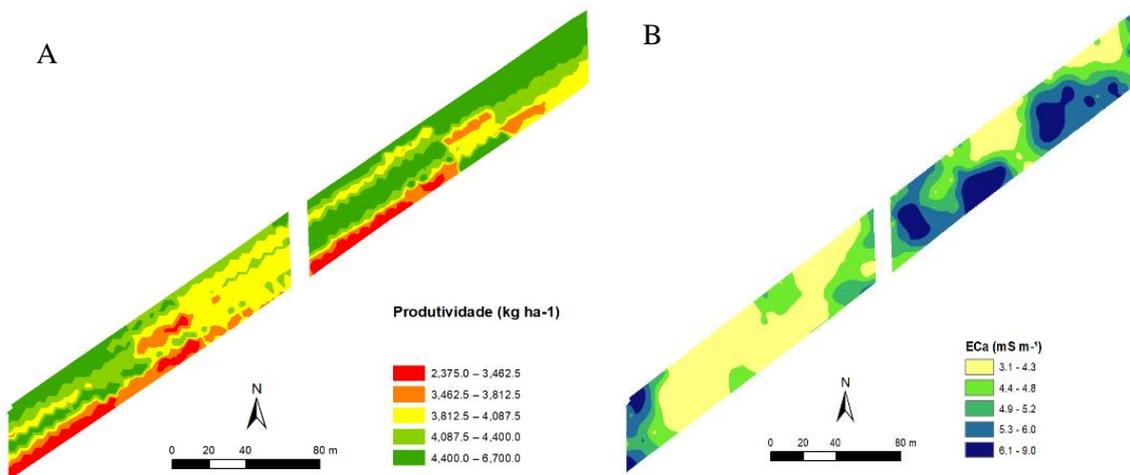


Figura 7. Correlação espacial entre a produtividade dos tratamentos (A) e condutividade elétrica aparente do solo (B).

Pelos resultados obtidos nesse experimento, foi verificado que o arranjo no estande de plantas nas diferentes taxas de semeadura sofre influência das propriedades químicas e físicas do solo, como a CTC e a condutividade elétrica aparente. Para se obter maior produtividade na área cultivada é importante mensurar essas variáveis para que o produtor tenha melhor eficiência no uso de sementes, adequando-se assim, o custo para a semeadura da cultura da soja. Portanto, recomendações de estandes de plantas devem ser específico para cada área de cultivo de acordo com os valores das variáveis representadas pela análise de solo.

### **Produtividade versus tratamento**

Não houve diferença significativa entre os tratamentos quando relacionados a produtividade (Figura 8), este fator pode estar relacionado a capacidade compensatória da cultura quando não adensada. Assim, como sua adaptabilidade em condições adensadas a partir de compensações fisiológicas e bioquímicas que induzem a planta a reorientação e equilíbrio de seus foto assimilados e demais componentes de acordo com sua capacidade produtiva (Agudamu e Shiraiwa, 2016)

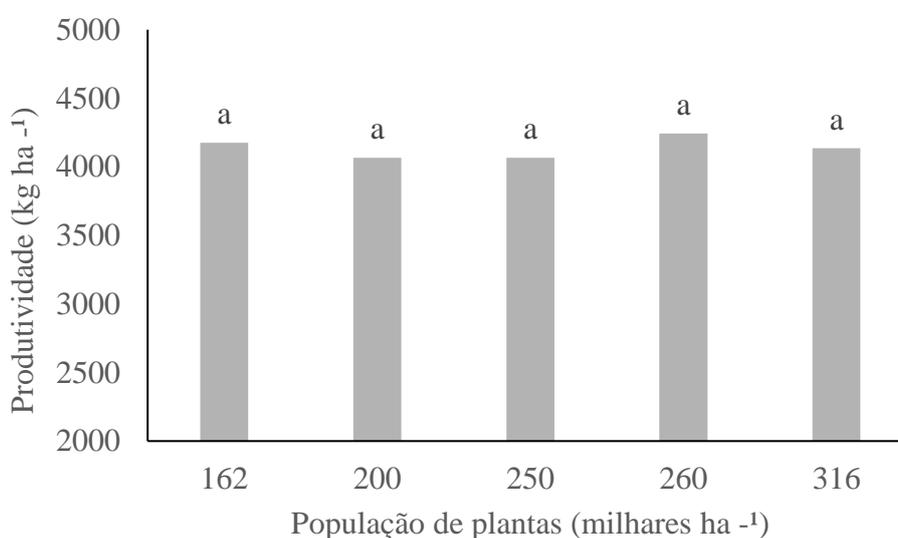


Figura 8. Diferentes tratamentos e sua respectiva produtividade.

Portanto, como houve variação de sementes entre os tratamentos, e não houve variação de produtividade, é possível reduzir custos de produção otimizando o investimento em sementes, sem perdas de lucratividade por redução de produção total na área.

Com base nos dados coletados, os produtores poderão definir a melhor estratégia ao optar por variadas taxas de semeadura para um ambiente ou solo específico, contribuindo significativamente para a agricultura de precisão ao indicar de forma quantificada seus resultados.

## **CONCLUSÕES**

O uso de ferramentas para medir a resposta espectral na cultura da soja em diferentes estádios fenológicos é crucial para delimitar a população adequada, maximizando o potencial genético das plantas. A produtividade correlacionou-se fortemente com a avaliação por GNDVI durante o estágio fenológico R5.3 (88 DAE), indicando a importância dessa ferramenta nesta janela cronológica.

Este estudo destaca a influência das propriedades físicas e químicas do solo na produtividade da soja, propondo um modelo de taxa de semeadura com base nessas avaliações. Em áreas com maior CTC, sugere-se menor estande de plantas, enquanto em áreas com menor CEa, o aumento do estande é recomendado. O arranjo espacial das plantas, determinado pela taxa de semeadura, é crucial para o desenvolvimento adequado da cultura, com menor massa verde em densidades mais altas devido à competição entre as plantas.

Observou-se o potencial de compensação da cultivar de soja utilizada, com pouca variação na produtividade entre os tratamentos, indicando uma clara limitação econômica ao crescer a taxa de semeadura desta cultivar, visto que tal ação não implica em maiores produtividades ao produtor, e conseqüentemente não viabiliza a operação.

## REFERÊNCIAS

AGUDAMU, T.Y., and T. SHIRAIWA. 2016. **Branch development responses to planting density and yield stability in soybean cultivars.** *Plant Prod. Sci.* **19**(3): 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1080/1343943X.2016.1157443>

AGURLA, S.; GAHIR, S.; MUNEMASA, S.; MURATA, Y.; RAGHAVENDRA, A. S. **Mechanism of stomatal closure in plants exposed to drought and cold stress.** In: IWAYA-INOUE, M.; SAKURAI, M., et al. (Ed.). *Survival strategies in extreme cold and desiccation: adaptation mechanisms and their applications.* Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 215-232. ISBN 978-981-13-1244-1.

BERTOLLI, S.C. et al. **Photosynthetic limitations caused by different rates of water-deficit induction in *Glycinemax* and *Vignaunguiculata*.** *Photosynthetica*, v.50, p.329-336, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11099-012-0036-4#page-1>>. Acesso em: 04 ago. 2013. doi: 10.1007/s11099-012-0036-4. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0036-4>.

BHERING, L.L. **Rbio: a tool for biometric and statistical analysis using the R platform.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v.17, n.2, p.187-190. DOI: 10.1007/978-981-13-1244-1\_12.

CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. **Boletim da safra de grãos, primeiro levantamento, safra 2023/2024.** Brasília, out. 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos>>

DE MANFREDA, S.; MCCABE, M. F.; MILLER, P. E.; LUCAS, R.; PAJUELO MADRIGAL, V.; MALLINIS, G.; BEN DOR, E.; HELMAN, D.; ESTES, L.; CIRAOLO, G.; MÜLLEROVÁ, J.; TAURO, F.; DE LIMA, M. I.; DE LIMA, J. L. M.P.; MALTESE, A.; FRANCES, F.; CAYLOR, K.; KOHV, M.; PERKS, M.; RUIZPÉREZ, G.; SU, Z.; VICO, G.; TOTH, B. **On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring.** *Remote Sensing*, v. 10, n. 4, p. 641, 2018. ISSN 2072-4292. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641> >. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040641>.

EITEL, J. U. H.; LONG, D. S.; GESSLER, P. E.; HUNT, E. R. **Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat.** *Agronomy Journal*, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, 2008. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0362>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tecnologias de Produção de Soja: Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 262p.

HEIFFIG, L.S.; CÂMARA, G.M.S.; MARQUES, L.A.; PEDROSO, D.B.; PIEDADE, S.M.S. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v.65, n.2, p.285-295, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000200010>.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LI, Y.; BINGXIN, Y.; YIMING, Y.; XIANTAO, H.; QUANWEI, L.; ZHIJIE, L.; XIAOWEI, Y.; TAO, C.; DONGXING, Z. Visão geral global do progresso da pesquisa e desenvolvimento de plantadores de milho de precisão. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.9, p.9-26, 2016. DOI: 10.3965/j.ijabe.20160901.2285.

MAHLEIN, A.K. Plant disease detection by imaging sensors - parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **APS Journals**, v.100, n.2, p.241-251, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340>.

MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. (2019). Sensor systems for mapping soil fertility attributes: challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v. 39(spe), p. 126–147. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep126-147/2019>.

MUNDSTOCK, C. M; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavoura da UFRGS: Evangraf, 2005.

MORLIN CARNEIRO, F.; ANGELI FURLANI, C. E.; ZERBATO, C.; CANDIDA DE MENEZES, P.; DA SILVA GÍRIO, L. A.; FREIRE DE OLIVEIRA, M. Comparison between vegetation indices for detecting spatial and temporal variabilities in soybean crop using canopy sensors. **Precision Agriculture**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 979–1007, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-019-097043>.

QUEBRAJO, L.; PEREZ-RUIZ, M.; PÉREZ-URRESTARAZU, L.; MARTÍNEZ, G.; EGEE, G. Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation

management of sugar beet. **Biosystems Engineering**, v. 165, p. 77-87, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.013>.

SANGOI, L.; SCHIMITT, A.; VIEIRA, J.; PICOLI JUNIOR, G. J.; SOUZA, C. A.; CASA, R. T.; SCHENATTO, D. E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C. M.; MACHADO, G. C.; HORN, D. Variabilidade na distribuição espacial de plantas na linha e rendimento de grãos de milho. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, v.11, n.3, p.268–277, 2013. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v11n3p268-277>