



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

DÉBORA CARBONELL MARTINS STOLZMANN

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE SECA NO NOROESTE DO RIO
GRANDE DO SUL E IMPACTOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE SOJA**

Porto Alegre

2022

DÉBORA CARBONELL MARTINS STOLZMANN

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE SECA NO NOROESTE DO RIO
GRANDE DO SUL E IMPACTOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE SOJA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Ruhoff

Coorientador: Leonardo Laipelt

Porto Alegre

2022

DÉBORA CARBONELL MARTINS STOLZMANN

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE SECA NO NOROESTE DO RIO
GRANDE DO SUL E IMPACTOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 06/05/2022 pela banca avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Anderson Luis Ruhoff – Orientador

.....

Leonardo Laipelt – Coorientador

.....

Prof^a. Dr^a. Denise Cybis Fontana – Faculdade de Agronomia

.....

Prof. Dr. Alfonso Risso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

.....

Msc. Bruno César Comini de Andrade – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Conceito:.....

RESUMO

Os eventos de seca ocorrem devido a combinação de diversos fatores hidrometeorológicos, como precipitação, armazenamento de água na bacia, temperatura da superfície e evapotranspiração, e apresentam efeitos ao meio ambiente e a sociedade. Entre esses efeitos está o impacto negativo causado às produções agrícolas. De forma a atender a demanda crescente por alimento, se faz necessário um melhor entendimento da ocorrência de eventos de secas que podem limitar a produção agrícola. Assim, é de fundamental importância a identificação e caracterização destes eventos de seca para monitorar e, quando possível, mitigar seus efeitos. Para isso, podem ser utilizadas variáveis hidrometeorológicas obtidas através de sensoriamento remoto. Nesse contexto, o presente trabalho busca identificar e caracterizar eventos extremos de seca que ocorreram na mesorregião Noroeste Rio-grandense do Estado do Rio Grande do Sul (2004/2005, 2011/2012 e 2021/2022) e que impactaram na produção agrícola da cultura de soja. Foram utilizados dados de sensoriamento remoto obtidos na plataforma Google Earth Engine para o período de janeiro de 2000 a fevereiro de 2022 e dados de produção agrícola obtidos no banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o intervalo de 2000 a 2020. As variáveis ambientais selecionadas para o estudo foram precipitação (CHIRPS), variação do armazenamento total de água (GRACE-FO), temperatura de superfície (MOD11), evapotranspiração (SSEBop) e índice de vegetação NDVI (MOD13). A partir dos dados obtidos foram verificados o padrão temporal das variáveis e como ele se modifica durante os eventos de seca, suas variações com relação à média temporal e a correlação entre cada uma delas e entre elas e a produção agrícola. Os resultados indicaram que o primeiro trimestre do ano apresenta as melhores correlações entre as variáveis hidrometeorológicas e a produção agrícola, com destaque para a temperatura de superfície e a evapotranspiração. Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o melhor entendimento da ocorrência de eventos de seca no noroeste do Rio Grande do Sul que podem limitar a produção agrícola.

Palavras-chave: seca; Rio Grande do Sul; agricultura; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Drought events occur due to the combination of several hydrometeorological factors, such as precipitation, water storage in the basin, surface temperature, and evapotranspiration, and have effects on the environment and society. Among these effects is the negative impact caused to agricultural production. To meet the growing demand for food, a better understanding of the occurrence of drought events that can limit agricultural production is necessary. Thus, it is of utmost importance to identify and characterize these drought events to monitor and, when possible, mitigate their effects. For that, hydrometeorological variables obtained through remote sensing can be used. In this context, the present work seeks to identify and characterize extreme drought events that occurred in the Northwest mesoregion of the State of Rio Grande do Sul (2004/2005, 2011/2012 and 2021/2022) and that impacted the agricultural production of the soybean crop. The data used included remote sensing data obtained from the Google Earth Engine platform for the period ranging from January 2000 to February 2022 and agricultural production data obtained through the database of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) for the interval from 2000 to 2020. The environmental variables selected for the study were precipitation (CHIRPS), total water storage change (GRACE-FO), surface temperature (MOD11), evapotranspiration (SSEBop) and NDVI vegetation index (MOD13). From the data obtained, the temporal pattern of the variables and how it changes during drought events, their variations with respect to the temporal average and the correlation between each of them and between them and agricultural production were verified. The results indicated that the first quarter of the year has the best correlations between hydrometeorological variables and crop production, with highlight on surface temperature and evapotranspiration. The results obtained are expected to contribute to a better understanding of the occurrence of drought events in northwestern Rio Grande do Sul that may limit agricultural production.

Keywords: drought; Rio Grande do Sul; agriculture; remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Calendário agrícola de cultivo (verde) e de colheita (laranja) da soja no Estado do Rio Grande do Sul.....	16
Figura 2 - Presença da cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul.....	26
Figura 3 - Mesorregiões do Estado do Rio Grande do Sul, com destaque para o Noroeste Rio-grandense.	27
Figura 4 - Padrões temporais das variáveis na mesorregião Noroeste Rio-grandense no período de 2000 a 2022, com eventos de seca identificados. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	33
Figura 5 - Anomalias para a mesorregião Noroeste Rio-grandense no período de 2000 a 2022, com destaque para os eventos de seca. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	36
Figura 6 - Coeficiente de correlação de Pearson entre os valores absolutos das variáveis de sensoriamento remoto na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2003 a 2021.	39
Figura 7 - Produção agrícola anual na mesorregião Noroeste Rio-grandense, para as safras de 1999/2000 a 2020/2021.	40
Figura 8 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre os valores absolutos das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020.	41
Figura 9 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e as anomalias da produção agrícola na área de estudo, no período de 2000 a 2020.	42
Figura 10 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020.	42
Figura 11 - Previsão da produção agrícola da safra 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense, com faixa de valores prováveis estimados.....	45

Figura 12 - Anomalias das variáveis na mesorregião Noroeste Rio-grandense com foco no período de 2021 a 2022. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	46
Figura 13 - Correlação por trimestre entre valores absolutos das variáveis ambientais e da produção agrícola na área de estudo, de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	63
Figura 14 - Correlação por trimestre entre anomalias das variáveis ambientais e da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	64
Figura 15 - Correlação por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese das informações dos produtos utilizados.....	28
Tabela 2 - Produções estimadas a partir das variáveis ambientais para a safra 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. SECA	13
3.2. RIO GRANDE DO SUL	15
3.2.1. Agricultura no Rio Grande do Sul	15
3.2.2. Clima no Rio Grande do Sul	16
3.2.3. Ocorrência de secas no Rio Grande do Sul	17
3.3. IMPACTOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DO RIO GRANDE DO SUL ...	18
3.4. MONITORAMENTO DE EVENTOS DE SECA POR SENSORIAMENTO REMOTO	18
3.4.1. Temperatura de superfície	20
3.4.2. Precipitação	20
3.4.3. Variação do armazenamento total de água	22
3.4.4. Evapotranspiração	23
3.4.5. Índices de vegetação	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1. ÁREA DE ESTUDO	25
4.2. CONJUNTO DE DADOS UTILIZADO	27
4.3. MÉTODOS	29
4.3.1. Padrão temporal das variáveis ambientais no tempo	29
4.3.2. Anomalias das variáveis ambientais e eventos de seca	29

4.3.3.	Correlação entre variáveis	30
4.3.4.	Normalização da produção agrícola	30
4.3.5.	Correlação entre variáveis ambientais e produção agrícola.....	31
4.3.6.	Estimativa da safra 2020/2021 para a área de estudo	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1.	PADRÃO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NO TEMPO	33
5.2.	ANOMALIAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E EVENTOS DE SECA ...	36
5.3.	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS	38
5.4.	PRODUÇÃO AGRÍCOLA ANUAL NA ÁREA DE ESTUDO	40
5.5.	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PRODUÇÃO AGRÍCOLA	40
5.6.	ESTIMATIVA DA SAFRA 2020/2021 PARA A ÁREA DE ESTUDO	44
5.7.	EVENTO DE SECA DO ANO DE 2021/2022	46
5.8.	DISCUSSÃO	49
6.	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICE A - GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PRODUÇÃO AGRÍCOLA	63

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos são fenômenos naturais definidos pela sua intensidade e/ou duração. Eles são responsáveis por expressivos danos e perdas de caráter ambiental, econômico e social, possuindo um impacto profundo na sociedade e afetando consideravelmente a segurança humana, o abastecimento de água, a produção de alimentos e a geração de energia (GETIRANA, 2016). O mais complexo, mas menos compreendido, de todos os desastres naturais é a seca, afetando mais pessoas do que qualquer outro desastre (HAGMAN, 1984). Assim, a seca pode ser definida como um desastre natural complexo que afeta os ecossistemas e a sociedade de diversos modos (VAN LOON, 2015), representando uma ameaça à segurança hídrica e alimentar, além de poder levar a riscos econômicos (KIEM *et al.*, 2016; VOGT *et al.*, 2018).

A seca é a consequência de uma redução natural da quantidade de precipitação recebida ao longo de um período de tempo, embora outros fatores climáticos estejam frequentemente associados a ela e possam agravar significativamente a severidade do evento (WILHITE, 2000). No Brasil, de 2017 a 2020, aproximadamente 89 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens, correspondendo a cerca de 15 vezes mais que por cheias (ANA, 2021). Entre as consequências dos eventos de seca estão os impactos ao setor agrícola, ocasionando a perda de produção visto que, mesmo com o avanço tecnológico, a agricultura depende fortemente das condições climáticas e meteorológicas.

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) tem como um pilar da sua economia o setor agropecuário, apresentando uma contribuição considerável na produção de soja no cenário nacional (RIO GRANDE DO SUL, 2021; IBGE, 2017a). Ocorrências de eventos de seca são reportadas no Estado apesar da distribuição equilibrada de chuvas o ano inteiro e provocam impactos no setor agrícola e, consequentemente, na economia gaúcha.

Como forma de analisar os impactos desses eventos extremos, além da possibilidade de antever novas ocorrências, podem ser utilizados recursos para o monitoramento de variáveis ambientais, como o sensoriamento remoto. Produtos

provenientes de imagens de satélites permitem a obtenção de informações de objetos da superfície terrestre sem que seja necessário o contato direto com eles (MORAES, 2002), além de ser facilmente acessíveis através de plataformas online, como o Google Earth Engine (GEE).

Assim, este trabalho busca investigar o padrão temporal de eventos extremos de seca ocorridos no RS e os seus impactos na safra agrícola a partir da análise de variáveis ambientais obtidas por meio de sensoriamento remoto e de dados de produção agrícola. Dessa forma, espera-se verificar a correlação entre as variáveis ambientais observadas durante os eventos de seca e os impactos na safra agrícola.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho consiste em analisar os impactos de secas na produção agrícola do Estado do Rio Grande do Sul através do uso de produtos de sensoriamento remoto e dados de produção agrícola.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, busca-se:

- Verificar o padrão temporal de cada variável obtida por produto de sensoriamento remoto na mesorregião geográfica Noroeste Rio-grandense e como esse padrão se modifica durante eventos de seca;
- Estabelecer correlações entre as variáveis ambientais, através da comparação das suas respostas obtidas pelos produtos de sensoriamento remoto; e
- Determinar a correlação entre as variáveis ambientais e a produção agrícola da soja para a mesorregião geográfica Noroeste Rio-grandense.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SECA

De acordo com Hagman (1984), a seca é considerada como o mais complexo, mas menos compreendido, de todos os perigos naturais, afetando mais pessoas do que qualquer outro perigo. A seca é uma característica normal do clima e a sua recorrência, como qualquer outro evento extremo, é inevitável. Secas normalmente requerem um mínimo de dois a três meses para se estabelecer, podendo perdurar por meses ou anos, apesar de seu início e seu fim serem de difícil determinação (WILHITE, 2000). Segundo Van Loon (2015), os eventos de seca se desenvolvem lentamente e, muitas vezes, despercebidos e têm consequências diversas e indiretas.

A seca ocorre em praticamente todos os regimes climáticos, sejam eles de alta ou de baixa pluviosidade. É um evento temporário em comparação com a aridez, que é uma característica permanente do clima e restrita a áreas de baixa pluviosidade (WILHITE, 2000). Além disso, é consequência de uma redução natural da quantidade de precipitação recebida ao longo de um período de tempo e sua severidade não depende apenas da duração, intensidade e extensão geográfica de um episódio específico de seca, mas também das demandas das atividades humanas e da vegetação sobre o abastecimento de água de uma região (WILHITE, 2000). A natureza da seca é regional, refletindo características meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e socioeconômicas únicas (WILHITE, 1993).

Existem quatro tipos distintos de secas, diferenciados por Wilhite (2000), e que, de acordo com a descrição de Fernandes *et al.* (2009), podem ser vistos como estágios subsequentes:

- Seca meteorológica: déficit da precipitação (< 70-75%) em relação ao normal esperado, sendo considerada específica de uma região;
- Seca agrícola: deficiências na umidade do solo associadas à disponibilidade de água no solo para fins agrícolas, como crescimento e desenvolvimento da planta;

- Seca hidrológica: redução nas reservas hídricas superficiais e subterrâneas, estando, normalmente, defasado das secas meteorológica e agrícola; e
- Seca socioeconômica: impactos diretos e indiretos da seca sobre as atividades humanas, produzindo danos sociais, ambientais e econômicos.

Com base nessa classificação, pode-se inferir que a dimensão e a gravidade dos impactos do evento de seca são dependentes da extensão e duração da seca meteorológica (FERNANDES, 2009).

Ainda, de acordo com Wilhite (2000), os eventos de seca podem ser um gatilho natural significativo para a fome devido a perturbação de sistemas de produção de alimentos. Chen *et al.* (2019) afirma que a seca, se não for prevista e detectada em tempo hábil, é capaz de se desenvolver e se intensificar em um curto período de tempo e resultar em grandes perdas agrícolas.

O termo estiagem, por sua vez, é usado erroneamente como sinônimo de seca, apesar de não serem de fato (BINDA, 2020). De acordo com Castro *et al.* (2003), as estiagens são resultado da redução da precipitação, atraso de períodos chuvosos ou da ausência de chuvas previstas para um determinado período e, quando comparadas com as secas, são menos intensas e ocorrem por curtos períodos de tempo. Ainda na concepção de Castro *et al.* (2003), a seca, do ponto de vista meteorológico, é uma estiagem prolongada. Desse modo, os termos estiagem e seca podem ser diferenciados considerando-se dois aspectos: intensidade e duração do fenômeno (BINDA, 2020).

Conforme o Relatório Pleno da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021), as regiões mais críticas em termos de eventos de seca nos últimos três anos (2017-2020) são a Nordeste, Sudeste e Sul. Ainda, segundo o Relatório Pleno, aproximadamente 89 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil entre 2017 e 2020, sendo mais de 10 milhões de pessoas afetadas por esses eventos extremos somente no ano de 2020.

3.2. RIO GRANDE DO SUL

O Estado do Rio Grande do Sul está localizado no extremo sul do território brasileiro e possui uma área total de 281.707,15 km². Conta com uma população de 11.422.973 habitantes, aproximadamente 5,4% da população brasileira, sendo o quarto estado mais populoso do país (RIO GRANDE DO SUL, 2021).

O Rio Grande do Sul era dividido em 7 (sete) mesorregiões geográficas até o ano de 2017, sendo elas: Nordeste Rio-grandense; Noroeste Rio-grandense; Centro Ocidental Rio-grandense; Centro Oriental Rio-grandense; Metropolitana de Porto Alegre; Sudoeste Rio-grandense; e Sudeste Rio-grandense (PESSETI e GOMES, 2020, p. 68; IBGE, 1990). Essa classificação foi proposta no ano de 1990 (IBGE, 1990) pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Todavia, no ano de 2017, foi apresentada uma nova classificação regional pelo IBGE. Essa nova classificação regional agora divide o RS em 8 (oito) Regiões Geográficas Intermediárias, a saber: Porto Alegre; Pelotas; Santa Maria; Uruguaiana; Ijuí; Passo Fundo; Caxias do Sul; e Santa Cruz do Sul-Lajeado (PESSETI e GOMES, 2020, p. 68; IBGE, 2017c).

Para este trabalho, optou-se pela análise e interpretação dos dados a partir da classificação em mesorregiões geográficas, conforme proposto em 1990. Essa decisão se deve ao fato de que essa classificação foi muito utilizada em diferentes estudos desenvolvidos pela comunidade científica na época abrangida pelo trabalho (2000-2022), possibilitando a análise comparativa com outros estudos.

Segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2021), o Estado é a quarta economia do país pelo tamanho do Produto Interno Bruto (PIB), participando de 6,4% do PIB nacional. A economia gaúcha é impulsionada por dois setores principais: Agropecuária e Indústria de Transformação.

3.2.1. Agricultura no Rio Grande do Sul

O Rio Grande do Sul tem forte contribuição no setor agrícola do Brasil, especialmente na produção de soja. Conforme os resultados definitivos do Censo Agropecuário do IBGE (IBGE, 2017a), entre as unidades da Federação, o Estado é

o segundo maior produtor de soja em grão do Brasil, com uma contribuição em torno de 16% da produção nacional, superado apenas pelo Mato Grosso.

No âmbito do RS, a produção de soja se concentra principalmente ao Norte e Oeste do território gaúcho (IBGE, 2017a). A soja é uma cultura temporária de verão, conforme pode ser observado no calendário do cultivo agrícola no Rio Grande do Sul, apresentado na Figura 1. A época de cultivo, indicada em verde, se concentra nos meses finais do ano e a época de colheita, indicada em laranja, nos meses iniciais do ano.

Figura 1 - Calendário agrícola de cultivo (verde) e de colheita (laranja) da soja no Estado do Rio Grande do Sul.



(Fonte: adaptado de CONAB, 2022).

3.2.2. Clima no Rio Grande do Sul

O clima do Estado é Temperado do tipo Subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido (classificação de Köppen Cfa) (RIO GRANDE DO SUL, 2021). A sua posição geográfica, especificamente sua latitude, reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e atlântica. As temperaturas no RS apresentam grande variação sazonal, com verões quente e invernos bastante rigorosos, e as temperaturas médias variam entre 15 e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C.

As chuvas no Estado apresentam uma distribuição relativamente equilibrada ao longo de todo o ano. Contudo, o volume de chuvas é diferenciado no território. A precipitação média ao sul está entre 1.299 e 1.500 mm enquanto ao norte a média situa-se entre 1.500 e 1.800 mm, com maior intensidade de chuvas a nordeste do Estado (RIO GRANDE DO SUL, 2021).

3.2.3. Ocorrência de secas no Rio Grande do Sul

Apesar da distribuição equilibrada de chuvas o ano todo, o Estado do Rio Grande do Sul está sujeito a secas prolongadas e severas (MOTA *et al.*, 1992). A ocorrência de eventos extremos de secas no RS apresenta grande impacto na produção agrícola gaúcha. Segundo Anderson *et al.* (2016), a Região Sul do Brasil enfrentou eventos extremos de seca durante 2009 e 2012, causando grandes perdas para o setor agrícola. Ainda, um evento de seca severa impactou a produção agrícola no Estado na safra de 2004/2005.

Artigos de veículos de comunicação registraram a ocorrência desses eventos de seca no RS nos anos de 2005 (CIGANA, 2012; SCHAFFNER, 2022), 2009 (DIÁRIO GAÚCHO, 2009), 2012 (G1 RS, 2012; CIGANA, 2012) e 2022 (SCHAFFNER, 2022; DORNELLES, 2022). Conforme o Monitor de Secas do Brasil (ANA, 2019), 100% do território do Rio Grande do Sul esteve em situação de seca desde outubro de 2020. Além disso, em janeiro de 2022, 67% do território gaúcho se encontrava em situação de seca grave e 10% em situação de seca extrema.

Nedel, Sausen e Saito (2010) realizaram um zoneamento das secas ocorridas no RS entre 2003 e 2009, através das notificações de ocorrências (decretos) de seca emitidas pela Defesa Civil do RS. Os autores constataram que o verão é a estação do ano mais favorável para os eventos de seca no Estado, apresentando o maior número de ocorrências, e que as regiões mais afetadas se localizam ao Norte e Noroeste do território gaúcho. O estudo indicou, ainda, que nos anos de 2004, 2005 e 2009 ocorreram os episódios de seca mais intensos registrados.

Gross (2015) analisou ocorrências de estiagens e secas no Estado para o período de 1991 a 2012 e concluiu, da mesma forma que Nedel, Sausen e Saito (2010), que a época do ano em que são registrados mais decretos de situação de emergência é o verão. O estudo igualmente verificou que os anos com maiores ocorrências de seca foram 2004, 2005 e 2012. Ainda, foi observado que as regiões mais afetadas estão ao Oeste do RS.

3.3. IMPACTOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DO RIO GRANDE DO SUL

A economia gaúcha é dependente em grande parte do setor agrícola, tendo forte contribuição no cenário nacional. Contudo, eventos extremos de seca geram impactos na produção agrícola do Estado. De acordo com Lazzari (2005), a safra gaúcha de soja de 2004/2005 verificou uma redução de 54,4% no rendimento médio em relação à safra anterior.

Para o ano de 2012, o rendimento médio do grão de soja reduziu em 50% quando comparado com o ano de 2011 (IBGE, 2017b). Em relação à safra de 2021/2022 para o Estado do Rio Grande do Sul, a queda na produtividade da soja é inevitável e a quebra da safra poderá superar os 48% para o período de 2021/2022 em relação a 2020/2021 (CONAB, 2022).

Os eventos de seca têm o potencial de impactar o setor agrícola visto que, devido à redução da precipitação e ao aumento das perdas líquidas por evapotranspiração, as reservas hídricas de superfície e subsuperfície diminuem (CASTRO *et al.*, 2003). Conseqüentemente, a disponibilidade hídrica para o setor também diminui. Os impactos na agricultura podem ser sentidos principalmente quando falta umidade em momentos decisivos para o cultivo agrícola, como nos períodos de floração e enchimento de grãos (GROSS, 2015).

3.4. MONITORAMENTO DE EVENTOS DE SECA POR SENSORIAMENTO REMOTO

O termo sensoriamento remoto (SR) pode ser entendido como um conjunto de tarefas que permite a obtenção de informações de objetos da superfície terrestre sem que seja necessário o contato direto com eles. Essas tarefas incluem a detecção, aquisição, interpretação e extração de informações provindas da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. Essa energia eletromagnética é a base de dados para todo o processo de identificação dos objetos (MORAES, 2002).

Conforme indicado por Melesse *et al.* (2007), a grande vantagem de utilizar dados obtidos através de sensoriamento remoto é a possibilidade de aplicações e estudos em larga escala, por meio da geração de informações em uma ampla gama

de resoluções espaciais e temporais. Entretanto, segundo apontado por Liou e Kar (2014), uma limitação do uso do sensoriamento remoto para obtenção de dados é a aquisição simultânea de imagens de alta resolução temporal e espacial, já que satélites que fornecem imagens de alta resolução espacial geralmente possuem menor frequência temporal e vice-versa.

O uso de dados de sensoriamento remoto no mapeamento de recursos naturais e como fonte de dados de entrada para modelagem de processos ambientais tem se tornado cada vez mais popular (MELESSE *et al.*, 2007). Moraes (2002) afirmou que sensores remotos são ferramentas essenciais para a realização de inventários, mapeamento e monitoramento de recursos naturais.

Além de fornecer dados meteorológicos, abordagens baseadas em sensoriamento remoto também monitoram condições na superfície terrestre como, por exemplo, a saúde da vegetação e os níveis de água, fornecendo um conjunto diversificado de dados contextuais para o monitoramento da seca. Como resultado, o sensoriamento vem sendo uma alternativa viável para o monitoramento de variáveis-chave relacionadas à seca em escalas temporais e espaciais maiores do que era possível utilizando somente métodos convencionais (WEST; QUINN; HORSWELL, 2019).

Atualmente, vários produtos de sensoriamento remoto podem ser obtidos através de plataformas online. Um exemplo desse tipo de plataforma é o Google Earth Engine (GEE) que, conforme Gorelick *et al.* (2017), é uma plataforma baseada em nuvem que facilita o acesso a recursos de computação de alta performance para o processamento de conjuntos de dados geoespaciais. O catálogo de dados do GEE abriga um grande repositório de conjuntos de dados disponíveis ao público em geral, incluindo observações de uma variedade de satélites, variáveis ambientais, dados meteorológicos, cobertura do solo e conjuntos de dados topográficos e socioeconômicos (GORELICK *et al.*, 2017).

Entre os principais produtos de SR disponíveis para monitoramento de variáveis ambientais estão a temperatura de superfície, a precipitação, a variação do armazenamento total de água, a evapotranspiração e os índices de vegetação. Os itens a seguir descrevem esses produtos.

3.4.1. Temperatura de superfície

A temperatura pode ser medida tanto na superfície como na atmosfera. De acordo com Rossi (2020), para a investigação de eventos de seca é pertinente a obtenção das variações de temperatura na superfície já que ela está associada a mudanças na vegetação e em cursos hídricos superficiais.

A temperatura de superfície (em inglês *Land Surface Temperature* - LST) é o componente de radiação de onda longa emitido por balanços de energia da superfície terrestre. A LST é um parâmetro-chave nos estudos de processos da superfície terrestre em escalas regionais e globais, tais como processos climáticos, hidrológicos, ecológicos e biogeoquímicos, combinando os resultados de todas as interações superfície-atmosfera e fluxos de energia entre a atmosfera e o solo. O processo hidrológico de evapotranspiração, por exemplo, é altamente sensível à flutuação de temperatura de superfície (RUNNING *et al.*, 1994; WAN, 2008).

A informação de LST pode ser obtida através do conjunto de sensores MODIS (do inglês *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), os quais estão presentes nos satélites Terra e Aqua da NASA (do inglês *National Aeronautics and Space Administration*), por meio do produto MOD11. O satélite Terra obtém dados matutinos enquanto o Aqua obtém dados vespertinos (WAN, 2008; NASA, 2022).

3.4.2. Precipitação

Precipitação (PPT) pode ser definida como a água da atmosfera que atinge a superfície, sendo a chuva a mais importante forma de precipitação, especialmente no cenário brasileiro. A precipitação é o principal modo de entrada da água no ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico é composto por entradas, a partir de eventos de precipitação, e saídas, caracterizadas por escoamentos e evapotranspiração. Em escala global, o ciclo hidrológico é fechado (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

A chuva é caracterizada por uma grande aleatoriedade no tempo e no espaço. Um dos aspectos mais importantes para o clima e hidrologia de uma região é a época de ocorrência de chuvas, ou seja, sua variabilidade sazonal. Existem regiões que apresentam grande variabilidade sazonal da chuva, com estações muito secas ou muito úmidas. No Sul do Brasil, onde está localizado o Rio Grande do Sul, a

chuva é relativamente bem distribuída ao longo do ano todo. Contudo, isso não impede que possam ocorrer épocas extremamente secas ou úmidas em alguns anos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Conforme Collischonn e Dornelles (2015), a chuva pode ser medida *in-situ*, por meio de pluviômetros, ou pode ser estimada utilizando radares meteorológicos ou imagens de sensoriamento remoto. De acordo com West, Quinn e Horswell (2019), a introdução de produtos de sensoriamento remoto para precipitação mudou a eficiência e a cobertura espaço-temporal do mapeamento pluviométrico e monitoramento da seca.

Apesar da medição da precipitação em um determinado local utilizando instrumentos de superfície, como o pluviômetro, ser relativamente simples, a grande variabilidade espacial e temporal da intensidade, tipo e ocorrência da precipitação dificulta as medições diretas e uniformemente calibradas em grandes regiões, especialmente sobre os oceanos. Sobre a terra, os pluviômetros sofrem com problemas de representatividade ao estimar a precipitação em áreas extensas (HOU *et al.*, 2014).

A obtenção de dados de PPT por meio de SR começou em 1997 com o lançamento do satélite TRMM (do inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission*), mediante uma colaboração entre a NASA e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA). Essa missão operou até 2015 e teve como sucessor a missão GPM (do inglês *Global Precipitation Measurement*). A missão GPM foi lançada em 2014 pela colaboração entre a NASA e a JAXA e foi projetada para proporcionar uma nova geração de observações de precipitação para melhorar a compreensão do ciclo hidrológico e energético da Terra (WEST; QUINN; HORSWELL, 2019; HOU *et al.*, 2014).

Para esse trabalho, os dados de PPT foram obtidos através do conjunto de dados do produto de sensoriamento remoto CHIRPS (do inglês *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations*). O CHIRPS engloba três tipos variados de informação: climatologias globais, estimativas de satélite e observações *in-situ*. A principal vantagem desse conjunto de dados é a alta resolução dos dados disponíveis (KATSANOS; RETALIS; MICHAELIDES, 2016).

3.4.3. Variação do armazenamento total de água

A variação do armazenamento total de água (em inglês *Total Water Storage – TWS*) é a soma da mudança na água armazenada na superfície da terra ou próxima a ela, podendo ser na condição de umidade do solo, neve, água superficial, água subterrânea, geleiras e mantos de gelo. Ele pode ser visto como o desequilíbrio entre a precipitação, a evapotranspiração e o fluxo de água em uma bacia de drenagem (LETTENMAIER *et al.*, 2015).

É possível obter a mudança no armazenamento total de água através de dados da missão GRACE (do inglês *Gravity Recovery and Climate Experiment*) (TAPLEY *et al.*, 2004), lançada em 2002. A missão mede a aceleração gravitacional a partir de dois satélites na mesma órbita. A aceleração é atribuída ao campo gravitacional resultante da massa total sob o par de satélites e, à medida que eles repetem suas órbitas, a massa abaixo deles varia e uma nova massa total pode ser medida. A substância que tem massa e se move na Terra é a água, portanto a maior parte da mudança no campo gravitacional é atribuível a mudanças na água (LETTENMAIER *et al.*, 2015; AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015).

Dessa forma, estimativas de impactos da seca no armazenamento de água e nas condições de águas subterrâneas, em escalas regionais a global, podem ser obtidas usando dados da missão GRACE. O GRACE é o único método por satélite que pode estimar de forma consistente mudanças no armazenamento de águas subterrâneas (LETTENMAIER *et al.*, 2015; AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015).

A missão GRACE finalizou em 2017 e foi sucedida pela missão GRACE-FO (do inglês *GRACE Follow-On*), lançada em 2018. O GRACE-FO continua o trabalho de rastreamento do movimento da água para monitorar mudanças no armazenamento total de água. O conceito de medição do GRACE-FO é semelhante ao do GRACE, com melhoras em relação ao desempenho do instrumento e ao sistema de voo (LANDERER *et al.*, 2020).

3.4.4. Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é a perda combinada de água no solo por evaporação e da vegetação por transpiração (SINGH e SENAY, 2016). De acordo com West, Quinn e Horswell (2019), uma estimativa confiável da ET é essencial para o monitoramento eficaz da seca. Segundo os autores, uma das principais vantagens de utilizar produtos de sensoriamento remoto é a capacidade de avaliar a ET em grandes áreas e na ausência de estações de monitoramento *in-situ*.

Várias técnicas e modelos são usados para estimar com precisão a ET desde escalas de campo até escalas globais e imagens de SR são cada vez mais utilizadas para essa estimativa em diferentes escalas temporais e espaciais. Nas últimas décadas, diversos modelos para estimar a ET foram desenvolvidos usando dados de SR. É importante notar que modelos diferentes têm requisitos de dados de entrada diferentes e, assim, influenciam na seleção do modelo com base na disponibilidade de dados de entrada (SINGH e SENAY, 2016).

Entre esses modelos estão o GLEAM (do inglês *Global Land Evaporation Amsterdam Model*) (MARTENS *et al.*, 2017) e o produto MOD16 (MU *et al.*, 2011), do MODIS. O modelo GLEAM é projetado para estimar a ET e a umidade do solo (WEST; QUINN; HORSWELL, 2019), utilizando para tal a equação de Priestley-Taylor (MARTENS *et al.*, 2017). Já o produto MOD16 do MODIS, instrumento dos satélites Terra e Aqua da NASA, é baseado na equação de Penman-Monteith (MU *et al.*, 2011) e pode ser usado para calcular o balanço hídrico e energético regional e a umidade do solo (NASA, 2022).

Outro desses modelos é o SSEBop (do inglês *Operational Simplified Surface Energy Balance*) (SENAY *et al.*, 2013). Ele é baseado em um princípio do balanço energético de superfície simplificado, não resolvendo todos os termos do balanço explicitamente, mas definindo duas temperaturas de superfície limite extremas, quente e fria, e utiliza a temperatura da superfície terrestre para estimar a ET (SINGH e SENAY, 2016). Nesse trabalho serão usados os dados do modelo SSEBop para ET.

3.4.5. Índices de vegetação

Devido a sua capacidade de fornecer medições repetitivas das características da vegetação em escala global, o SR desempenha um significativo papel no estudo da biosfera. Índices de vegetação (VIs) são medidas sensíveis das variações espaciais e temporais na atividade fotossintética da vegetação e nas variações estruturais do dossel. VIs são transformações espectrais de duas ou mais bandas, sendo frequentemente comprimentos de onda do espectro visível e infravermelho-próximo (GAO *et al.*, 2000; HUETE *et al.*, 2002).

Dentre os principais índices de vegetação está o NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*). Esse índice, quando obtido a partir do produto MODIS, é produzido globalmente com resoluções de 1 km e 500 m e períodos de composição de 16 dias, sendo sensível à clorofila (HUETE *et al.*, 2002).

O NDVI é uma razão normalizada das faixas vermelho e infravermelho-próximo (NIR) do espectro eletromagnético (HUETE *et al.*, 2002). A faixa do vermelho é absorvida pela clorofila das plantas, constituindo sua pigmentação, e a faixa do infravermelho-próximo é refletida. O NDVI pode ser calculado por meio da equação:

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

O NDVI irá resultar em valores variando entre -1 e 1. Quanto maior for o valor obtido, mais saudável é a vegetação analisada. Já valores inferiores a zero caracterizam uma área sem vegetação ou com vegetação sem atividade.

Os produtos relativos ao índice de vegetação NDVI podem ser obtidos através do MODIS, instrumento dos satélites Terra e Aqua da NASA, por meio do produto MOD13. Esses satélites fazem parte do Sistema de Observação da Terra (do inglês *Earth Observing System* - EOS) que tem como um dos principais interesses estudar o papel da vegetação em processos globais de larga escala com o objetivo de compreender o sistema terrestre (HUETE *et al.*, 2002; NASA, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

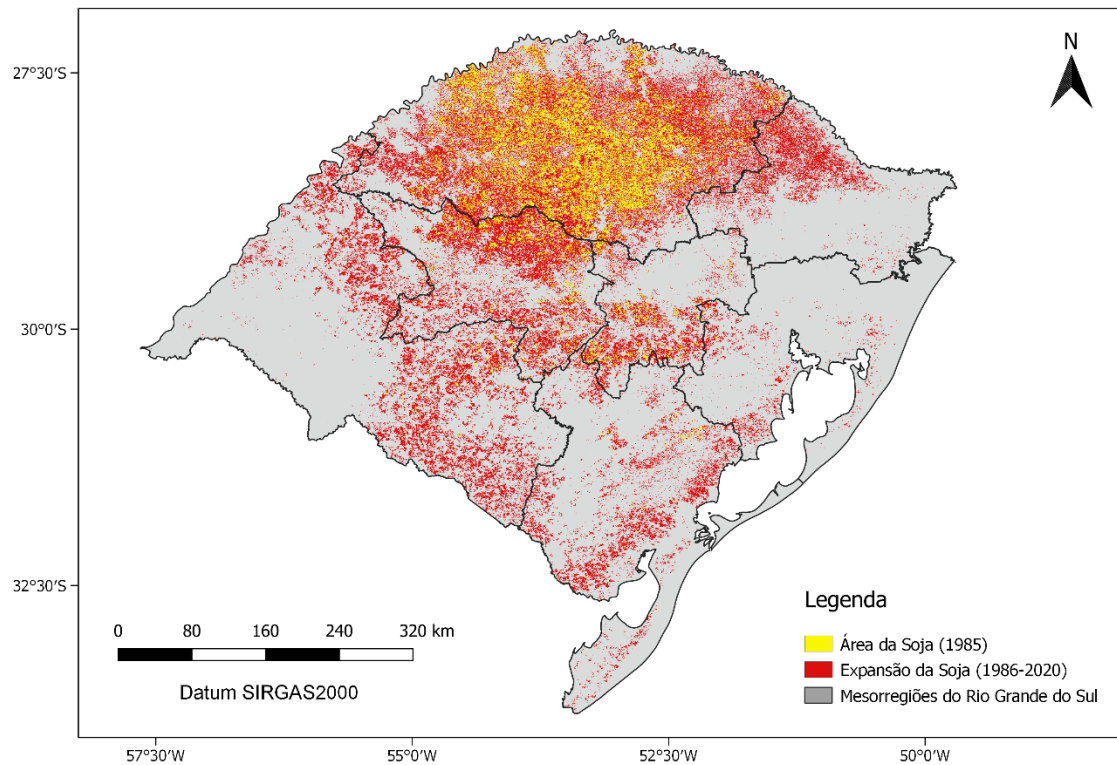
4.1. ÁREA DE ESTUDO

Mesmo com uma distribuição equilibrada de chuvas o ano todo, o Rio Grande do Sul está suscetível a eventos de secas (MOTA *et al.*, 1992). A estação do ano mais propícia para esses eventos no Estado é o verão (NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2010).

Gross (2015) observou que as regiões mais afetadas por secas estavam ao Oeste do RS enquanto Nedel, Sausen e Saito (2010) constataram que as regiões com mais eventos extremos de seca se localizavam ao Norte e Noroeste do território gaúcho. Ainda, o estudo de Gross (2015) verificou que os anos com maiores ocorrências de secas foram 2004, 2005 e 2012. Além disso, conforme verificado em veículos de comunicação, foi registrada a ocorrência de um evento de seca no presente ano de 2022 (SCHAFFNER, 2022; DORNELLES, 2022).

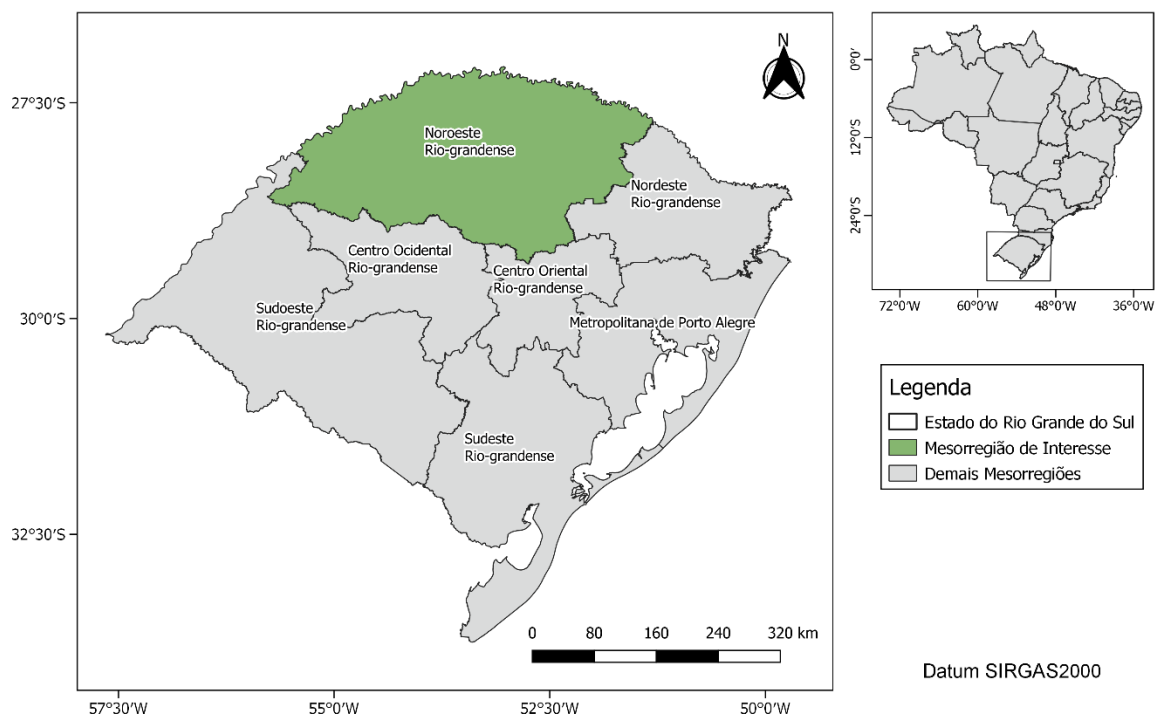
A soja é uma cultura temporária de verão de grande importância para o Estado do Rio Grande do Sul, que é o segundo maior produtor de soja em grão do Brasil, e a produção desse grão se concentra principalmente ao Norte e Oeste do território gaúcho (IBGE, 2017a). Conforme pode ser visualizado na Figura 2, desde o ano de 1985, a área de cultivo de soja apresentou uma significativa expansão. No ano de 1985, início da série anual de dados de classificação de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas (SOUZA *et al.*, 2020), a área plantada de soja era equivalente a 14.282 km² e era restrita praticamente à mesorregião Noroeste Rio-grandense, enquanto no ano de 2020 essa área passou para 68.217 km², ocupando as demais mesorregiões do RS. Isso pressupõe uma expansão de 378% de 1986 até 2020 em comparação com o ano de 1985. Fica evidente, por meio do mapa apresentado, que a mesorregião Noroeste Rio-grandense é aquela com, historicamente, a maior expressão de área de cultivo de soja.

Figura 2 - Presença da cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul.



Assim, para a análise dos eventos de seca no RS foi escolhida a mesorregião geográfica com os maiores registros de eventos de seca para o período compreendido entre 2000 e 2022 e com a maior expressão da cultura de soja no Estado. Dessa forma, foi analisada a mesorregião Noroeste Rio-grandense, conforme destacado na Figura 3. Já os anos escolhidos para análise dos impactos de secas na produção agrícola do Estado foram os anos das safras de 2004/2005, 2011/2012 e 2021/2022, com base nos anos evidenciados como os com maiores ocorrências de secas.

Figura 3 - Mesorregiões do Estado do Rio Grande do Sul, com destaque para o Noroeste Rio-grandense.



4.2. CONJUNTO DE DADOS UTILIZADO

Os dados das variáveis ambientais utilizados neste trabalho foram obtidos através de produtos de sensoriamento remoto, acessíveis na plataforma online GEE, para o período de janeiro de 2000 a fevereiro de 2022. Os parâmetros analisados foram temperatura de superfície (LST), precipitação (PPT), variação do armazenamento total de água (TWS), evapotranspiração (ET) e índice de vegetação (NDVI). A Tabela 1 apresenta a síntese das informações dos produtos de SR utilizados no trabalho, tais como nome do produto, resolução espacial e temporal, unidade, período de disponibilidade dos dados e referência.

Tabela 1 - Síntese das informações dos produtos utilizados.

Parâmetro	Produto	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Unidade	Período	Fonte
LST	MOD11	1 km	8 dias	Kelvin	18/02/2000 - presente	Wan <i>et al.</i> , 2015
PPT	CHIRPS	0,05°	diário	mm/mês	01/01/1981 - presente	Funk <i>et al.</i> , 2015
TWS	GRACE-FO	1°	mensal	mm/mês	04/2002 - presente	Save <i>et al.</i> , 2016
ET	SSEBop	1 km	mensal	mm/mês	01/01/2003 - presente	Senay <i>et al.</i> , 2013
NDVI	MOD13	500 m	16 dias	-	18/02/2000 - presente	Didan, 2015

Os dados de produção agrícola avaliados neste trabalho foram obtidos por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), um banco de tabelas estatísticas com informações de pesquisas que o IBGE realiza (IBGE, 2022). As tabelas do SIDRA contêm dados agregados da produção agrícola do país. Assim, foram obtidos os dados de produção agrícola da cultura temporária da soja para a mesorregião Noroeste Rio-grandense. Eles são fornecidos em valores anuais e em toneladas. O período de disponibilidade dos dados obtidos abrange as safras de 1999/2000 até 2019/2020. Os dados da safra 2020/2021 ainda não estão disponíveis no banco de dados do IBGE para uma escala mais detalhada do que a Região Sul do país e a safra 2021/2022 ainda estava em andamento no momento da execução deste trabalho. Contudo, a Emater/RS-Ascar (EMATER/RS-ASCAR, 2022) disponibiliza o valor da produção agrícola da cultura de soja para a safra de 2020/2021 apenas no Estado do RS, estimada com base nos dados preliminares do IBGE.

4.3. MÉTODOS

Todos os dados das variáveis ambientais obtidas a partir de sensoriamento remoto foram analisados em escala temporal mensal e em específico para a mesorregião Noroeste Rio-grandense, com exceção dos dados de TWS que foram analisados na escala do Estado do RS, sendo utilizada a média para a área de todo Estado. Portanto, para aqueles dados com resolução temporal menor que um mês foram calculados os valores médios mensais. Nos itens a seguir estão explicitadas as análises realizadas nos dados.

4.3.1. Padrão temporal das variáveis ambientais no tempo

A primeira análise conduzida foi para verificar o padrão temporal das variáveis ambientais no período de estudo (janeiro de 2000 a fevereiro de 2022). Foram elaboradas figuras ilustrando o padrão temporal de cada variável no intervalo de tempo e identificados os eventos de seca e seus impactos nos padrões das variáveis.

4.3.2. Anomalias das variáveis ambientais e eventos de seca

A fim de verificar como os eventos de seca se diferenciam da média da série temporal, foram analisadas as anomalias mensais de cada variável para todo o período (janeiro de 2000 a fevereiro de 2022). O cálculo da anomalia é feito através do *z-score* e indica quanto e em qual sentido uma variável desvia de sua média (ANDERSON *et al.*, 2010). Ele é calculado a partir da equação:

$$z = \frac{(\bar{X}_m - \overline{(\bar{X}_m)})}{\sigma(\bar{X}_m)} \quad (2)$$

onde z é o *z-score*; X é a variável analisada; \bar{X}_m é o valor médio para cada mês m ; $\overline{(\bar{X}_m)}$ é a média de \bar{X}_m para o mesmo mês do ano, dentro de todo o período; e $\sigma(\bar{X}_m)$ é o desvio padrão de \bar{X}_m para a série temporal total ao longo desse mesmo mês do ano.

A partir dos resultados obtidos de z-score foram geradas figuras de anomalias mensais para todas as variáveis ao longo de todos os meses e anos avaliados neste trabalho. Com essas figuras é possível a visualização das épocas de maiores anomalias, tanto positivas quanto negativas, de cada variável ambiental e, dessa forma, possibilitando a identificação dos eventos extremos de seca. Além disso, é possível avaliar a abrangência temporal da situação anômala, ou seja, em que momento ela inicia e quanto tempo ela dura.

4.3.3. Correlação entre variáveis

Através dos valores absolutos de cada variável foi elaborada uma figura ilustrando a correlação entre cada uma das variáveis ambientais. A relação estatística entre as variáveis foi calculada a partir do coeficiente de correlação de Pearson, obtido com a equação:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

onde r é o coeficiente de correlação de Pearson; x e y são os valores da variável na amostra; e \bar{x} e \bar{y} são as médias de cada variável analisada.

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1. Resultados próximos de 1 indicam uma correlação positiva entre duas variáveis, enquanto resultados próximos de -1 evidenciam uma correlação negativa entre duas variáveis, isto é, quando uma aumenta a outra diminui. Já resultados próximos de zero significam que duas variáveis não dependem linearmente uma da outra e, assim, têm pouca ou nenhuma correlação.

4.3.4. Normalização da produção agrícola

Ao longo dos anos, o crescimento da produção agrícola também está relacionado a avanços tecnológicos. Para que os dados de produção agrícola de anos diferentes pudessem ser comparados sem o viés tecnológico, foi realizada

uma regressão linear nos dados para o período de estudo (ANDERSON *et al.*, 2016). A equação de regressão linear é:

$$prod(y)' = prod(y) - prod_{lin}(y) \quad (4)$$

onde $prod(y)'$ é o valor normalizado de produção no ano y ; $prod(y)$ é a produção no ano y ; e $prod_{lin}(y)$ é um fator dado pelo ajuste temporal linear de todos os dados para o intervalo analisado.

4.3.5. Correlação entre variáveis ambientais e produção agrícola

Também foi avaliada a correlação entre as variáveis ambientais e a produção agrícola da soja na área de estudo. Foram geradas figuras apresentando a correlação entre cada variável ambiental e a produção agrícola. A correlação é calculada da mesma forma que explicado no item 4.3.3.

A análise da correlação foi realizada para os quatro trimestres do ano, visto que a soja é uma cultura temporária de verão e apresentará correlação melhor com os dados para o período de cultivo e colheita da cultura (primeiro e último trimestre do ano). Assim, foram utilizadas as médias trimestrais de cada variável ambiental e para os dados de produção, que estavam em uma resolução temporal anual, foram repetidos os valores em cada trimestre. Isso pode ser realizado dado que a soja é uma cultura temporária de verão e os dados anuais de produção refletem majoritariamente o período de cultivo e colheita, de outubro a maio.

Além disso, foi necessário organizar os dados de produção conforme os anos das safras para correlacionar com as variáveis ambientais. Dessa forma, os valores de produção foram correlacionados com o primeiro trimestre do mesmo ano e com os três últimos trimestres do ano anterior, a fim de corresponder a safra com o período de cultivo e colheita da cultura no Estado.

4.3.6. Estimativa da safra 2020/2021 para a área de estudo

Por fim, foi estimada a produção de soja na safra de 2020/2021 para a mesorregião Noroeste Rio-grandense que, no momento da execução deste trabalho, não estava disponível no banco de dados do IBGE para uma escala mais detalhada do que a Região Sul do país. Essa estimativa foi executada através de regressões lineares entre os valores médios das variáveis de sensoriamento remoto para o trimestre com maior correlação entre as variáveis ambientais e a produção e as produções agrícolas anuais da área de estudo.

Foi realizada uma regressão linear para cada variável de sensoriamento remoto, obtendo-se, assim, uma previsão para a safra a partir de cada uma delas. Em seguida, foi calculada a média entre todas as produções estimadas para utilizar como o valor da produção estimada de soja na mesorregião.

A fim de avaliar o valor da produção estimada através das regressões lineares foi utilizado o valor da produção de soja para a safra de 2020/2021 apenas no Estado do RS, disponibilizado pela Emater/RS-Ascar e estimado com base nos dados preliminares do IBGE, e a área de cultivo de soja no território gaúcho. Desse modo, pode-se inferir a produtividade de soja, em toneladas por hectare, no Rio Grande do Sul.

O valor de produtividade de soja no RS para o período de 2020/2021 é, então, multiplicado pela área de cultivo de soja na mesorregião Noroeste Rio-grandense para obter a produção de soja apenas na área de interesse. Finalmente, com esse valor, é possível comparar a estimativa da produção de soja a partir das variáveis ambientais com o valor de produção observado para a região no mesmo período.

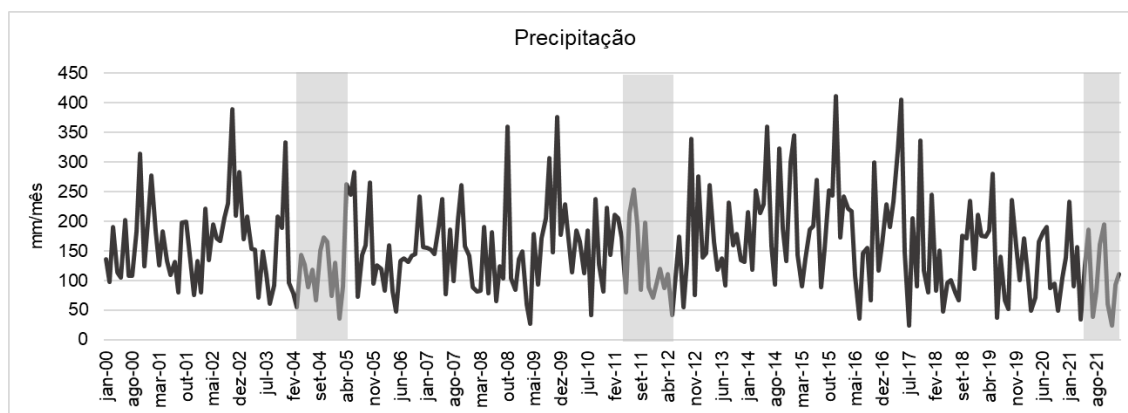
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PADRÃO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NO TEMPO

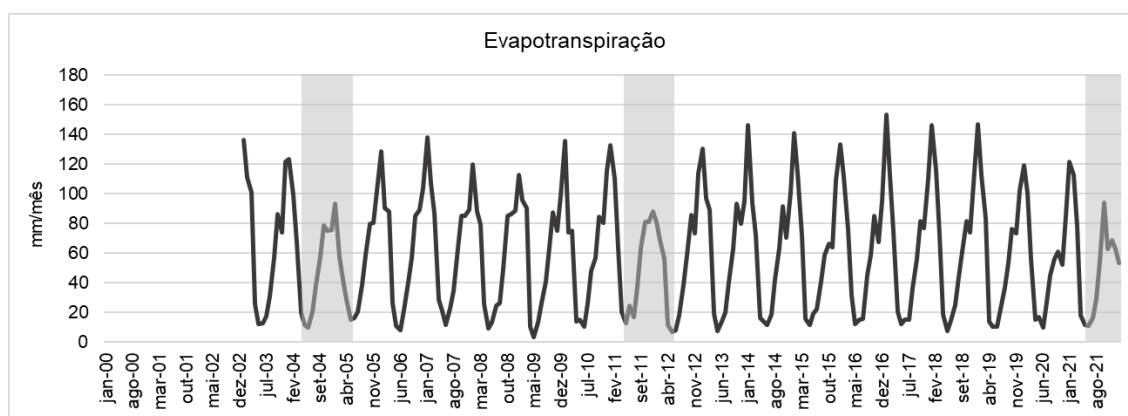
Foram analisados os padrões temporais das variáveis ambientais para a série histórica estudada (janeiro de 2000 a fevereiro de 2022). A Figura 4 apresenta os padrões temporais das variáveis e identifica os eventos de seca.

Figura 4 - Padrões temporais das variáveis na mesorregião Noroeste Rio-grandense no período de 2000 a 2022, com eventos de seca identificados. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.

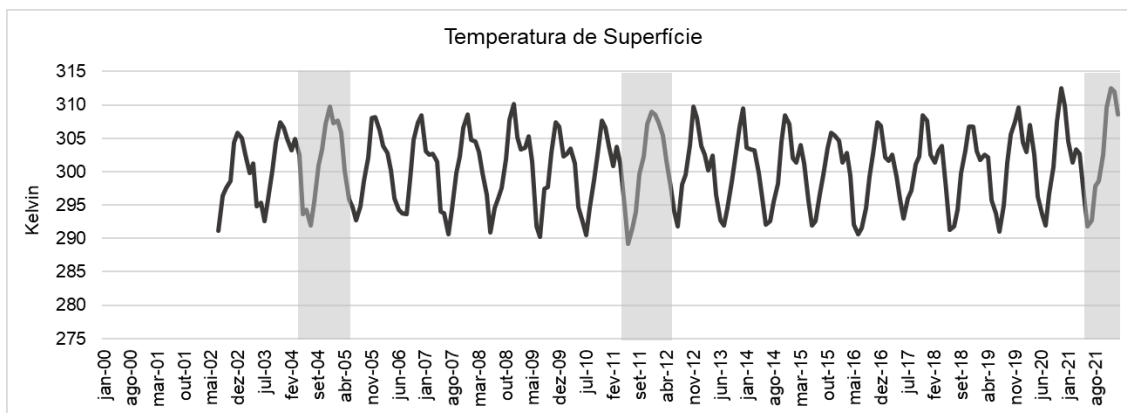
(a) Precipitação



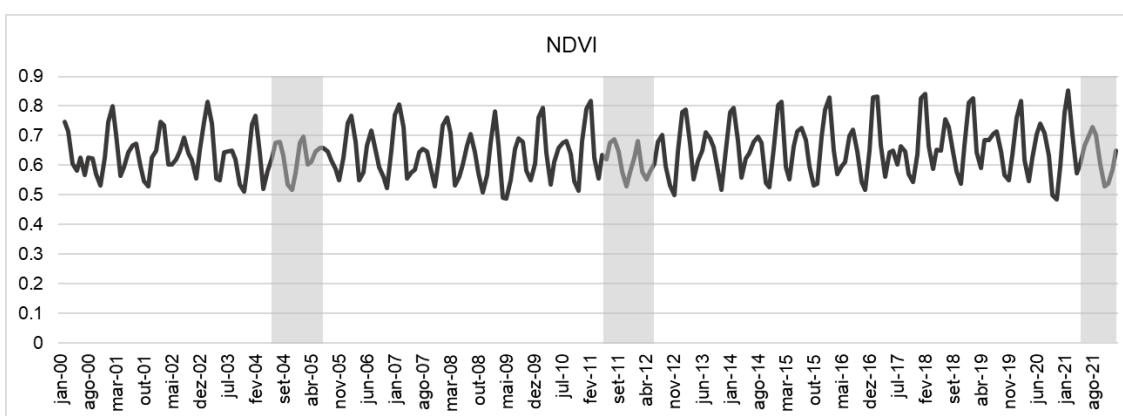
(b) Evapotranspiração



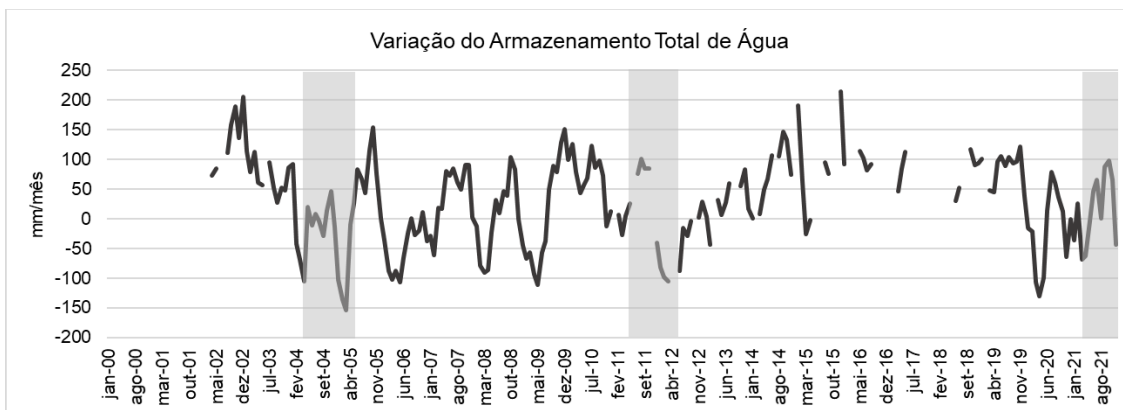
(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



(e) Variação do armazenamento total de água



Para a precipitação é possível verificar a distribuição relativamente equilibrada ao longo do de todo o ano. Os meses com menos chuva são agosto e fevereiro, com médias de 117 mm e 133 mm, respectivamente, e outubro é o mês mais chuvoso, com média de 228 mm. Os demais meses apresentam médias variando entre 137 mm e 172 mm. Além disso, a mesorregião apresenta grande variação

sazonal de temperatura, assim como o Estado, evidenciado pelas médias mensais que variam em até 8°C a mais que a média anual durante o verão e em até 8°C a menos que a média nos meses de inverno.

Em termos de evapotranspiração, a mesorregião apresenta maior ET nos meses de verão do que nos meses de inverno. Os meses com maior ET são janeiro e dezembro, com médias de 125 mm e 99 mm, respectivamente, e maio é o mês com menor evapotranspiração, com média de 11 mm. Isso pode ser explicado pela maior radiação líquida no período do verão, o que faz com que haja uma maior disponibilidade de energia para o processo de evapotranspiração.

O índice de vegetação NDVI apresenta médias estáveis durante o ano para o período analisado. Os maiores valores ocorrem nos meses de fevereiro e janeiro, com 0,78 e 0,75, respectivamente, e o menor valor ocorre no mês de novembro, com 0,53. O maior NDVI observado nos meses de verão tem influência do crescimento da cultura da soja no período.

A variação do armazenamento total de água representa bem o período de seca no RS, com as menores médias ocorrendo no período de verão. Nos meses de março e fevereiro foram observadas as menores médias de TWS, com médias de -25,9 mm e -24,2 mm, respectivamente. Já o mês com a maior média de TWS coincide com o mês de maior precipitação, outubro, com 83,2 mm de média.

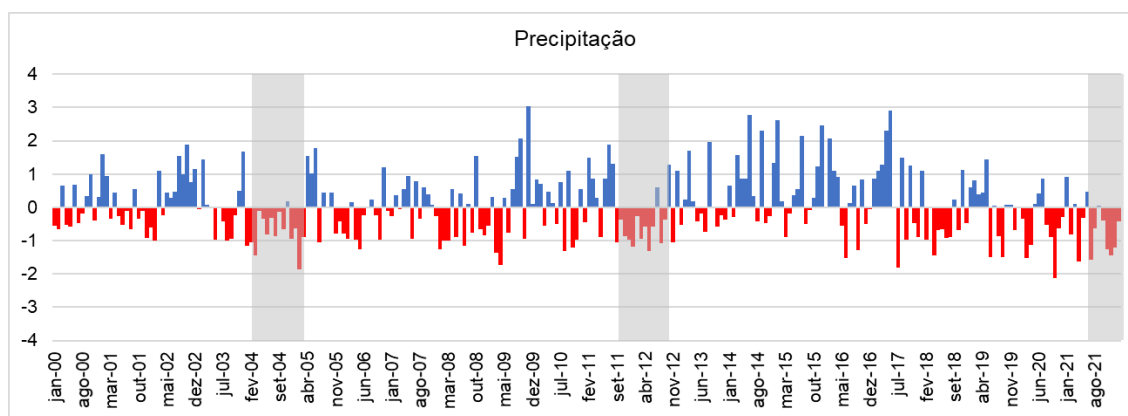
A partir dos eventos de seca identificados na Figura 4 é possível visualizar os impactos desses eventos nos padrões temporais das variáveis. A PPT no período é menor do que na mesma época em outros anos e a LST é ligeiramente mais elevada do que para o mesmo período em anos sem eventos de seca. O índice NDVI atinge valores menores do que aqueles esperados para o mesmo período durante os anos de seca e a evapotranspiração é fortemente impactada, sendo verificados valores bem abaixo do esperado para a época. Para o TWS é verificada uma redução dos valores começando em um período anterior ao evento e sem aumentos significativos até o final do evento de seca.

5.2. ANOMALIAS DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E EVENTOS DE SECA

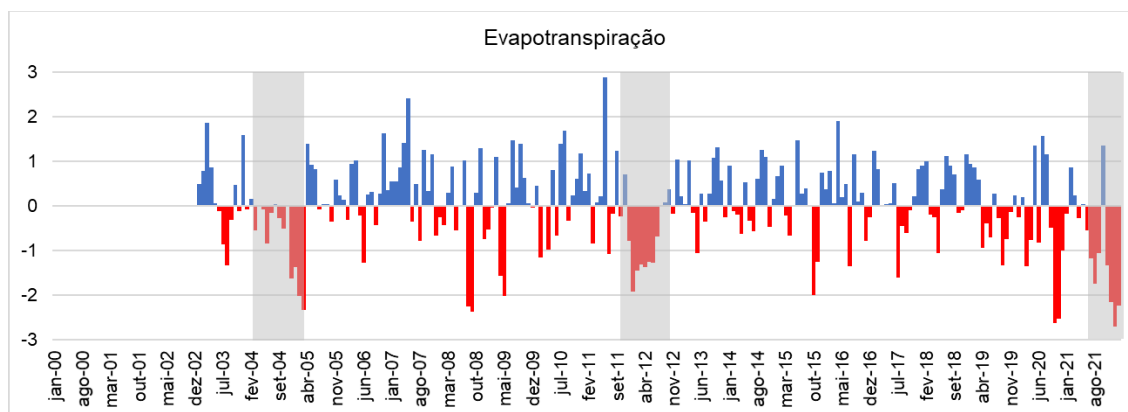
Os desvios das variáveis ambientais com relação à média da série temporal foram verificados através da análise das anomalias mensais de cada variável, a fim de investigar os eventos de seca ocorridos na região estudada. Na Figura 5 é possível visualizar as anomalias mensais de cada variável analisada, com destaque para os períodos dos eventos de seca. As anomalias dos eventos de seca de 2004/2005 e 2011/2012 são analisadas na sequência e o evento de 2021/2022 é analisado no item 5.7.

Figura 5 - Anomalias para a mesorregião Noroeste Rio-grandense no período de 2000 a 2022, com destaque para os eventos de seca. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.

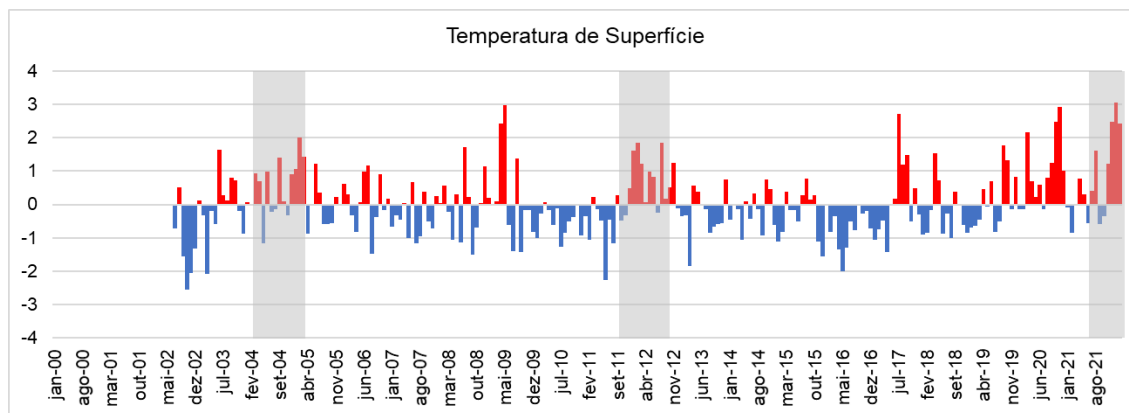
(a) Precipitação



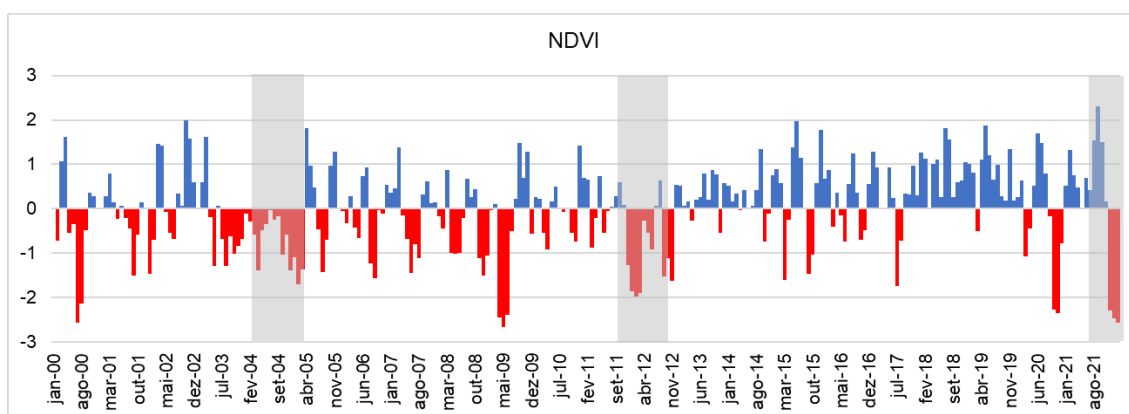
(b) Evapotranspiração



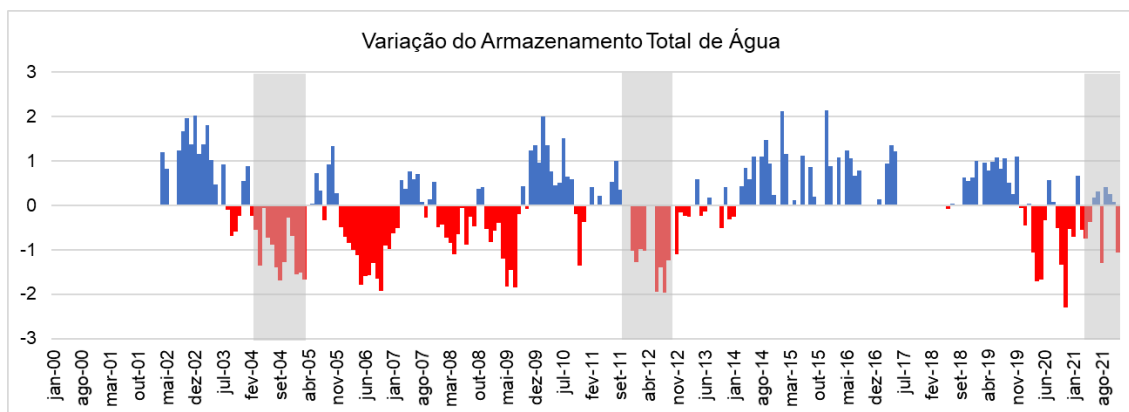
(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



(e) Variação do armazenamento total de água



Para o evento de 2004/2005, a redução da precipitação média mensal começou em janeiro de 2004 e durou até março de 2005, com uma anomalia levemente positiva verificada em novembro de 2004. Para esse evento, a ET começou a apresentar anomalias negativas iniciando em março de 2004, aumentando a intensidade a partir de dezembro de 2004 e apresentando recuperação a partir de

abril de 2005. Já para a LST, as anomalias positivas iniciaram a partir de setembro de 2004, se estendendo até março de 2005.

O evento de seca de 2004/2005 apresentou anomalias negativas significativas para o NDVI, com início do período anômalo iniciando em maio de 2003 e perdurando até março de 2005, com a maior anomalia verificada em fevereiro de 2005. Além disso, foram observados valores anômalos negativamente para o TWS começando em fevereiro de 2004, com o maior valor anômalo identificado em setembro de 2004. Uma anomalia positiva somente foi verificada novamente em junho de 2005.

A seca ocorrida em 2011/2012 apresentou uma redução dos valores médios de precipitação a partir de setembro de 2011 até junho de 2012 e anomalias negativas de evapotranspiração começando em dezembro de 2011 e durando até metade de 2012. Para a temperatura de superfície é possível observar que desde dezembro de 2011 até novembro de 2012 foram registradas anomalias positivas consideráveis, com apenas uma anomalia negativa em julho de 2012. Ainda, é visível a diferença de temperatura entre o ano de 2012 e os anos anteriores e posteriores.

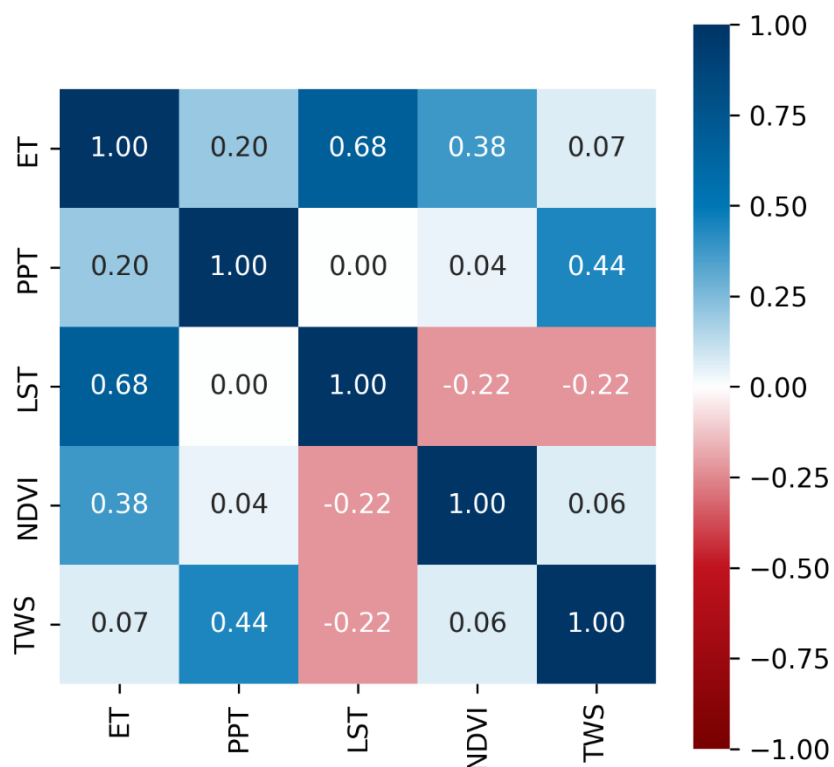
Foram identificadas anomalias negativas significativas de NDVI para o evento de 2011/2012 a partir de dezembro de 2011 até março de 2012, mantendo-se abaixo da média até junho de 2012. Valores anômalos negativamente de TWS foram observados também a partir de dezembro de 2011, atingindo seu máximo em agosto de 2012. Os valores seguiram abaixo da média no ano de 2013 e somente demonstraram uma recuperação em março de 2014.

5.3. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS

A correlação entre cada uma das variáveis de SR em termos de valores absolutos foi avaliada e está apresentada na Figura 6. A correlação foi analisada para o intervalo de tempo em comum de todos os dados, compreendido entre janeiro de 2003 e dezembro de 2021, já que os dados de ET estão disponíveis somente a partir de janeiro de 2003 e os dados de TWS estão disponíveis apenas

até dezembro de 2021, evitando, desse modo, possíveis erros na análise da correlação.

Figura 6 - Coeficiente de correlação de Pearson entre os valores absolutos das variáveis de sensoriamento remoto na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2003 a 2021.



ET = evapotranspiração; PPT = precipitação; LST = temperatura de superfície;
TWS = variação do armazenamento total de água.

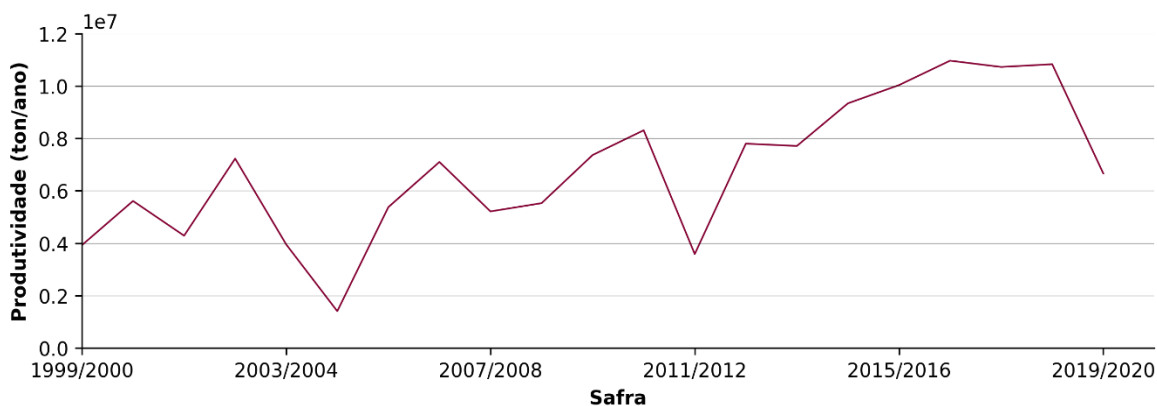
Por meio da análise da Figura 6, é verificado que a PPT não apresenta correlação significativa com as demais variáveis, sendo a maior correlação observada com o TWS (0,44). Essas correlações podem ser atribuídas à equilibrada distribuição de chuvas no território gaúcho ao longo do ano todo, sem variações sazonais que são observadas nas demais variáveis.

A temperatura de superfície demonstrou expressiva correlação positiva com a evapotranspiração (0,68) e uma correlação negativa com a variação do armazenamento total de água (-0,22) e com o NDVI (-0,22). Em contrapartida, a evapotranspiração revelou ter correlação positiva com o NDVI (0,38).

5.4. PRODUÇÃO AGRÍCOLA ANUAL NA ÁREA DE ESTUDO

Foi avaliado o padrão temporal da produção agrícola desde a safra de 1999/2000 até a safra de 2019/2020, a última com dados disponíveis para a mesorregião Noroeste Rio-grandense. A Figura 7 apresenta o padrão temporal da produção agrícola no período.

Figura 7 - Produção agrícola anual na mesorregião Noroeste Rio-grandense, para as safras de 1999/2000 a 2020/2021.



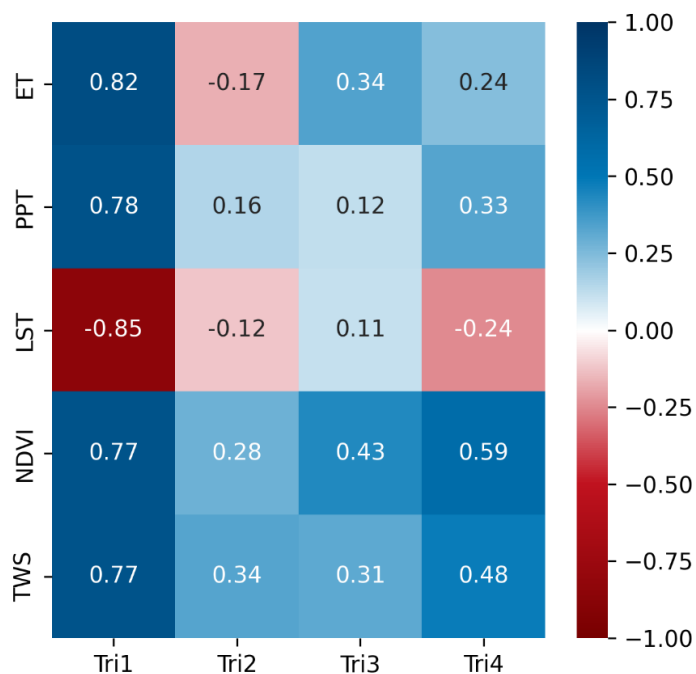
Ao analisar o padrão temporal das safras de soja na região de interesse, ficam evidentes os impactos dos eventos de seca na produção agrícola, com quedas acentuadas nas safras de 2004/2005 e 2011/2012. Além disso, é verificada uma outra queda na safra de 2019/2020.

5.5. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PRODUÇÃO AGRÍCOLA

A correlação entre as variáveis ambientais e a produção agrícola da soja foi verificada em termos tanto de valores absolutos quanto de valores de anomalias. A análise foi executada trimestralmente, de janeiro de 2000 até dezembro de 2020, a fim de verificar se existe uma melhor correlação da cultura da soja com o seu período de cultivo e colheita (primeiro e último trimestre do ano). Assim, com o objetivo de corresponder a safra com o período de cultivo e colheita da cultura no RS, os valores de produção foram correlacionados com o primeiro trimestre do mesmo ano e com os três últimos trimestres do ano anterior.

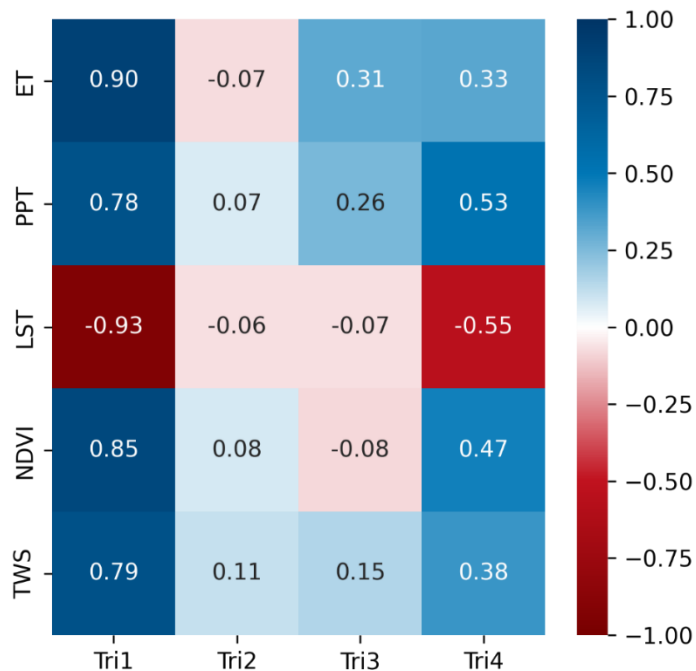
Foram analisados três cenários: valores absolutos das variáveis de sensoriamento remoto e valores absolutos de produção agrícola; anomalias tanto das variáveis ambientais quanto da produção agrícola; e anomalias dos produtos de sensoriamento remoto e valores absolutos da produção agrícola. Os três cenários são apresentados da Figura 8 a Figura 10. No Apêndice A estão apresentados os gráficos de dispersão que permitem visualizar a correlação para cada um dos três cenários.

Figura 8 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre os valores absolutos das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020.



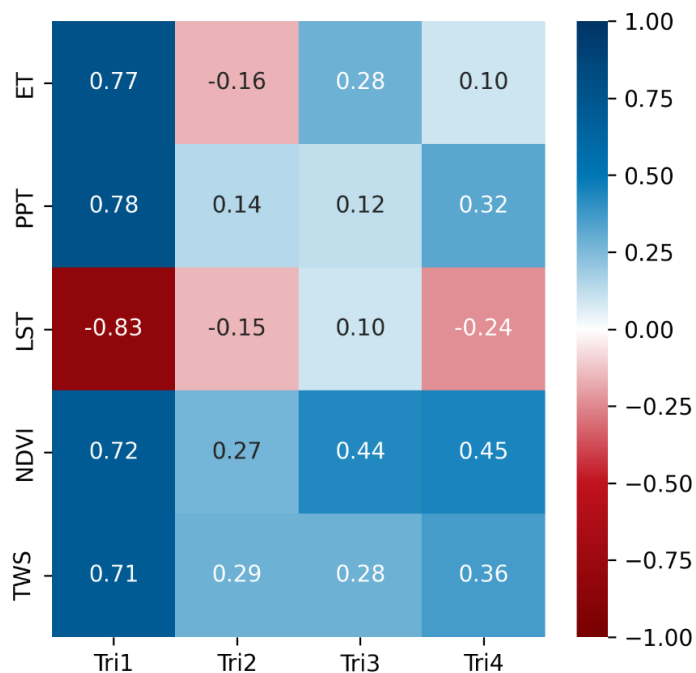
ET = evapotranspiração; PPT = precipitação; LST = temperatura de superfície;
TWS = variação do armazenamento total de água.

Figura 9 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e as anomalias da produção agrícola na área de estudo, no período de 2000 a 2020.



ET = evapotranspiração; PPT = precipitação; LST = temperatura de superfície;
TWS = variação do armazenamento total de água.

Figura 10 - Coeficiente de correlação de Pearson por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020.



ET = evapotranspiração; PPT = precipitação; LST = temperatura de superfície;
TWS = variação do armazenamento total de água.

Avaliando as correlações nos três cenários analisados, é verificado que o primeiro trimestre é aquele que apresenta as maiores correlações entre variáveis ambientais e a produção agrícola, seguido pelo quarto trimestre. Isso pode ser justificado pelo período de cultivo e colheita da cultura de soja, de outubro a maio. Ainda, pode-se inferir que as alterações nas variáveis ambientais no primeiro trimestre (janeiro a março), que é o período de floração e enchimento de grãos (CONAB, 2022), são aquelas que têm o maior impacto na produção agrícola.

De uma maneira geral, os três cenários apresentam resultados muito similares. As variáveis LST e ET correlacionam mais significativamente com a produção, tanto em valores absolutos quanto em anomalias no primeiro trimestre. Para a variável LST essa correlação tende a ser negativa no primeiro trimestre, ou seja, há uma relação significativa entre um aumento da temperatura ou da anomalia da temperatura de superfície e a queda de produção agrícola. Já para a ET, a PPT, o NDVI e o TWS essa correlação no primeiro trimestre tende a ser positiva, ou seja, um aumento nos valores absolutos ou anômalos dessas variáveis está correlacionado com o aumento da produção agrícola.

A PPT apresentou a mesma expressiva correlação positiva (0,78) no primeiro trimestre para os três cenários, evidenciando a sua importância para a produção agrícola. Os produtos NDVI e TWS também demonstraram uma correlação positiva significativa no primeiro trimestre com a produção agrícola da soja.

Para o quarto trimestre, as variáveis NDVI e TWS foram aquelas que apresentaram maiores correlações com a produção, com exceção do cenário que correlacionava as anomalias tanto das variáveis quanto da produção, quando foram verificadas as mais expressivas correlações com a LST e a PPT. Essa constatação indica que, para o quarto trimestre, as variáveis que mais significativamente correlacionam com a produção divergem daquelas do primeiro trimestre. Isso pode estar associado ao subperíodo do ciclo da cultura, que para o quarto trimestre se encontra em semeadura e desenvolvimento vegetativo e para o primeiro trimestre se encontra em floração e enchimento de grãos (CONAB, 2022).

5.6. ESTIMATIVA DA SAFRA 2020/2021 PARA A ÁREA DE ESTUDO

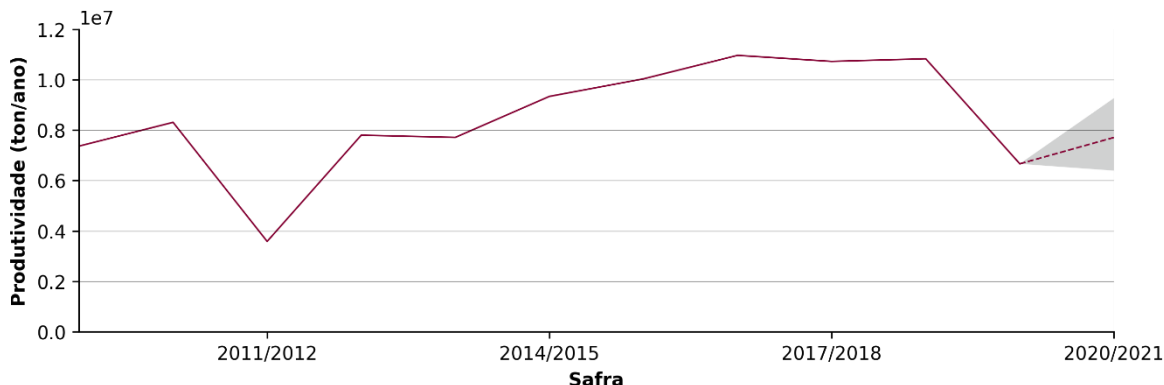
Tendo em vista que os dados da safra 2020/2021 ainda não foram disponibilizados no banco de dados do IBGE em uma escala mais detalhada do que a Região Sul do Brasil, foi avaliada a previsão da safra de 2020/2021 para a mesorregião Noroeste Rio-grandense por meio de regressões lineares entre os valores médios dos primeiros trimestres das variáveis ambientais e as produções agrícolas anuais da área de estudo. Os dados dos primeiros trimestres foram utilizados visto que esse é o trimestre com a maior correlação entre as variáveis ambientais e a produção, conforme verificado no item 5.5. As produções agrícolas estimadas a partir de cada uma das variáveis ambientais para a safra de 2020/2021 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Produções estimadas a partir das variáveis ambientais para a safra 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense.

Variável Ambiental	Produção Estimada (ton)
Precipitação	7.138.410
Evapotranspiração	7.744.244
Temperatura de Superfície	7.996.961
NDVI	9.264.857
Armazenamento Total de Água	6.395.725

A maior produção estimada foi obtida a partir da regressão linear do NDVI e a menor produção prevista foi verificada através da regressão linear do TWS. A média entre todas as produções estimadas ficou em 7.708.039 toneladas. A Figura 11 apresenta a previsão da produção agrícola para a safra de 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense. A faixa tracejada representa a média das produções agrícolas estimadas e a faixa cinza representa a faixa de valores prováveis estimados a partir de cada variável ambiental.

Figura 11 - Previsão da produção agrícola da safra 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense, com faixa de valores prováveis estimados.



Através da análise da Figura 11, é verificado que a produção estimada a partir das variáveis de SR para a safra de 2020/2021 na mesorregião Noroeste Rio-grandense, de 7.708.039 toneladas, apresentou um aumento de aproximadamente 16% quando comparada com a produção da safra de 2019/2020, de 6.664.180 toneladas. Todas as estimativas de produção agrícola apresentaram um valor superior a safra anterior, com exceção da estimativa a partir do TWS, quando foi observado uma queda na produção em relação à safra passada.

O valor da produção estimada através das regressões lineares foi avaliado por meio da produtividade de soja no RS para a safra de 2020/2021. Para isso, foi utilizado o valor da produção agrícola de soja no Estado e a área de cultivo de soja. O valor da produção agrícola da cultura de soja para a safra de 2020/2021 apenas no Estado do Rio Grande do Sul, estimado com base nos dados preliminares do IBGE e disponibilizado pela Emater/RS-Ascar (EMATER/RS-ASCAR, 2022), é de 20.421.119 toneladas. A área de cultivo de soja no território gaúcho para o ano de 2020 era de 68.217 km², conforme indicado no item 4.1.

A produtividade de soja no RS obtida foi de 2,994 toneladas por hectare. A área cultivada com soja na mesorregião Noroeste Rio-grandense é de 34.792 km². Assim, a produção de soja observada para a área de estudo na safra de 2020/2021 foi de 10.415.030 toneladas.

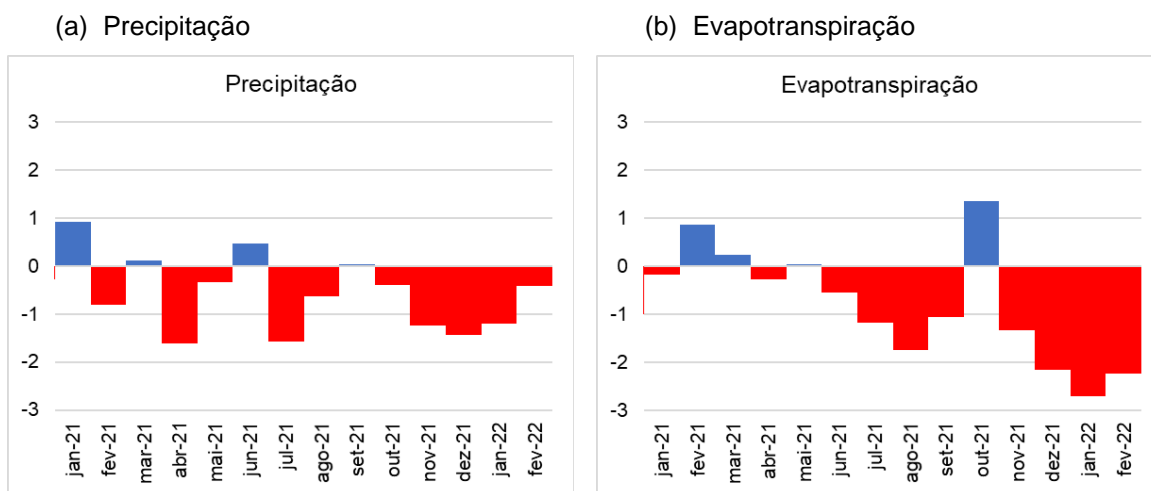
Apesar de ser uma aproximação da produção de soja observada para a área de interesse, é possível verificar que a previsão a partir de regressões lineares entre

os valores médios dos primeiros trimestres das variáveis ambientais e as produções agrícolas anuais obteve o mesmo sentido, de crescimento, observado na safra de 2020/2021. A regressão linear do NDVI foi aquela que mais se aproximou do observado, prevendo a maior produção agrícola no período, e a regressão linear do armazenamento total de água foi aquela que mais se afastou do observado, estimando a menor produção.

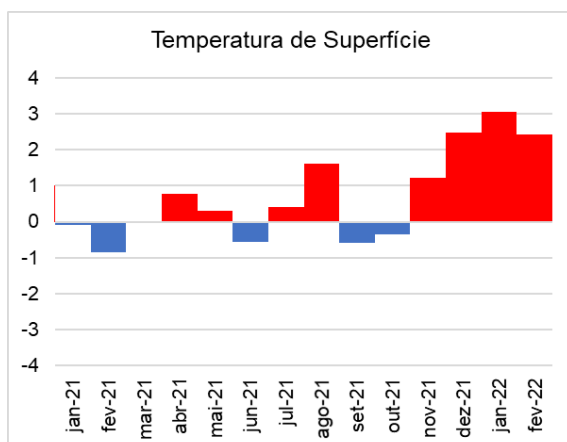
5.7. EVENTO DE SECA DO ANO DE 2021/2022

No período de 2021/2022 está sendo registrado um evento intenso de seca. Ele foi analisado na mesorregião Noroeste Rio-grandense a partir das informações das variáveis ambientais e comparado com os eventos de seca prévios observados na mesorregião. Na Figura 12, estão apresentadas as anomalias mensais de cada variável analisada com foco apenas no período da atual seca.

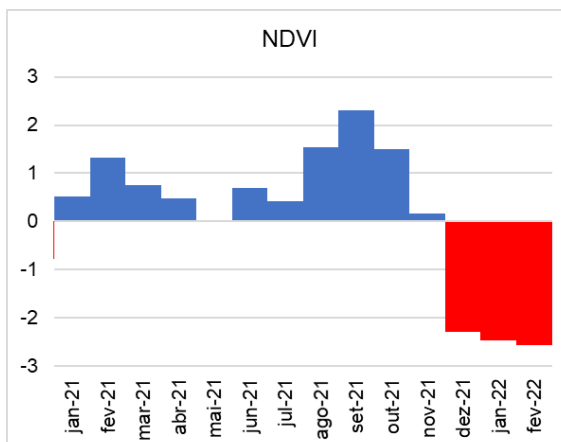
Figura 12 - Anomalias das variáveis na mesorregião Noroeste Rio-grandense com foco no período de 2021 a 2022. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.



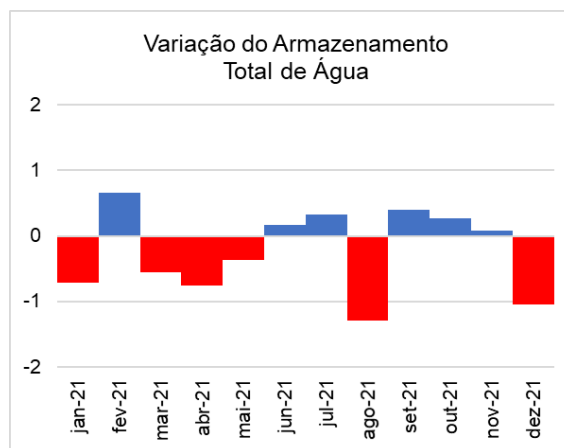
(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



(e) Variação do armazenamento total de água



Para o evento de seca observado no presente ano de 2021/2022, foi verificada uma redução da precipitação média mensal desde abril de 2021 e ainda não foi possível a observação de um final do padrão de anomalias negativas, com exceção de uma anomalia positiva de pequena magnitude em junho de 2021. Esse evento também apresentou anomalias negativas de evapotranspiração iniciando em abril de 2021 e se intensificando a partir de novembro de 2021, com uma anomalia positiva no mês de outubro de 2021. Além disso, desde novembro de 2021 são verificadas significativas anomalias positivas de temperatura de superfície.

Em relação ao NDVI para o evento de 2021/2022 são identificadas anomalias negativas intensas a partir de dezembro de 2021. Para o TWS foi observada uma anomalia negativa em agosto de 2021, seguida por um período de três meses de

anomalias positivas de pequena magnitude, e em dezembro de 2021 foi verificada outra anomalia negativa.

A partir dessa análise pode-se verificar que o TWS não apresentou uma resposta significativa quando comparado com as outras variáveis. A PPT e a ET foram as primeiras variáveis a apresentarem valores negativamente anômalos, seguidas pelos valores positivamente anômalos da LST e negativamente anômalos do NDVI.

Quando o presente evento de seca é comparado aos anteriores, ocorridos durante as safras de 2004/2005 e 2011/2012, é verificado que as anomalias de precipitação foram muito similares para os três eventos, com anomalias negativas ocorrendo no mínimo desde setembro, antes do período de semeadura da soja. As anomalias também apresentaram valores anômalos similares, observando na seca de 2011/2012 os valores anômalos menos significativos quando comparado com os outros dois eventos.

Entretanto, quando é analisada a temperatura de superfície, verifica-se que as anomalias positivas de temperatura para o período de 2021/2022 foram muito mais significativas que as observadas nos eventos anteriores, especialmente nos meses de verão. A mesma tendência é verificada para a evapotranspiração, que nos meses de verão apresentou anomalias negativas mais intensas do que nos eventos de seca ocorridos nos outros anos.

Para o NDVI, os valores anômalos negativamente começam a ser verificados a partir de dezembro do ano anterior, assim como na seca da safra de 2011/2012, diferentemente do evento de seca observado em 2004/2005, quando os valores anômalos negativamente do índice já eram identificados desde janeiro do ano anterior. Uma tendência parecida foi avaliada na TWS, apresentando anomalia negativa começando em dezembro de 2021 assim como no evento de 2011/2012, no qual as anomalias negativas iniciaram em dezembro de 2011, enquanto o evento de 2004/2005 apresentou valores anômalos negativamente desde fevereiro de 2004.

A Emater/RS-Ascar previu, em março de 2022 (EMATER/RS-ASCAR, 2022), a produção de soja para todo o Estado do Rio Grande do Sul como sendo de 9.541.841 toneladas. Esse valor representa uma queda de 53,3% em relação ao

valor de produção observado na safra anterior, de 20.421.119 toneladas. Essa queda significativa reflete as condições observadas nas variáveis hidrometeorológicas em decorrência do evento de seca de 2021/2022.

5.8. DISCUSSÃO

Este estudo demonstrou uma correlação negativa significativa entre o LST e a produção agrícola no primeiro trimestre (janeiro a março), período em que ocorre a floração e enchimento de grãos. Resultado similar foi obtido por Gusso *et al.* (2014), que observaram que as variações das médias de LST durante os períodos de floração e enchimento de grãos das culturas de verão no RS estão intimamente associadas às variações na produção da soja.

Anderson *et al.* (2016) identificaram que as correlações das anomalias de produção agrícola de soja com o índice ESI (Índice de Estresse Evaporativo, do inglês *Evaporative Stress Index*), que engloba uma fração relativa da ET, são maximizadas no intervalo entre janeiro e abril, especialmente no Estado do RS, com coeficientes de correlação em torno de 0,8. Esse intervalo coincide com os estágios de floração e enchimento de grãos de soja. Uma avaliação semelhante foi verificada no presente estudo, com a variável ET correlacionando significativamente com a produção agrícola da soja na área de estudo no primeiro trimestre, com coeficientes de correlação variando entre 0,77 e 0,90, dependendo do cenário analisado.

Outra variável que demonstrou ter expressiva correlação com a produção agrícola da soja foi o NDVI. Esse índice apresentou correlação positiva tanto no primeiro trimestre quanto no quarto trimestre, incluindo os subperíodos do ciclo da cultura de semeadura, desenvolvimento vegetativo, floração e enchimento dos grãos. Esquerdo *et al.* (2011) estudaram uma região do Oeste do Estado do Paraná e verificaram que o NDVI poderia explicar uma grande parte da variabilidade da produção de soja em anos com condições climáticas diferentes.

No estudo de Esquerdo *et al.* (2011) foram realizadas regressões lineares para avaliar a correlação entre o índice NDVI e a produção de soja em dois anos de condições climáticas distintas. Os resultados dos autores mostraram o potencial da análise da série temporal de NDVI na geração de parâmetros a serem empregados

por modelos agrometeorológicos para estimativas de produção de soja. Tal potencial também foi observado no presente trabalho a partir da melhor estimativa de produção agrícola de soja para a safra de 2020/2021 na área de estudo através da regressão linear do índice NDVI.

Em síntese, este trabalho fez o uso de variáveis hidrometeorológicas, obtidas através de produtos de SR, para avaliar o padrão temporal de eventos de seca na mesorregião Noroeste Rio-grandense do Estado do RS que impactaram a produção agrícola da cultura de soja. Entre as perspectivas futuras estão a avaliação de outros produtos, para verificar se são obtidos resultados similares; a análise de uma maior área de estudo, abrangendo todo o território gaúcho, para auxiliar na compreensão do padrão temporal das secas e seus impactos na produção agrícola de todo o Estado; a análise da existência de lags temporais, ou seja, uma dependência temporal, entre as variáveis; e a elaboração de testes de significância estatística das correlações, a fim de melhor qualificá-las. Ainda, seria interessante verificar o impacto dos eventos de seca na produção agrícola de outras culturas, além da soja.

6. CONCLUSÕES

A análise de variáveis hidrometeorológicas obtidas através de sensoriamento remoto possibilitou a identificação e caracterização de eventos extremos de seca na mesorregião Noroeste Rio-grandense do Estado do Rio Grande do Sul. As secas ocorrem no Estado durante o verão e, para todas as variáveis, foram verificados padrões temporais distintos do esperado para a mesma época do ano naqueles anos com registro de seca. As principais diferenças foram observadas na precipitação e evapotranspiração, apresentando significativas diminuições.

Neste trabalho foi possível verificar o padrão temporal de cada uma das variáveis de SR analisadas durante o intervalo de tempo e as alterações observadas nelas em decorrência dos eventos de seca. Durante os eventos, foram identificadas reduções nos valores de precipitação, evapotranspiração e índice de vegetação NDVI. A temperatura de superfície apresentou valores ligeiramente mais elevados e para a variação do armazenamento total de água foi verificada uma redução dos valores com início em um período anterior ao evento.

Este estudo também permitiu a análise das variáveis com relação à média da série temporal, possibilitando a avaliação da abrangência temporal da situação anômala. Das variáveis analisadas, a variação do armazenamento total de água e a evapotranspiração representaram muito bem os eventos de seca. Foi possível visualizar a duração do evento a partir do momento em que as anomalias começaram a ficar muito negativas até elas retornarem a valores médios novamente.

A fim de avaliar as respostas das variáveis, foram estabelecidas correlações entre as variáveis de sensoriamento remoto. A precipitação não apresentou significativa correlação com nenhuma das outras variáveis, assim como o NDVI. A correlação mais expressiva verificada foi entre a temperatura de superfície e evapotranspiração (0,68).

Este trabalho também verificou a correlação entre as variáveis de sensoriamento remoto e a produção agrícola para identificar quais variáveis têm o potencial de impactar mais fortemente a cultura da soja. O primeiro trimestre apresenta as

maiores correlações, seguido pelo quarto trimestre. Isso se deve ao período de cultivo e colheita da cultura da soja, de outubro a maio. De maneira geral, as variáveis LST e ET correlacionam mais significativamente com a produção no primeiro trimestre, sendo a correlação para a variável LST negativa e para a variável ET positiva. Além disso, a precipitação apresentou expressiva correlação positiva com a produção agrícola no primeiro trimestre (0,78), demonstrando a sua importância.

No quarto trimestre, as variáveis NDVI e TWS foram aquelas que apresentaram maiores correlações com a produção. Assim, as variáveis que mais significativamente correlacionam com a produção divergem no quarto e primeiro trimestre. Isso pode estar associado ao subperíodo do ciclo da cultura, que é diferente nesses trimestres. Além disso, é notável que as correlações observadas no segundo e terceiro trimestres não são tão expressivas quanto aquelas verificadas no primeiro e quarto trimestres.

Ainda, foi estimada a safra 2020/2021 para a mesorregião Noroeste Rio-grandense, visto que não havia a disponibilidade desse dado em uma escala mais detalhada do que a Região Sul do país. Foi estimada uma produção a partir de cada uma das variáveis ambientais, obtendo uma média de 7.708.039 toneladas. Todas as estimativas apresentaram um aumento quando comparadas com a produção da safra anterior, de 6.664.180 toneladas, com exceção da estimativa da variação do armazenamento total de água.

Através do valor da produção agrícola de soja na safra 2020/2021 apenas para o Estado do Rio Grande do Sul e a área de cultivo de soja, foi possível estimar a produção na mesorregião de interesse mediante a produtividade. Foi estimada uma produção agrícola de 10.415.030 toneladas. Assim, a estimativa obtida por meio das variáveis ambientais apresentou o mesmo sentido, de crescimento, que o observado na safra de 2020/2021. Ainda, a estimativa obtida a partir do índice de vegetação NDVI foi aquela que previu a maior produção agrícola do período, sendo a que mais se aproximou do observado.

Por fim, foi analisado o evento de seca registrado no presente ano de 2022 para a mesorregião Noroeste Rio-grandense. A precipitação e a evapotranspiração

apresentam anomalias negativas desde abril de 2021 e o índice de vegetação NDVI manifestou anomalias extremamente negativas a partir de dezembro de 2021. Foram observadas anomalias positivas da temperatura de superfície iniciando em novembro de 2021. A variação do armazenamento total de água ainda não apresentou um impacto significativo quando comparado com as outras variáveis.

Comparando-se o evento de seca de 2021/2022 com aqueles dos anos de 2004/2005 e 2011/2012, é verificado que as anomalias de precipitação foram similares nos três eventos e que a temperatura de superfície e a evapotranspiração apresentaram anomalias muito mais significativas do que nas secas anteriores. Já o NDVI e a variação do armazenamento total de água demonstraram tendências parecidas com aquelas observadas na seca de 2011/2012. A previsão da queda da produção de soja no Rio Grande do Sul, de 53,3%, reflete as condições observadas nas variáveis hidrometeorológicas em decorrência do evento de seca de 2021/2022.

De modo geral, através da análise das variáveis obtidas por sensoriamento remoto, este trabalho conseguiu identificar e caracterizar os eventos de seca ocorridos na mesorregião Noroeste Rio-grandense do Estado do Rio Grande do Sul e que impactaram na produção agrícola da cultura de soja. Foi possível avaliar quais as variáveis que têm o potencial de representar os impactos na cultura da soja através da análise da correlação entre essas variáveis e a produção agrícola. Esse estudo pode contribuir para o melhor entendimento da ocorrência de eventos de seca que podem limitar a produção agrícola.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021 - Relatório Pleno**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: <<https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Monitor de Secas do Brasil**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019. Disponível em: <<https://monitordesecas.ana.gov.br/o-monitor-de-secas>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

AGHAKOUCHAK, A. *et al.* **Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities**. *Reviews of Geophysics*, [S.l.], v. 53, p. 452-480, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014RG000456>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

ANDERSON, L. O. *et al.* **Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies**. *New Phytologist*, [S.l.], v. 187, p. 733-750, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x>. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x>>. Acesso em: 5 abr. 2022.

ANDERSON, M. C. *et al.* **The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts**. *Remote Sensing of Environment*, [S.l.], v. 174, p. 82-99, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715302212>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

BINDA, A. L.; VERDUM, R. **Estiagens, secas e os processos de arenização na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul**. *GeoTextos*, [S.l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: 10.9771/geo.v16i2.38159. Disponível em: <<https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/38159>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

CASTRO, A. L. C. *et al.* **Manual de desastres**. v.1. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174p. Disponível em:

<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Desastres_Naturais_Voll.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2022.

CHEN, L.G. *et al.* **Flash Drought Characteristics Based on U.S. Drought Monitor**. *Atmosphere*, [S.l.], v. 10, n. 9, 498, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10090498>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/10/9/498>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

CIGANA, C. **Seca atual já supera a de 2005 no Rio Grande do Sul**. *Gaúcha Zero Hora*, [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2012/01/seca-atual-ja-supera-a-de-2005-no-rio-grande-do-sul-3631660.html>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2ª impressão. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015. 336p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. v. 9, safra 2021/22, n. 6, Sexto levantamento. Brasília: CONAB, 2022.

DIÁRIO GAÚCHO. **Estiagem: 182 municípios já decretaram situação de emergência no RS**. *Diário Gaúcho*, [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://diariogauchoclicrbs.com.br/rs/noticia/2009/05/estiagem-182-municipios-ja-decretaram-situacao-de-emergencia-no-rs-2500579.html>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

DIDAN, K. **MOD13A1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.006>. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a1v006/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

DORNELLES, E. **RS tem 83% das cidades em situação de emergência; entenda a diferença entre seca e estiagem**. *Portal G1*, [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2022/02/23/rs-tem-83percent-das-cidades-em-situacao-de-emergencia-entenda-a-diferenca-entre-seca-e-estiagem.ghtml>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

EMATER/RS-ASCAR. **Estimativa da Safra de Verão 2021-2022**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2022. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/info-agro/acompanhamento_safra.php>. Acesso em: 14 abr. 2022.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ANTUNES, J. F. G. **Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil.** International Journal of Remote Sensing, [S.l.], v. 32, n. 13, p. 3711-3727, 2011. DOI: 10.1080/01431161003764112. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161003764112>>. Acesso em: 16 abr. 2022.

FERNANDES, D. S. *et al.* **Índices para a quantificação da seca.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 45p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 244). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/663874/1/doc244.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

FUNK, C. *et al.* **The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes.** Scientific Data, [S.l.], v. 2, n. 150066, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/sdata201566>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

G1 RS. **Quase 7 meses depois, seca ainda afeta mais de 140 municípios no RS.** Portal G1, [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/estiagem/noticia/2012/05/quase-7-meses-depois-seca-ainda-afeta-mais-de-140-municipios-no-rs.html>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

GAO, X. *et al.* **Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination.** Remote Sensing of Environment, [S.l.], v. 74, p. 609-620, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001504>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

GETIRANA, A. **Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space.** Journal of Hydrometeorology, [S.l.], v. 17, p. 591-599, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/17/2/jhm-d-15-0096_1.xml>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GORELICK, N. *et al.* **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.** Remote Sensing of Environment, [S.l.], v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

GROSS, J. A. **Índice de anomalia de chuva (IAC) dos municípios do Rio Grande do Sul afetados pelas estiagens no período de 1991 a 2012**. 2015. 99p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

GUSSO, A. *et al.* **Monitoring Heat Waves and Their Impacts on Summer Crop Development in Southern Brazil**. *Agricultural Sciences*, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 353-364, 2014. DOI: 10.4236/as.2014.54037. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=43991>>. Acesso em: 16 abr. 2022.

HAGMAN, G. *et al.* **Prevention Better than Cure: Report on human and environmental disasters in the Third World**. 3. ed. Estocolmo: Cruz Vermelha Sueca, 1984. 187p.

HOU, A. Y. *et al.* **The Global Precipitation Measurement Mission**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [S.l.], v. 95, n. 5, p. 701-722, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/95/5/bams-d-13-00164.1.xml>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

HUETE, A. *et al.* **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices**. *Remote Sensing of Environment*, [S.l.], v. 83, p. 195-213, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017: Resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html>. Acesso em: 11 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. v. I. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=22269>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017c. 82p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100600>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pmc/brasil>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

KATSANOS, D.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S. **Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period**. Atmospheric Research, [S.l.], v. 169B, p. 459-464, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.015>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016980951500174X>>. Acesso em: 21 mar. 2022.

KIEM, A. S. *et al.* **Natural hazards in Australia: droughts**. Climatic Change, [S.l.], v. 139, p. 37-54, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1798-7>. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1798-7>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LANDERER, F. W. *et al.* **Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance**. Geophysical Research Letters, [S.l.], v. 47, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL088306>>. Acesso em: 25 mar. 2022.

LAZZARI, M. R. **Safra 2004/05 de grãos de verão do RS: produção e preços em baixa**. Porto Alegre: Indicadores Econômicos FEE, v. 33, n. 2, p. 47-64, 2005. Disponível em: <<https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/indicadores/article/viewFile/1117/1448>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

LETTENMAIER, D. P. *et al.* **Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era**. Water Resources Research, [S.l.], v. 51, p. 7309-7342, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017616>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015WR017616>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

LIU, Y.; KAR, S. **Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review**. *Energies*, [S.l.], v. 7, n. 5, p. 2821-2849, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7052821>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/5/2821/htm>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MARTENS, B. *et al.* **GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture**. *Geoscientific Model Development*, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 1903-1925, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/10/1903/2017/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

MELESSE, A. M. *et al.* **Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling**. *Sensors*, [S.l.], v. 7, n. 12, p. 3209-3241, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7123209>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/7/12/3209/htm>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MORAES, E. C. de. **Capítulo 1: Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2002. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf?linktype=relative>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MOTA, F. S. da. *et al.* **Risco de Secas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul**. Brasília: Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 27, n. 5, p. 709-720, 1992. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/105628>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. **Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm**. *Remote Sensing of Environment*, [S.l.], v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711000691>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

NASA. **MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**. Estados Unidos: NASA, 2022. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

NEDEL, A. S.; SAUSEN, T. M.; SAITO, S. M. **Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003 – 2009 - Parte I: Seca.** In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. Anais [...] Belém: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.19.13.38/doc/20_95661.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2022.

PESSETI, M.; GOMES, L. C. **Região e Regionalização no Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, n. 36, p. 57-80, 2020. Disponível em: <<https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/4413>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul.** 6. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental, 2021. 203p. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

ROSSI, J. B. **Representação de eventos de secas no Brasil por produtos de sensoriamento remoto.** 2020. 91p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RUNNING, S. W. *et al.* **Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS.** International Journal of Remote Sensing, [S.l.], v. 15, n. 17, p. 3587-3620, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169408954346>. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169408954346>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

SAVE, H.; BETTADPUR, S.; TAPLEY, B. D. **High-resolution CSR GRACE RL05 mascons.** Journal of Geophysical Research: Solid Earth, [S.l.], v. 121, p. 7547-7569, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JB013007>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

SENAY, G. B. *et al.* **Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach.** Journal of the American Water Resources Association, [S.l.], v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jawr.12057>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

SCHAFFNER, F. **Estiagem deixa 5,4 mil famílias sem acesso à água no RS.** Gaúcha Zero Hora, [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2022/01/estiagem-deixa-54-mil-familias-sem-acesso-a-agua-no-rs-ckxz5drw6006o0188jxzx2o1j.html>>. Acesso em: 11 mar. 2022.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B. **Comparison of Four Different Energy Balance Models for Estimating Evapotranspiration in the Midwestern United States.** Water, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 9, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8010009>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/8/1/9/htm>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

SOUZA, C. M., Jr. *et al.* **Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine.** Remote Sensing, [S.l.], v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735>>. Acesso em: 17 abr. 2022.

TAPLEY, B. D. *et al.* **GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System.** Science, [S.l.], v. 305, n. 5683, p. 503-505, 2004. DOI: 10.1126/science.1099192. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1099192>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

VAN LOON, A. F. **Hydrological drought explained.** WIREs Water, [S.l.], v. 2, p. 359-392, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>. Disponível em: <<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wat2.1085>>. Acesso em: 25 mar. 2022.

VOGT, J. V. *et al.* **Drought Risk Assessment and Management.** Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2018. DOI: 10.2760/057223. Disponível em: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/55fa1d08-fc2e-11e8-a96d-01aa75ed71a1/language-en>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. **MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006.** NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

WAN, Z. **New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products.** Remote Sensing of Environment, [S.l.], v. 112,

p. 59-74, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.026>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425707003665>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

WEST, H.; QUINN, N.; HORSWELL, M. **Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities.** Remote Sensing of Environment, [S.l.], v. 232, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719303104>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

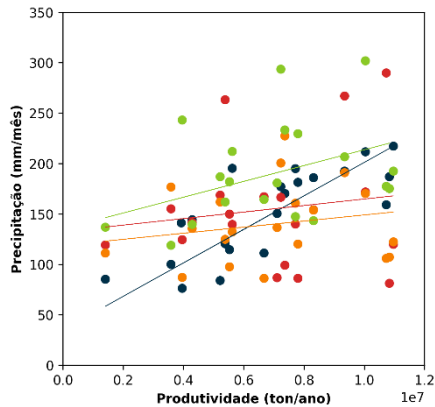
WILHITE, D. A. **Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions.** Londres: Drought: A Global Assessment, v. I, cap. 1, p. 3–18, 2000. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69/>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

WILHITE, D. A. **The Enigma of Drought.** Boston: Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies, cap. 1, p. 3-15, 1993. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/65/>>. Acesso em: 4 mar. 2022.

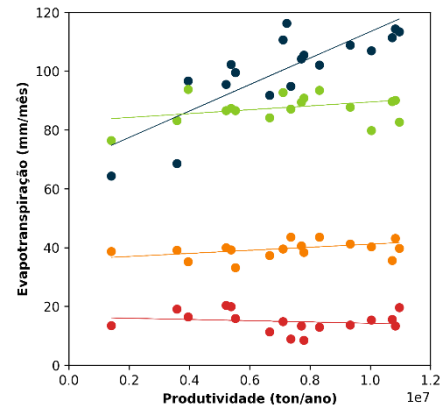
APÊNDICE A - GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Figura 13 - Correlação por trimestre entre valores absolutos das variáveis ambientais e da produção agrícola na área de estudo, de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.

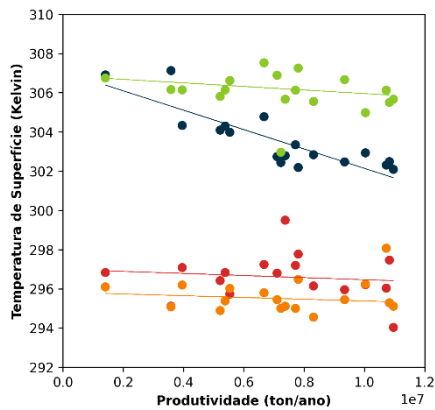
(a) Precipitação



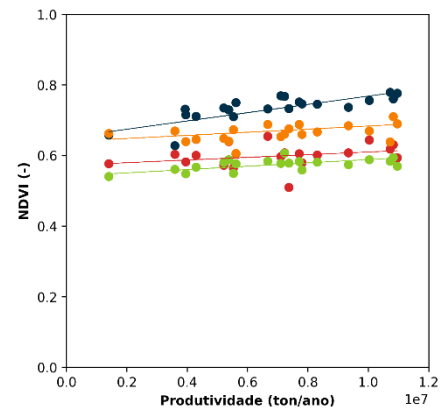
(b) Evapotranspiração



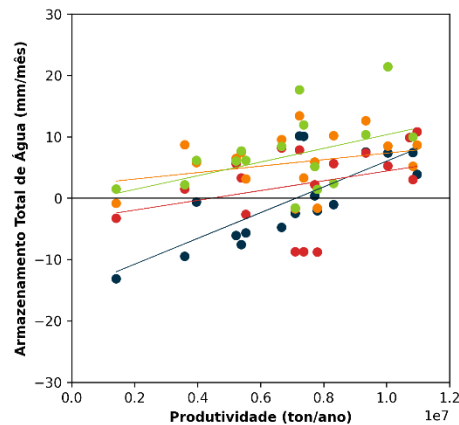
(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



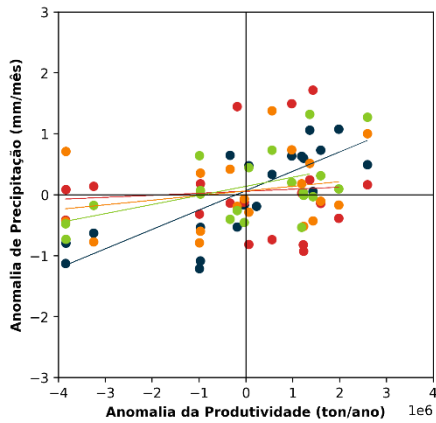
(e) Variação do armazenamento total de água



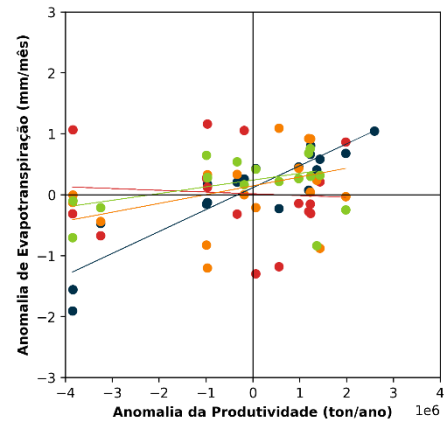
● Trimestre 1 ● Trimestre 2 ● Trimestre 3 ● Trimestre 4

Figura 14 - Correlação por trimestre entre anomalias das variáveis ambientais e da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.

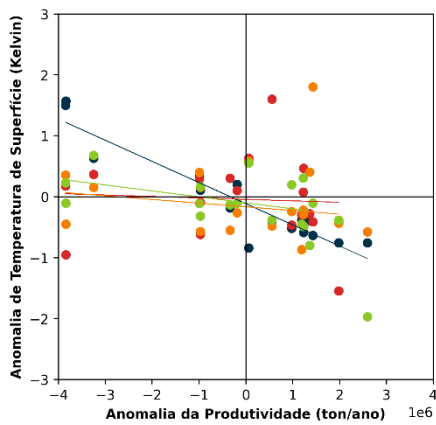
(a) Precipitação



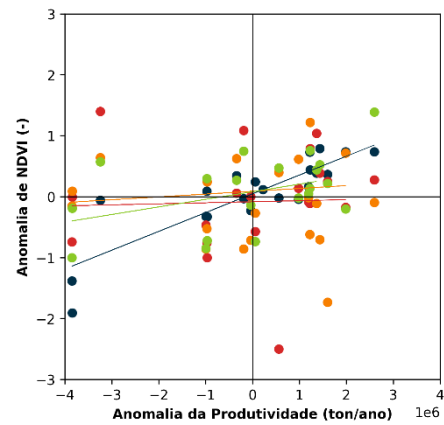
(b) Evapotranspiração



(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



(e) Variação do armazenamento total de água

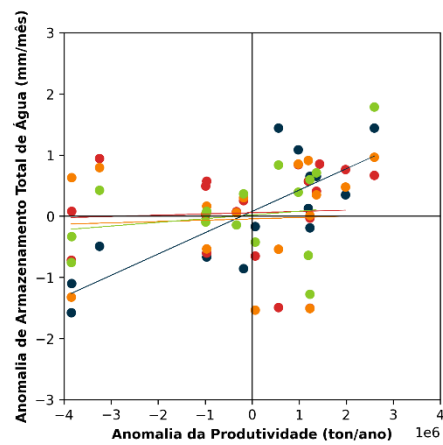
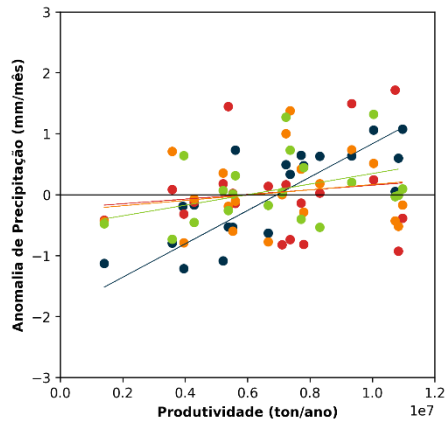
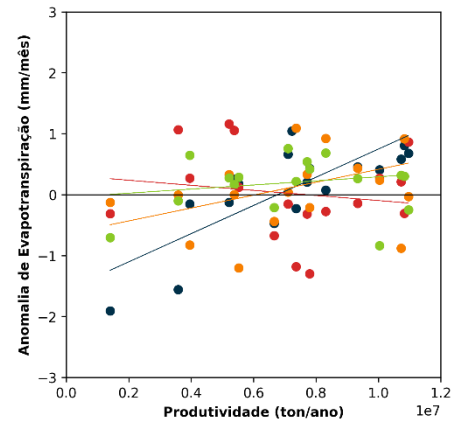


Figura 15 - Correlação por trimestre entre as anomalias das variáveis ambientais e os valores absolutos da produção agrícola na mesorregião Noroeste Rio-grandense, no período de 2000 a 2020. (a) Precipitação. (b) Evapotranspiração. (c) Temperatura de superfície. (d) NDVI. (e) Variação do armazenamento total de água.

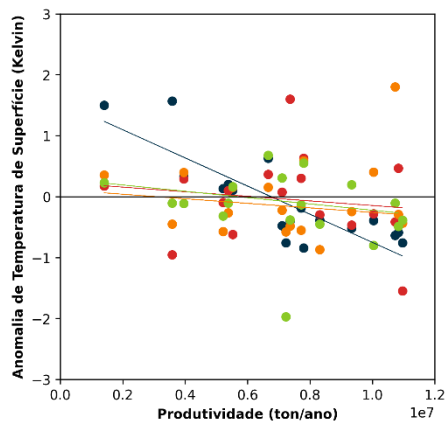
(a) Precipitação



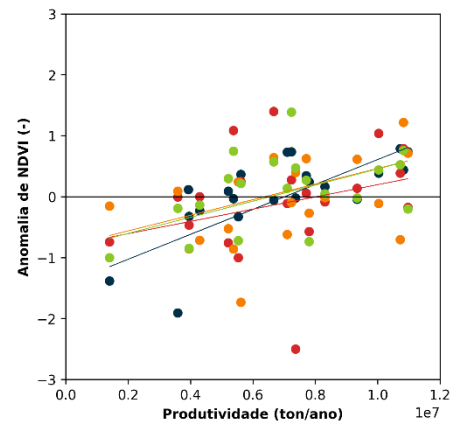
(b) Evapotranspiração



(c) Temperatura de superfície



(d) NDVI



(e) Variação do armazenamento total de água

