

CORRELAÇÃO DE DIFERENTES ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COM ÍNDICE DE CLOROFILA E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA

COLLA, Carlos Eduardo Kinalski¹
ROSA, Helton Aparecido²

RESUMO

O objetivo deste estudo foi correlacionar os índices de vegetação NDVI, VARI e NDRE, medidos por sensores do satélite Sentinel-2, com os níveis de clorofila A e B na cultura da soja em diferentes estádios de crescimento, a fim de avaliar sua relação com a produtividade final da cultura. O trabalho foi realizado no Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG), localizado em Cascavel-PR. Para a aquisição de dados a campo, os 21 pontos amostrais foram distribuídos em grid regular de 100x100 m na área experimental, onde em cada ponto foram coletadas de três plantas o nível de clorofila aos 83 dias após a semeadura (DAS). Para a produtividade, colheu-se 2 m² em cada ponto amostral, que posteriormente foram extrapolados para kg ha⁻¹. Para a geração dos mapas de produtividade e de índice de clorofila foi realizada interpolação pelo método de Krigagem Ordinária com o uso do complemento *Smart-Map* do software QGIS. Os resultados da correlação de Pearson foram obtidos a partir do software Minitab 17. Os dados do experimento revelaram forte correlação entre produtividade e níveis de clorofila A (0,94) e B (0,85) aos 83 DAS. Além disso, os índices vegetativos NDVI e VARI demonstraram correlações moderadas com clorofila A e B aos 91 DAS, com coeficientes de Pearson entre 0,52 e 0,66. O índice de clorofila e os índices de vegetação são eficazes para estimar a produtividade da soja, indicando sua utilidade no monitoramento e previsão da produção agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: NDVI; VARI, NDRE, Agricultura de precisão; Sensoriamento remoto.

CORRELATION OF DIFFERENT VEGETATION INDEXES WITH CHLOROPHYLL INDEX AND SOYBEAN CROP PRODUCTIVITY

ABSTRACT

The objective of this study was to correlate the vegetation indices NDVI, VARI and NDRE, measured by sensors from the Sentinel-2 satellite, with the levels of chlorophyll A and B in soybean crops at different growth stages, in order to evaluate their relationship with the final productivity of the crop. The work was carried out at the University Center of the Assis Gurgacz Foundation (FAG), located in Cascavel-PR. For field data acquisition, the 21 sampling points were distributed in a regular grid of 100x100 m in the experimental area, where at each point the chlorophyll level was collected from three plants at 83 days after sowing (DAS). For productivity, 2 m² were collected at each sampling point, which were later extrapolated to kg ha⁻¹. To generate the productivity and chlorophyll index maps, interpolation was performed by the Ordinary Kriging method using the Smart-Map add-on of the QGIS software. The Pearson correlation results were obtained from Minitab 17 software. The experiment data revealed a strong correlation between productivity and chlorophyll A (0.94) and B (0.85) levels at 83 DAS. In addition, the vegetative indices NDVI and VARI demonstrated moderate correlations with chlorophyll A and B at 91 DAS, with Pearson coefficients between 0.52 and 0.66. The chlorophyll index and vegetation indices are effective for estimating soybean productivity, indicating their usefulness in monitoring and forecasting agricultural production.

KEYWORDS: NDVI; VARI, NDRE, Precision agriculture; Remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão é essencial para a eficiência da agricultura, e o sensoriamento remoto desempenha um papel central nesse processo. Ele oferece uma análise detalhada das condições das

¹Engenheiro Agrônomo, Egresso do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, Paraná.
carlos.kinalski.colla@hotmail.com

²Engenheiro Agrícola, Docente do Curso de Agronomia, Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, Paraná.
helton@fag.edu.br

culturas e do solo, permitindo uma gestão mais precisa e informada. Com essas informações, é possível otimizar a produtividade, reduzir custos e aplicar insumos agrícolas de maneira mais eficiente, minimizando desperdícios e excessos.

A agricultura de precisão busca alcançar altos níveis de produção por meio de ferramentas sofisticadas que proporcionam grande exatidão nas análises a campo, abrangendo desde parâmetros vegetativos até análises espectro-temporais (MONTEIRO, 2021). O sensoriamento remoto é uma técnica fundamental nesse contexto, permitindo a coleta de dados e informações sem contato direto com o objeto. Utilizando sensores orbitais ou não orbitais, ele capta a radiação refletida em diferentes comprimentos de onda e gera mapas detalhados, possibilitando análises precisas das condições a campo e o monitoramento da área ao longo dos anos (LIU, 2007; SANTOS; LIMA, 2018).

Uma das formas de se utilizar o sensoriamento remoto é calculando índices de vegetação, que são medidas quantitativas derivadas de imagens de satélite, por exemplo, e ajudam a avaliar a saúde e a densidade vegetativa. Eles são calculados usando combinações específicas de bandas espectrais, como a luz visível e o infravermelho próximo, para realçar as diferenças na vegetação e fornecer informações sobre o seu estado e desenvolvimento (HUNT; WILLIAMS, 2019).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é definido por ser um índice que quantifica o volume foliar de uma determinada vegetação, sendo assim, caracterizando-a em um determinado período de tempo (ZANZARINI *et al.*, 2013). Os resultados obtidos a partir do NDVI, podem variar entre -1 e 1, onde valores mais próximos de 1 indicam que em determinado ponto a planta está com alta densidade vegetativa o que influí aspectos positivos para o desenvolvimento da cultura, já valores aproximados de -1 indicam deterioração da massa vegetal. (BRAZ; AGUAS; GARCIA, 2015).

O VARI (*Visible atmospheric resistance index*), é considerado um índice de vegetação minimamente sensível a atmosfera, tendo por objetivo a medição quão verde é a área de estudo. Diferentemente dos índices NDRE e NDVI, o VARI apresenta em sua composição apenas comprimento de onda na área do visível, sendo assim ausente comprimentos da banda infravermelho e Red Edge (SCHENEIDER, 2008).

Índice utilizado durante muitos anos de pesquisa denominado NDRE (*Normalized Diferrence Red Edge*) utiliza banda de bordas vermelhas (RE) e banda de infravermelho próximo (NIR) para definir a densidade e condições da vegetação (RITCHIE, 2010).

Com a modernização dos sensores e a maior aplicabilidade da radiometria espectral, a precisão vem cada vez mais aumentando. E com o auxílio de softwares que corrigem e processam imagens a obtenção de dados referentes a cada material refletido é intensificada, distinguindo os comprimentos de onda seja de área vegetal ou solo (PADOLFI; RAMALDES; SANTOS, 2018). Uma vez que estas

informações são obtidas, a associação de dados acaba se correlacionando com características fisiológicas das culturas (BRANDÃO *et al.*, 2008).

A clorofila A tem grande importância no processo de desenvolvimento da cultura, sendo responsável por grande parte dos processos fotossintéticos das plantas, em principal realizando a produção de diversas substâncias orgânicas que impactam diretamente na qualidade da formação de grãos e qualidade vegetativa. Completando parte do processo a clorofila B tem por objetivo refinar os mecanismos oriundos da clorofila A, sendo que são menos presentes em relação a clorofila A, podendo assim ser considerada como uma clorofila acessório (STREIT *et al.*, 2005).

A cultura da soja é de grande importância, sendo uma das principais commodities de exportação do Brasil, na safra 2021/22 houve um crescimento de 4,4% da área de soja cultivada em relação à safra anterior (CONAB, 2022). Na safra 2021/22, o Brasil produziu 123,8 milhões de toneladas de soja, com médias produtivas de 3.026 kg ha^{-1} , somente no estado do Paraná, foram 19,9 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Sendo uma das mais importantes culturas para a economia, e com o aumento de exportação, existe necessidade de elevar as produtividades, e uma das maneiras para isso é a utilização de agricultura de precisão, utilizando os insumos de forma mais racional e assertiva.

O objetivo deste estudo foi correlacionar os índices de vegetação NDVI, VARI e NDRE, medidos por sensores do satélite Sentinel-2, com os níveis de clorofila A e B na cultura da soja em diferentes estádios de crescimento, a fim de avaliar sua relação com a produtividade final da cultura.

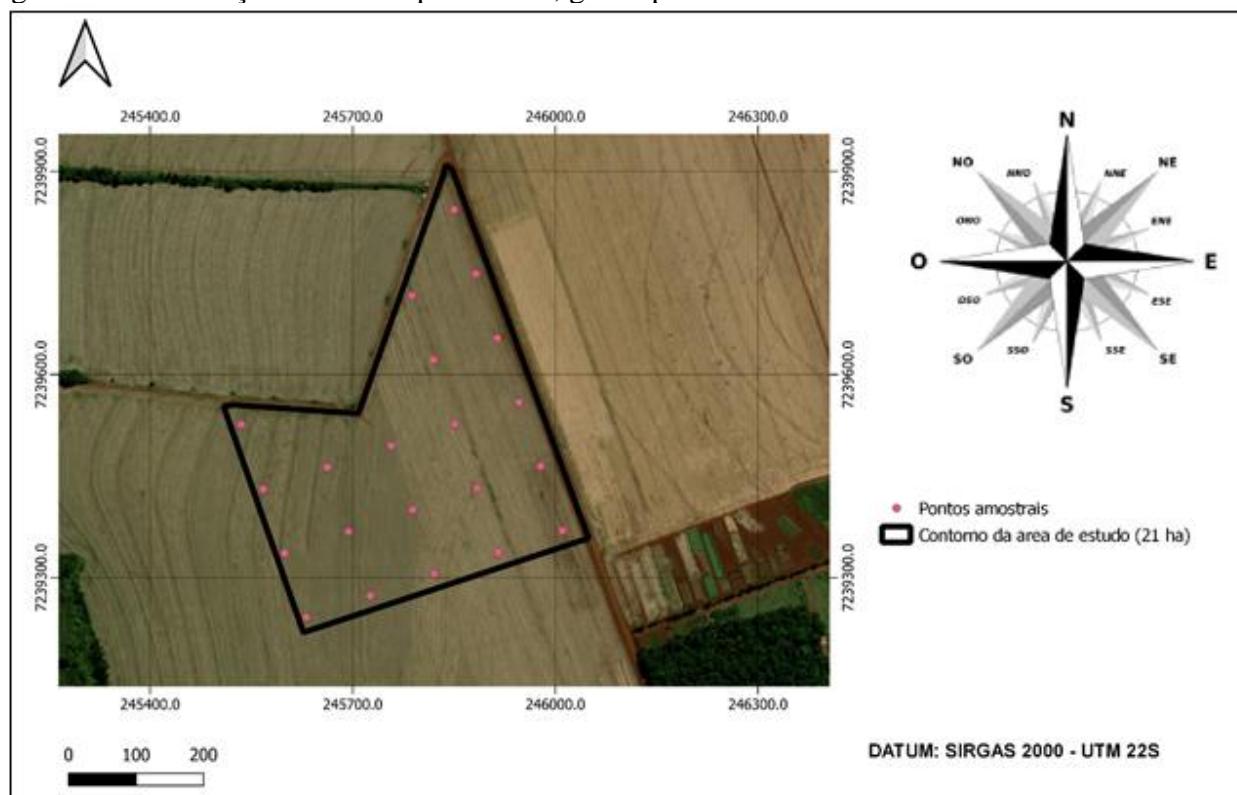
2. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido na safra agrícola 2021/2022 em uma área experimental de 21 hectares, localizada no Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, na cidade de Cascavel, região oeste do estado do Paraná. A área de estudo está localizada nas coordenadas geográficas $24^{\circ}56'20.2''\text{S}$ e $53^{\circ}31'02.7''\text{W}$, com a altitude de 700 m. A cultivar presente na área de estudo foi Bramax Zeus IPRO® que possui ciclo de maturação precoce e boa resistência ao acamamento de plantas, a data em que foi realizada a semeadura foi 26/10/2021, a coleta de clorofila ocorreu 17/01/2022 e a colheita realizada em 01/03/2022.

O solo da região de estudo é classificado como Latossolo vermelho distroférrico típico, de textura argilosa (BHERING, 2007), o clima da região experimental é classificado como Cfa segundo a classificação Köppen-Geiger com média de temperatura de 13°C a 15°C (EMBRAPA, 2012).

A área foi delimitada e marcada com base em um grid regular de 100x100 m para a geração dos pontos experimentais (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área experimental, grid e pontos amostrais.



Para a aquisição de dados, foram utilizadas imagens do sensor MSI, localizado no satélite Sentinel-2, que foram disponibilizadas gratuitamente na plataforma "Sentinel Hub". As cenas baixadas são derivadas do produto L2A, uma vez que passam por correções atmosféricas. O sensor orbital presente no satélite Sentinel-2 fornece dados com alta resolução de imagem, em 13 bandas espectrais (Tabela 1), com resolução temporal de 5 dias.

Tabela 1 - Bandas espectrais do sensor MSI, presente no satélite Sentinel-2.

Resolução	Nº da banda	Nome da banda	Comprimento de onda (nm)
10 m	B02	Azul (B)	490
	B03	Verde (G)	560
	B04	Vermelho (R)	665
	B08	Infravermelho Próximo (NIR)	
20 m	B05	Red Edge 1	705
	B06	Red Edge 2	740
	B07	Red Edge 3	783
	B08A	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B01	Aerossol	443
	B09	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

Fonte: Adaptado de Engesat (2021).

Para o processamento de imagem e aplicação dos índices vegetativos foi utilizado o *software* QGIS Standalone 3.16®, onde foi aplicado os índices NDVI (Equação 1), VARI (Equação 2) e NDRE (Equação 3).

$$NDVI = \frac{B08(Nir) - B04(Red)}{B08(Nir) + B04(Red)} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

NDVI = Índice de vegetação por diferença normalizada.

Nir = Refletância na banda do infravermelho próximo (Nm).

Red = Refletância na banda do vermelho (Nm).

$$VARI = \frac{B03(G) - B04(R)}{B03(G) + B04(R) - B02(B)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

VARI = Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível.

R = Refletância na banda do vermelho (Nm).

G = Refletância na banda do verde (Nm).

B = Refletância na banda do azul (Nm).

$$NDRE = \frac{B08(Nir) - B05(ReRededge)}{B08(Nir) + B05(ReRededge)} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

NDRE = Índice de borda vermelha de diferença normalizada.

Nir (B08) = Refletância na banda do infravermelho próximo (Nm).

ReRededge (B05) = Refletância na banda de borda vermelha (Nm).

Com o auxílio do complemento de agricultura de precisão: *Smart-Map* do software QGIS®, foram gerados os mapas de produtividade pelo método de interpolação de dados por Krigagem ordinária. Para fins de uniformização e correlação dos dados na área experimental, foi utilizado um buffer de 30 metros em cada ponto amostral.

Todas as análises foram realizadas entre o ciclo da cultura da soja sendo coletados os dados dos IV's em 36, 66, 91 e 111 DAS, a coleta de clorofila ocorreu 83 DAS, a colheita foi realizada 126 DAS.

Para a aquisição de dados a campo, os níveis de clorofila foram obtidos com um clorofilômetro ClorofiLOG Falker, fornecendo os resultados instantaneamente, sendo adquirido dados de três plantas por ponto amostral.

A coleta de dados produtivos após o fim do ciclo cultural foi realizada manualmente com dois metros quadrados por ponto amostral, onde dentro do talhão estudado, cada ponto foi posicionado numa grade 100x100 metros. Os grãos obtidos da coleta foram debulhados manualmente e em seguida pesados, e dispostos à análise de umidade, sendo corrigidos a 13% de umidade (BRASIL, 2009), obtendo assim o peso de grãos, a fim de corrigir de para quilogramas por hectare (Kg ha⁻¹).

Após a coleta e processamentos dos dados, os mesmos foram dispostos ao teste de normalidade de Shapiro-wilk, que para haver normalidade na distribuição dos dados, o valor *p* deve obrigatoriamente ser maior que 0,05 (MIOT, 2017).

Com os dados de produtividade, foi feita a análise estatística descritiva. Para o coeficiente de variação foram avaliados de acordo com a classificação: baixo (< 10%); médio (entre 10 e 20%); alto (entre 20 e 30%) e muito alto (> 30%) (GOMES, 2009).

Uma vez que os dados apresentam normalidade, foi utilizado para a análise de correlação, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 4), estruturando uma medida onde se associa a força do grau de relacionamento entre duas variáveis (GARSON, 2009).

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (\text{Equação 4})$$

Os dados do coeficiente de correlação de Pearson foram obtidos com auxílio do software Minitab®, onde realizou-se o teste de significância a 5% de probabilidade.

Para fins de avaliação em relação a correlação, foi utilizado a classificação em que *r* tem possibilidade de ser avaliado qualitativamente, avaliação esta proposta por Callegari-Jacques (2003), onde é determinado a partir dos seguintes intervalos: $0,9 \leq |r| \leq 1,0$, representa uma correlação muito forte; $0,7 \leq |r| < 0,9$, representa uma correlação forte; $0,4 \leq |r| < 0,7$, representa em uma correlação

moderada, $0,2 \leq |r| < 0,4$, representa uma correlação fraca e $0,0 \leq |r| < 0,2$ representa uma correlação muito fraca.

Para realizar a krigagem com o complemento *Smart-Map* utilizou-se os seguintes modelos matemáticos definidos a partir da validação cruzada (Tabela 2).

Para medir e classificar o grau de dependência espacial, foi utilizado o índice proposto por Cambardella *et al.* (1994), na qual é definida pela seguinte equação:

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

C_0 = Efeito Pepita

$C_0 + C_1$ = Patamar

Os valores são assumidos entre 0 e 1, onde que o IDE menor que 0,25 significa dependência espacial forte, valores do intervalo entre 0,25 e 0,75 indica dependência espacial moderada, e valores acima de 0,75 caracteriza dependência espacial fraca (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

3. ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Ao realizar a estatística descritiva, obteve-se os dados referentes aos índices de vegetação em relação às diferentes cenas fornecidas pelo Sentinel-2 (Tabela 2).

Ao observar os dados obtidos nota-se que o coeficiente de variação é menor em relação ao NDVI, segundo a literatura para dados obtidos menores que 10% indicam que há baixo valor do coeficiente de variação relacionando os IV's e os demais dados, sendo assim todos os resultados nas datas de NDVI e NDRE (36 DAS e 66 DAS) constou baixa variação dos dados, para valores expressos entre 10-20% indica média variação dos dados como é observado no índice NDRE nas datas 91 e 111 DAS, dados superiores a 30% são definidos por ter variação muito alta sendo apresentados nas demais datas observadas.

Analizando os mapas de NDVI (Figura 2), pode-se observar que 66 DAS apresentou as maiores médias registradas na maior parte do talhão de estudo, aonde a faixa foi de 0,68 - 0,81, motivo este ligado à cultura da soja estar no período crítico de desenvolvimento de massa verde, já que as plantas estão com alta taxa fotossintética e alto formação da densidade foliar, obtendo assim maiores valores.

Tabela 2 – Estatística descritiva entre os IV's em diferentes cenas do Sentinel-2.

IV's NDRE	Estatística Descritiva				
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Médio	Desvio Padrão	CV (%)
36 DAS	0,46	0,18	0,37	0,036	10
66 DAS	0,25	0,61	0,55	0,046	8
91 DAS	0,11	0,34	0,28	0,034	12
111 DAS	0,09	0,33	0,23	0,029	12
NDVI					
36 DAS	0,27	0,69	0,53	0,052	9
66 DAS	0,38	0,82	0,71	0,049	6
91 DAS	0,19	0,49	0,42	0,042	10
111 DAS	0,16	0,52	0,38	0,041	10
VARI					
36 DAS	-0,33	0,08	-0,09	0,051	---
66 DAS	-0,27	0,36	0,14	0,079	58
91 DAS	-0,15	0,15	0,07	0,040	57
111 DAS	-0,16	0,13	0,05	0,039	82

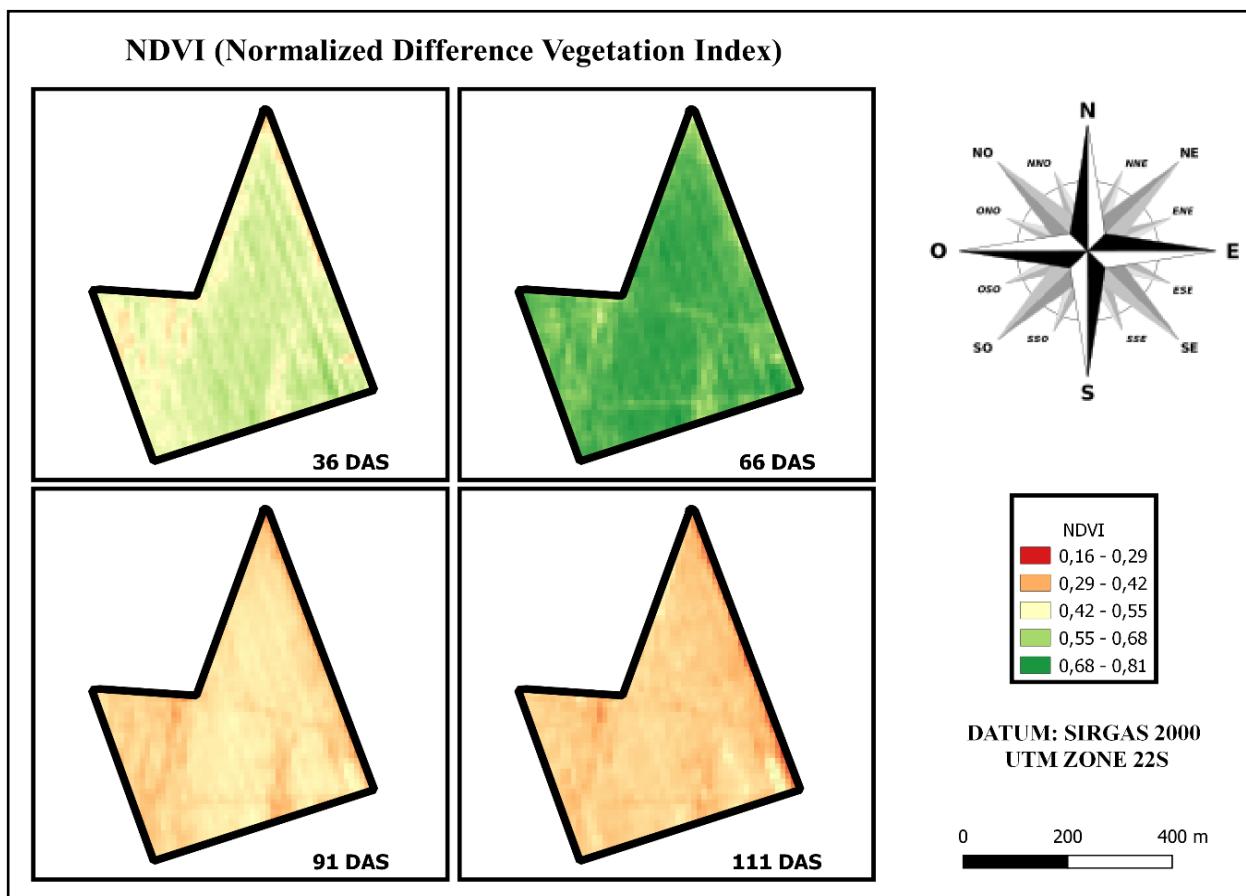
DAS = Dias após a semeadura. CV = Coeficiente de variação. IV's = Índices de vegetação.

Importante salientar que, o índice NDVI, é regido por um intervalo de 1 a -1, uma vez que 66 DAS apresentou a faixa mais aproximada de 1, infere diretamente em que, na quantia apresentada de massa verde há bons indicativos de densidade foliar ao se referir a cultura da soja (BRAZ; AGUAS; GARCIA, 2015).

O registro obtido aos 36 DAS, mostra que em grande parte da extensão do talhão a faixa média obtida foi entre os intervalos de 0,42 – 0,55, o intervalo médio registrado indica que a cultura estava no processo inicial de desenvolvimento, não apresentando altos valores, pois não há grande densidade de massa verde ainda.

As demais datas, 91 DAS e 111 DAS, apresentaram os menores valores entre os intervalos, sendo que estes se mantiveram na faixa de 0,29 – 0,42, e pode ser explicado pelo motivo de que a cultura estava no processo de maturação fisiológica, com folhas apresentando amarelecimento e em alguns casos ocorrendo a queda das mesmas oriundo à seca no fim do ciclo.

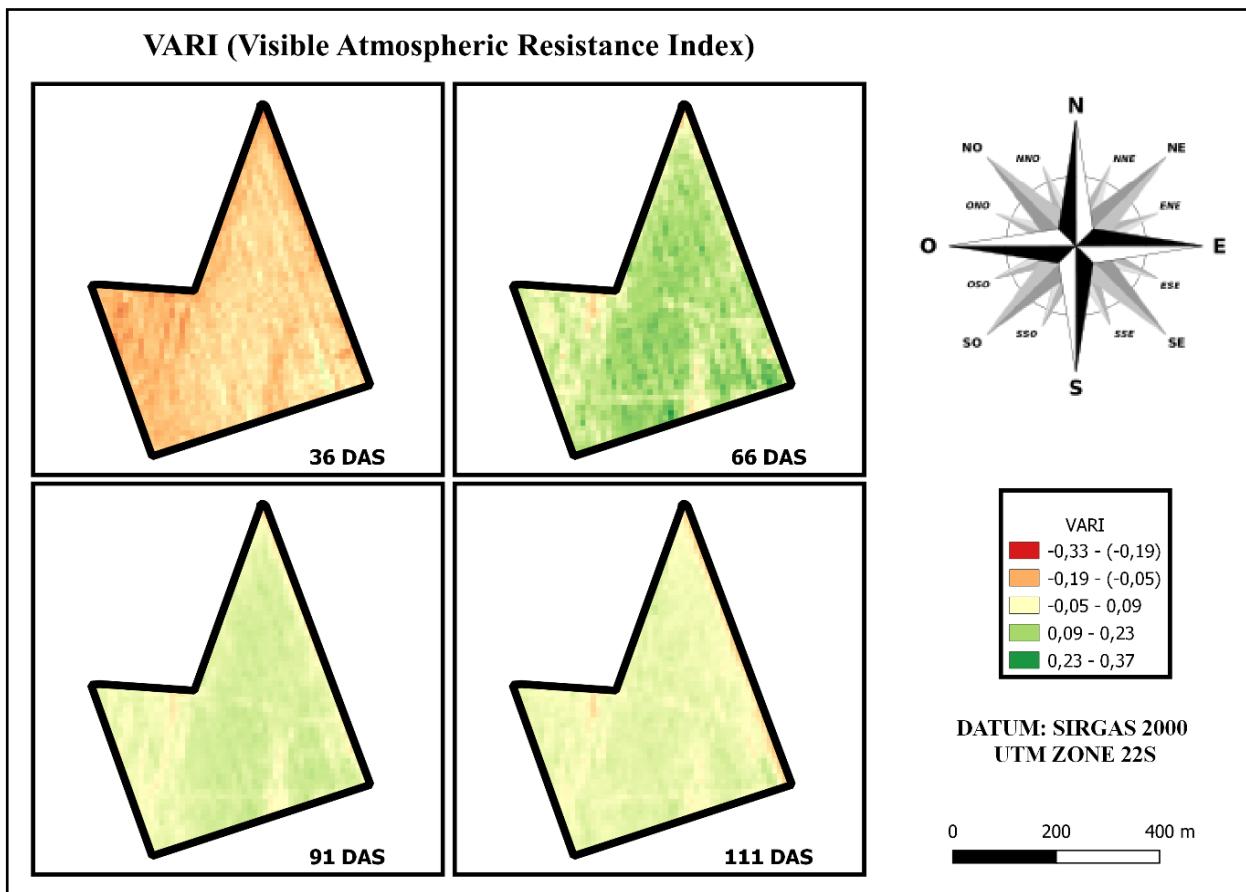
Figura 2 – Mapas do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).



Ao observar os mapas de VARI (Figura 3), é notável que 66 DAS foi a data que obteve as maiores médias, sendo a maior extensão presente no intervalo de 0,09 – 0,23, estas médias são explicadas pelo motivo de que a cultura está demonstrando alto nível de pigmentação sendo que a mesma está no período crítico vegetativo para reprodutivo (V8 – R3) , onde há a formação de vagens e influencia no começo do enchimento de grãos, assim de grande importância para o desenvolvimento apresentando folhas bem pigmentadas em grande atividade fotossintética.

Para 91 e 111 DAS, o intervalo médio para maior parte do mapa foi entre -0,05 – 0,09, nestas datas é possível observar a redução dos intervalos comparados com 66 DAS, pois a cultura estava no processo de maturação, demonstrando redução no volume de pigmentação verde a ocorrendo o amarelecimento das folhas. A data que obteve as menores médias foi de 36 DAS, onde a maioria estavam dispostos na faixa de -0,19 – (-0,05), por se tratar do início do ciclo cultural, com plantas recém emergindo, as menores médias foram registradas, pois não havia grande pigmentação e baixo volume verde por parte das plantas. Baixos valores do índice VARI, podem ser utilizados para identificar que a cultura pode estar passando por algum estresse, seja hídrico ou nutricional, sendo que o índice VARI tem grande relação ao nível de pigmentação da cultura, podendo ser assim um indicativo de redução de clorofila (VINA, 2004).

Figura 3 – Mapas do *Visible atmospheric resistance index* (VARI).

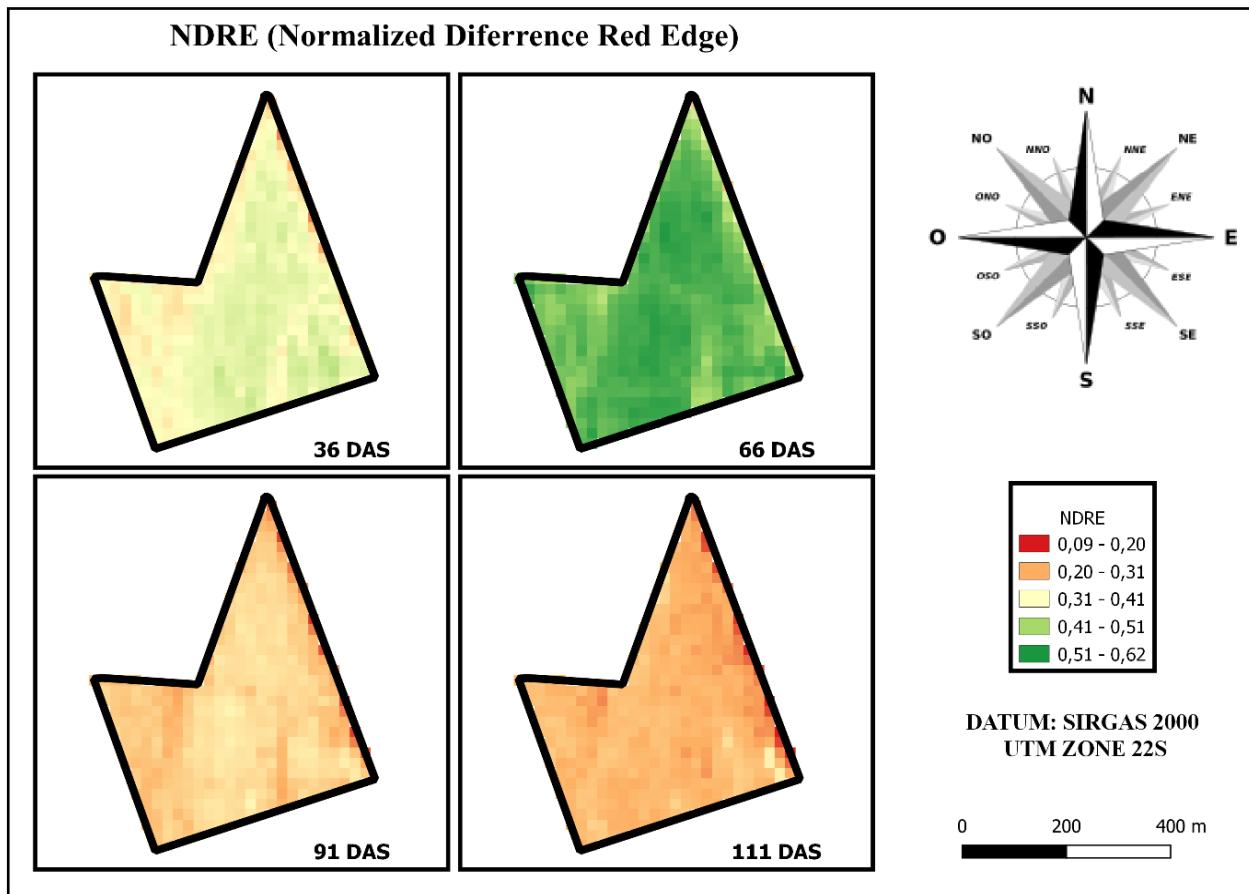


Os mapas gerados a partir do NDRE (Figura 4) demonstraram que em 66 DAS, obteve-se as maiores médias na extensão, sendo grande parte da área estando entre os intervalos de 0,51 – 0,62, observando assim que, o estado da cultura a campo influí condições positivas a mesma, sendo um período em que a densidade da vegetação é alta e bem fechada.

Em 36 DAS os valores obtidos foram registrados entre o intervalo de 0,31 – 0,41 notando que, por estar no período de desenvolvimento inicial da cultura logo após a germinação das plantas, são valores que representam média densidade de vegetação, apontando pontos em que não há total cobertura da área até o momento observado. As menores médias obtidas foram nos períodos de 91 e 111 DAS, onde a maior extensão do talhão obteve dados na faixa de 0,20 – 0,31, o fato ocorrido é devido a senescência das folhas devido a maturação fisiológica da cultura. É perceptível através da Figura 4, que houve um processo de degradação da densidade de vegetação da data de 91 DAS à 111 DAS e assim sucessivamente até o término do ciclo cultural.

Como o NDRE é gerado a partir de cenas de banda Red Edge e estas possuem a resolução de 20 m diferentemente do NDVI e VARI (ambos 10 m), automaticamente os mapas gerados reduzem a precisão apresentando pixels maiores.

Figura 4 – Mapas do *Normalized Diference Red Edge* (NDRE).



O índice NDRE indica condições da densidade da vegetação, uma vez que baixos níveis no período crítico de desenvolvimento da cultura podem indicar uma possível degradação foliar da cultura, consequentemente podendo levar a problemas produtivos (RITCHIE, 2010).

A tabela 3 mostra os modelos matemáticos e respectivos dados referentes a Krigagem ordinária realizada para a geração dos mapas.

Tabela 3 – Modelos e distâncias utilizados para a Krigagem ordinária no *Smart-Map*.

Mapas	Modelo	Co	C	Co + C	Alcance	IDE
Produtividade	Exponencial	26442,65	35256,92	61699,57	640,31	0,57
Clorofila A	Gaussiano	1,11	2,129	3,239	284,19	0,65
Clorofila B	Gaussiano	0,065	0,796	0,861	284,19	0,92

C0 = efeito pepita; (C1+C0) = patamar; IDE = Índice de dependência espacial.

É observado que segundo a classificação de Cambardella *et al.* (1994), os mapas de produtividade e índice de clorofila A apresentaram uma dependência espacial moderada, já o mapa de índice de clorofila B mostrou ter uma dependência espacial fraca.

Observando o mapa de produtividade (Figura 5), é notável que os dados obtidos demonstram baixa dispersão nos dados, uma vez que o coeficiente de variação foi igual a 10%. A produtividade observada na área experimental foi de 1206,86 a 1947,89 kg ha⁻¹, sendo que na maior parte do talhão, teve valores no intervalo de 1503,27 – 1651,47 kg ha⁻¹.

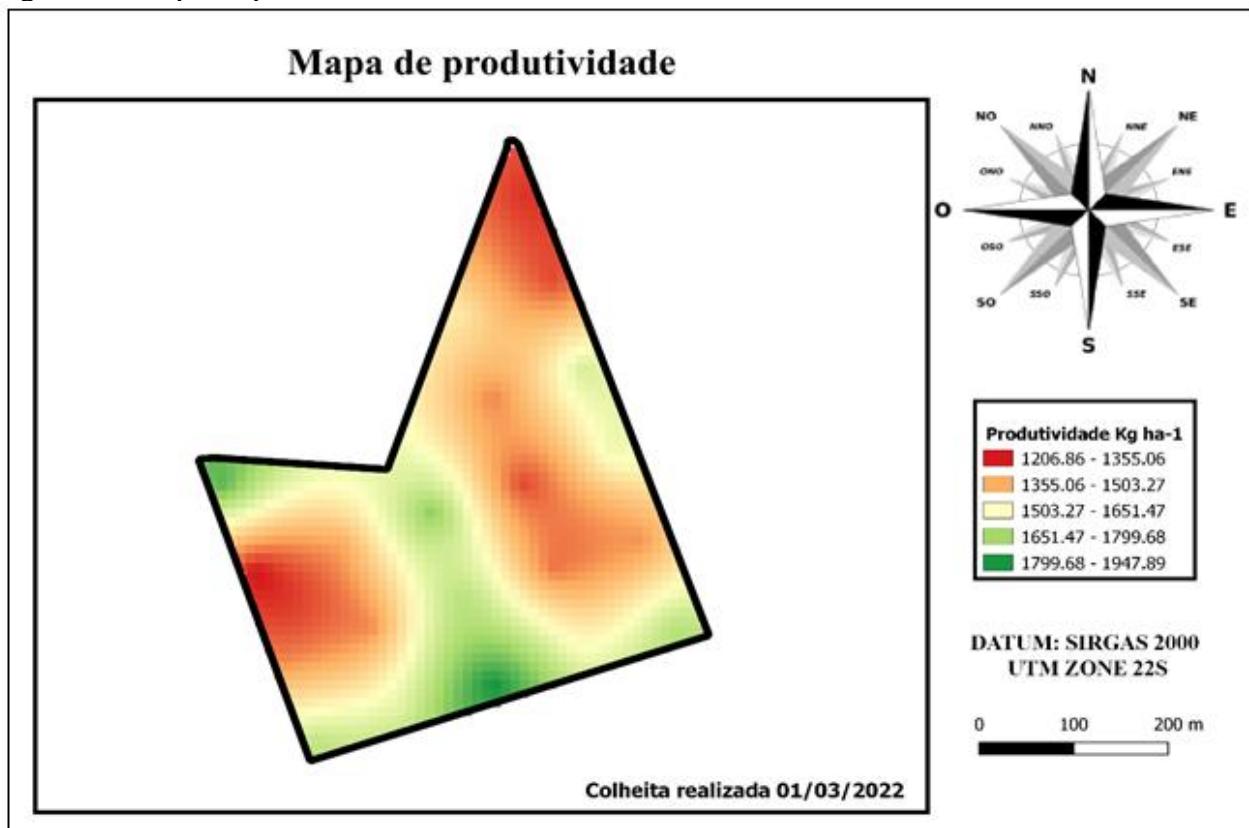
É possível notar também que a cultura foi conduzida num período onde a região do experimento (Oeste paranaense), nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro passou por restrições por falta de precipitação, sendo estas restrições nos períodos de desenvolvimento vegetativo, floração, enchimento de grãos, maturação e colheita (CONAB, 2022), assim estes fatores influenciando diretamente na produtividade. O volume de chuva registrado na região é mostrado na tabela 4.

Tabela 4 - Volume de precipitação entre os meses de outubro à fevereiro em Cascavel-PR

Meses	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
Precipitação (mm)	446,9	68,8	37,2	159,5	65,9

Fonte: AGUASPARANÁ, 2022.

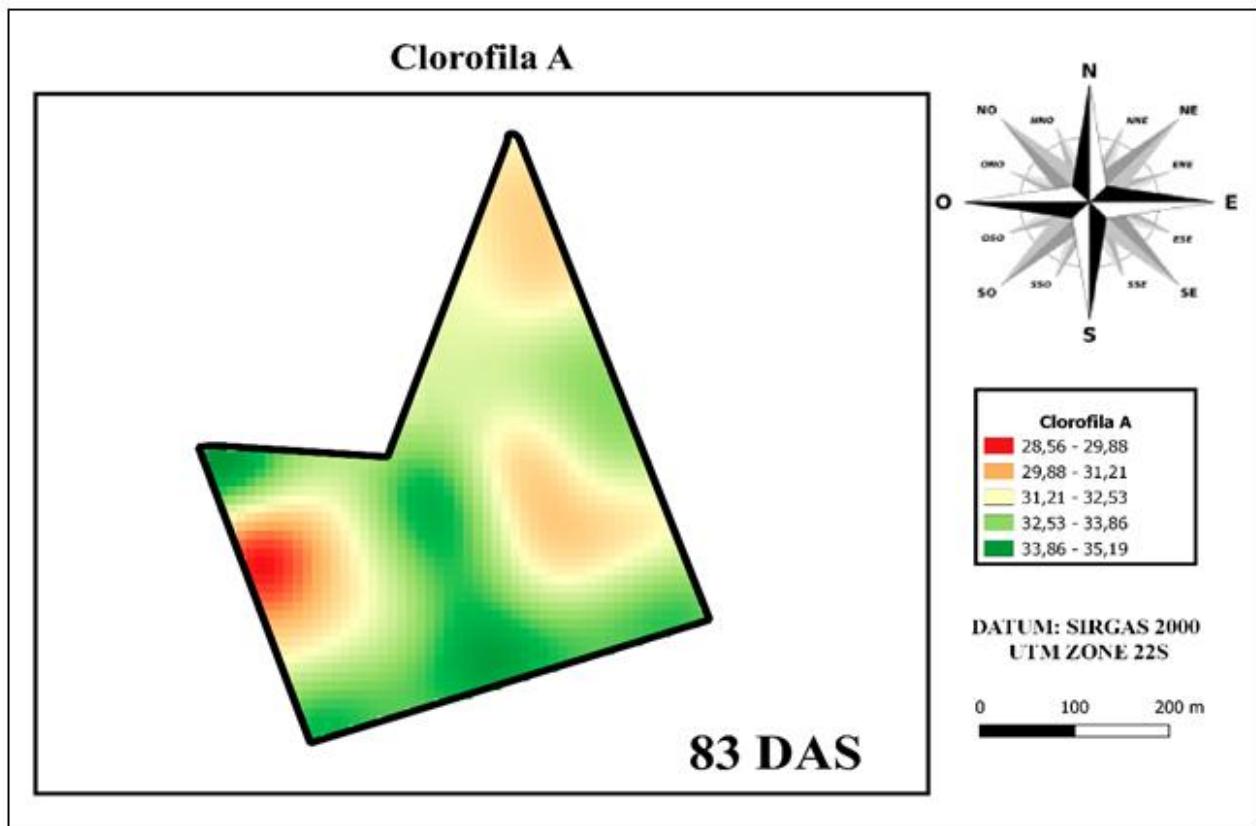
Figura 5 – Mapa de produtividade.



Ao visualizar o mapa de índice de clorofila A (Figura 6), pode-se observar que o intervalo total registrado foi de 28,56 – 35,19 para Clorofila A, sendo que a maior parte da área teve médias registradas na faixa de 32,53 – 33,86. É de grande importância ao se referir a enchimento de grãos,

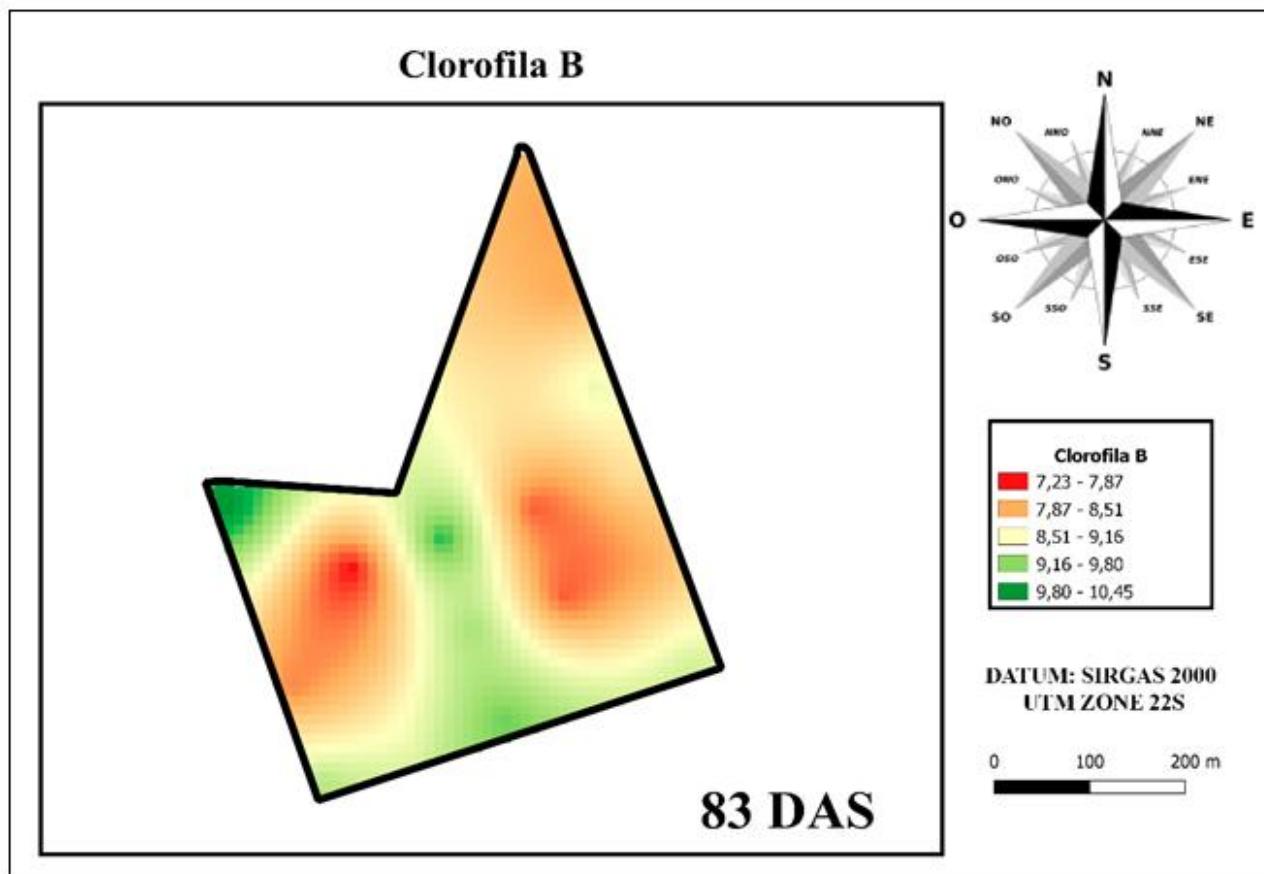
qualidade da massa vegetal e eficiência fotossintética, a clorofila A desempenha papel fundamental para alcançar tetos produtivos que a cultura pode fornecer, ampliando juntamente com boas condições climáticas e manejo adequado a rentabilidade.

Figura 6 – Mapa de índice Clorofila A



O mapa de índice de clorofila B (Figura 7) mostra que na área experimental os limites observados foram de 7,27 – 10,45, onde grande parte do mapa teve média entre o intervalo de 8,51 – 9,16. Não menos importante o índice de clorofila B é representativo ao se referir a produtividade, uma vez que esta diretamente relacionada com a clorofila A, sendo uma grande cooperadora na produção e refinadora da mesma (STREIT *et al.*, 2005).

Figura 7 – Mapa de índice de Clorofila B.



Com base na matriz de correlação de Pearson (Tabela 5), os dados referentes à produtividade, clorofila A e clorofila B, coletados aos 83 dias após a semeadura (DAS), revelaram-se estatisticamente significativos. A correlação entre produtividade e clorofila A foi de 0,94, enquanto a correlação entre produtividade e clorofila B foi de 0,85. O elevado grau de correlação pode ser explicado pela homogeneidade dos dados no campo, especialmente no caso da clorofila A. Os dados de clorofila A e produtividade mostram alta semelhança tanto na localização geográfica quanto nos valores registrados.

Tabela 5 – Matriz de Correlação de Pearson entre os dados de produtividade da soja e índices de Clorofila A e B em 83 DAS.

	Produtividade	Clorofila A	Clorofila B
Produtividade	1,00		
Clorofila A	0,94*	1,00*	
Clorofila B	0,85*	0,79*	1,00*

Fonte: O Autor (2022). *Significativo (p-valor <0,05). DAS = Dias após a semeadura.

Ao correlacionar os dados de produtividade da soja e os índices vegetativos (Tabela 6), é notável que as maiores médias são para 91 DAS com os IV's VARI e NDVI (0,62 – 0,59), assim mostrando maior correlação e classificadas como moderadas, seguidas de 111 DAS com os IV's

VARI e NDVI (0,56 – 0,49), e por fim as menores médias registradas para 66 DAS com os IV's NDRE e NDVI (0,58 – 0,48), os demais não apresentarão correlação significativa em destaque para a data de 36 DAS que não apresentou nenhuma significância entre todos os IV's indicando a partir do intervalo classificando-as como correlação fraca.

Tabela 6 – Correlação de Pearson entre os dados de produtividade da soja os IV's (VARI, NDVI, NDRE) em diferentes cenas do satélite Sentinel-2.

IV's	36 DAS	66 DAS	91 DAS	111 DAS
VARI	0,35	0,39	0,62*	0,56*
NDVI	0,33	0,48*	0,59*	0,49*
NDRE	0,21	0,58*	0,42	0,41

Fonte: O Autor (2022). *Significativo (p-valor <0,05). DAS = Dias após a semeadura.

Carneiro (2018), conduzindo experimentos com a cultura da soja em Jaboticabal – SP, em condições semelhantes de solo argiloso, obteve resultados diferentes aos observados ao relacionar os IV's com a produtividade, onde que para NDVI e NDRE não houve significância, obtendo médias no intervalo entre todas as datas de 0,00 – 0,22 para ambos. O que pode ser explicado devido ao menor desenvolvimento momentâneo da planta.

Groff (2010), realizou um experimento na cidade de Ponta Grossa – PR com o auxílio de um espectro radiômetro obtendo a refletância do dossel com comprimento de ondas 590 – 880nm, ao correlacionar valores de NDVI e produtividade obteve valores significativos semelhantes aos valores encontrados, uma vez que observou o intervalo de 0,54 – 0,68, para 40 DAS.

Avaliou-se que ao correlacionar os dados de índice de Clorofila A e os índices vegetativos (Tabela 7), foi possível observar que os dados de correlação mais significativos ocorreram nas datas de 91 DAS com os índices de VARI e NDVI (0,66 – 0,62) e 66 DAS para todos os IV's. Posteriormente nas datas de 36 DAS os índices NDVI e VARI (0,48 – 0,47) e 111 DAS para o VARI (0,52) obteve correlação significativa, sendo todas classificadas como correlação moderada, os demais dados não houveram correlação significante abrangido assim exceto o NDRE para 91 DAS e classificando-as como correlação fraca.

Tabela 7 - Correlação de Pearson entre os dados de índice de Clorofila A (83 DAS) e os IV's (VARI, NDVI, NDRE) em diferentes cenas do satélite Sentinel-2.

IV's	36 DAS	66 DAS	91 DAS	111 DAS
VARI	0,47*	0,53*	0,66*	0,52*
NDVI	0,48*	0,58*	0,62*	0,42
NDRE	0,33	0,61*	0,42	0,33

Fonte: O Autor (2022). *Significativo (p-valor <0,05). DAS = Dias após a semeadura.

Almeida (2004), conduziu um experimento na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e com imagens derivadas de um espectrorradiômetro e correlacionou cenas a partir do Landsat-8 e constou dados semelhantes do índice NDVI para níveis de clorofila A e B, sendo registrado um intervalo de 0,45 – 0,78, uma vez que se disponibilizou fatores e manejo parecidos para o desenvolvimento da cultura, apresentando alta correlação entre os dados.

Em relação a dados de índice de Clorofila B e os índices vegetativos (Tabela 8), na data de 91 DAS em correlação com os índices NDVI e VARI (0,54 – 0,52) foi onde observou-se a maior correlação significativa. Em seguida nas datas de 111 DAS para índices VARI e NDVI (0,49 – 0,47) e 66 DAS com o índice NDRE (0,56) observou-se que há correlação significativa entre as médias e assim para todas as faixas obtidas sendo classificadas como correlação moderada, já para a data de 36 DAS obteve o resultado se nenhuma significância entre todos os índices vegetativos e nível de clorofila B, e representados no intervalo onde classifica a correlação muito fraca.

Tabela 8 - Correlação de Pearson entre os dados de índice de Clorofila B (83 DAS) e os IV's (VARI, NDVI, NDRE) em diferentes cenas do satélite Sentinel-2.

IV's	36 DAS	66 DAS	91 DAS	111 DAS
VARI	0,19	0,23	0,52*	0,49*
NDVI	0,14	0,34	0,54*	0,47*
NDRE	0,14	0,56*	0,42	0,36

Fonte: O Autor (2022). *Significativo (p-valor <0,05). DAS = Dias após a semeadura.

Ferri (2004) realizou um experimento na cidade de Campinas – SP, com uma cultivar da soja com parâmetros semelhantes ao do presente estudo, sendo ela o IAC17 que apresenta características de ciclo precoce e recomendada para solos com média a alta fertilidade, onde observou valores NDVI semelhantes aos obtidos, apresentando dados relativos a R5 até R8 com correlação ao índice de clorofila, onde obteve respectivamente a faixa de 0,75 - 0,37, sendo que estes valores representam a diminuição do valor do índice de clorofila por conta do processo de maturação fisiológica, ao referenciar em 91 DAS e 111 DAS tiveram os maiores valores obtidos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados do experimento mostraram que houve forte correlação entre produtividade e níveis de clorofila A (0,94) e B (0,85) aos 83 DAS. Os índices de clorofila se destacam como bons estimadores da produtividade da soja, evidenciando sua utilidade para a previsão e monitoramento eficiente da produção agrícola.

Os resultados demonstraram que há uma correlação significativa entre os índices vegetativos e os dados produtivos da soja. Em particular, os índices NDVI e VARI mostraram correlações mais robustas com os níveis de clorofila A e B quando medidos aos 91 DAS, com coeficientes variando entre 0,52 e 0,66. Estes resultados sugerem que, para a cultura da soja, os índices vegetativos NDVI e VARI são eficazes para refletir o estado de clorofila e, potencialmente, a produtividade da planta.

REFERÊNCIAS

AGUASPARANÁ – Instituto das Águas do Paraná. **Alturas diárias de precipitação 2021/2022 na cidade de Cascavel – PR.**

ALMEIDA, T. S.; FONTANA, D. C.; MARTORANO, L. G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A. **Associação entre teor de clorofila na folha e a refletância da cultura da soja em distintas condições de manejo.** 2004. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BHERING, S. B.; DOS SANTOS, H. G.; MANZATTO, C. V.; BOGNOLA, I. A.; FASOLO, P. J.; DE CARVALHO, A. P.; POTTER, R. O.; CURCIO, G. R. Mapa de solos do estado do Paraná. **Embrapa Solos-Dокументos (INFOTECA-E),** 2007.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. (2008). Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. **O agronegócio do algodão no Brasil.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap. v. 20, p. 1309, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes.** Brasília, DF: Mapa/ACS, p. 398, 2009.

BRAZ, A. M.; ÁGUAS, T. D. A.; MIRANDOLA GARCIA, P. H. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e índice de área foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego Ribeirãozinho, Município de Selvíria – **Ms. Revista Percurso**, v. 7, n. 2, p. 5-22, 2015.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações.** Porto Alegre: Artmed, 2003.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58(5), p. 1501-1511, 1994.

CARNEIRO, F. M. **Sensores de dossel no monitoramento da variabilidade temporal das culturas da soja e do amendoim.** 2018. Dissertação de Doutorado. Universidade Estadual Paulista - Campus Jaboticabal.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos,** Brasília, DF, v.8, safra 2021/22, n. 8 oitavo levantamento, maio. 2022.

FERRI, C. P.; FORMAGGIO, A. R.; SCHIAVINATO, M. A. Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [Glycine max (L.) Merril]. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 16, n. 3, p. 131-136, 2004.

GARSON, G. David., **Statnotes: Topics in Multivariate Analysis**. 2009. Disponível em: <<http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>>. Acesso em: 14 set. 2021.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed., Piracicaba: FEALQ, 2009, 451 p.

GROFF, E. C. **Comportamento do NDVI da cultura da soja e sua relação com as variáveis agronômicas**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.

HUNT, E. R.; WILLIAMS, D. The use of vegetation indices in remote sensing of agriculture: A review. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 11, n. 6, p. 650, 2019. DOI: 10.3390/rs11060650.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2. ed. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 906 p.

MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal vascular brasileiro**, v. 16, p. 88-91. 2017.

MONTEIRO, P. H. S. **Comportamento espectro-temporal da soja utilizando sensores orbitais e não orbital e correlação dos índices de vegetação com a produtividade**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PADOLFI, A. S.; DOS SANTOS, O. L., RAMALDES, G. P. Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT. **Revista Científica FAESA**, v. 14, n. 1, p. 145-165, 2018.

RITCHIE, G. L.; SULLIVAN, D. G.; VENCILL, W. K.; BEDNARZ, C. W.; HOOK, J. E. Sensitivities of normalized difference vegetation index and a green/red ratio index to cotton ground cover fraction. **Crop science**, v. 50, n. 3, p. 1000-1010, 2010.

SANTOS, L. A. C.; DE LIMA, P. E. M. Comparação entre diferentes algoritmos de classificação supervisionada em imagens Landsat-8 no mapeamento temático da bacia hidrográfica do rio caldas, Goiás. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 03, p. 961-972, 2019.

SCHNEIDER, P.; ROBERTS, D. A.; KYRIAKIDIS, P. C. A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1151-1167, 2008.

STREIT, N. M., CANTERLE, L. P., CANTO, M. W. D., & HECKTHEUER, L. H. H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 03, p. 748-755. 2005.

VIÑA, A.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C.; KEYDAN, G.; SCHEPERS, J. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 1139-1147, 2004.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C.; BRANDÃO, F. J.; TEIXEIRA, D. D. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 608-614, 2013