

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
COORDENADORIA ACADÊMICA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Henrique Slaiffer

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A
PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA EM ÁREA IRRIGADA E
DE SEQUEIRO**

Cachoeira do Sul, RS

2023

Henrique Slaiffer

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DA SOJA EM ÁREA IRRIGADA E DE SEQUEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em **Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega

Coorientador: Prof. Dr. Ezequiel Saretta

Cachoeira do Sul, RS

2023

Henrique Slaiffer

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA
CULTURA DA SOJA EM ÁREA IRRIGADA E DE SEQUEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em **Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 17 de julho de 2023

Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)

{Presidente/Orientador}

Prof. Dr. Ezequiel Saretta (UFSM)

Profa. Dra. Zanandra Boff de Oliveira (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS

2023

“O atrativo do conhecimento seria pequeno se no caminho que a ele conduz não houvesse que vencer tanto pudor.”

(Friedrich Nietzsche)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus;

Aos meus pais, José e Judite, que me apoiaram até aqui, de todas as formas, e sem os quais nada disso seria possível;

À minha namorada Lorena, por todo apoio, aprendizado, experiências e paciência, por ter acreditado no meu potencial e estar sempre ao meu lado.

À minha irmã Cíntia e meu cunhado Sandro, que me deram suporte quando possível e sempre que necessário.

Ao meu professor e coorientador Ezequiel Saretta, pelo conhecimento compartilhado, pelas oportunidades e por todo incentivo ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador Eduardo Leonel Bottega, não apenas pela orientação como também pela dedicação, disponibilidade e ensinamentos que tornaram esse trabalho possível.

À empresa ConnectFarm, que gentilmente forneceu parte do banco de dados utilizado nas análises deste estudo.

À todos os professores, colegas, amigos, familiares, que estiveram presente e que, de alguma forma, contribuíram para o alcance dessa conquista.

Muito obrigado!

RESUMO

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA EM ÁREA IRRIGADA E DE SEQUEIRO

AUTOR: Henrique Slaiffer
ORIENTADOR: Eduardo Leonel Bottega
COORDINADOR: Ezequiel Saretta

A soja constitui uma cultura de destaque na agricultura brasileira com grande representação no cenário econômico nacional. No estado do Rio Grande do Sul sua produtividade vem se destacando, como consequência, principalmente, do emprego da tecnologia no campo e uso da agricultura de precisão. Entre as ferramentas que contribuíram para a evolução dos patamares produtivos destaca-se o uso do sensoriamento remoto. O presente trabalho teve por objetivo mapear a variabilidade espacial da resposta espectral e a produtividade da cultura da soja, assim como avaliar a correlação entre os mapas gerados, a partir do cálculo dos índices de vegetação: NDVI, NDMI, NDRE, em lavoura irrigada por pivô central e em cultivo de sequeiro. O estudo foi desenvolvido em uma propriedade rural no município de Cachoeira do Sul. A produtividade de soja foi mapeada por sistema de mapeamento embarcado na colhedora. O mapeamento dos índices de vegetação foi realizado utilizando a plataforma online *Crop Monitoring*. Foram gerados mapas de variabilidade espacial dos índices de vegetação estudados para diferentes datas, ao longo do ciclo da cultura, cultivada em sistema irrigado e de sequeiro. Os dados de produtividade e dos índices de vegetação compuseram o banco de dados empregado nas análises estatísticas e geoestatísticas. Para análise e tratamento dos dados foram utilizados os programas computacionais MapFilter, Statística e QGIS. Os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE apresentaram variações espaciais nas áreas estudadas, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro. Os maiores valores médios dos índices de vegetação estudados foram observados para a resposta espectral da cultura da soja em cultivo irrigado. A produtividade da cultura da soja apresentou variabilidade espacial em cultivo sequeiro e em cultivo em irrigado, sendo no cultivo em sequeiro o valor mínimo observado de 3.588 kg ha⁻¹, máximo de 4.998 kg ha⁻¹ e médio de 4.405 kg ha⁻¹. Já na área irrigada o valor mínimo observado foi de 3.960 kg ha⁻¹, máximo de 5.398 kg ha⁻¹ e médio de 4.636 kg ha⁻¹. Todos os índices de vegetação estudados apresentaram correlação espacial significativa com a variabilidade espacial na produtividade da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro. No cultivo em sequeiro, o maior valor de correlação significativa foi positivo observado entre o NDVI e a produtividade de soja (0,57), ocorrendo 43 dias após a semeadura. Para os índices NDMI e NDRE, estes valores foram de 0,47 e 0,54 respectivamente, observados em 48 dias após a semeadura. No cultivo irrigado, os maiores valores de correlação significativa também foram positivos, sendo os valores 0,60, 0,48 e 0,63 observados, respectivamente, para a correlação da produtividade com os índices NDVI, NDMI e NDRE, 128 dias após a semeadura.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr. NDVI. NDMI. NDRE. Cultivo irrigado. Cultivo em sequeiro.

ABSTRACT

CORRELATION BETWEEN VEGETATION INDEX AND SOYBEAN YIELD IN IRRIGATED AND RAINFED AREA

AUTHOR: Henrique Slaiffer
ADVISOR: Eduardo Leonel Bottega
COADVISOR: Ezequiel Saretta

Soybean is a prominent crop in Brazilian agriculture with great representation in the national economic scenario. In the state of Rio Grande do Sul, its yield has been increasing, mainly as a result of the use of technology in the field and the use of precision agriculture. Among the tools that contributed to the evolution of yield levels, the use of remote sensing stands out. The objective of this work was to map the spatial variability of the spectral response and the soybean yield, as well as to evaluate the correlation between the maps generated, from the calculation of the vegetation index: NDVI, NDMI, NDRE, in a irrigated and rainfed area. The study was developed in a rural property in the municipality of Cachoeira do Sul. Soybean yield was mapped by a mapping system built into the harvester. The mapping of vegetation index was carried out using the Crop Monitoring online platform. Maps of spatial variability of the studied vegetation indices were generated for different dates, throughout the crop cycle, cultivated in irrigated and rainfed systems. Yield data and vegetation index made up the database used in the statistical and geostatistical analyses. For data analysis and processing, was used the computational programs MapFilter, Statistica and QGIS. The NDVI, NDMI and NDRE vegetation index showed spatial variations in the studied areas, during the development cycle of the soybean crop, in irrigated cultivation and in rainfed cultivation. The highest mean values of the studied vegetation index were observed for the spectral response of the soybean crop under irrigated cultivation. The soybean yield showed spatial variability in irrigated and rainfed cultivation, in rainfed cultivation, the minimum observed value was 3,588 kg ha⁻¹, the maximum was 4,998 kg ha⁻¹ and the average was 4,405 kg ha⁻¹. In the irrigated area, the minimum value observed was 3,960 kg ha⁻¹, a maximum of 5,398 kg ha⁻¹ and an average of 4,636 kg ha⁻¹. All vegetation index studied showed a significant spatial correlation with the spatial variability in soybean yield, in irrigated and rainfed cultivation. In rainfed cultivation, the highest significant positive correlation value was observed between NDVI and soybean yield (0.57), occurring 43 days after sowing. For the NDMI and NDRE index, these values were 0.47 and 0.54 respectively, observed in 48 days after sowing. In irrigated cultivation, the highest values of significant correlation were also positive, with values 0.60, 0.48 and 0.63 observed, respectively, for the correlation of soybean yield with the NDVI, NDMI and NDRE indices, 128 days after sowing.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr. NDVI. NDMI. NDRE. Irrigated cultivation. Rainfed cultivation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Polígonos delimitadores das áreas de estudo e grade de pontos amostrais. Cachoeira do Sul, 2023.....	14
Figura 2 – Utilização do plugin Point Sampling Tool na extração de valores de NDVI para cada ponto da grade amostral. Cachoeira do Sul, 2023.	18
Figura 3 – Gráficos de precipitação pluviométrica acumulada para os meses de outubro de 2020 a março de 2021 (a) e da precipitação pluviométrica diária para os meses de novembro e dezembro de 2020 e fevereiro de 2021. Cachoeira do Sul, 2023.....	20
Figura 4 – Resultado da filtragem dos dados de produtividade de soja para a área de sequeiro (a) e para a área irrigada (b). Cachoeira do Sul, 2023.....	21
Figura 5 – Mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da produtividade de soja para as áreas de sequeiro (a) e irrigado (b), semivariogramas ajustados para as área de sequeiro (c) e irrigado (d), gráficos de validação cruzada para as áreas de sequeiro (e) e irrigado (f) e mapas temáticos de variabilidade espacial da produtividade de soja ($Mg\ ha^{-1}$) para as áreas de sequeiro (g) e irrigado (h). Cachoeira do Sul, 2023.....	23
Figura 6 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDVI na área de sequeiro. Cachoeira do Sul, 2023.....	26
Figura 7 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDVI na área irrigada. Cachoeira do Sul, 2023.....	27
Figura 8 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDMI na área de sequeiro. Cachoeira do Sul, 2023.....	28
Figura 9 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDMI na área irrigada. Cachoeira do Sul, 2023.....	29
Figura 10 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDRE na área de sequeiro. Cachoeira do Sul, 2023.....	30
Figura 11 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDRE na área irrigada. Cachoeira do Sul, 2023.....	31
Figura 12 – Valores médios dos índices de vegetação NDVI, NDRE e NDMI nos cultivos de sequeiro (S) e irrigado (I), durante o ciclo da cultura da soja. Cachoeira do Sul, 2023.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores de produtividade de soja (kg ha^{-1}) e dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo em sequeiro e irrigado. Cachoeira do Sul, 2023.	33
Tabela 2 – Análise de correlação de Pearson entre os valores de produtividade de soja (kg ha^{-1}) e os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo em sequeiro. Cachoeira do Sul, 2023.	34
Tabela 3 – Análise de correlação de Pearson entre os valores de produtividade de soja (kg ha^{-1}) e os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo irrigado. Cachoeira do Sul, 2023.	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. ÁREA DE ESTUDO	14
2.2. MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE SOJA	15
2.3. CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E OBTENÇÃO DAS IMAGENS	16
2.4. ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DURANTE O PERÍODO DE CULTIVO DA CULTURA DA SOJA NA ÁREA DE ESTUDO	20
3.2. FILTRAGEM DOS DADOS DE PRODUTIVIDADE	21
3.3. MAPEAMENTO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DE SOJA	22
3.4. MAPEAMENTO DO NDVI	25
3.5. MAPEAMENTO DO NDMI	27
3.6. MAPEAMENTO DO NDRE	29
3.7. COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO AO LONGO CICLO DA CULTURA	31
3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON	33
4. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma das principais culturas cultivadas no mundo, com grande representação no cenário econômico e expressivo impacto no agronegócio brasileiro. Cultivada especialmente nas regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil, a soja constitui um dos produtos de destaque da agricultura nacional assim como na balança comercial, sendo o principal setor exportador do agronegócio brasileiro. Entre 1985 e 2020 o cultivo da soja atingiu um marco de 4,3% da área total de agricultura mapeada no Brasil. Além da área cultivada, a produção nacional e a produtividade média da cultura chegaram a 123,9 milhões de toneladas e 3.026 kg ha⁻¹ respectivamente no período da safra 2021/2022 (CONAB,2022).

O estado do Rio Grande do Sul, terceiro maior produtor nacional, foi responsável pela produção média de 15,8 milhões de toneladas de soja no triênio 2018-2020, segundo a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE. Ainda, de acordo com os dados mais recentes do Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER, 2022), o estado apresenta 6,51 milhões de hectares de área plantada com uma produção esperada de 14,16 milhões de toneladas. Destes 6,51 milhões, segundo Martins et al. (2018), o estado possui uma área de aproximadamente 111,12 mil hectares irrigados, contabilizando 1.753 sistemas de irrigação por pivô central, estando estes localizados principalmente nas regiões do Planalto Médio, alto Uruguai e Missões.

Apesar da implantação desses sistemas, um dos grandes desafios enfrentados na agricultura irrigada é o uso eficiente da água na produção, seja devido à falta de informação ou treinamento adequado para o manuseio da mesma, ou ainda pela disponibilidade de recursos. Desta forma, ferramentas da agricultura de precisão podem ser utilizadas para garantir a uniformidade da eficiência em cada metro quadrado da área de manejo, otimizando a produção e diminuindo a variabilidade das áreas da lavoura (PIERCE; NOWAK, 1999).

Utilizando estas ferramentas também é possível identificar as heterogeneidades das áreas de cultivo onde é realizado o mapeamento da produtividade, os quais os mapas gerados constituem um banco de dados com as informações necessárias para a área de estudo, classificando as regiões por faixas de importância e, por fim, definindo as zonas de manejo. Para auxiliar no entendimento e tratamento desses mapas pode-se utilizar técnicas de sensoriamento remoto.

Para uma análise quantitativa da biomassa verde e dos respectivos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da vegetação podem ser empregados os índices de vegetação (BELLOLI, 2019). Estes índices são produtos da aplicação das técnicas de sensoriamento

remoto e buscam relacionar as informações captadas pelos sensores com a vegetação presente na área imageada. Alguns índices de vegetação empregados na agricultura são o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) e o índice da borda do vermelho de diferença normalizada (NDRE).

O índice de vegetação normalizada (NDVI) está entre os índices que melhor se correlaciona com a vegetação, já que utiliza banda espectrais obtidas no vermelho e infravermelho próximo, que possuem significativa correlação com o verde ou porções fotossinteticamente ativas das plantas (MOREIRA, 2007). Segundo Wang et al. (2003), sua simplicidade e sua relativa alta sensibilidade à densidade da cobertura vegetal tornaram possíveis comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética, bem como o monitoramento sazonal, interanual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais e fenológicos da vegetação.

O índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) é capaz de quantificar o conteúdo de água nos tecidos esponjosos do mesófilo do dossel da planta em ecossistemas de alta biomassa (DAS et al., 2022). A interpretação do seu valor absoluto permite reconhecer imediatamente locais em um campo que estão passando por estresse hídrico.

Por fim, o índice da borda do vermelho de diferença normalizada (NDRE) é um indicador da atividade fotossintética de uma cobertura vegetal usada para estimar as concentrações de nitrogênio nas folhas das plantas. Através dele é possível otimizar o tempo de colheita, detectar a vegetação oprimida e envelhecida e, identificar possíveis doenças nas plantas. É mais indicado sua utilização nos estágios avançados da cultura, uma vez que o dossel está altamente denso, e pode causar saturação do NDVI (CROP MONITORING, 2023).

Considerando o exposto anteriormente fica evidente que os índices podem contribuir para o monitoramento da área, permitindo avaliar o desenvolvimento da cultura, área foliar, ausência de nutrientes, identificação de pragas e doenças, uniformidade da irrigação, e de forma geral auxiliar no manejo e na tomada de decisão dos produtores.

O presente estudo teve por objetivos mapear, para um ano agrícola de déficit hídrico, a resposta espectral da cultura da soja, durante seu ciclo de desenvolvimento, a partir do cálculo dos índices de vegetação: NDVI, NDMI e NDRE, em lavoura irrigada e em cultivo de sequeiro. Mapear a variabilidade espacial da produtividade da cultura da soja em lavoura irrigada e em cultivo de sequeiro. Avaliar a correlação espacial entre os índices de vegetação mapeados com a produtividade da cultura da soja, a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson. Determinar, para cada índice de vegetação estudado, em quantos dias após a semeadura da

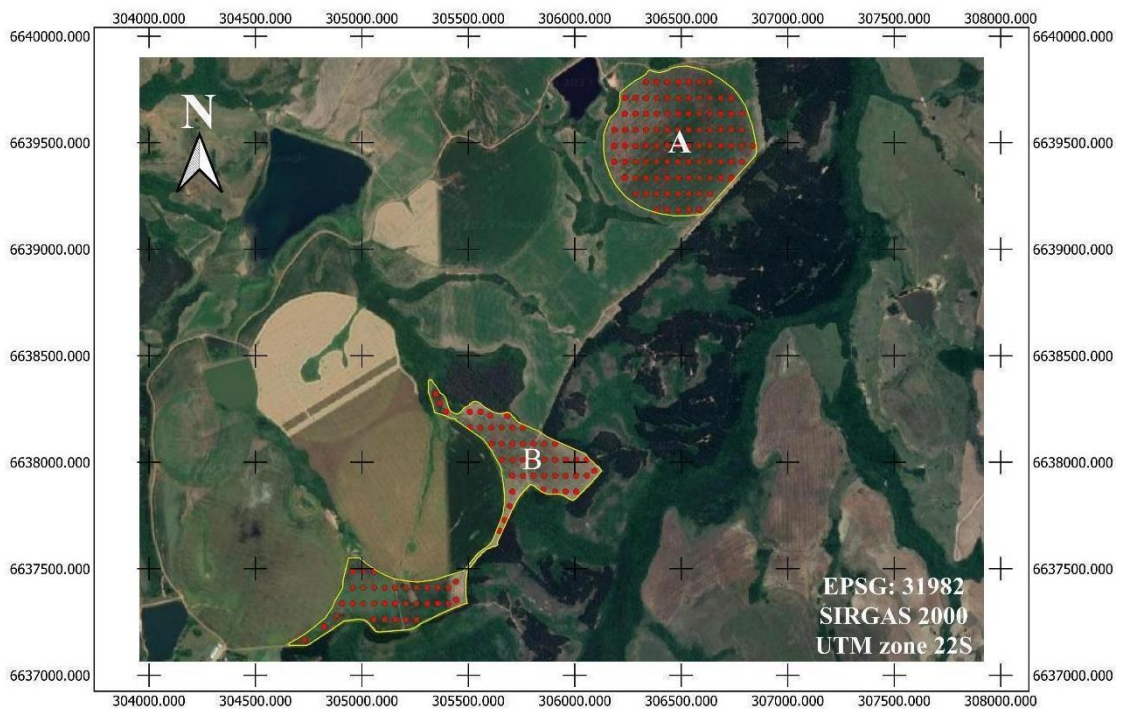
cultura da soja, obtém-se o maior valor significativo da correlação de Pearson com a produtividade, em cultivo de sequeiro e irrigado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido no município de Cachoeira do Sul, região central do estado do Rio Grande dos Sul - Brasil, em uma propriedade particular, destinada à produção de grãos. O solo da região é classificado como ARGISSOLO Vermelho (EMBRAPA, 2013). O clima da região é classificado como subtropical úmido com verão quente (Cfa), com temperatura média anual de 20°C e precipitação média de 1500 mm no ano. Foram utilizados dois talhões desta propriedade, um com cultivo irrigado sob pivô central (Fig. 1A) e outro com cultivo sem irrigação (Fig. 1B). Em cada talhão foi estabelecida uma grade amostral, com pontos espaçados em 50 metros na linha e 75 metros na entrelinha. As grades amostrais foram geradas no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña), utilizando a ferramenta *Vetor >>> Investigar >>> Criar grade*. Na Figura 1 são apresentados os polígonos das áreas de estudo e os pontos amostrais.

Figura 1 – Polígonos delimitadores das áreas de estudo e grade de pontos amostrais. Cachoeira do Sul, 2023.



Fonte: Autor.

Os pontos amostrais serviram de base para estruturação do banco de dados, utilizado nas análises estatísticas subsequentes. A área do pivô (Fig. 1A) possui 38 ha e 95 pontos amostrais. A área de sequeiro (Fig. 1B) possui 31,7 ha e 80 pontos amostrais. Em ambas as áreas a densidade amostral foi representativa de 2,5 pontos por hectare.

A cultura semeada foi a cultura da soja, cultivar Brasmax Compacta IPRO. A Brasmax Compacta é uma cultivar com a tecnologia Intacta RR2 PRO, apresenta ciclo tardio (148 dias), grupo de maturação 6.5 e peso de mil grãos de 177g. Como características principais possui um alto potencial de ramificação aliado a um alto teto produtivo, sendo indicada para ambientes de alta tecnologia (BRASMAX, 2023). Na área irrigada a semeadura ocorreu no dia 04/11/2020 e na área de sequeiro, no dia 05/11/2020. A população de plantas adotada foi de 220 mil plantas por hectare. A semeadura da soja foi realizada sob resteva de trigo.

2.2. MAPEAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE SOJA

A colheita foi realizada nos dias 11/04/21 a 13/04/21 (área aeroporto), e nos dias 14/04/21 a 15/04/21 (área pivô), utilizando uma colhedora automotriz da marca New Holland, modelo CR 9060. A colhedora estava equipada com o monitor IntelliView™ IV. De acordo com o fabricante, o IntelliView™ IV é uma tela colorida, intuitiva e sensível ao toque que pode vir de fábrica integrada a diversos modelos de equipamentos New Holland. Tem compatibilidade ISOBUS total e pode ser usada tanto para controlar as funções principais do veículo quanto para executar aplicações de precisão, como a orientação automática IntelliSteer™, mapeamento conforme aplicado e controle das funções do implemento de frotas mistas de equipamentos. Seu emprego em colhedoras permite a realização do mapeamento e monitoramento de rendimento e detecção de umidade dos grãos colhidos (NEW HOLLAND AGRICULTURE, 2022).

Os dados de produtividade, obtidos pelo sistema sensor da colhedora, foram filtrados para remoção de possíveis valores discrepantes (outliers). Para filtragem foi utilizado o programa computacional MapFilter, desenvolvido por Maldaner et al. (2022). O software executa a filtragem espacial dos dados através de uma análise global dos dados e uma análise local isotrópica e anisotrópica levando em consideração os valores da vizinhança. Os dados são classificados como consistentes, inadequados (fora do intervalo definido) ou duvidosos. Cada talhão foi filtrado utilizando um raio de busca de 10 metros e um coeficiente de variação de

10% para a média. Pontos identificados como duvidosos ou fora do intervalo definido foram removidos da base de dados.

2.3. CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E OBTENÇÃO DAS IMAGENS

Os índices de vegetação estudados foram: índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de umidade por diferença normalizada (NDMI) e índice de borda vermelha de diferença normalizada (NDRE).

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi calculado utilizando a Equação 1, proposta por Jensen (1996).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Em que:

NIR é a refletância no comprimento de onda correspondente ao infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm);

R é a refletância no comprimento de onda correspondente ao vermelho (0,63 a 0,69 μm).

Os valores de NDVI podem variar de -1 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam a presença de vegetação fotossinteticamente ativa e valores menores ou próximo de 0 indicam a presença de solo exposto (ROUSE et al. 1974).

Para o cálculo do índice de umidade por diferença normalizada (NDMI), foi utilizada a Equação 2, proposta por Gao (1996).

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

Em que:

SWIR é a refletância na banda do infravermelho de ondas curtas (1,3 a 2,5 μm).

Seus valores podem variar entre -1 e 1, sendo que cada valor corresponde a uma situação agrônômica diferente, independente da cultura (CROP MONITORING, 2023).

Por fim, o índice de borda vermelha de diferença normalizada (NDRE) foi calculado a partir da Equação 3, proposta por Barnes et al. (2000).

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge} \quad (3)$$

Em que:

RedEdge é a refletância na banda da borda do vermelho (0,715 μm).

Na escala padrão, os valores de NDRE variam de -1 a +1, os quais valores de -1 a 0 indicam solo descoberto ou uma cultura em desenvolvimento e quanto valores de 0,1 a +1, são

indicativos de culturas saudáveis, e em estádios fenológicos mais avançados. (CROP MONITORING, 2023).

O mapeamento dos índices de vegetação estudados, para a cultura da soja cultivada com irrigação e em sequeiro, foi realizado utilizando as ferramentas disponíveis no programa Crop Monitoring, disponível no website <https://crop-monitoring.eos.com/login>. Foram gerados mapas para os três índices de vegetação estudados, para ambas as áreas, representativos do período de novembro de 2020 até abril de 2021, de forma a capturar o comportamento espectral do dossel de plantas durante seu período de desenvolvimento. Imagens com mais de 30% de cobertura por nuvens não foram consideradas no estudo.

Para a utilização deste programa o usuário necessita fazer um cadastro prévio com algumas informações, sendo que em seu primeiro acesso, o mesmo tem direito a um campo experimental com limite de 300 ha para aferição. Ao logar é necessário que seja informada a área a ser monitorada através de um polígono, podendo ser desenhada ou carregada através de um arquivo shp, shx, dbf. Após isso, estarão disponíveis diversas ferramentas para a análise e gestão da lavoura, que vão desde mapas de vegetação, produtividade e prescrição, bastando apenas selecionar o de interesse e o respectivo período. O programa opera com imagens de resolução de 10 metros, com atualizações regulares fornecidas pelo satélite Sentinel 2 em cada quatro a seis dias, podendo ser facilmente baixadas.

2.4. ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

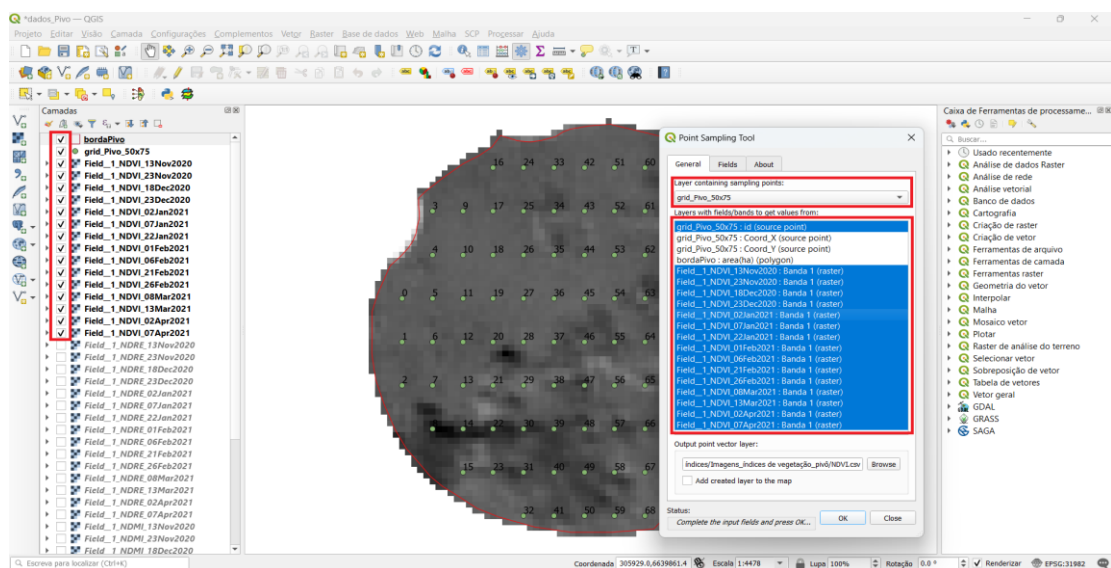
O banco de dados utilizados nas análises estatística descritiva e análise de correlação de Pearson foi construído em planilha Microsoft Excel. Para cada sistema de cultivo (irrigado e sequeiro) foram estruturadas pastas de trabalho onde, para cada ponto amostral da grade (id), foram associados os seguintes dados: CoordX(m), CoordY(m), Produtividade de soja (kg ha^{-1}), valores dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para as datas em que foi possível gerar mapas da variabilidade espacial, sem que houvesse cobertura de nuvens.

Os mapas dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE, gerados no Crop Monitoring foram salvos em um arquivo *Tag Image File Format* (.TIFF) e posteriormente carregados no QGIS. Após filtrados os dados de produtividade, os mesmos foram trabalhados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis (QGIS Development Team, 2020), versão 3.10.11 (A Coruña). A variabilidade espacial da produtividade foi modelada a partir do ajuste de semivariogramas, utilizando o plugin Smart-Map, desenvolvido por Pereira et al. (2022). O

Smart-Map possibilita a predição e o mapeamento de atributos do solo e das plantas em locais não amostrados. Realiza a interpolação dos dados utilizando Krigagem Ordinária e técnicas de Machine Learning por meio do Support Vector Machine (SVM). Sua interação com o QGIS se dá a partir de layers (Shapefile e GeoTIFF).

Uma vez confeccionados os mapas da variabilidade espacial da produtividade de soja e gerados os mapas dos índices de vegetação estudados, obteve-se o valor destes atributos em cada um dos pontos das grades amostrais anteriormente geradas, sobrepondo a grade amostral aos mapas gerados. A extração dos valores de produtividade de soja e dos índices de vegetação, em cada ponto amostral, foi realizada utilizando o plug-in *Point Sampling Tool*. O plugin possibilita a coleta de atributos de polígonos e valores *raster* de várias camadas em pontos de amostragem especificados. Para sua utilização é necessário uma *layer* contendo a grade amostral e os arquivos *raster* dos atributos que se deseja extrair valores. As *layers* devem estar carregadas no projeto do QGIS que se deseja trabalhar, além disso, é necessário que a caixa de marcação de cada *layer* esteja ativada. O arquivo contendo os valores dos atributos de interesse foi salvo no formato *Comma separate values* (.csv), para posterior inserção na pasta de trabalho do Excel. Na Figura 2 é apresentado um print da área de trabalho do QGIS, demonstrando a utilização do plugin *Point Sampling Tool* na extração de valores de NDVI para cada um dos pontos amostrais da grade representativa do pivô.

Figura 2 – Utilização do plugin Point Sampling Tool na extração de valores de NDVI para cada ponto da grade amostral. Cachoeira do Sul, 2023.



Fonte: Autor.

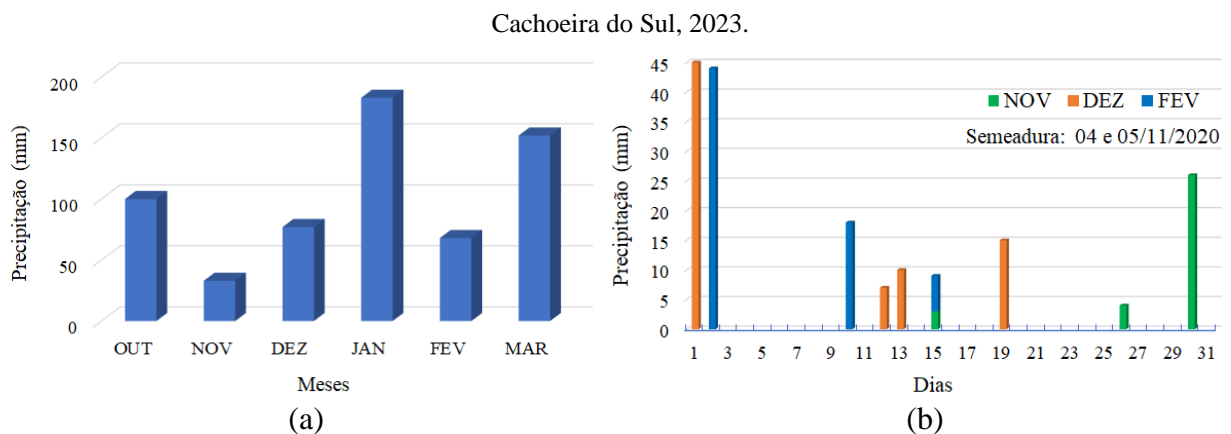
Os dados obtidos para a produtividade de soja e para os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE, foram submetidos a análise estatística descritiva, calculando-se os valores de mínimo, média, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação. Foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre os valores dos índices de vegetação e os valores de produtividade da cultura da soja. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida adimensional que pode assumir valores no intervalo entre -1 a +1. O mesmo mede a intensidade e a direção de relações lineares. A intensidade consiste no grau de relacionamento entre as duas variáveis, sendo que quanto mais próximo dos extremos (-1 a +1) mais forte a correlação. A direção diz respeito ao tipo de correlação, sendo que a correlação positiva representa que os valores altos de uma variável correspondem a valores altos da outra variável, e a correlação negativa representa que valores altos de uma das variáveis correspondem a valores baixos de outra. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa estatístico *Statistica*, versão 7.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DURANTE O PERÍODO DE CULTIVO DA CULTURA DA SOJA NA ÁREA DE ESTUDO

Na Figura 3 são apresentados os gráficos de precipitação pluviométrica acumulada para os meses de outubro de 2020 a março de 2021 (Fig. 3a) e da precipitação pluviométrica diária para os meses de menor precipitação, novembro, dezembro de 2020 e fevereiro de 2021 (Fig. 3b), na área de estudo, durante o cultivo da cultura da soja. Os dados apresentados são oriundos do monitoramento por pluviômetro, localizado na propriedade.

Figura 3 – Gráficos de precipitação pluviométrica acumulada para os meses de outubro de 2020 a março de 2021 (a) e da precipitação pluviométrica diária para os meses de novembro e dezembro de 2020 e fevereiro de 2021.

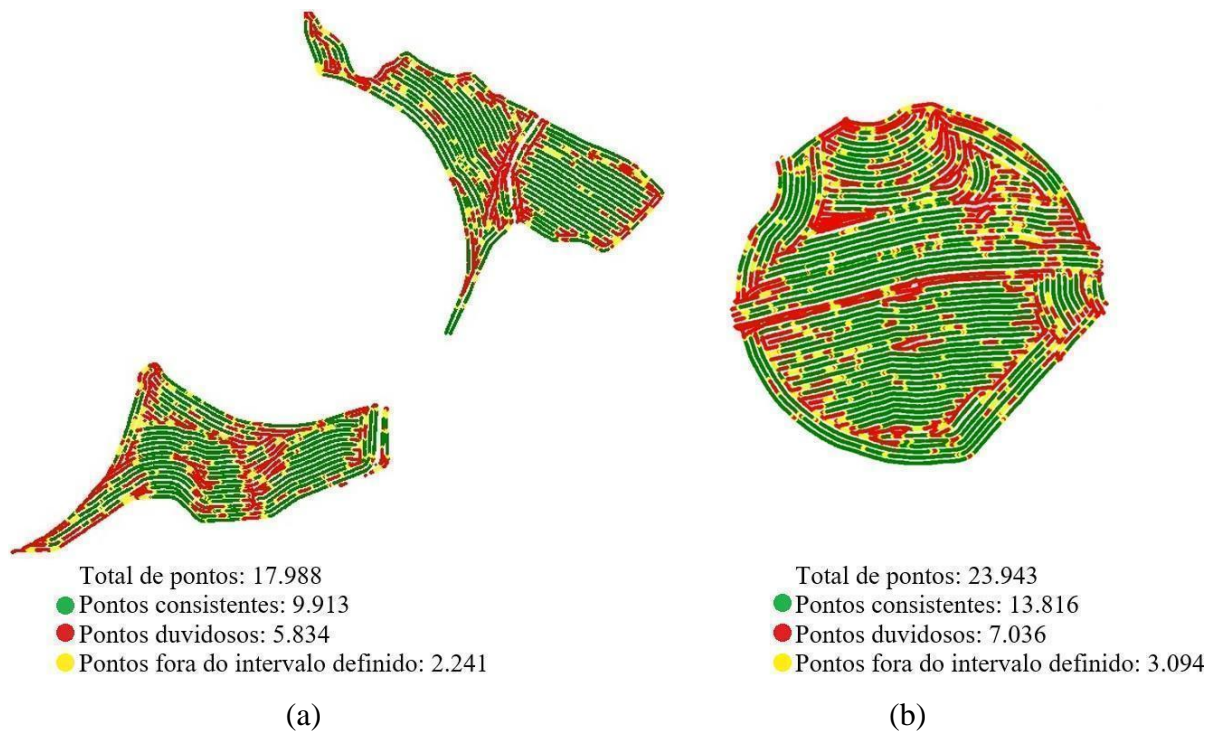


Conforme apresentado na Figura 3b, a primeira chuva após a semeadura da cultura da soja ocorreu em 15/11/2020, com uma altura de 3 milímetros. Para garantir uma boa germinação, a semente da soja necessita absorver, no mínimo, 50% do seu peso. Nessa fase o conteúdo de água no solo deve permanecer entre 50% e 85% do total máximo disponível. Conforme a planta vai se desenvolvendo, a necessidade de água vai aumentando, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm dia⁻¹) e começa a decrescer depois deste período. A necessidade total de água para a cultura, para a obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm ciclo⁻¹, dependendo das condições climáticas, manejo da cultura e duração de seu ciclo (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007)

3.2. FILTRAGEM DOS DADOS DE PRODUTIVIDADE

Os dados de produtividade gerados pelo sistema de mapeamento da colhedora apresentaram pontos com valores duvidosos e fora do intervalo definido (raio de busca de 10 metros e um coeficiente de variação de 10% para a média). Estes pontos foram removidos, sendo utilizados na análise da variabilidade espacial apenas aqueles filtrados como consistentes. Na Figura 4 é apresentado a visualização de plotagem dos pontos de produtividade pelo software MapFilter, indicando os pontos consistentes (em verde), duvidosos (em vermelho) e fora do intervalo definido (em amarelo).

Figura 4 – Resultado da filtragem dos dados de produtividade de soja para a área de sequeiro (a) e para a área irrigada (b). Cachoeira do Sul, 2023.



Fonte: Autor

A filtragem de dados é muito importante, pois garante que os mapas gerados representam, de forma fiel, a realidade observada no campo. Segundo Menegatti e Molin (2003), as falhas presentes em mapas de produtividade, podem ser devido erros de posicionamento, produtividades improvavelmente altas e baixas, largura da plataforma incorreta, umidade de grãos, distância entre pontos, intervalo de enchimento e limites estatísticos para dados discrepantes.

Estudos conduzidos por Maldaner et al. (2022), Spekken, Alselmi e Molin (2013), Vega et al. (2019), buscaram desenvolver e testar um filtro para identificar e excluir outliers espaciais no conjunto de dados espaciais de alta densidade. Os autores destacam que, dependendo do filtro utilizado, é possível diminuir o efeito pepita e melhorar a caracterização de variabilidade.

Maldaner et al. (2022) utilizou um filtro composto por uma análise de dados globais, anisotrópica e anisotrópica local considerando valores da vizinhança. Além disso, ele também utilizou a mediana para classificar um determinado ponto espacial no conjunto de dados como principal parâmetro estatístico, levando em consideração seus vizinhos dentro de um raio, o que segundo os autores, trouxe-lhes melhor desempenho na remoção de dados outliers quando comparada com outras metodologias da literatura.

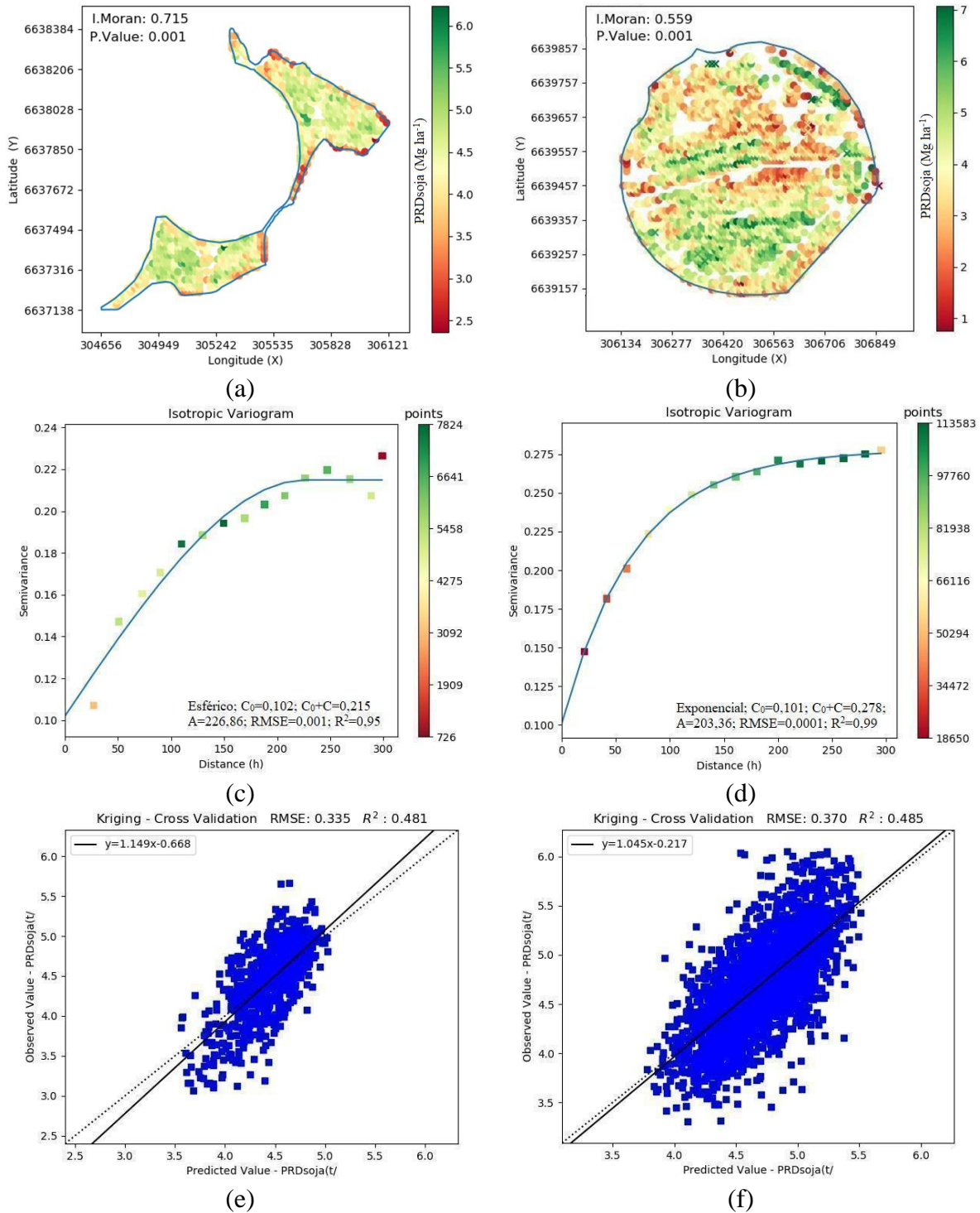
Já Spekken et al. (2013) desenvolveu um software genérico capaz de excluir pontos inconsistentes de seus vizinhos, assim como também é capaz de identificar dados errôneos, como por exemplo, produtividade nula, conjunto errado de largura de plataforma e modos de atraso/preenchimento em cabeceiras, etc. Para os autores, no momento da filtragem é necessário um bom entendimento na definição dos limites superiores e inferiores de identificação das outliers, para que não haja perda de dados consistentes.

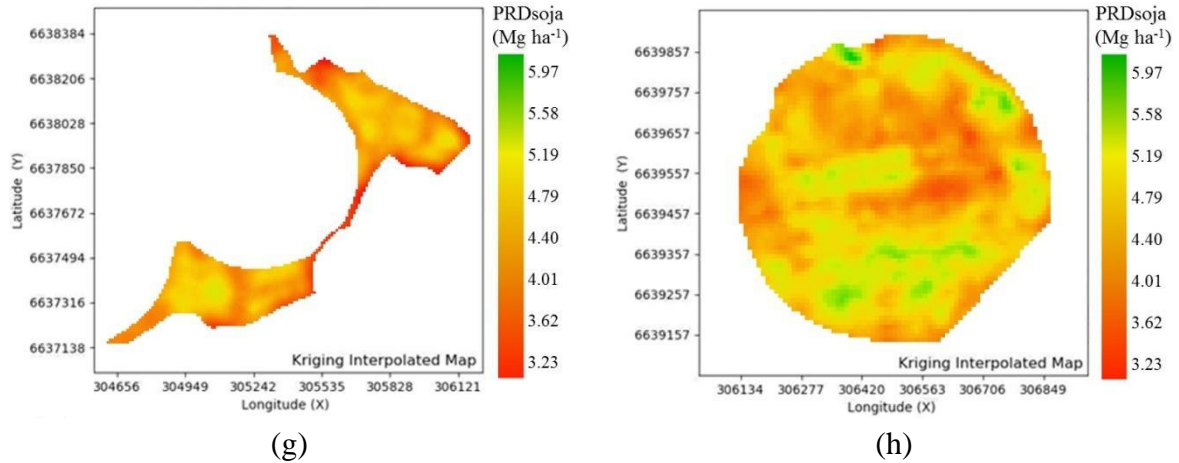
Por fim, Vega et al. (2019) elaboraram um script para automatizar a remoção de erros dos mapas de produtividade. Primeiro, os dados foram rastreados filtrando valores de rendimento nulo e de borda, bem como outliers globais. Em segundo lugar, os outliers espaciais ou observações defeituosas locais foram excluídos usando o índice de Moran de autocorrelação espacial e o gráfico de Moran. Através da viabilidade dessa remoção automatizada de erros do monitor de produção, ficou claro que isso pode beneficiar nas decisões de gerenciamento.

3.3. MAPEAMENTO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DE SOJA

A produtividade de soja apresentou variabilidade espacial em ambas as áreas mapeadas (sequeiro e irrigada). Na Figura 5 são apresentados os mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da produtividade de soja para as áreas de sequeiro (a) e irrigado (b), semivariogramas ajustados para as áreas de sequeiro (c) e irrigado (d), gráficos de validação cruzada para as áreas de sequeiro (e) e irrigado (f) e mapas temáticos de variabilidade espacial da produtividade de soja (Mg ha^{-1}) para as áreas de sequeiro (g) e irrigado (h).

Figura 5 – Mapas referentes ao índice de Moran, ilustrativo da autocorrelação espacial da produtividade de soja para as áreas de sequeiro (a) e irrigado (b), semivariogramas ajustados para as área de sequeiro (c) e irrigado (d), gráficos de validação cruzada para as áreas de sequeiro (e) e irrigado (f) e mapas temáticos de variabilidade espacial da produtividade de soja (Mg ha^{-1}) para as áreas de sequeiro (g) e irrigado (h). Cachoeira do Sul, 2023.





Fonte: Autor.

O Índice de Moran univariado indicou haver autocorrelação espacial significativa para a produtividade de soja observada no cultivo irrigado e no cultivo em sequeiro, portanto, há indicativo de variabilidade espacial nas áreas de estudo. Os modelos teóricos de semivariância, ajustados a variância empírica dos dados de produtividade de soja observada no cultivo irrigado e no cultivo em sequeiro, foram o modelo esférico e o modelo exponencial, com R^2 de 0,95 e 0,99, respectivamente. O modelo esférico indica uma maior mudança de dependência espacial com a distância (VIEIRA et al., 1991). Já o modelo exponencial, pressupõe pequena quantidade entre valores para pequenos intervalos (ISAAKS, 1989). Trabalho conduzido por Flora, Santi e Cortez (2021), obteve para ajuste do semivariograma da variabilidade espacial da produtividade de soja o modelo esférico. No entanto, Vieira et al. (2010) e Montanari et al. (2011) encontraram ajustes de semivariogramas exponencial quando estudaram produtividade da soja, o que indica que o modelo exponencial pode ser utilizado para explicar o comportamento espacial dessa variável.

O valor do alcance obtido para os modelos ajustados foi de 226,86 metros para a produtividade de soja no cultivo em sequeiro e 203,36 metros para a produtividade de soja no cultivo irrigado. Estes valores são superiores à menor distância entre pontos amostrais, que foi de 50 metros. Segundo Corá et al. (2004), o valor do alcance determina o número de valores usados na interpolação, portanto, podem influenciar na qualidade das estimativas. Desta forma, estimativas feitas com interpolação por krigagem ordinária utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade. Este fato pode ser verificado pelo RMSE obtido na análise de validação cruzada, uma vez que o RMSE fornece uma medida da magnitude média dos erros de previsão em relação às unidades da variável de interesse (quanto mais próximo de zero, mais preciso é o modelo). Neste estudo

foi observado RMSE de 0,001 no cultivo de sequeiro e 0,0001 no cultivo irrigado, indicando boa precisão nas predições de valores em locais não amostrados.

3.4. MAPEAMENTO DO NDVI

Na Figura 6 são apresentados os mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDVI na área de sequeiro e na Figura 7, para a área irrigada. Ao longo do ciclo da cultura nem todas as imagens puderam ser representativas, uma vez que a presença de nuvens impede a utilização de algumas para validação.

Foi observado que os valores de NDVI variam em função do desenvolvimento da cultura, sendo que valores próximos de 0 puderam ser identificados nas fases iniciais de desenvolvimento, em virtude da presença de uma baixa área foliar que, conseqüentemente, remete a uma baixa reflectância, o que pode ser observado nas imagens dos dias 13/11/20 a 23/11/20, apresentando uma coloração em tons mais avermelhados. Os maiores valores do NDVI foram obtidos entre 93 a 123 dias após sementeira, representado pelas imagens dos dias 06/02/21 a 08/03/21, em que possivelmente a cultura estava no estágio reprodutivo, estágio em que a planta possui uma elevada atividade fotossintética, conforme observado por Rodrigues et al. (2013) ao avaliarem a mesma cultivar.

Vale ressaltar que nos dias 16/02/21 (área de sequeiro) e 22/01/21 (área irrigada) é possível observar a presença de nuvens subestimando os valores do índice. Nas imagens dos dias 02/04/2021 a 07/04/21 percebe-se uma queda nos valores de NDVI, indicando o início do processo de maturação e senescência, os quais as folhas absorvem mais no infravermelho próximo, refletindo menor quantidade de energia nesta região do espectro, e maior quantidade na região do visível (SILVA, 2006).

Figura 6 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDVI na área de sequeiro.

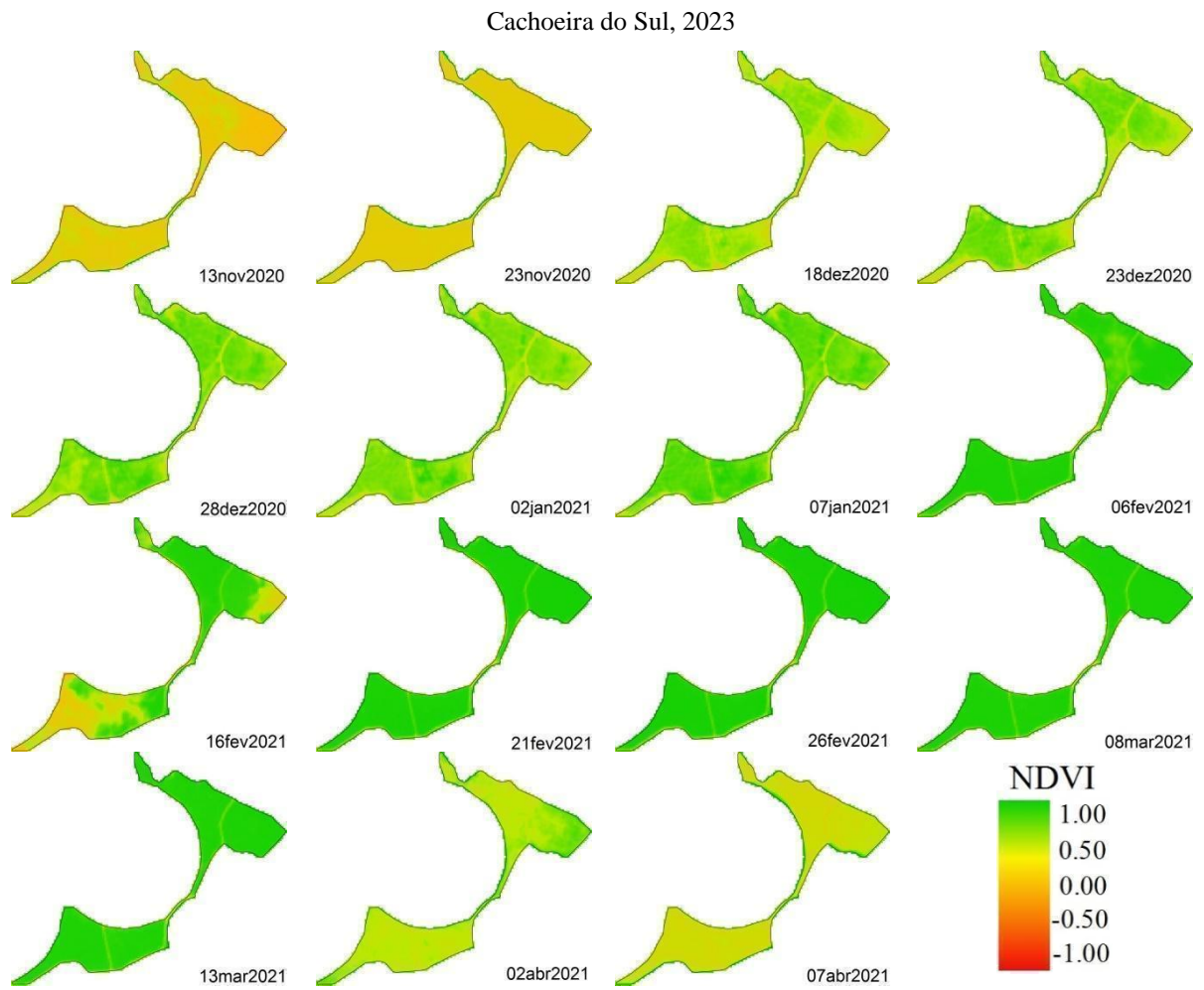
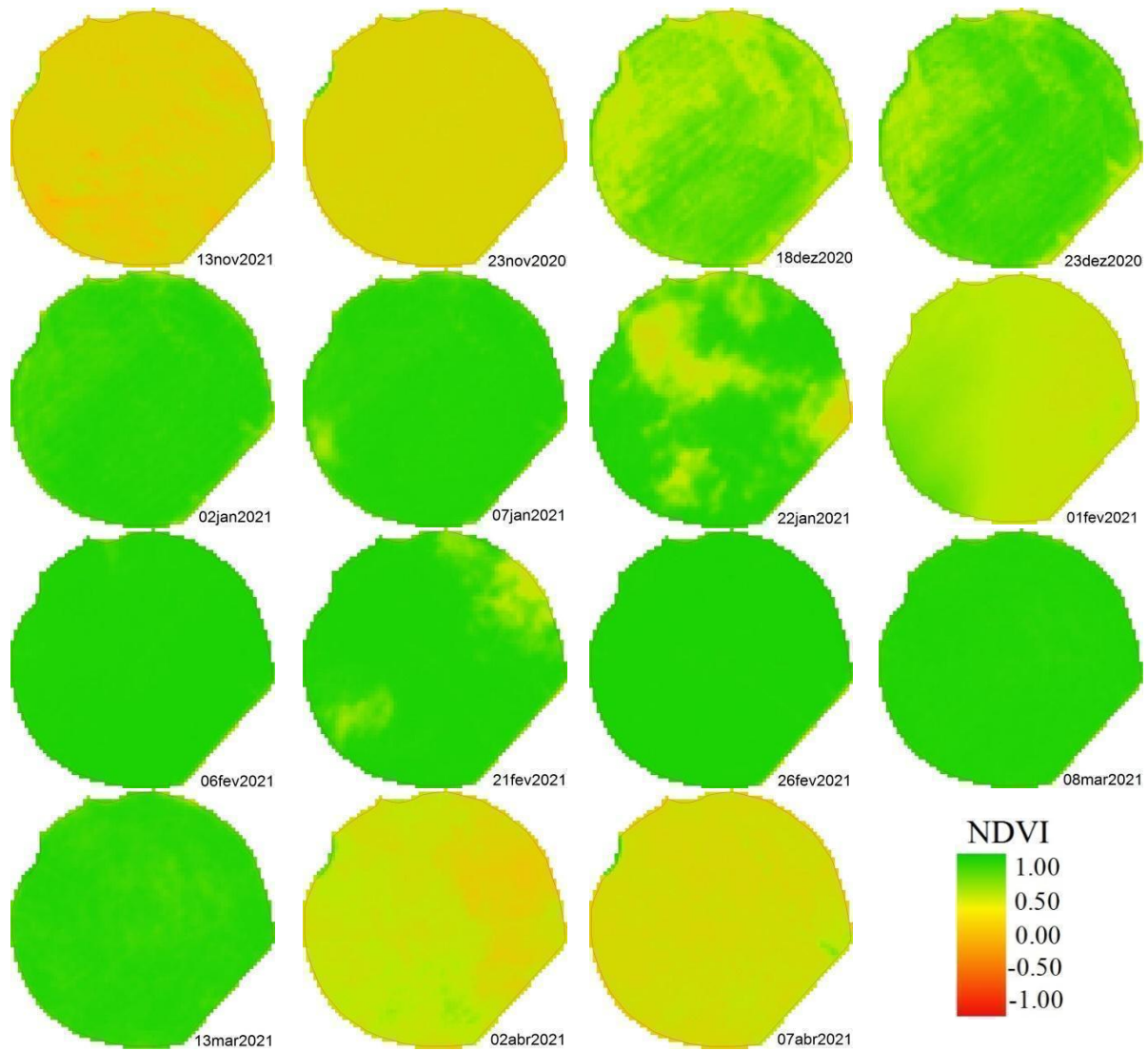


Figura 7 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDVI na área irrigada.
Cachoeira do Sul, 2023



3.5. MAPEAMENTO DO NDMI

Na Figura 8 são apresentados os mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDMI na área de sequeiro e na Figura 9, as variações para a área irrigada. O índice infere a quantidade de moléculas de água líquida nas copas das plantas que interagem com a radiação solar. Com base nisso, é possível perceber que menores valores são encontrados nas fases iniciais, devido ao porte da cultura, que tende a apresentar uma coloração azul claro. Comportamento semelhante pode ser observado por Monteiro et al. (2012), o qual os baixos valores são justificados pela baixa quantidade de biomassa, predominância de restos culturais e presença de solo exposto. Nas fases finais da cultura, ou seja, quando a planta entra

em estado de senescência essa coloração mais clara também pode ser vista já que o conteúdo de águas nos tecidos diminui.

Analisando as duas áreas (sequeiro e irrigado), não é possível identificar diferença entre as imagens dos dias 13/11/20 ao dia 23/12/20. Já nas imagens a partir do dia 02/01/21 até o dia 13/03/21 é possível perceber que na área irrigada a tonalidade azul forte é mais incidente e constante do que na área em sequeiro, indicando a presença de maior uniformidade da umidade na área. A interpretação do NDMI requer alguma experiência, pois é um índice de umidade significativo apenas quando a vegetação é dominante, ao passo que fornece valores negativos para solo nu e corpos d'água, de modo que, quando a cobertura do dossel é baixa, o resultado é uma combinação ponderada de valores adequados de solo e vegetação (DAS et al., 2022).

Figura 8 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDMI na área de sequeiro.

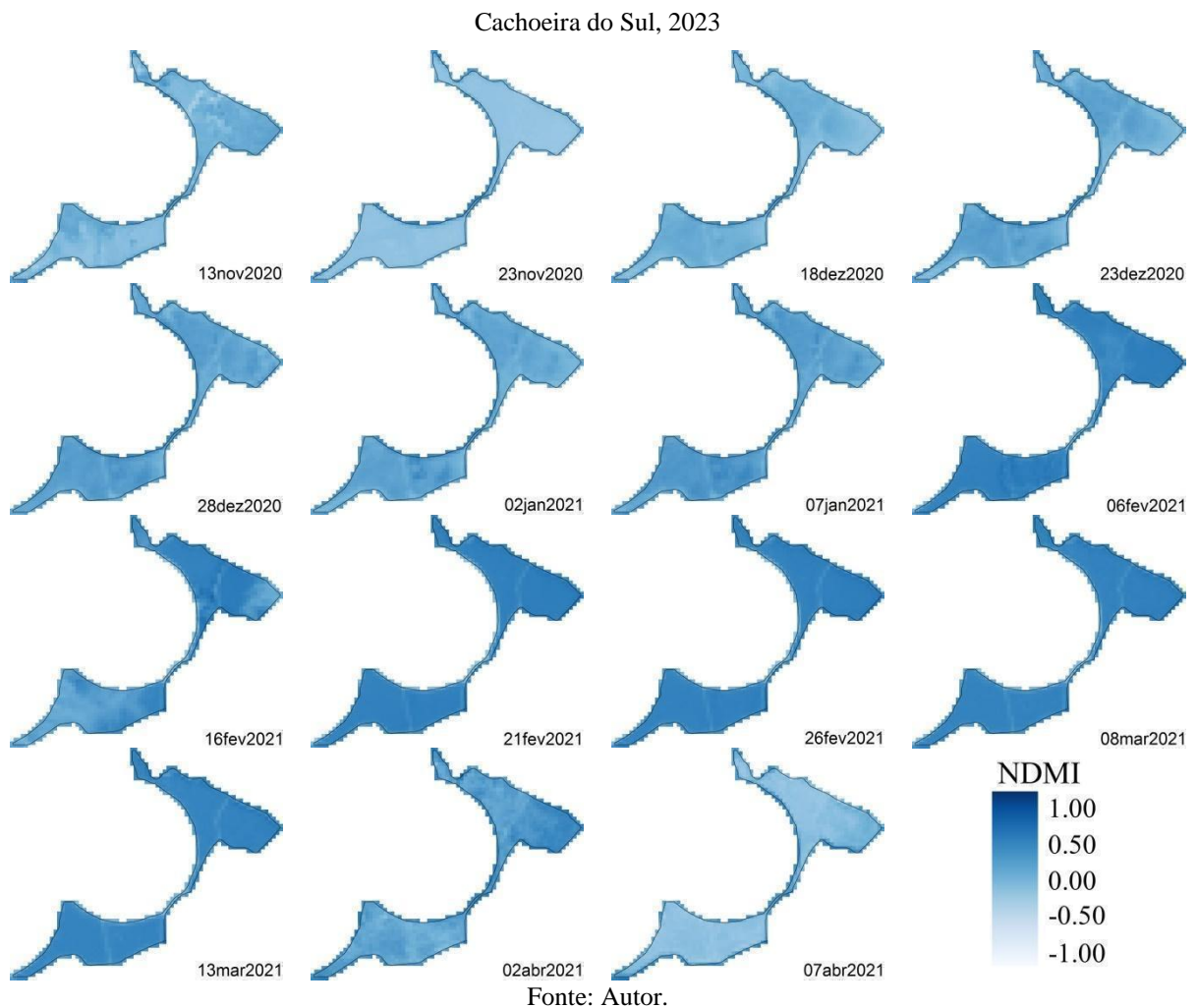
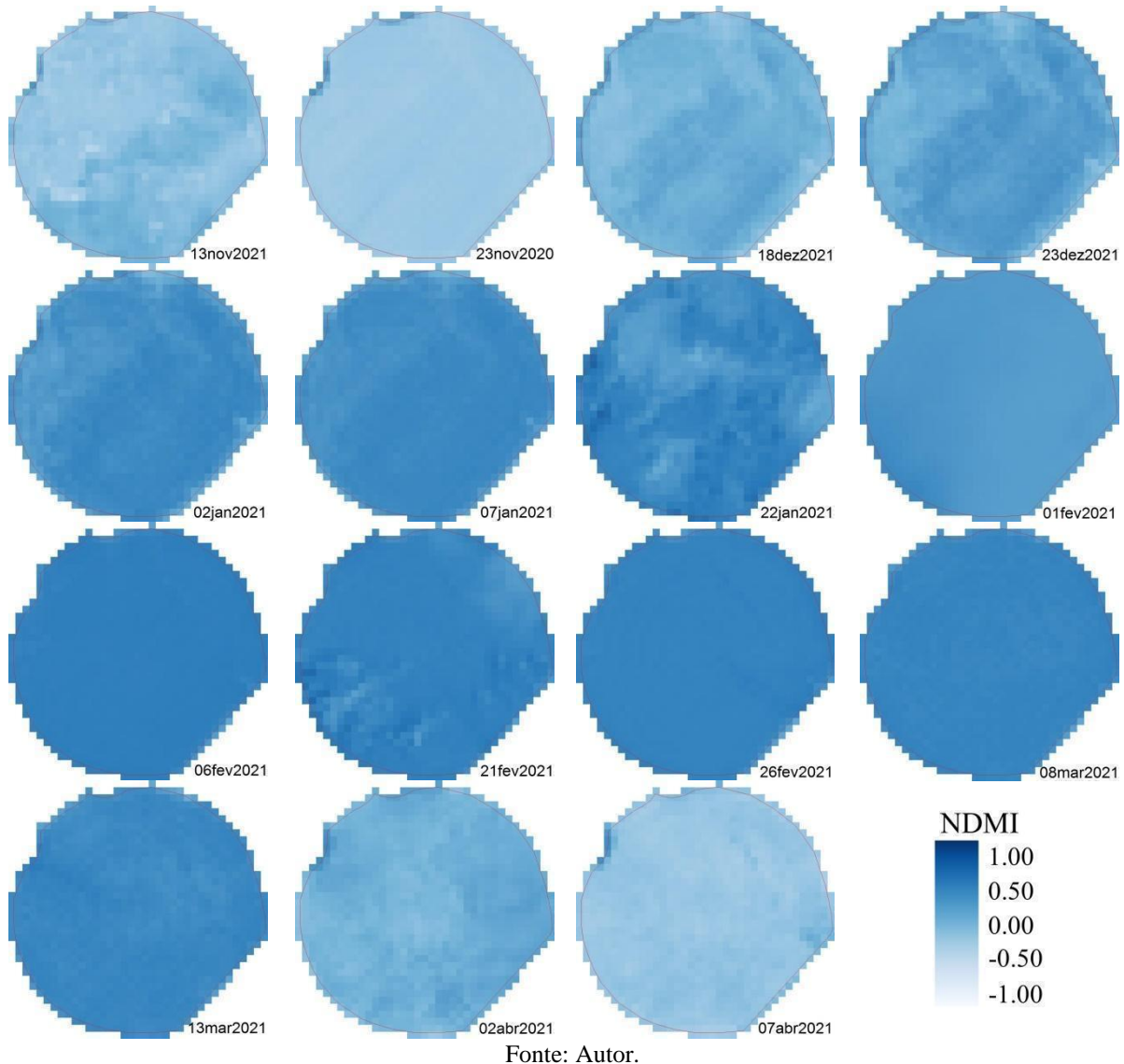


Figura 9 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDMI na área irrigada.
Cachoeira do Sul, 2023



3.6. MAPEAMENTO DO NDRE

Na Figura 10 são apresentados os mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDRE na área de sequeiro e na Figura 11 para a área irrigada. O índice mede a atividade da clorofila presente nas folhas, semelhante ao NDVI, porém ele utiliza a banda da borda do vermelho (Red-Edge). Essa banda está entre o vermelho visível e o infravermelho próximo, sendo mais sensível para a identificação de estresse vegetativo. Além disso, ele consegue fornecer uma visão melhor das culturas por ser capaz de medir mais abaixo

do dossel, além de não saturar o mapa do mesmo modo que o NDVI, conforme também observado por Taipale (2018).

De acordo com as imagens, verifica-se que no período de 13/11/20 ao dia 07/12/20 na área em sequeiro, os valores obtidos são menores do que na área irrigada, devido a presença de água que favorece o desenvolvimento melhor da cultura. Já nos dias entre 06/02/21 a 08/03/21, em ambas as áreas, os valores de NDRE ficam próximo de +1 indicando uma boa atividade fotossintética, possivelmente resultado da precipitação que aconteceu no período inicial do mês de fevereiro que influenciou diretamente. Vale ressaltar que no dia 16/02/21, na área sequeiro, e nos dias 22/01/21 e 21/02/22, na área irrigada, a presença de nuvens interfere na consistência dos dados. Por fim, nos dias 02/04/21 a 07/04/21 é possível identificar valores menores de NDRE, em ambas as áreas, indicando que as plantas estão entrando na fase de senescência, obedecendo o mesmo comportamento dos demais índices.

Figura 10 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDRE na área de sequeiro.

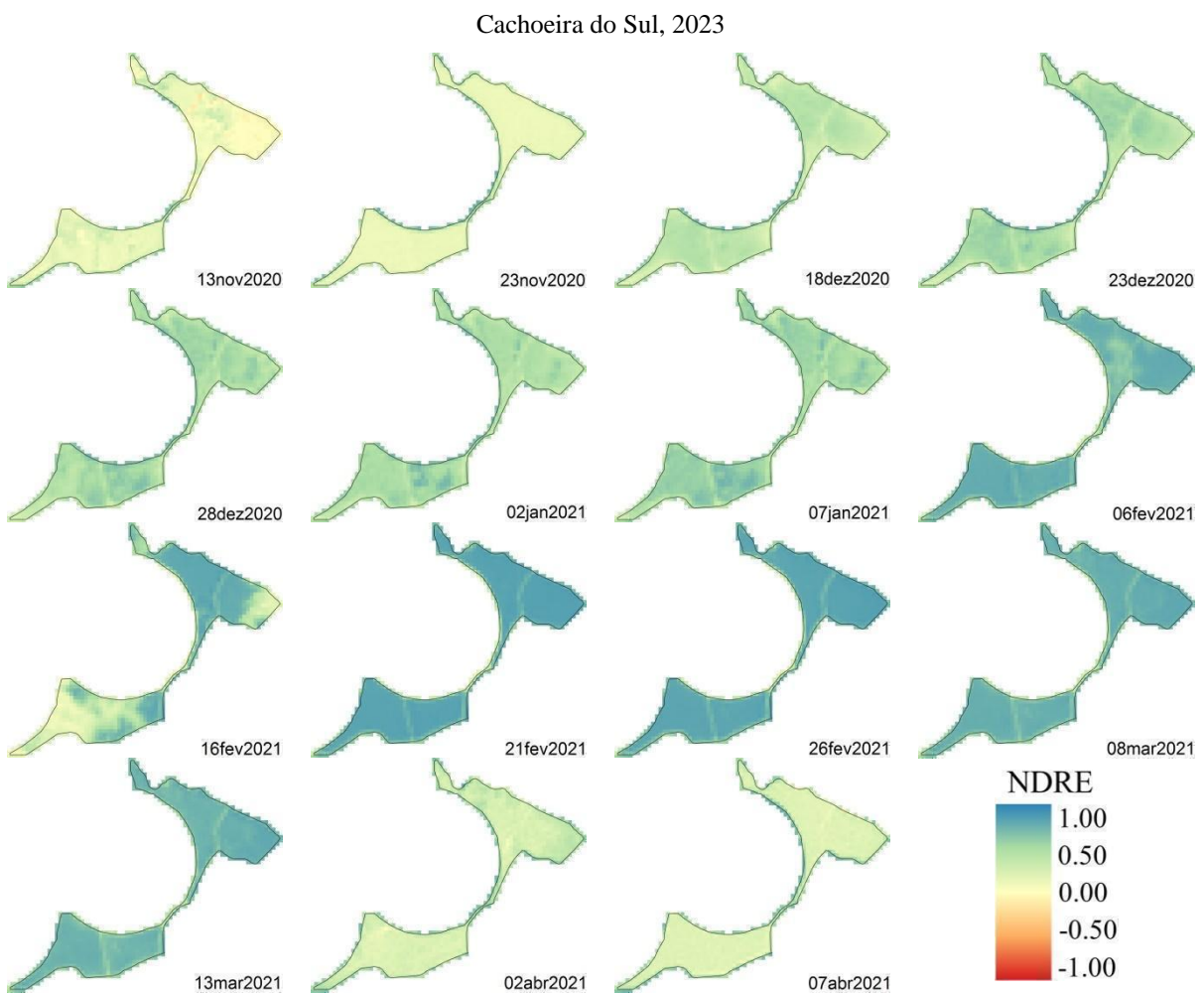
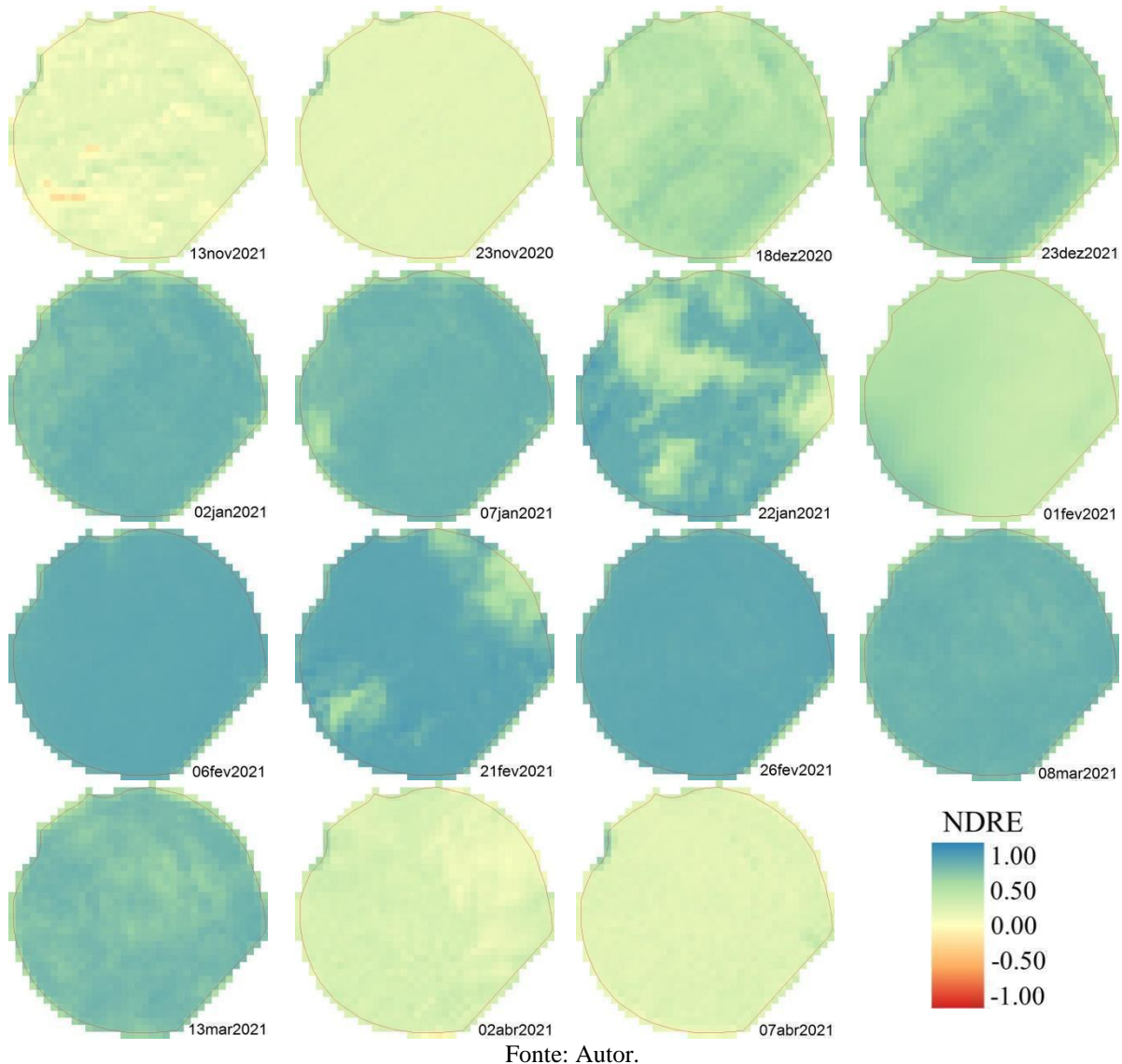


Figura 11 – Mapas temáticos representativos das variações espaciais e temporais do NDRE na área irrigada.
Cachoeira do Sul, 2023



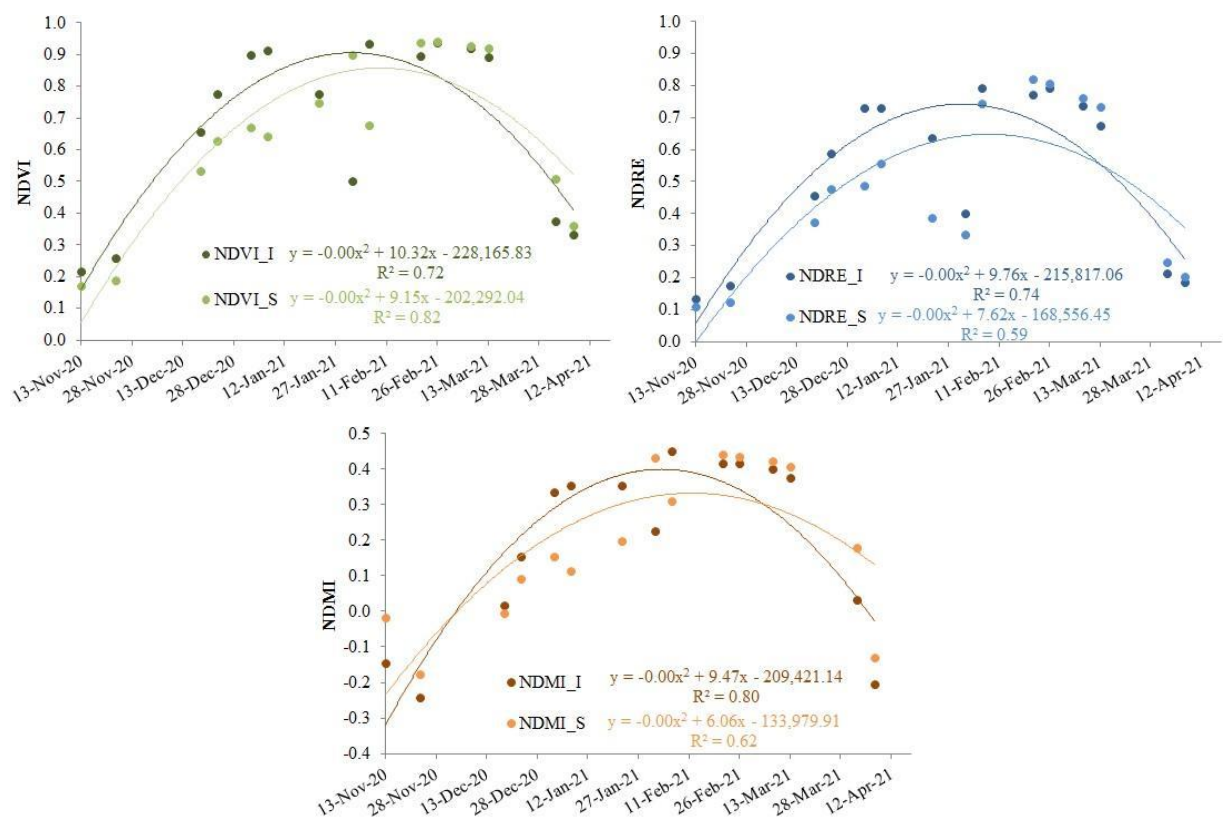
3.7. COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO AO LONGO CICLO DA CULTURA

Na Figura 12 são apresentados os gráficos do comportamento médio do NDVI, NDMI e NDRE na área de sequeiro e na área irrigada, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Foi observado que, até a data de 21 de fevereiro, os maiores valores médios, para os índices de vegetação estudados, foram computados para a área irrigada, a partir desta data o comportamento dos índices se inverteu, sendo os maiores valores médios observados para a área de sequeiro.

Este comportamento pode estar associado ao déficit hídrico observado para os meses de novembro e dezembro de 2020 (Figura 3), o que pode ter retardado o desenvolvimento da soja no sequeiro e ocasionado retenção foliar. Retenção foliar é um distúrbio fisiológico na maturação produzido por qualquer fator que interfira, negativamente, no estabelecimento das vagens ou dos grãos ou, ainda, no enchimento desses grãos (NEUMAIER et al., 2000). Segundo Embrapa Soja (2003), a retenção foliar da soja, é, quase sempre, consequência de distúrbios fisiológicos que interferem na formação ou no enchimento de grãos, podendo ser resultante do estresse hídrico (falta ou excesso).

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo a máxima demanda durante a floração – enchimento de grãos (7 – 8 mm dia¹), decrescendo após esse período (FEHR; CAVINESS, 1977). Com as chuvas de janeiro, a cultura retomou seu desenvolvimento até o final do ciclo, refletindo nos índices de vegetação.

Figura 12 – Valores médios dos índices de vegetação NDVI, NDRE e NDMI nos cultivos de sequeiro (S) e irrigado (I), durante o ciclo da cultura da soja. Cachoeira do Sul, 2023



Fonte: Autor.

3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Na Tabela 1 é apresentado o resultado da análise estatística descritiva da produtividade de soja (PRDsoja, kg ha⁻¹), NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo da soja em sequeiro e irrigado por pivô central. O valor médio, para todas as variáveis estudadas, apresentou-se maior para o cultivo irrigado quando comparado ao cultivo em sequeiro. Os menores coeficientes de variação (CV%) foram observados para os índices de vegetação calculados para o cultivo irrigado, indicando que, neste cultivo, houve menor dispersão relativa do conjunto de dados, ou seja, maior homogeneidade no desenvolvimento da cultura, provavelmente justificada pelo suprimento hídrico via irrigação, em períodos de déficit de água.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores de produtividade de soja (kg ha⁻¹) e dos índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo em sequeiro e irrigado. Cachoeira do Sul, 2023.

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
Cultivo em sequeiro					
PRDsoja (kg ha ⁻¹)	3588,46	4405,72	4998,06	268,11	6,09
NDVI	0,00	0,65	0,96	0,06	9,14
NDMI	-0,25	0,19	0,57	0,04	18,66
NDRE	-0,09	0,50	0,86	0,05	10,78
Cultivo irrigado					
PRDsoja (kg ha ⁻¹)	3960,45	4636,93	5398,82	340,07	7,33
NDVI	0,02	0,69	0,95	0,05	7,13
NDMI	-0,34	0,20	0,51	0,03	16,31
NDRE	-0,18	0,53	0,83	0,04	7,50

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a produtividade de soja e os índices de vegetação, para as diferentes datas de desenvolvimento da cultura da soja, cultivada em área de sequeiro.

Tabela 2 – Análise de correlação de Pearson entre os valores de produtividade de soja (kg ha^{-1}) e os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo em sequeiro. Cachoeira do Sul, 2023.

NDVI	PRDsoja	NDMI	PRDsoja	NDRE	PRDsoja
13nov2020	-0,06	13nov2020	-0,02	13nov2020	-0,02
23nov2020	-0,58*	23nov2020	-0,37*	23nov2020	-0,54*
18dez2020	0,57*	18dez2020	0,43*	18dez2020	0,53*
23dez2020	0,54*	23dez2020	0,47*	23dez2020	0,54*
28dez2020	0,24*	28dez2020	0,26*	28dez2020	0,23*
02jan2021	0,29*	02jan2021	0,22*	02jan2021	0,20
07jan2021	0,30*	07jan2021	0,27*	07jan2021	0,27*
06fev2021	0,00	06fev2021	0,06	06fev2021	0,07
16fev2021	-0,28*	16fev2021	-0,20	16fev2021	-0,26*
21fev2021	0,26*	21fev2021	0,06	21fev2021	0,29*
26fev2021	0,20	26fev2021	-0,01	26fev2021	0,26*
08mar2021	0,20	08mar2021	0,18	08mar2021	0,37*
13mar2021	0,21	13mar2021	0,16	13mar2021	0,26*
02abr2021	-0,12	02abr2021	-0,09	02abr2021	-0,42*
07abr2021	-0,30*	07abr2021	-0,25*	07abr2021	-0,40*

*Coeficiente de correlação de Pearson significativo a 5% de probabilidade.

Quanto mais próximo dos extremos -1 e +1 mais forte a correlação de Pearson, ou seja, maior o grau de relacionamento entre as duas variáveis. A correlação positiva representa que os valores altos de uma variável correspondem a valores altos da outra variável, e a correlação negativa representa que valores altos de uma das variáveis correspondem a valores baixos de outra.

Coefficientes de correlação significativos entre o NDVI e a produtividade de soja foram obtidos em 9 das 15 datas estudadas. Para as correlações entre o NDMI e o NDRE com a produtividade de soja, foram obtidos coeficientes significativos em 7 e 12 datas, respectivamente, para as 15 datas estudadas. Entre esses valores significativos, para o NDVI e o NDMI, os meses de novembro de 2020 a janeiro de 2021 corresponderam à predominância desses eventos significativos, numa proporção de 6 para 7 eventos. Enquanto para o índice NDRE, sua predominância de eventos significativos se deu tanto no início, de novembro a dezembro, quanto a partir do mês de fevereiro de 2021.

Em relação ao valor da variável, os maiores coeficientes de correlação (negativo e positivo) entre os índices e a produtividade, ocorreram nas datas 23 de novembro, 18 e 23 de dezembro de 2020, os quais, de acordo com a classificação proposta por Callegari Jacques (2007), são regulares, pois se situam na faixa entre 0,30 e 0,60. Em 23 de novembro de 2020 foi observado o coeficiente de correlação da produtividade com NDVI no valor de -0,58, com o NDMI no valor de -0,37 e com o NDRE de -0,54, constituindo os menores valores negativos.

O maior coeficiente de correlação significativo positivo da produtividade da soja com o NDVI foi observado para 18 de dezembro de 2020, com valor de 0,57. Já para o NDMI e NDRE, 23 de dezembro de 2020, sendo os valores de 0,47 e 0,54, respectivamente.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a produtividade de soja e os índices de vegetação, para as diferentes datas de desenvolvimento da cultura da soja, cultivada em área irrigada.

Tabela 3 – Análise de correlação de Pearson entre os valores de produtividade de soja (kg ha⁻¹) e os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE para o cultivo irrigado. Cachoeira do Sul, 2023.

NDVI	PRDsoja	NDMI	PRDsoja	NDRE	PRDsoja
13nov2020	-0,14	13nov2020	0,02	13nov2020	-0,17
23nov2020	0,19	23nov2020	0,03	23nov2020	0,02
18dez2020	0,34*	18dez2020	0,23*	18dez2020	0,28*
23dez2020	0,22*	23dez2020	0,18	23dez2020	0,18
02jan2021	0,21*	02jan2021	0,17	02jan2021	0,17
07jan2021	0,11	07jan2021	0,21*	07jan2021	0,16
22jan2021	-0,09	22jan2021	-0,06	22jan2021	-0,08
01fev2021	0,14	01fev2021	0,15	01fev2021	0,14
06fev2021	0,06	06fev2021	0,07	06fev2021	0,15
21fev2021	-0,13	21fev2021	-0,13	21fev2021	-0,13
26fev2021	0,03	26fev2021	-0,03	26fev2021	0,39*
08mar2021	0,52*	08mar2021	0,34*	08mar2021	0,56*
13mar2021	0,60*	13mar2021	0,48*	13mar2021	0,63*
02abr2021	0,34*	02abr2021	0,08	02abr2021	0,12
07abr2021	0,50*	07abr2021	0,45*	07abr2021	0,22*

*Coeficiente de correlação de Pearson significativo a 5% de probabilidade.

No caso do NDVI houve significância em sete dos 15 períodos estudados, enquanto que no NDMI e no NDRE foi observado em cinco dos 15 períodos estudados, respectivamente. Destes valores significativos dos índices, foi observado um padrão de predominância de ocorrência em todos os índices no início do ciclo, no dia 18/12/2020, e no final, nos dias 08/03/2021 a 13/03/2021, períodos em que a cultura apresenta significativas mudanças na sua área foliar.

Os coeficientes de correlação obtidos foram todos positivos, sendo que os maiores valores ocorreram em 13/03/2021, 129 dias após a semeadura, nos valores de 0,60 para o NDVI, 0,48 para o NDMI e 0,63 para o NDRE.

Com base no resultado da análise de correlação de Pearson, apresentado nas Tabelas 2 e 3, foi observado que o maior número de coeficientes de correlação significativos fora obtido para a correlação entre os índices de vegetação estudados e a produtividade de soja em cultivo

de sequeiro, sendo observados índices de correlação negativos e significativos para o início de desenvolvimento da cultura, 18 dias após a semeadura. Não foi observada correlação negativa significativa entre os índices de vegetação estudados e a produtividade de soja obtida no cultivo irrigado, indicando, possivelmente, que neste sistema de cultivo a cultura apresentou um melhor estabelecimento do dossel de plantas e, conseqüentemente, maior aporte de biomassa.

4. CONCLUSÃO

Os índices de vegetação NDVI, NDMI e NDRE apresentaram variações espaciais nas áreas estudadas, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro.

Os maiores valores médios dos índices de vegetação estudados foram observados para a resposta espectral da cultura da soja em cultivo irrigado.

A produtividade da cultura da soja apresentou variabilidade espacial em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro, sendo no cultivo em sequeiro o valor mínimo observado de 3.588 kg ha⁻¹, máximo de 4.998 kg ha⁻¹ e médio de 4.405 kg ha⁻¹. Já na área irrigada o valor mínimo observado foi de 3.960 kg ha⁻¹, máximo de 5.398 kg ha⁻¹ e médio de 4.636 kg ha⁻¹.

Todos os índices de vegetação estudados apresentaram correlação espacial significativa com a variabilidade espacial na produtividade da cultura da soja, em cultivo irrigado e em cultivo em sequeiro.

No cultivo em sequeiro, o maior valor de correlação significativa foi positivo observado entre o NDVI e a produtividade de soja (0,57), ocorrendo 43 dias após a semeadura. Para os índices NDMI e NDRE, estes valores foram de 0,47 e 0,54 respectivamente, observados em 48 dias após a semeadura.

No cultivo irrigado, os maiores valores de correlação significativa também foram positivos, sendo os valores 0,60, 0,48 e 0,63 observados, respectivamente, para a correlação da produtividade com os índices NDVI, NDMI e NDRE, 128 dias após a semeadura.

REFERÊNCIAS

BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; RICHARDS, S. E.; COLAIZZI, P. D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSKI, M.; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R. J.; LI, H.; MORAN, M. S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. **In: PROCEEDINGS 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE**. Bloomington, 2000.

BELLOLI, T. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono de vegetação macrofítica a partir de dados espectrais e de campo, banhado grande, RS**. (2019). Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRASMAX. **Brasmax Compacta IPRO**. 2023. Disponível em: <https://www.brasmaxgenetica.com.br/cultivar-regiao-sul/?produto=4927>. Acesso em: 13 abr 2023.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2007. 255 p.

CORÁ, J. E. ; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Vol. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 08/04/2023.

CROP MONITORING. **Software de gestão agrícola**.. Disponível em: <https://crop-monitoring.eos.com/login>. Acesso em: 12/01/2023

DAS, P.B.; MUKUND, D.B.; SAROJ, K.B.; SUJOY, M.; BUDDOLLA, J.; SWARUP, S.; SANTA, R.J.; DIBYENDU, A.; SOUMIT, K. B.; KIRANMAY, S.; PRASHANT, K.S.; PUNEET, S.C. Shifting cultivation induced Burn area Dynamics using Ensemble Approach in Northeast India. **Trees, Forests and People**. New Delhi. jan. 2022.

EMATER, 2022. **Ascar divulga atualização da estimativa da safra de verão 2022/22**. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/emater-rs-ascar-divulga-atualizacao-da-estimativa-da-safra-de-verao-2022-23#:~:text=A%20soja%2C%20principal%20cultura%20em,6%2C88%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas>. Acesso em: 07/05/2023..

EMBRAPA SOJA. **Centro Nacional de Pesquisa de Soja, Tecnologias de Produção de Soja – Paraná 2004**. Londrina: Embrapa Soja, 218p, 2003.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. 353p. 2013.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da Soja. Londrina, **Embrapa Soja - Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2007.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Agriculture and Home Economics Experiment Station. Report Ames, Iowa State University, (Cooperative Extension Service, 80), p.11, 1977.

FLORA, D.P.D.; SANTI, A.L.; CORTEZ.; J.W.; Variabilidade espacial da produtividade da soja cultivada em cobertura vegetal do nabo forrageiro. **In: Congresso técnico científico de Engenharia e da Agronomia, 2021.**

GAO, B. C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257–266, 1996.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, M. A introduction to applied geostatistics. **Oxford Univ. Press**, New York, 1989.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2a. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.

MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P.; SPEKKEN, M. Methodology to filter out outliers in high spatial density data to improve maps reliability. **Sci. Agric.** v.79, n.1, e20200178, 2022.

MARTINS, J. D.; BOHRZ, I. S.; TURA, E. F.; FREDRICH, M.; VERONEZ, R. P.; KUNZ, G. A. Levantamento da área irrigada por pivô central no estado do Rio Grande do Sul. **Irriga**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 300, 2018.

MENEGATTI, L.A.A.; MOLIN, J.P. Remoção de erros Remoção de erros em mapas de produtividade em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 126-134, dez. 2003.

MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. da; STONE, L. F. Armazenamento de água em um Latossolo Vermelho distrófico no sistema integração agricultura pecuária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Efeito da água na agricultura: anais**. Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia: Embrapa Tabuleiro Costeiros, 2007. 1 CD-ROM.

MONTANARI, R.; LIMA, R. C.; BONINI, A. S.; MARQUES, L. S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M. P.; PAZ FERREIRO, J.; COSTA, N. R. Variabilidade dos atributos de um latossolo vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe**, Coruña, v. 36, p. 219 – 237, 2011.

MONTEIRO, P. F. C.; ANGULO FILHO, R.; XAVIER, A. C.; MONTEIRO, R. O. C. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 2, p. 87-94, 2012.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, J.A.; FARIAS, R.B.; OYA, T.: Estresses de ordem ecofisiológica. **In: Estresses em soja**, Passo Fundo, R.S, Embrapa Trigo, p.45-55, 2000.

NEW HOLLAND AGRICULTURE. **Agricultura de precisão**. 9p. Disponível em: https://assets.cnhindustrial.com/nhag/lar/pt-br/assets/PLM/Telas-PLM/NHAG_FOLHETO_COMPLETO.pdf. Acesso em: 17 jun 2022.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.d.; COELHO, A.L.d.F.; COSTA, M.M.; GRIFT, T. Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v.12, n.6: 1350, 2022.

PIERCE, Francis J.; NOWAK, Peter. **Aspects of Precision Agriculture**. Advances in Agronomy, 1999, v.67, p.1-85.

QGIS Development Team, 2020. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

RODRIGUES, S.P.; FONTANA, D.C.; MORAES, O.L.L.; ROBERTI, D.R. NDVI e fluxo de CO2 em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.95-104, 2013.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS: third erts-1 symposium nasa. **Ntrs - Nasa Technical Reports Server**. Washington Dc, p. 309-317. jan. 1974.

SILVA, P.R. **Técnicas de sensoriamento remoto e radiometria aplicadas a vinhedos em duas regiões do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SPEKKEN, M.; ANSELMINI, A.A.; MOLIN, J.P. A simple method for filtering spatial data. **Precision Agriculture** '13, p. 259-266, 24 abr. 2013. Wageningen Academic Publishers. <http://dx.doi.org/10.3920/978-90-8686-778-3>.

TAIPALE, E. **NDVI vs. NDRE: What's the Difference?** 2018. Disponível em: <<https://sentra.com/ndvi-vs-ndre-whats-difference/>>. Acesso em: 28 de jul. de 2023.

VEGA, A.; CÓRDOBA, M.; CASTRO-FRANCO, M. BALZARINI, M. Protocol for automating error removal from yield maps. **Precision Agriculture**, p. 1-15, 2019.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI, D.R.; BURROWS, I. Mapeamento das precipitações máximas prováveis para o estado de São Paulo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.1, p.93-98, 1991.

VIEIRA, S. R.; FILHO, O. G.; CHIBA, M. K.; MELLIS, E. V.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira Ciências Solo**, n. 34, p. 1503-1514, 2010.

WANG, Z.X.; LIU, C.; HUETE, A. From AVHRRNDVI to MODIS-EVI: **Advances in vegetation index research**. Acta Ecologica Sinica, v.23, n.5, p.979-988, 2003.