



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

Júlia Brusso Rossi

Representação de eventos de secas no Brasil por produtos
de sensoriamento remoto

Porto Alegre

Novembro 2020

JÚLIA BRUSSO ROSSI

**REPRESENTAÇÃO DE EVENTOS DE SECAS NO BRASIL POR PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Anderson Luis Ruhoff
Coorientador: Ayan Santos Fleischmann

Porto Alegre

Novembro 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Rossi, Júlia Brusso
Representação de eventos de secas no Brasil por
produtos de sensoriamento remoto / Júlia Brusso Rossi.
-- 2020.
91 f.
Orientador: Anderson Luis Ruhoff.

Coorientador: Ayan Santos Fleischmann.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. secas. 2. eventos extremos. 3. sensoriamento
remoto. I. Ruhoff, Anderson Luis, orient. II.
Fleischmann, Ayan Santos, coorient. III. Título.

JÚLIA BRUSSO ROSSI

REPRESENTAÇÃO DE EVENTOS DE SECAS NO BRASIL POR PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 23/11/2020 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Anderson Luis Ruhoff – Orientador

.....

Me. Ayan Santos Fleischmann – Coorientador

.....

Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes – UFMT

.....

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – IPH UFRGS

.....

Me. Adriana Aparecida Moreira – IPH UFRGS

Conceito:.....

Para Laura, minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Anderson Luis Ruhoff, e ao coorientador Ayan Santos Fleischmann, por toda a dedicação e suporte para a realização deste trabalho, e por todo o aprendizado que este me proporcionou.

A todos os professores e professoras que fizeram parte da minha graduação, e inspiraram meu interesse pela pesquisa.

Aos meus pais, minha irmã, amigos(as) e colegas, por todo o apoio, amizade e incentivo durante a graduação.

Ao meu namorado e colega, Leonardo Laipelt, por toda a atenção e paciência ao me auxiliar na elaboração deste TCC, ao me apoiar durante a graduação, e por todo o seu companheirismo.

RESUMO

Os eventos extremos de secas ocorrem de formas distintas em diferentes regiões do Brasil, considerando o seu tempo de duração, intensidade, e efeitos para o meio ambiente e sociedade de modo geral. A identificação e caracterização destes processos, em cada região, se apresentam como uma forma de avaliação, monitoramento e possível controle dos impactos das secas. Para tanto, a análise de variáveis climáticas e hidrológicas, obtidas de produtos de sensoriamento remoto, se mostra como uma alternativa para a caracterização de eventos de escassez hídrica. Neste sentido, este estudo tem como objetivo identificar e comparar como ocorreram determinados eventos extremos de secas, em diferentes regiões do país, avaliando sua duração e intensidade, e correlacionando diversas variáveis ambientais com vista a obter padrões na ocorrência destes eventos. Foram avaliadas quatro regiões do país e eventos extremos de secas ocorridos em cada região, sendo: a Região Norte – Amazônia (seca de 2010), a Região Nordeste (seca de 2012), a Região Sudeste (seca de 2014), e a Região Sul – Estado do Rio Grande do Sul (seca de 2012). Foram utilizados dados obtidos por sensoriamento remoto, disponíveis na plataforma Google Earth Engine, para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2016. As variáveis de interesse deste estudo foram a precipitação (IMERG), a temperatura de superfície (MOD11), a anomalia no armazenamento total de água (GRACE), a evapotranspiração (GLEAM e MOD16) e os índices de vegetação NDVI, EVI (MOD13) e GPP (MOD17). Com estes dados, se obteve o comportamento das variáveis na estação seca de cada região, seus padrões temporais, e a correlação entre estas variáveis, para cada região. Os resultados deste estudo indicaram os padrões característicos de eventos extremos de secas, e como estes ocorrem em diferentes regiões do Brasil, verificando o comportamento das variáveis em cenários com e sem a presença de secas. A seca extrema da Amazônia, em 2010, gerou grande redução de precipitação, o que provocou redução no armazenamento total de água, e nos índices EVI e NDVI. Na Região Nordeste, antes da seca de 2012, a precipitação, a ET e os índices de vegetação já apresentavam anomalias muito negativas, e depois da seca, os registros de anomalias negativas seguiram para a ET, o armazenamento total de água e os índices de vegetação. Na Região Sudeste, a seca de 2014 provocou queda na anomalia de armazenamento total de água, registrando valor muito menor que a média para o período, sendo que essa variável só se recuperou em 2016. No Rio Grande do Sul, para a seca de 2012, a variação no armazenamento total de água também registrou grande redução nos valores. Destaca-se a variável de anomalia no armazenamento total de água, obtida pelo produto GRACE, que representou muito bem os eventos de secas. Espera-se que os resultados obtidos neste estudo sejam úteis para melhor compreender como ocorrem os eventos extremos de secas no Brasil, podendo contribuir para o gerenciamento dos recursos disponíveis em cenários extremos de escassez hídrica.

Palavras-chave: secas, eventos extremos, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Extreme drought events occur in distinct ways for different regions of Brazil, considering their duration, intensity, and effects on the environment and society. The identification and characterization of these processes, in each region, are presented as a form of assessment, monitoring and possible control of drought impacts. Therefore, the analysis of climatic and hydrological variables, obtained from remote sensing products, is shown as an alternative for the characterization of water scarcity events. Thus, this study aims to identify and compare how certain extreme drought events occurred, in different regions of the country, assessing their duration and intensity, and correlating the environmental variables in order to obtain patterns in the occurrence of these events. Extreme droughts in four regions of the country were evaluated: the North Region – Amazon (2010 drought), the Northeast Region (2012 drought), the Southeast Region (2014 drought), and the South Region – State of Rio Grande do Sul (2012 drought). Remote sensing data available on the Google Earth Engine platform were processed for the period from January 2003 to December 2016. The variables of interest in this study were precipitation (IMERG), surface temperature (MOD11), total water storage anomaly (GRACE), evapotranspiration (GLEAM and MOD16) and vegetation indices - NDVI, EVI (MOD13) and GPP (MOD17). With these data, the behavior of the variables in the defined drought period, their temporal patterns, and the correlation between these variables, for each region, were discussed. The results of this study indicated the characteristic patterns of extreme drought events, and how they occurred in different regions of Brazil, verifying the behavior of variables in scenarios with and without the presence of droughts. The Amazon extreme drought, in 2010, generated a great reduction in precipitation, which caused a reduction in total water storage, and EVI and NDVI indices. In the Northeast Region, before the 2012 drought, precipitation, ET and vegetation indices already showed very negative anomalies, and after the drought, the records of negative anomalies followed for ET, total water storage and vegetation indices. In the Southeast Region, the drought of 2014 caused a decrease in total water storage anomaly, registering a value much lower than the average for that period, and this variable only recovered in 2016. In Rio Grande do Sul, for the 2012 drought, the variation in total water storage also registered a great reduction in values. Stands out that the variable of anomaly in total water storage, obtained by GRACE product, represented drought events very well. The results obtained in this study are expected to be useful to better understand how extreme drought events occur in Brazil, and may contribute to the management of available resources in extreme water scarcity scenarios.

Keywords: droughts, extreme events, remote sensing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	SECAS NO BRASIL	17
3.1.1	Região Norte (Amazônia)	18
3.1.2	Região Nordeste	20
3.1.3	Região Sudeste.....	22
3.1.4	Região Sul (Estado do Rio Grande do Sul)	25
3.2	PRINCIPAIS SISTEMAS DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA ATUANTES NO BRASIL 26	
3.2.1	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	26
3.2.2	El Niño - Oscilação Sul.....	27
3.2.3	Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	31
3.3	SENSORIAMENTO REMOTO.....	31
3.3.1	Temperatura de Superfície	35
3.3.2	Precipitação	35
3.3.3	Anomalia no armazenamento total de água	36
3.3.4	Evapotranspiração (GLEAM e MOD16).....	37
3.3.5	Índices de Vegetação (EVI, NDVI e GPP)	38
4	ÁREAS E EVENTOS DE ESTUDO	42
4.1	AMAZÔNIA: SECA DE 2010	43
4.2	REGIÃO NORDESTE: SECA DE 2012.....	44
4.3	REGIÃO SUDESTE: SECA DE 2014.....	44
4.4	ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL: SECA DE 2012.....	45
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
5.1	OBTENÇÃO DOS DADOS	46
5.2	ANÁLISE DOS DADOS	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
6.1	AMAZÔNIA.....	53
6.2	REGIÃO NORDESTE	59

6.3	REGIÃO SUDESTE.....	63
6.4	ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	68
6.5	SÍNTESE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DAS SECAS EM CADA REGIÃO.....	73
7	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
	ANEXOS.....	88

FIGURAS

Figura 1: Comparação de clima em um cenário de vegetação de floresta tropical versus vegetação de pasto (Fonte: adaptado de Chapin, et al. (2011)).	20
Figura 2: Cenário climático normal versus situação do verão de 2014 na Região Sudeste. (Fonte: Marengo et al., 2015).	24
Figura 3: Padrão de circulação da célula de Walker em condição de El Niño. (Fonte: adaptado de Climate).	28
Figura 4: Representação do padrão atmosférico e oceânico em condições normais, El Niño e La Niña. (Fonte: adaptado de Shuttleworth (2012)).	29
Figura 5: Efeito dos fenômenos El Niño e La Niña na América do Sul. (Fonte: adaptado de CPTEC-INPE, 2020).	30
Figura 6: Espectro eletromagnético. (Fonte: adaptado de Purkis e Klemas (2011)).	32
Figura 7: Representação de alguns dos principais satélites a orbitar a Terra (Fonte: Nasa).	34
Figura 8: Assinaturas espectrais da vegetação. (Fonte: Planet Watchers).	40
Figura 9: Localização dos polígonos a serem analisados.	42
Figura 10: Médias das variáveis analisadas no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – JJAS (azul) e no período de seca em 2010 – evento extremo (vermelho).	54
Figura 11: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.	56
Figura 12: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.	57
Figura 13: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Amazônia, para o período de 2003 a 2016.	58
Figura 14: Médias das variáveis analisadas no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – JASO (azul) e no período de seca em 2012 – evento extremo (vermelho).	59
Figura 15: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.	61
Figura 16: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As	

linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.	62
Figura 17: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Região Nordeste, para o período de 2003 a 2016.	63
Figura 18: Médias das variáveis analisadas no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – MJJA (azul) e no período de seca em 2014 – evento extremo (vermelho).....	64
Figura 19: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.	65
Figura 20: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.	66
Figura 21: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Região Sudeste, para o período de 2003 a 2016.	68
Figura 22: Médias das variáveis analisadas no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – DJFM (azul) e no período de seca em 2011/2012 – evento extremo (vermelho).....	69
Figura 23: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.....	70
Figura 24: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.	71
Figura 25: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono do Rio Grande do Sul, para o período de 2003 a 2016.	73
Figura 26: Síntese comparativa do comportamento das variáveis no período de secas, em cada uma das regiões de interesse.	74
Figura 27: Correlação entre as variáveis, para o período de 2003 a 2016, em todos os polígonos.....	76

QUADROS

Quadro 1: Últimas ocorrências de El Niño e La Niña e intensidade do fenômeno (Fonte: CPTEC-INPE, 2020).	29
Quadro 2: Períodos sem resultados disponíveis no GRACE.	48
Quadro 3: Síntese de informações dos produtos utilizados.	50

ANEXOS

Anexo 1: Mapa da Região da Amazônia Legal, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.	89
Anexo 2: Mapa da Região Nordeste do Brasil, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.	90
Anexo 3: Mapa da Região Sudeste do Brasil, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.	91
Anexo 4: Mapa do estado do Rio Grande do Sul, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.	92

1 INTRODUÇÃO

Eventos extremos são ocorrências naturais caracterizadas pela sua intensidade e/ou duração. Eventos extremos de caráter climático e hidrológico são eventos que estão diretamente ligados à ocorrência de precipitação em uma determinada região, porém, não se limitam a este parâmetro, sendo influenciados diretamente pela temperatura e cobertura e uso do solo no local. Conforme (MARENGO et al., 2013), secas e inundações são causadas por chuvas insuficientes ou excessivas, início tardio ou precoce das estações chuvosas, ou altas temperaturas do ar e baixa umidade para secas.

Os eventos hidrológicos extremos englobam períodos com alto volume de chuvas (eventos de cheias/inundações) e períodos de intensa estiagem (eventos de secas). Eventos de enchentes e secas possuem profundo impacto na sociedade e afetam consideravelmente a segurança humana, o abastecimento de água, a produção de alimentos e a geração de energia (GETIRANA, 2016). Os eventos de secas se diferenciam de eventos de cheias por terem a tendência de perdurar por longos períodos.

No Brasil, em 2018, cerca de 43 milhões de pessoas foram afetadas por eventos de secas e estiagens, 30 vezes mais que por cheias. Neste mesmo ano, em 38% dos eventos de secas registrados foi declarado que 100% da população do município foi afetada por algum dano humano oriundo deste evento, o que indica que os impactos da seca não costumam ser pontuais, dispendo de forte tendência a se propagar pelo território. (ANA, 2019).

Os impactos da seca nos sistemas socioeconômicos e ecológicos são o resultado da falta de água que é causada pela complexa interação de processos naturais e antropogênicos (VAN LOON et al., 2016). Ocorrências de eventos de secas são reportadas em todas as regiões do Brasil, provocando impactos no abastecimento de água para consumo humano, dessedentação de animais, e irrigação de culturas. Porém, em função da dimensão do país, cada região possui características específicas de clima, vegetação e geologia, além de diferente densidade populacional, o que influencia na frequência e intensidade das secas em cada lugar.

Para avaliar os impactos desses eventos extremos, e inclusive prever novas situações de secas, podem ser utilizados recursos como o monitoramento de variáveis ambientais por medição em campo, ou por sensoriamento remoto. Os satélites permitem a obtenção de dados hidrológicos, climáticos e de vegetação em uma larga escala espacial e temporal, e a disponibilização destes dados em sítios *online* favorece o processo de análise desses resultados, para identificação de eventos extremos. Neste sentido, existem vários índices e

produtos de sensoriamento remoto disponíveis, mas a análise desses produtos e do comportamento das secas no Brasil ainda não é consolidada.

Neste estudo são avaliados episódios recentes de secas no Brasil, em diferentes regiões do país, a partir da análise de variáveis hidrológicas, climáticas e índices de vegetação, obtidos por sensoriamento remoto e disponibilizados em uma plataforma online (Google Earth Engine). Será avaliado o tempo de resposta e de recuperação de cada variável em relação a suas anomalias, determinando a duração e intensidade dos eventos hidrológicos extremos. Com isso espera-se caracterizar as secas extremas em cada uma das regiões estudadas, identificando os padrões e relações entre essas ocorrências no país.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é realizar um estudo de hidrologia comparativa de secas no Brasil através de observações de variáveis ambientais a partir de sensoriamento remoto, comparando diferentes regiões do Brasil. Ainda, as secas são avaliadas conforme sua duração e intensidade a partir da análise de variáveis ambientais como precipitação, evapotranspiração (ET), temperatura de superfície, armazenamento total de água, e índices de vegetação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos estabeleceu-se:

- Verificar como cada variável obtida por produto de sensoriamento remoto se comporta em diferentes regiões do Brasil, e como esse comportamento se altera durante eventos extremos de seca;
- Avaliar as variáveis conforme seu tempo de resposta e de recuperação em relação à determinado evento de seca;
- Comparar as respostas obtidas pelos produtos referentes a diferentes variáveis ambientais, estabelecendo correlações entre as variáveis, para as diferentes regiões estudadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SECAS NO BRASIL

A seca surge como consequência da redução natural da quantidade de precipitação recebida durante um longo 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 para abastecimento de água de uma região (WILHITE, 2000).

As secas são um fenômeno natural que se diferencia das demais ocorrências naturais (como cheias, furacões e terremotos), pois essas são repentinas e se restringem normalmente a uma pequena região, enquanto que o fenômeno das secas tem, quase sempre, um início lento, longa duração, e abrangência de extensa área (FREITAS, 1998).

Quanto aos tipos de secas, estas são definidas em seca meteorológica, seca agrícola, e seca hidrológica, conforme Wilhite (2000):

- A seca meteorológica (evento natural) é o resultado da ocorrência de interrupções persistentes em grande escala no padrão de circulação global da atmosfera.
- A seca agrícola vincula várias características da seca meteorológica aos impactos agrícolas, com foco na escassez de precipitação, diferenças entre a evapotranspiração (ET) real e a potencial, déficits de água no solo e assim por diante.
- A seca hidrológica está associada aos efeitos de períodos de queda de precipitação no abastecimento de água superficial ou subterrâneo.

Dessa forma, as secas meteorológicas resultam de deficiências de precipitação, enquanto que as secas agrícolas são em grande parte o resultado de deficiências de umidade do solo (WILHITE, 2000).

De forma geral, a crise hídrica é gerada por uma conjunção de fatores que incluem a falta de gerenciamento dos recursos hídricos e a escassez de chuva (MARENGO et al., 2015). O monitoramento e análise das secas no Brasil serve de auxílio para determinação de regiões com possível ocorrência de escassez de água, o que provocaria impactos em diferentes setores que fazem uso da água, como abastecimento, irrigação, indústria, entre outros.

O impacto da seca está diretamente relacionado às características climáticas e hidrológicas da região de ocorrência da mesma, sendo a precipitação o fator de maior interferência na ocorrência das secas. A precipitação média anual do Brasil é de 1.760 mm, mas por causa das suas dimensões continentais, o total anual de chuva varia de menos de

500 mm na região semiárida do Nordeste, a mais de 3.000 mm na região Amazônica (ANA, 2019). Neste sentido, é de se esperar que essas diferentes regiões do Brasil tenham comportamentos distintos em relação à ocorrência de secas e estiagens.

Conforme Relatório da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), as regiões mais críticas em termos de secas são as regiões Sudeste, Sul e Nordeste. Ainda, conforme este Relatório, a Região Sudeste se destaca pelo uso da água para abastecimento humano, irrigação e na indústria, enquanto que na Região Sul é expressiva a retirada de água para irrigação de grandes lavouras de arroz pelo método de inundação. Em relação à Região Nordeste, esta apresenta demanda considerável em relação à sua disponibilidade hídrica.

Considerando a importância da Amazônia para a disponibilidade hídrica do país, e sabendo das regiões com situação mais crítica em termos de secas, foram definidas as regiões para as análises de secas no Brasil para este estudo. Assim, foram selecionadas quatro regiões de interesse, sendo estas: a Região Norte (Amazônia), a Região Nordeste, a Região Sudeste, e a Região Sul (Estado do Rio Grande do Sul).

3.1.1 Região Norte (Amazônia)

A Amazônia Legal é uma região ao norte do Brasil que ocupa uma área de mais de 5.000.000 km², e é composta pelos estados de, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, e parte do Estado do Maranhão. Esta região engloba todo o bioma Amazônia no território brasileiro, além de parte do bioma Cerrado e do bioma Pantanal.

Para a bacia amazônica, nas regiões ao sul do equador, os meses de dezembro a março são considerados a estação chuvosa, enquanto que os meses de junho a setembro são a estação seca (MARENGO; ESPINOZA, 2016). Na parte da Amazônia que fica ao norte do equador (e.g., bacia do rio Negro, Roraima), a estação chuvosa ocorre no período inverso.

O fenômeno de anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), no Oceano Pacífico, costuma interferir na disponibilidade hídrica da Amazônia, provocando muitas vezes eventos de secas. As secas mais intensas na Amazônia nos últimos anos ocorreram nos anos de 2005, 2010 e 2015/16 (GOMES et al., 2018; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; JIMENEZ; LIBONATI; PERES, 2018; MARENGO et al., 2018b; PANISSET et al., 2017). Segundo Marengo et al. (2011), desde o final da década de 1970, as anomalias de TSM no Atlântico Norte tropical aumentaram gradativamente, atingindo altos valores em 1980, 1998, 2005 e 2010, os quais coincidem com anos de seca na Amazônia.

Porém, conforme mencionado anteriormente, nem todo evento de anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) provocou fenômenos de El Niño e La Niña.

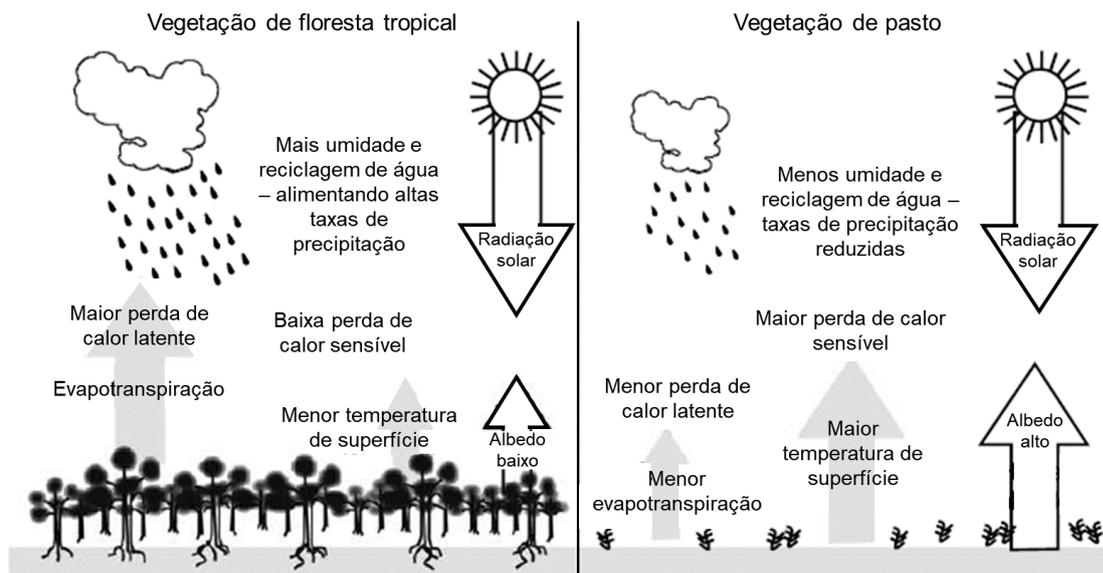
Enquanto que a seca de 2005 foi relacionada a um Atlântico Norte tropical mais quente do que o normal, na ausência do El Niño (MARENGO; ESPINOZA, 2016), a seca de 2010 começou durante um evento El Niño no início do verão de 2010 e então se tornou mais intensa durante o La Niña na estação seca do inverno e na primavera seguinte (MARENGO et al., 2011). O evento extremamente quente de 2015/2016 se destaca pela extensa área sob severidade extrema de seca, afetando as florestas tropicais, de fevereiro a março de 2016 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016), estando relacionado a um El Niño muito forte.

O aquecimento no Atlântico Norte tropical durante 2010 foi o mais forte de todo o período de 1903-2010, e atingiu seu pico entre março e maio, época em que a posição climatológica média da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está sobre a Amazônia central e leste, o que forçou a ZCIT a se deslocar anormalmente ao norte (MARENGO et al., 2011). O capítulo 3.2.1 apresenta mais detalhes sobre os processos que envolvem a ZCIT. Além da influência dos fenômenos de anomalias de temperatura sobre os oceanos, as secas na Amazônia podem ainda sofrer impacto do desmatamento que ocorre na parte sul da Amazônia. Conforme estudo de Bagley et al. (2014), a redução da precipitação, induzida pelo desmatamento, foi evidente em todas as regiões de seca da bacia do sul da Amazônia, sendo que grande parte dessa redução ocorreu devido ao desmatamento na região centro-sul da Amazônia.

Segundo o portal TerraBrasilis do INPE¹, na Amazônia Legal, de 1988 a 2019, aproximadamente 446.355 km² de floresta foram desmatados. Parte desta área desmatada foi convertida em campo ou pasto para a agropecuária, setor este muito presente na região. O impacto do desmatamento e conversão do solo em pastagem é esquematizado na Figura 1, onde, como resultado deste processo, pode ocorrer a perda de umidade e a redução de precipitação na área atingida, podendo assim afetar o regime hídrico, e a ocorrência de secas.

¹ Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation>>. Acesso em: 03 de outubro de 2020.

Figura 1: Comparação de clima em um cenário de vegetação de floresta tropical versus vegetação de pasto (Fonte: adaptado de Chapin, et al. (2011)).



Conforme artigos de jornais publicados na época, a seca de 2010 na Amazônia atingiu pelo menos 62 mil famílias (UOL NOTÍCIAS, 2010) e deixou mais da metade do Amazonas em estado de emergência (G1, 2010).

3.1.2 Região Nordeste

A Região Nordeste do Brasil (NEB) possui extensão territorial de aproximadamente 1.554.291 km² e abrange nove estados litorâneos, sendo estes: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. O nordeste do Brasil é uma região relativamente seca com precipitação média anual inferior a 700 mm (REBOITA et al., 2010).

A NEB se destaca por ser uma região árida de baixa disponibilidade hídrica e escassez hídrica. Os baixos índices de precipitação, a irregularidade do seu regime, temperaturas elevadas durante todo o ano, a baixa capacidade de armazenamento de água no solo, entre outros fatores, contribuem para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica observados no Nordeste Brasileiro, em particular na região Semiárida e no Nordeste Setentrional (estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco), que tem 88% do seu território no Semiárido (ANA, 2019).

As condições climáticas do Nordeste sofrem influência dos fenômenos de El Niño e La Niña, que provocam alterações na precipitação da região. Importante destacar que o Nordeste

já é caracterizado pelo clima seco, com temperaturas altas, baixa precipitação e baixo armazenamento de água no solo. Segundo Marengo et al. (2013), as condições de seca no Nordeste do Brasil estão relacionadas às condições meteorológicas locais e sua influência é maximizada quando o esgotamento da água do solo é controlado principalmente pela evaporação com pouca ou nenhuma chuva.

No caso da NEB, as condições de maior seca são observadas durante o outono (JIMENEZ et al., 2019), sendo que, no semiárido, as chuvas ocorrem de forma mais intensa entre os meses de janeiro a abril, e o período seco ocorre entre os meses de junho e novembro (MELATI et al., 2019).

Nos eventos de El Niño em 1983, 1998 e 2016, foram observados déficits generalizados de precipitação no Nordeste (JIMENEZ et al., 2019). Entre 2010 e 2017 o Nordeste enfrentou um evento extremo de seca, sendo o período caracterizado pela ocorrência de chuvas irregulares, influenciado pelos fenômenos de La Niña em 2011/2012 e de El Niño em 2015/2016.

No ano de 2010, apesar da seca, os reservatórios estavam cheios devido aos dois anos chuvosos anteriores. Em 2011 as chuvas ocorreram em torno da média, embora não tenha havido acumulação de água. Contudo, a partir de 2012 até 2015, a região enfrentou um caso de secas pluri- anuais, sendo que o ano de 2015 foi o quarto ano seguido de secas consecutivas. Além de perdas nas atividades agrícolas, muitos reservatórios secaram, deixando diversas cidades rurais sem água e sem fontes alternativas (Nys De et al., 2016).

Durante a La Niña de 2012, mesmo ano de inundações na Amazônia, o Nordeste declarou estado de emergência na maioria dos distritos da região devido a uma seca considerada a mais severa dos últimos 30 anos (MARENGO et al., 2013). O El Niño de 2015 potencializou o efeito da estiagem iniciada em 2010, provocando perdas na agropecuária, abastecimento de água e economias locais devido à seca (Marengo, et al., 2018).

A bacia do Rio São Francisco, que possui boa parte de sua área localizada no Semiárido, também enfrentou condições hidrológicas adversas desde 2012, com vazões e precipitações abaixo da média e, conseqüentemente, grande redução nos níveis de armazenamento de seus reservatórios (ANA, 2019). A seca que se intensificou em 2012 e se estendeu até 2015 é considerada a mais severa das últimas décadas e impactou muitos distritos do semiárido dos estados do NEB, afetando quase 9 milhões de pessoas (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

3.1.3 Região Sudeste

Na Região Sudeste do Brasil estão localizados os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santos e Minas Gerais, ocupando uma área total de mais de 924 mil km². Esta região abriga os três estados mais populosos do país, sendo estes: São Paulo com 41.262.199 habitantes, Minas Gerais com 19.597.330 habitantes e Rio de Janeiro com 15.989.929 habitantes, conforme o último censo do IBGE (2010). Essa Região se caracteriza pela presença de diversas atividades econômicas com relevante parque industrial.

Em função da densidade populacional da Região Sudeste, é de grande importância que o poder público atente para o correto gerenciamento dos recursos hídricos, monitorando a possibilidade de escassez de água, que por consequência, levaria ao desabastecimento na região. Conforme Nobre et al. (2016) extremos hidrometeorológicos e climáticos podem exercer pressões profundas sobre os ambientes urbanos. Na Região Sudeste destacam-se os usos da água para abastecimento, geração de energia elétrica, irrigação e uso industrial.

No Estado de São Paulo está localizado o Sistema Cantareira, um complexo de represas administrado pela Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, e considerado dos maiores sistemas de abastecimento de água potável do mundo (MARENGO et al., 2015). Conforme ANA (2020), o Sistema Cantareira produz 33 m³/s de água, abastecendo aproximadamente 46% da população da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O Sistema Equivalente do Cantareira é formado por cinco reservatórios conectados por túneis subterrâneos e canais. Este complexo de represas faz a transposição entre a Bacia do Rio Piracicaba para a Bacia do Alto Tietê, sendo que a maior parte do volume de água produzido (31 m³/s) vem da Bacia do Rio Piracicaba. É importante destacar que cerca de 45% da área produtora de água para o Sistema está em território mineiro. Os meses de novembro a março são responsáveis, em média, por 72% da precipitação total anual na região do Sistema Cantareira (MARENGO et al., 2015).

Ainda, em relação aos usos da água, a disponibilidade hídrica também se faz necessária para garantir a geração de energia elétrica no país. Segundo (COELHO et al., 2016), cerca de 70% da eletricidade do Brasil é produzida atualmente com usinas hidrelétricas, sendo a maior parte delas concentrada na Região Sudeste do país.

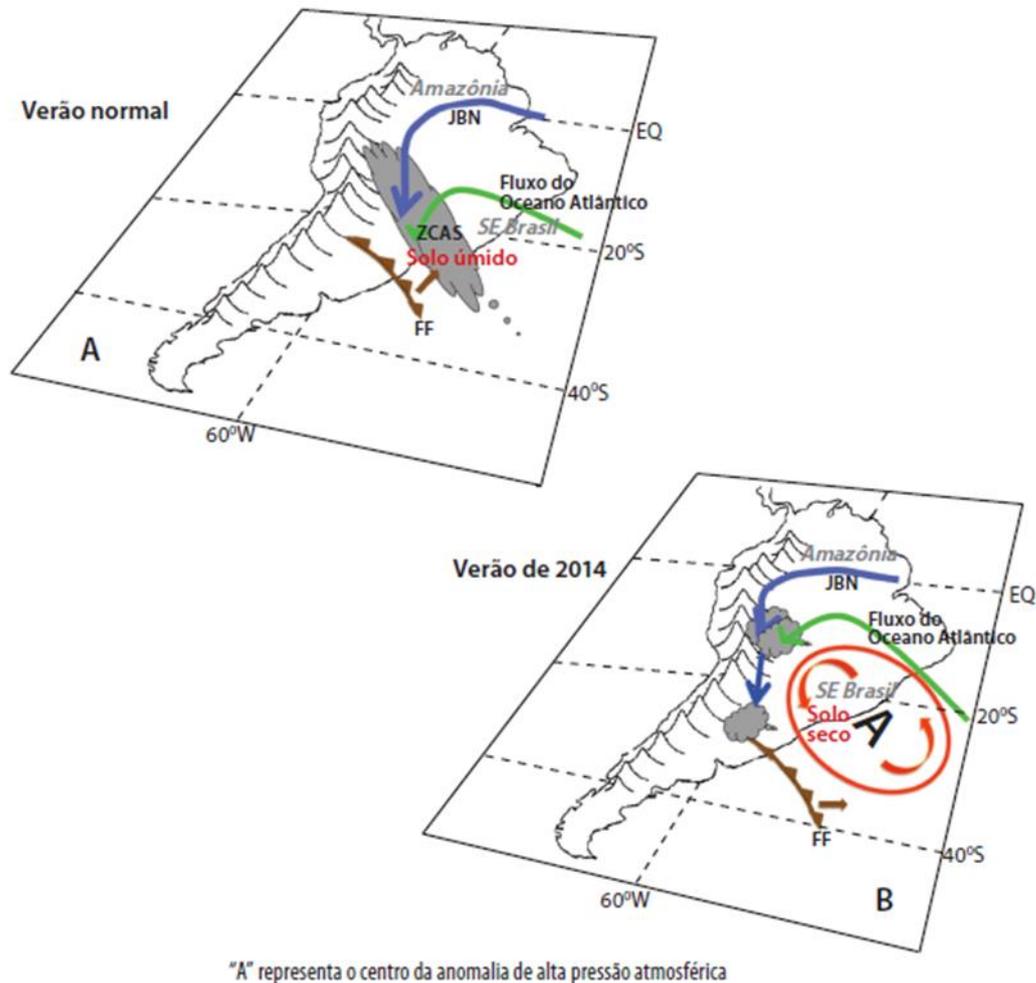
Nessa Região do país as precipitações apresentam um ciclo anual bem definido, onde a estação chuvosa começa em outubro e termina em abril (OBREGÓN; MARENGO; NOBRE, 2014), com volumes máximos nos meses de dezembro a fevereiro (verão) e valores mínimos durante o período de junho a agosto (inverno) (MARENGO et al., 2015).

Conforme (MARENGO et al., 2015), o regime de chuvas na Região Sudeste sofre influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), da passagem de frentes frias e de condições de forte instabilidade termodinâmica, muitas vezes incrementada pela atuação do Jato de Baixos Níveis (JBN) que transporta umidade da Amazônia para o Sul e o Sudeste do Brasil. O capítulo 3.2.3 apresenta mais informações sobre a ZCAS. Em relação às secas, a Região Sudeste experimentou secas intensas em 1953, 1971 e 2001 (MARENGO et al., 2015), além do grande episódio de escassez de chuva em 2014.

O mês de dezembro de 2013 foi marcado por um episódio de ZCAS muito intenso, que gerou grande volume de chuvas na porção norte do sudeste do Brasil, afetando o norte de Minas Gerais e o Espírito Santo. Compensando as chuvas extremas, na porção sul do sudeste houve precipitação escassa e altas temperaturas, atingindo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e o sul de Minas Gerais. Mesmo com a dissipação da ZCAS no final de dezembro de 2013, a precipitação permaneceu reduzida, sendo que, na região da Cantareira, de dezembro de 2013 a fevereiro de 2014 a precipitação foi cerca de 60% - 70% abaixo do normal (NOBRE et al., 2016).

A escassez de chuva em 2014 foi causada pela atuação de um sistema de alta pressão anormalmente intenso e prolongado. A região de alta pressão inibiu a formação de chuvas e provocou um bloqueio atmosférico, que impediu a passagem de sistemas frontais, assim como o desenvolvimento da ZCAS, e chegada da umidade transportada pelo JBN da Amazônia. O bloqueio (anticiclone) impediu a chegada de frentes frias, que ficaram estacionadas sobre o Sul do Brasil, e somente em fevereiro de 2014 uma frente fria intensa conseguiu deslocar o sistema de alta pressão para fora do continente (MARENGO et al., 2015). A Figura 2 compara o cenário climático de um verão normal na Região Sudeste com o cenário do verão de 2014, onde o anticiclone é indicado pela letra "A".

Figura 2: Cenário climático normal versus situação do verão de 2014 na Região Sudeste. (Fonte: Marengo et al., 2015).



Houve déficit de chuvas até o final da estação chuvosa, em março de 2014. Este mesmo cenário se repetiu no verão de 2015, pela presença de outro sistema anômalo de alta pressão, em menor intensidade. O cenário de 2015, somado à estiagem do ano anterior, resultou em escassez da umidade do solo, provocando a redução das chuvas (MARENGO et al., 2015).

De forma geral, os setores de abastecimento de água, agricultura e geração de energia foram severamente afetados por essa seca, visto que a região é densamente povoada e acomoda as principais usinas hidrelétricas do país, numerosos centros industriais e campos de irrigação, que juntos requerem uma grande quantidade contínua de água (GETIRANA, 2016).

3.1.4 Região Sul (Estado do Rio Grande do Sul)

O Estado do Rio Grande do Sul é o estado localizado mais ao sul do território brasileiro, possui área total de 281.707,15 km², e conta com uma população de 11.422.973 habitantes, aproximadamente 5,4% da população brasileira, sendo o quarto estado mais populoso do Brasil (RIO GRANDE DO SUL, 2020). O Rio Grande do Sul possui dois biomas em seu território, o bioma de Mata Atlântica, que ocupa a metade norte do estado e o bioma Pampa, cuja ocorrência no Brasil é restrita ao Rio Grande do Sul, e ocupa a metade sul do estado.

Conforme o (RIO GRANDE DO SUL, 2020), o clima do Rio Grande do Sul é Temperado do tipo Subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido (classificação de Köppen). A sua posição geográfica reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica. O estado se caracteriza por grande variação sazonal na temperatura, com verões quentes e invernos bastante frios, as temperaturas médias variam entre 15 e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C. Em relação à precipitação, as chuvas ocorrem de forma equilibrada o ano todo, sendo que ao sul do estado a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500 mm e, ao norte a média está entre 1.500 e 1.800 mm, com intensidade maior de chuvas à nordeste do estado.

Mesmo com a característica de presença de chuvas o ano todo, o Rio Grande do Sul está sujeito a prolongadas e severas secas (MOTA et al., 1992). Conforme artigos de jornais, foram registradas secas no RS em 2005, 2009 (CLICRBS, 2009; GROSS, 2015; NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2009), 2012 (G1 RS, 2012; GAÚCHA ZH, 2012; GROSS, 2015), 2015 (G1 RS, 2015a, 2015b) e 2020 (GAÚCHA ZH, 2020). A seca no estado do Rio Grande do Sul afeta muito o crescimento e colheita de culturas no estado. A parte norte do estado é caracterizada pela presença de culturas cultivadas em rotação, por exemplo, soja, milho e trigo, sendo soja a principal (ANDERSON et al., 2016). De forma geral, a época de plantio ocorre entre setembro e fevereiro, e a colheita entre março e abril, podendo haver variações conforme a safra. Conforme (ANDERSON et al., 2016), a região sul do Brasil enfrentou eventos de seca extremos durante 2009 a 2012, causando grandes perdas para o setor agrícola.

O estudo de Nedel, Sausen e Saito (2009) realizou um zoneamento das secas ocorridas no estado do Rio Grande do Sul no período de 2003 a 2009, a partir das notificações de ocorrências (decretos) de seca da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do RS (CEDEC). O estudo indicou que os episódios mais intensos de secas ocorreram ao longo dos anos 2004, 2005 e 2009 e afetaram inúmeros municípios, sendo que a época mais favorável para essas ocorrências foi a estação do verão (meses de março, janeiro e fevereiro, respectivamente). Ainda, observou-se que a maioria dos decretos de seca aconteceu em anos com a presença

de El Niño (fraco), com exceção do ano 2008, onde os eventos foram influenciados pela presença do fenômeno La Niña (2007/2008; forte).

Em um estudo mais recente, (GROSS, 2015) avaliou as ocorrências de secas e estiagem no estado do Rio Grande do Sul, no período de 1991 a 2012, e observou que os anos com maior número de decretos de situação de emergência registrados foram 2004, 2005, 2009 e 2012, destacando-se 2012 com 84,21% dos municípios em situação de emergência. Foram verificados dois grandes eventos de La Niña, de 2007 a 2009 e de 2010 a 2012, provavelmente associados aos períodos de anomalias negativas de precipitação. Ainda, este estudo apontou, que nos anos de 2004 e 2012, mais de 60% do território do estado estava sob estiagem, sendo os meses com maiores médias de área afetada pela estiagem sendo março, agosto e novembro.

Apesar de a parte norte do estado possuir maior índice de precipitação, principalmente na região nordeste, conforme é mencionado em Rio Grande do Sul (2020), o estudo de Nedel, Sausen e Saito (2009) apontou maior frequência de ocorrência de secas em regiões ao norte e noroeste do estado (região do Alto Uruguai, Planalto Médio e Missões). Neste sentido, o estudo de Gross (2015) também observou que a maioria dos decretos de situação de emergência foram registrados em municípios da região norte do estado.

3.2 PRINCIPAIS SISTEMAS DE CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA ATUANTES NO BRASIL

3.2.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A ZCIT é um sistema sinótico que ocorre nas proximidades da linha do equador, e se caracteriza pela formação de um fluxo de ar convergente e ascendente, que passa por um processo de resfriamento por expansão, resultando em altas taxas de precipitação nesta região. Conforme Carvalho e Oyama (2013), a região sob a ação da ZCIT é identificada pela presença de aglomerados convectivos, um dos principais mecanismos de aquecimento da atmosfera ocasionado, principalmente, pela liberação de calor latente e pela interação entre radiação e nebulosidade. A ZCIT está inserida numa região onde ocorre a interação de características marcantes atmosféricas e oceânicas: i) zona de confluência dos Alísios (ZCA); ii) zona do cavado equatorial; iii) zona de máxima temperatura da superfície do mar; iv) zona de máxima convergência de massa; e v) zona da banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, todas interagindo próximas à faixa equatorial (FERREIRA, 1996).

Nobre e Shukla (1996) evidenciaram que a principal razão para a deficiência (excesso) de chuvas sobre o norte do Nordeste e leste da Amazônia é a retirada precoce (posterior) da ZCIT em direção ao Hemisfério Norte.

A ZCIT é uma zona de baixa pressão atmosférica predominantemente estável sobre as áreas oceânicas mais quentes, e pode sofrer deslocamentos consideráveis com mudanças de Temperaturas da Superfície do Mar (TSM). Ainda, nesta região ocorre a formação dos Ventos Alísios de Nordeste (Hemisfério Norte) e Ventos Alísios de Sudeste (Hemisfério Sul), ventos calmos e levemente variáveis (mas persistentes).

3.2.2 El Niño - Oscilação Sul

Em relação aos ventos alísios, estes influenciam diretamente na formação dos eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS), sendo que, em condição de El Niño a anomalia da TSM é mais elevada e os ventos alísios estão mais fracos, e em condição de La Niña, ocorre o contrário.

As secas no Brasil sofrem forte influência das anomalias de Temperaturas da Superfície do Mar (TSM), fenômeno que pode resultar em eventos breves ou com padrões específicos, sendo esses últimos caracterizados pelos eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS). As temperaturas no Oceano Pacífico Equatorial podem sofrer alterações em relação à média normal histórica, provocando os ciclos climáticos de ENOS, sendo que, quando o oceano está mais quente o fenômeno é denominado de El Niño, e quando está mais frio, de La Niña. Os fenômenos El Niño e La Niña provocam interferência em padrões climáticos ao redor da Terra.

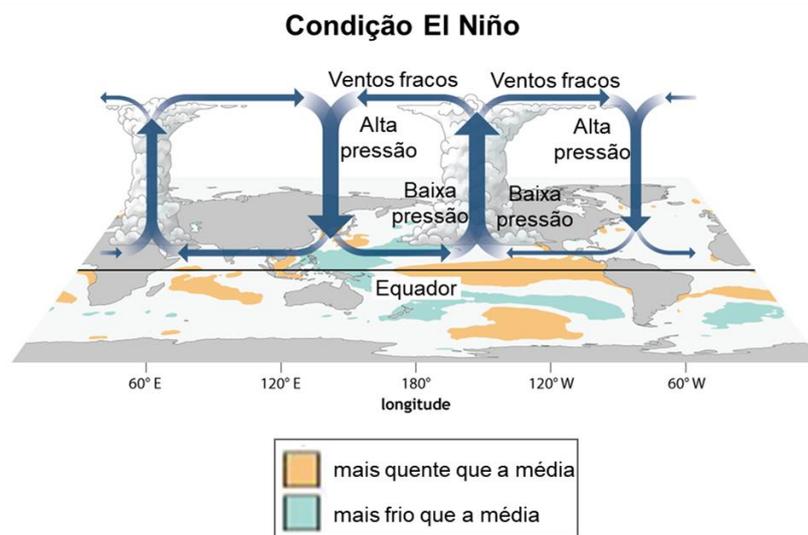
Segundo o de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE, 2020a), o El Niño se caracteriza pelo aquecimento anormal das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Equatorial, além de provocar alterações na atmosfera próxima à superfície, enfraquecendo os ventos alísios (que sopram de leste para oeste) na região equatorial. Esses processos acarretam em mudanças na circulação atmosférica, com impacto na distribuição das chuvas, e na temperatura em algumas regiões. A variabilidade do padrão de precipitação nos trópicos é conhecida por ser conectada ao aquecimento anômalo da água do oceano no Pacífico central e oriental e às mudanças no sistema de circulação das células de Walker (LIU; JUÁREZ, 2001).

Em condições normais a célula de Walker possui movimentos ascendentes no Pacífico Central/Ocidental e movimentos descendentes no oeste da América do Sul, com ventos próximos à superfície na direção leste para oeste (ventos alísios) e em níveis altos da troposfera, de oeste para leste, formando nuvens sobre o Pacífico Equatorial Oeste. Porém,

em cenários de El Niño ocorre o enfraquecimento dos ventos alísios, e o aquecimento do Oceano Pacífico Equatorial, o que resulta em evaporação, e por consequência, em formação de nuvens. Porém, desta vez as nuvens geradas irão se formar sobre o Pacífico Equatorial Central e Leste, e a célula de Walker fica bipartida (CPTEC-INPE, 2020a).

Este aquecimento anômalo eleva as temperaturas do ar na região costeira, através da transferência de calor do oceano para a atmosfera, o que provoca convecção atmosférica localizada e chuvas fortes (CAI et al., 2020). O padrão de circulação atmosférica e representação da célula de Walker, em condição de El Niño são apresentados na Figura 3.

Figura 3: Padrão de circulação da célula de Walker em condição de El Niño. (Fonte: adaptado de Climate²).



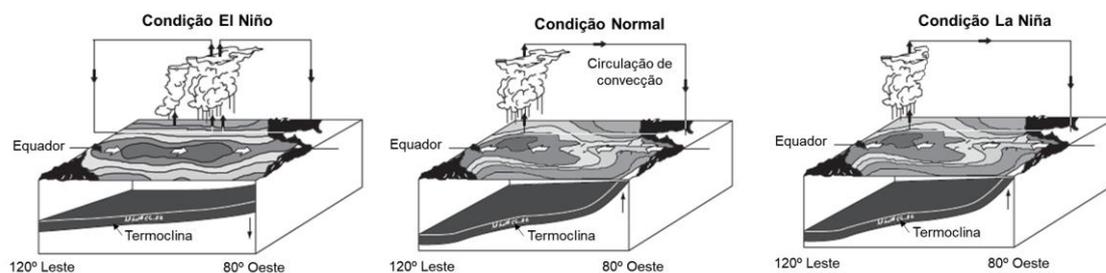
No caso da ocorrência de La Niña, esta se caracteriza pela formação de ventos alísios mais intensos, mantendo as águas mais quentes represadas mais a oeste do que o normal, essas águas quentes resultam em evaporação, formando nuvens e a célula de Walker fica mais alongada que o normal. Nesse cenário, ocorrem chuvas à oeste do Oceano Pacífico, enquanto no Pacífico Equatorial Oriental os movimentos descendentes da célula de Walker ficam mais intensos que em condições normais, inibindo a formação de nuvens nesta região (CPTEC-INPE, 2020b).

A Figura 4 apresenta representações da circulação atmosférica sobre o Oceano Pacífico Equatorial e do comportamento das águas superficiais em condições de normalidade, e em cenários de El Niño e La Niña. A termoclina é a camada de variação de temperatura em uma

² Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>>. Acesso em 22 de setembro de 2020.

determinada profundidade do mar. Quando em ocorrência de El Niño, a termoclina fica mais aprofundada junto à costa oeste da América do Sul (CPTEC-INPE, 2020a).

Figura 4: Representação do padrão atmosférico e oceânico em condições normais, El Niño e La Niña. (Fonte: adaptado de Shuttleworth (2012)).



Os anos com ocorrência de El Niño e La Niña e a intensidade do fenômeno em cada um destes anos são descritos no Quadro 1. Conforme o CPTEC-INPE, a intensidade do episódio de El Niño e La Niña dependem do valor de anomalia da TSM, verificado em algum dos meses pertencentes à série. Para El Niño forte o valor deve ser superior a 1,5°C, para moderado deve ser entre 1,0°C e 1,5°C, e El Niño fraco os valores ficam entre 0,5°C e 1,5°C. Enquanto que para La Niña forte as anomalias devem ser inferior a -1,5°C , moderada de -1,0°C a -1,5°C e fraca entre -0,5°C e -1,0°C.

Quadro 1: Últimas ocorrências de El Niño e La Niña e intensidade do fenômeno (Fonte: CPTEC-INPE, 2020³).

Ocorrência do El Niño		Ocorrência do La Niña	
1997-1998	Forte	1998-1999	Fraca
2002-2003	Moderada	1999-2000	Moderada
2006-2007	Moderada	2007-2008	Moderada
2009-2010	Moderada	2010-2011	Moderada
2015-2016	Forte	2017-2018	Moderada

Em relação ao Brasil, as ocorrências de El Niño e La Niña afetam as diferentes regiões do Brasil, estando diretamente relacionados a eventos de secas. Na Figura 5 são apresentados os efeitos dos cenários de El Niño e La Niña em diferentes regiões da América do Sul.

³ Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em 23 de setembro de 2020.

Figura 5: Efeito dos fenômenos El Niño e La Niña na América do Sul. (Fonte: adaptado de CPTEC-INPE, 2020⁴).



Na Bacia Amazônica, os eventos de El Niño trazem clima quente e seco para a Bacia, potencialmente afetando o crescimento das árvores, o armazenamento de carbono no solo e a probabilidade de ocorrência de incêndios (CHAPIN III; MATSON; MOONEY, 2011). A seca de 2010 na Amazônia teve início durante um evento El Niño no início do verão de 2010, e na estação seca do inverno e primavera seguinte a seca se intensificou durante o evento de La Niña (MARENGO et al., 2011). Ainda na Amazônia, o evento de seca extrema de 2015/2016 ocorreu na presença de El Niño muito forte (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016).

Na Região Nordeste, durante os eventos de El Niño em 1983, 1998 e 2016, foram observados déficits generalizados de precipitação (JIMENEZ et al., 2019). Em 2012, durante episódio de La Niña, ocorreram inundações na Amazônia, enquanto no Nordeste a maioria dos estados declarou estado de emergência pela seca (MARENGO et al., 2013). Ainda, o El Niño de 2015/2016 potencializou o efeito da estiagem iniciada em 2010 no Nordeste (MARENGO et al., 2018a).

No Estado do Rio Grande do Sul os anos de 2004, 2005, 2009 e 2012 registram maior números de decretos de situação de emergência pela seca (GROSS, 2015). A maioria dos decretos de seca ocorreu em anos de El Niño (NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2009), sendo verificados dois grandes eventos de La Niña, de 2007 a 2009 e de 2010 a 2012, provavelmente associados aos períodos de anomalias negativas de precipitação (GROSS, 2015).

⁴ Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em 23 de setembro de 2020.

3.2.3 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS é uma banda de nebulosidade que cruza as regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, provendo um elevado volume de chuvas em um curto período de tempo, durante o verão. O mês com maior frequência de evento de ZCAS é dezembro enquanto que abril possui menor frequência, e esses eventos, em geral, possuem duração média de 5 dias (SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019).

A ZCAS pode ser influenciada pela confluência entre os ventos de nordeste (NE) do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que transportam calor e umidade do oceano Atlântico para o interior do Brasil, e o JBN a leste dos Andes, que transporta calor e umidade da região amazônica para o sudeste da América do Sul (REBOITA et al., 2010). Segundo Carvalho et al. (2004), os episódios quentes de ENOS parecem favorecer a ocorrência de um ZCAS oceânico persistente.

Entre as características mais marcantes durante os eventos de ZCAS destaca-se as variáveis que indicam umidade na atmosfera, onde há anomalias positivas no Sudeste do Brasil e negativas no Sul. Ainda, na região da Amazônia e parte da região Centro-Oeste do Brasil praticamente não ocorrem diferenças entre as composições da ZCAS e a climatologia do verão (SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019).

A ZCAS é uma importante característica da circulação de verão na América do Sul, e é extremamente importante para a estação chuvosa do sudeste do Brasil (REBOITA et al., 2010). Com grande influência na seca de 2014 na Região Sudeste, a ZCAS impediu a formação de nuvens de chuva na região, o que resultou em grande estresse hídrico e com baixo armazenamento de água, que levou ao quase desabastecimento do Sistema da Cantareira. Mais detalhes sobre este episódio de seca na Região Sudeste são apresentados no item 3.1.3.

3.3 SENSORIAMENTO REMOTO

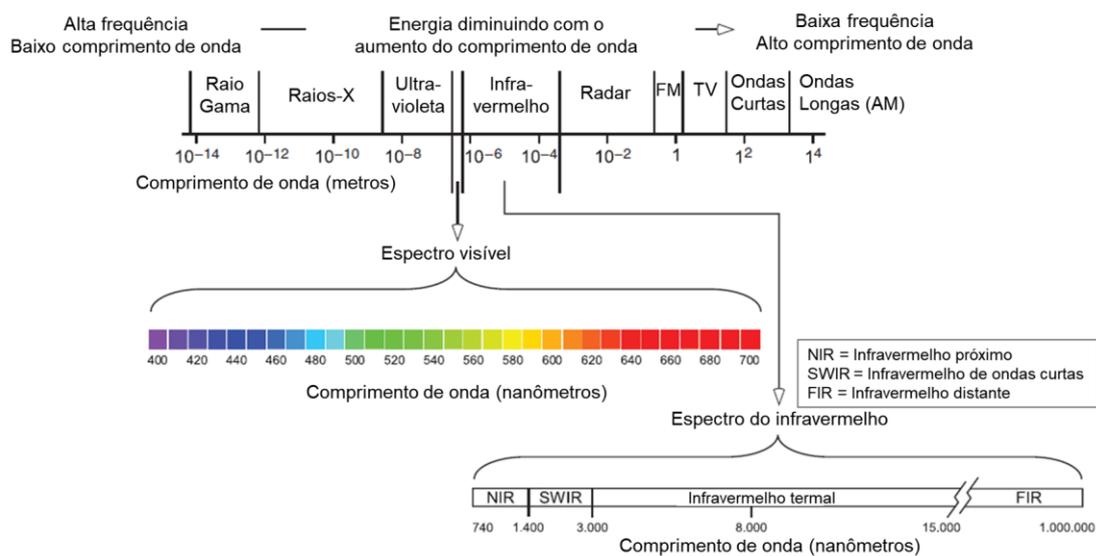
A definição clássica do termo sensoriamento remoto (SR) se refere a um conjunto de técnicas destinado à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles (NOVO; PONZONI, 2001). Conforme (PURKIS; KLEMAS, 2011), sensoriamento remoto se preocupa principalmente com a coleta e interpretação de informações sobre um objeto ou paisagem de um ponto de vista remoto, sendo que a plataforma pode estar em qualquer lugar, variando de um balão logo acima da superfície da Terra a um satélite a centenas de quilômetros de distância no espaço.

Toda matéria irradia energia contida em uma faixa do espectro eletromagnético (PURKIS; KLEMAS, 2011). Dessa forma, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação (MORAES, 2002).

Energia eletromagnética se refere a toda energia que se move com a velocidade da luz em um padrão de onda harmônico (ondas que ocorrem em intervalos iguais no tempo). Essas ondas podem ser descritas em termos de velocidade, comprimento de onda e frequência (PURKIS; KLEMAS, 2011). As faixas de comprimento de onda no espectro eletromagnético são apresentadas na Figura 6.

A energia eletromagnética utilizada na obtenção dos dados por sensoriamento remoto é também denominada de radiação eletromagnética (MORAES, 2002). A radiação eletromagnética é o elemento fundamental das técnicas de sensoriamento remoto, e possui relação com os demais elementos utilizados, sendo estes: a fonte de radiação eletromagnética (que pode ser o Sol, a Terra, antenas, etc.), o sensor (instrumento capaz de coletar e registrar a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelo objeto ou alvo), e o alvo (elemento do qual se pretende extrair informação) (NOVO; PONZONI, 2001).

Figura 6: Espectro eletromagnético. (Fonte: adaptado de Purkis e Klemas (2011)).



Os sistemas de sensoriamento remoto possuem quatro tipos de resoluções características, sendo estes: resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica e resolução temporal. Purkis e Klemas (2011) descrevem essas resoluções como:

- Resolução espacial: em imagens digitais, essa resolução corresponde ao tamanho do pixel. Ainda, a resolução espacial pode ser representada em

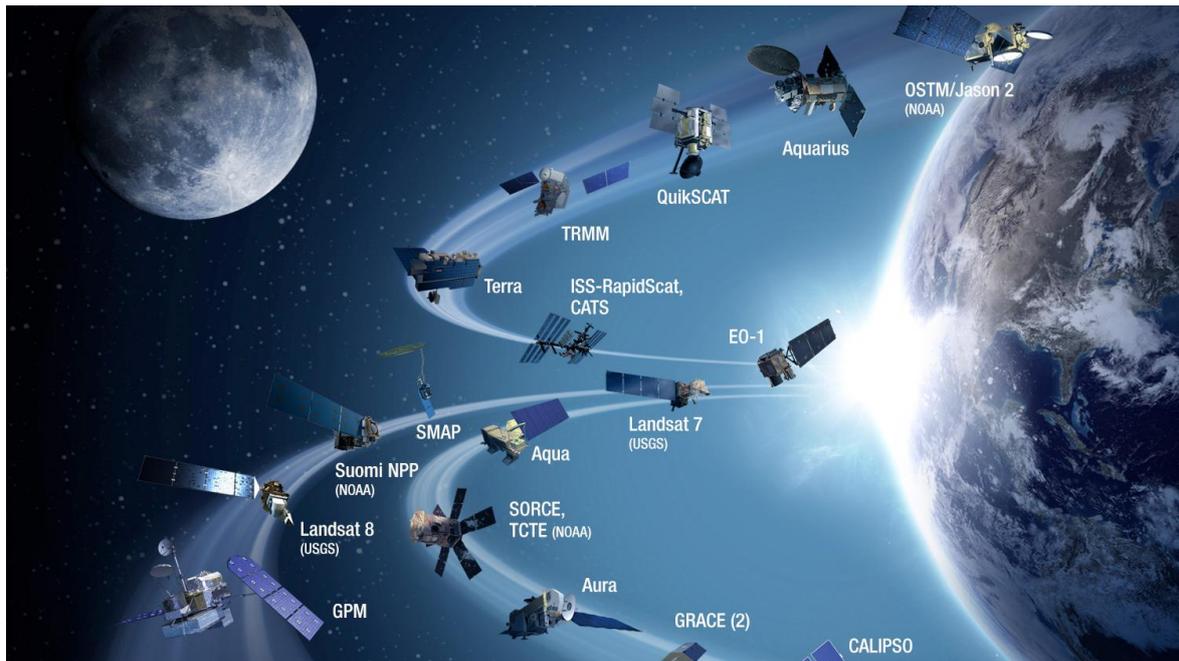
termos de distância (30 metros, 1 km etc.), e assim, descreve o comprimento lateral de um único pixel;

- Resolução espectral: é uma medida de intervalos de comprimento de onda específicos que um sensor pode registrar (número de bandas espectrais, amplitude, alcance etc.);
- Resolução radiométrica: é uma medida da capacidade de um sensor de distinguir entre dois objetos de refletância semelhante. Associada ao número de bits;
- Resolução temporal: é uma medida de quantas vezes a mesma área é visitada pelo sensor. A resolução temporal não descreve uma única imagem, mas sim uma série de imagens que são capturadas pelo mesmo sensor ao longo do tempo.

Sensores digitais de satélite são usados para mapear a vegetação, cobertura geral da terra e características do oceano (PURKIS; KLEMAS, 2011). Dessa forma, os sensores remotos são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais (MORAES, 2002). Ainda, conforme Getirana (2016), o uso de dados de sensoriamento remoto em estudos ambientais pode capacitar os tomadores de decisão para desenvolver políticas sociais, econômicas e ambientais mais adaptadas a eventos extremos e capazes de prevenir grandes perdas socioeconômicas devido a secas extremas.

Em 1972 foi lançado pela NASA o primeiro satélite experimental de levantamento de recursos naturais, o ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), posteriormente renomeado para Landsat-1 (NOVO; PONZONI, 2001). Desde então, diversas outras missões foram realizadas para o lançamento de satélites, abrangendo, desta forma, o monitoramento de diversas variáveis, como chuva, temperatura, produtos de vegetação, entre outros. A Figura 7 mostra a representação da frota de satélites da NASA que orbita a Terra.

Figura 7: Representação de alguns dos principais satélites a orbitar a Terra (Fonte: Nasa⁵).



Atualmente, a obtenção de diversos produtos gerados por sensoriamento remoto pode ser feita por meio de plataformas on-line, como o Google Earth Engine, um recurso da Google que disponibiliza dados de variáveis ambientais, muitas vezes já pré-processados. Conforme (GORELICK et al., 2017) o Google Earth Engine é uma plataforma baseada em nuvem que facilita o acesso a recursos de computação de alto desempenho para o processamento de conjuntos de dados geoespaciais muito grandes, consistindo em um catálogo de dados pronto para análise.

O catálogo de dados abriga um grande repositório de conjuntos de dados geoespaciais publicamente disponíveis, incluindo observações de uma variedade de sistemas de imagens de satélite e aéreas, variáveis ambientais, previsões meteorológicas e climáticas, cobertura da terra, topografia e conjuntos de dados socioeconômicos. Todos esses dados são pré-processados em um formato pronto para uso. Os usuários podem acessar e analisar dados do catálogo público, bem como seus próprios dados privados, através de programas do Earth Engine escritos utilizando bibliotecas em linguagens Python e/ou JavaScript (GORELICK et al., 2017).

Os itens a seguir descrevem alguns produtos disponíveis, gerados por sensoriamento remoto, para monitoramento de variáveis ambientais.

⁵ Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4487>>. Acesso em: 03 de outubro de 2020.

3.3.1 Temperatura de Superfície

Usualmente, a temperatura pode ser medida na superfície ou na atmosfera. Ao investigar eventos de secas é interessante obter as variações de temperatura na superfície, por estar relacionada as mudanças na vegetação e em cursos hídricos superficiais.

A temperatura de superfície (da sigla em inglês, LST) é o componente de radiação de onda longa emitida dos balanços de energia da superfície terrestre (RUNNING et al., 1994). A variável LST é altamente sensível às condições locais de umidade e aos efeitos do resfriamento evaporativo, e desempenha um papel fundamental no diagnóstico de muitos dos principais componentes do balanço de energia de superfície, incluindo calor sensível, saldo de radiação e fluxo de calor do solo (ANDERSON et al., 2012).

A LST é utilizada para uma ampla variedade de estudos de processos climáticos, hidrológicos, ecológicos e biogeoquímicos da Terra. Alguns processos hidrológicos, como evapotranspiração (ET), e ecológicos, como a fotossíntese, são especialmente sensíveis à LST (RUNNING et al., 1994). Por sensoriamento remoto, a LST pode ser obtida pelo MODIS, instrumento dos satélites Terra e Aqua da NASA, a partir do produto MOD11 que fornece a LST global.

3.3.2 Precipitação

Precipitação é a água da atmosfera que atinge a superfície, sendo a causa mais importante dos processos hidrológicos de interesse da engenharia, e é caracterizada por uma grande aleatoriedade no tempo e no espaço. A formação das nuvens de chuva geralmente está associada ao movimento ascendente de massas de ar úmido (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). O conhecimento preciso e acurado da intensidade e da acumulação da precipitação é essencial para compreender o ciclo dos fluxos globais de água e o balanço de energia do sistema terrestre (HOU et al., 2014).

Ao analisar dados de chuvas, um dos aspectos mais importantes é verificar a variabilidade sazonal da chuva na região de interesse. No caso do Brasil, existem regiões com chuvas bem distribuídas durante todo o ano, como é o caso do Estado do Rio Grande do Sul, enquanto que, em outras áreas, como na Amazônia e na Região Nordeste, o período de chuvas ocorre durante o verão, havendo grande variabilidade sazonal se comparado aos demais meses.

Embora a medição da precipitação em um determinado local usando instrumentos baseados na superfície seja relativamente simples, a grande variabilidade espacial e temporal da intensidade, tipo e ocorrência da precipitação torna as medições diretas e uniformemente calibradas difíceis em grandes regiões, especialmente sobre os oceanos. Sobre a terra, os

medidores de chuva sofrem com problemas de representatividade ao estimar a precipitação em áreas extensas, particularmente em resoluções temporais finas ou em terrenos complexos (HOU et al., 2014).

Neste sentido, a estimativa da precipitação por sensoriamento remoto é uma alternativa à medição da variável *in situ*, pois, apesar de não apresentar a mesma acurácia, o sensoriamento remoto abrange uma área maior de monitoramento, o que é útil quando a região de estudo não é monitorada, ou quando possui uma série curta de análise, com poucos dados levantados.

Em relação à obtenção de dados de precipitação por sensoriamento remoto, em 1997 foi lançado o satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission - Missão de medição de chuva tropical), da missão realizada em consórcio entre a NASA e a Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). O radar de precipitação do TRMM é um dos primeiros radares projetados especificamente para monitoramento de chuva a operar a partir do espaço, e embora sua faixa seja relativamente estreita e sofra das mesmas incertezas para a estimativa de chuva que os radares terrestres, este radar forneceu uma riqueza incrível de informações detalhadas da estrutura da chuva (KUMMEROW et al., 2000). A missão TRMM operou até 2015.

Com base no sucesso do TRMM, em 2014 a NASA e a JAXA lançaram a missão GPM ("*Global Precipitation Measurement*" - Medição de precipitação global), uma missão de satélite projetada especificamente para fornecer uma nova geração de observações de chuva e neve do espaço para melhorar nossa compreensão do ciclo de água e energia da Terra (HOU et al., 2014).

O algoritmo IMERG do GPM se destina a intercalibrar, fundir e interpolar "todas" as estimativas de satélite de precipitação por microondas, juntamente com estimativas de satélite de infravermelho calibrado por micro-ondas, análises de medidor de precipitação e potencialmente outros estimadores de precipitação em escalas de tempo e espaço, em todo o globo (HUFFMAN et al., 2019).

3.3.3 Anomalia no armazenamento total de água

O armazenamento de água é a soma da mudança na água armazenada na superfície da terra ou próximo a ela (podendo estar na forma de umidade do solo, neve, água superficial e subterrânea, geleiras e mantos de gelo), e pode ser visto como o desequilíbrio entre a precipitação, evapotranspiração (ET) e vazão em uma bacia hidrográfica (LETTENMAIER et al., 2015).

Em 2002 foi lançada a missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), uma missão conjunta das agências espaciais NASA e *German Aerospace Center* (DLR), que gera resultados GRACE produzidos por três centros, sendo estes: *Jet Propulsion Laboratory – NASA* (JPL), *Center for Space Research – U. Texas* (CSR) e *GeoForschungsZentrum Potsdam – German Research Centre for Geosciences* (GFZ).

Essa missão forneceu medições mensais detalhadas das mudanças do campo gravitacional da Terra, para obtenção de estimativas de anomalias no armazenamento de água terrestre, de 2002 a 2017. As variações do campo gravitacional da Terra foram obtidas a partir da relação com as variações da distância entre os dois satélites, que voam na mesma órbita, separados por cerca de 240 km a uma altitude de aproximadamente 450 km (SWENSON, 2012).

A missão GRACE monitorou o armazenamento de água terrestre, fornecendo estimativas verticalmente integradas de mudanças no armazenamento de água, que inclui mudanças no equivalente da neve - água, água superficial, umidade do solo e armazenamento de água subterrânea (MELATI et al., 2019).

3.3.4 Evapotranspiração (GLEAM e MOD16)

Evapotranspiração (ET) é definida como a água que deixa a superfície, em forma de vapor, sendo a soma da evaporação do solo e do dossel da vegetação com a transpiração da vegetação. As estimativas de ET podem ajudar, em escalas regionais e em nível de bacia hidrográfica, com decisões de alocação de água, incluindo estratégias para gestão de secas (BIGGS et al., 2015). Em regiões áridas e semiáridas, a ET frequentemente é quase igual à precipitação, enquanto que em áreas úmidas é limitada pela energia disponível (ZHANG; DAWES; WALKER, 2001).

A ET pode ser medida em campo, com uso de equipamentos como lisímetro, ou por meio de métodos como covariância dos vórtices turbulentos (*eddy covariance*). O sensoriamento remoto não mede diretamente a ET, devendo as radiâncias espectrais medidas serem combinadas a algoritmos e modelos, de forma a estimar a ET. Os métodos baseados em sensoriamento remoto podem ser agrupados em três diferentes abordagens: (i) métodos baseados na vegetação (com uso de índices de vegetação), (ii) métodos radiométricos baseados na temperatura da superfície da terra (balanço de energia) e (iii) métodos de inversão de triângulo / trapézio ou gráfico de dispersão (empíricos e estatísticos) (BIGGS et al., 2015).

Os métodos baseados na vegetação utilizam índices de vegetação, como EVI, NDVI e LAI (Índice de Área Foliar), que são aplicados em equações como Penman-Monteith e Priestley-Taylor, para estimar a ET. Entre os produtos disponíveis para estimar a ET por métodos baseados na vegetação, destacam-se o GLEAM (MIRALLES et al., 2011), o MOD-16 (MU; ZHAO; RUNNING, 2011), e o JPL-PT (FISHER; TU; BALDOCCHI, 2008).

O modelo conhecido como GLEAM (Global Land Surface Evaporation: the Amsterdam Methodology), é projetado para maximizar o uso de observações derivadas de satélite para criar uma estimativa espacialmente coerente do fluxo evaporativo sobre a terra (MIRALLES et al., 2011). Para estimar a ET o modelo GLEAM utiliza a equação de Priestley-Taylor.

O algoritmo usado no MOD16 é baseado na lógica da equação de Penman-Monteith, que inclui entradas de dados de reanálise meteorológica diária juntamente com produtos de dados de sensoriamento remoto do MODIS (um instrumento abordo dos satélites Terra e Aqua, da NASA) (RUNNING; MU; ZHAO, 2017).

Em relação aos métodos baseados em temperatura da superfície da terra e balanço de energia, estes utilizam produtos de temperatura de superfície de modo a obter as estimativas dos fluxos energéticos entre a superfície e atmosfera, e com isso, estimar a ET. Alguns modelos de estimativa de ET por este método são SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), ALEXI (ANDERSON et al., 2011) e METRIC (G.; MASAHIRO; RICARDO, 2007).

Alguns autores validaram produtos de estimativas de ET por sensoriamento remoto, baseados em índices de vegetação (MARTENS et al., 2017; RUHOFF et al., 2013; YANG et al., 2017), e baseados em temperatura da superfície (LAIPELT et al., 2020; WAGLE et al., 2017).

3.3.5 Índices de Vegetação (EVI, NDVI e GPP)

O sensoriamento remoto desempenha um papel importante no estudo da biosfera por meio de sua capacidade de fazer medições repetíveis das características da vegetação em escalas globais. Dados de diferentes bandas (frequentemente comprimentos de onda visíveis e infravermelhos próximos) foram combinados para produzir índices de vegetação espectrais (VIs), que são medidas sensíveis de variações espaciais e temporais na atividade fotossintética da vegetação e variações estruturais do dossel (GAO et al., 2000).

Entre alguns dos principais índices de vegetação, pode-se citar o índice de vegetação com diferença normalizada – NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), o índice de vegetação aprimorado – EVI (do inglês *Enhanced Vegetation Index*) e a produtividade primária bruta – GPP (do inglês *Gross Primary Production*).

O NDVI, EVI e GPP são produtos que podem ser obtidos a partir do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites Terra (lançado em 1999) e Aqua (lançado em 2002) do Sistema de Observação da Terra (EOS - *Earth Observing System*) da NASA. Um dos principais interesses do programa EOS é estudar o papel da vegetação terrestre em processos globais de grande escala com o objetivo de compreender como a Terra funciona como um sistema (HUETE et al., 2002).

- **EVI e NDVI**

No sensoriamento remoto, a base para determinar os índices de vegetação é derivada da análise de assinaturas de refletância espectral típicas de folhas. Neste sentido, o contraste entre as respostas das bandas do vermelho e do infravermelho próximo (NIR) é uma medida sensível da quantidade de vegetação. As diferenças máximas entre as bandas do vermelho e do NIR ocorrem ao longo de um dossel completo, e as mínimas sobre alvos com pouca ou nenhuma vegetação. Assim, para quantidades baixas e médias de vegetação, o contraste é o resultado de alterações tanto no vermelho quanto no NIR, enquanto em quantidades maiores de vegetação, apenas o NIR contribui para aumentar os contrastes, pois a faixa vermelha fica saturada devido à absorção da clorofila (HUETE, 1999).

Para o cálculo do NDVI são utilizadas as faixas do espectro eletromagnético: NIR e vermelho. A faixa do vermelho não reflete a radiação, sendo absorvida pelas plantas, constituindo sua pigmentação, enquanto que a faixa NIR é refletida. A Figura 8 mostra as assinaturas espectrais da vegetação, em função da refletância e do comprimento de onda.

O NDVI é calculado a partir da equação:

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

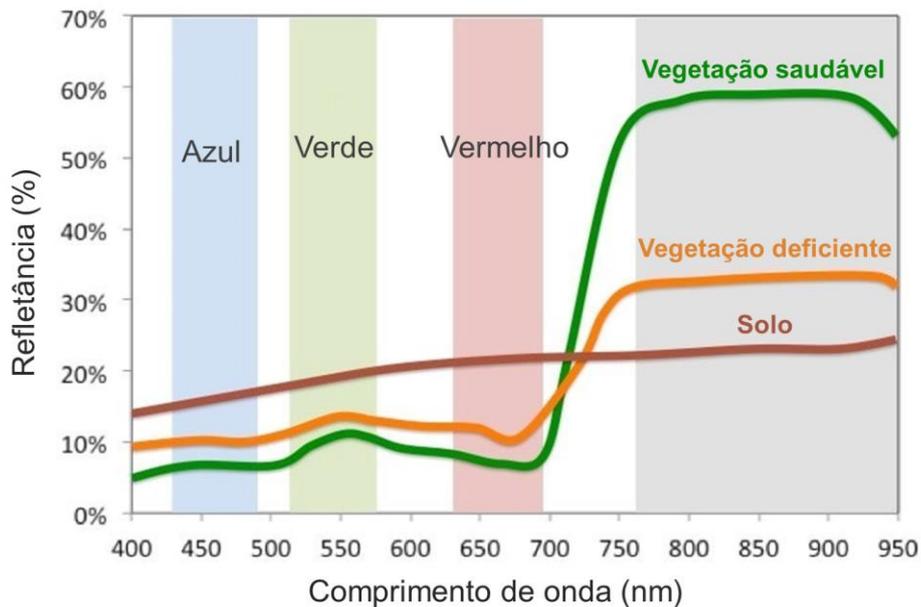
Enquanto que o EVI é um índice melhorado, que usa a faixa do azul para corrigir as influências do aerossol na faixa do vermelho, e é calculado pela equação:

$$\text{EVI} = \frac{\text{Infra Vermelho} - \text{Vermelho}}{\text{Infra Vermelho} + C1 \times \text{Vermelho} - C2 \times \text{Azul} + L} \quad (2)$$

Onde L é o ajuste de fundo do dossel para corrigir o NIR diferencial não linear e a transferência radiante vermelha através de um dossel; C1 e C2 são os coeficientes do termo de resistência do aerossol (correção dos efeitos atmosféricos para as bandas do vermelho e do azul); e G é um ganho ou fator de escala. Por exemplo, no MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), um instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, da NASA, para obter o EVI os coeficientes utilizados são L=1, C1=6, C2=7,5, e G=2,5.

O EVI e o NDVI resultam em valores de -1 a +1, sendo que, quanto maior o valor de EVI e NDVI, mais saudável a vegetação presente, e valores de EVI e NDVI menores que zero representam área sem vegetação, ou com vegetação sem atividade.

Figura 8: Assinaturas espectrais da vegetação. (Fonte: Planet Watchers⁶).



O NDVI é mais sensível à presença de clorofila nas plantas, enquanto que o EVI é mais responsivo às variações da estrutura do dossel, incluindo índice de área foliar (LAI), tipo de copa das árvores, fisionomia vegetal e arquitetura de dossel (GAO et al., 2000; HUETE et al., 2002).

O sinal sazonal de NDVI varia de acordo com os regimes de precipitação observados em cada bioma brasileiro (REBELLO et al., 2020). Em regiões mais secas e com menos vegetação, ou vegetação mais esparsa, como na região Nordeste, ocorre maior variação sazonal de EVI e NDVI, o que não é característico de áreas mais úmidas e com maior presença de vegetação densa, que é o caso da Amazônia, por exemplo.

- **GPP**

As plantas terrestres fixam o dióxido de carbono (CO_2) como composto orgânico através da fotossíntese, um fluxo de carbono, também conhecido a nível de ecossistema como produção primária bruta (GPP). O GPP terrestre é o maior fluxo global de carbono e está associado a várias funções do ecossistema, como respiração e crescimento, sendo a base para a produção de alimentos, fibras e madeira. Além disso, o GPP, junto com a respiração,

⁶ Disponível em: <<https://www.planetwatchers.com/whats-the-matter-with-ndvi-you-are/>>. Acesso em: 02 de outubro de 2020.

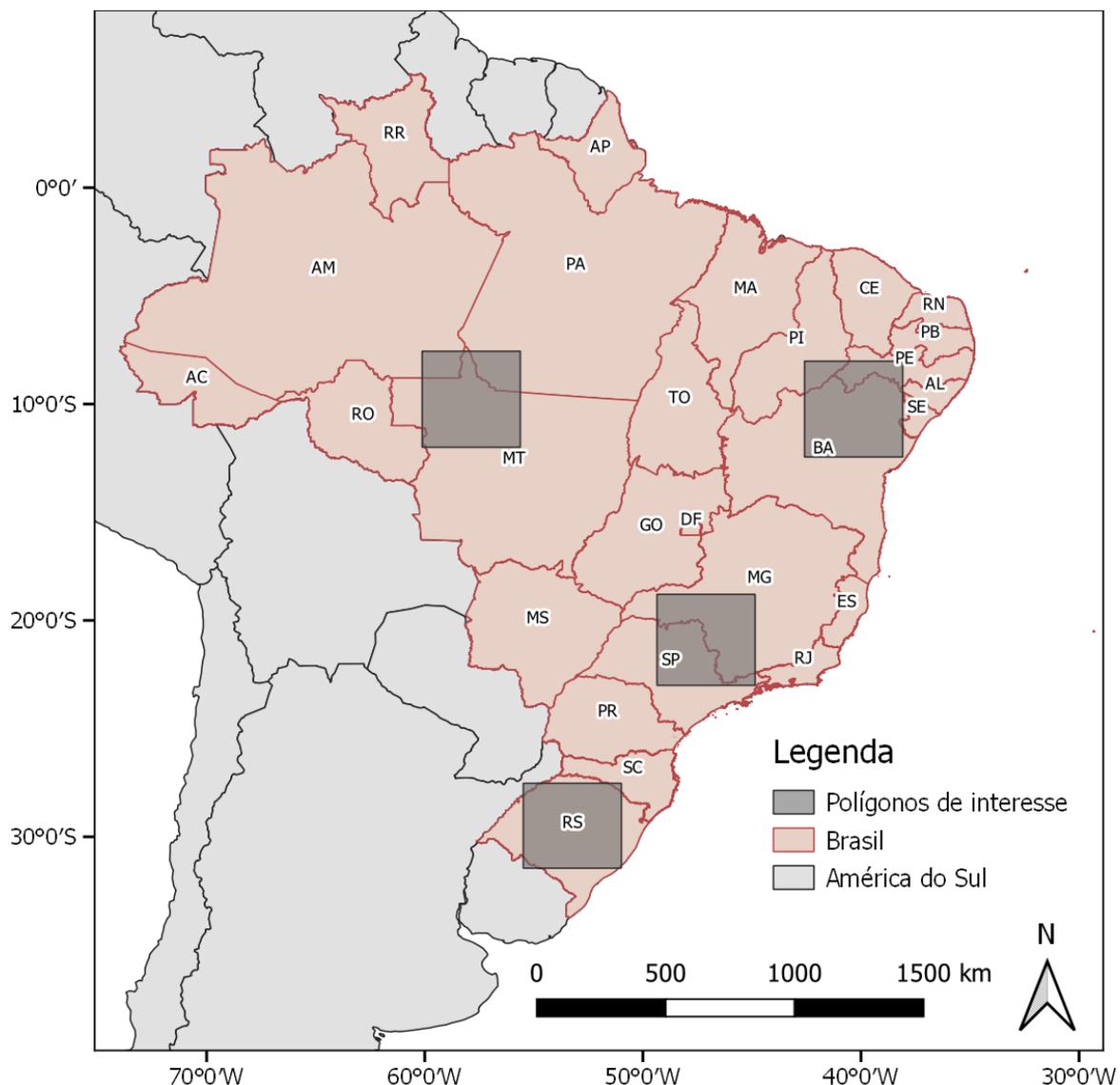
é um dos principais processos que controlam a troca de CO₂ da terra - atmosfera, fornecendo a capacidade dos ecossistemas terrestres de compensar parcialmente as emissões antropogênicas de CO₂ (BEER et al., 2010).

Conforme mencionado, o GPP pode ser obtido a partir de dados MODIS, que para calcular esta variável utiliza um algoritmo, que aplica conceito de eficiência de conversão de radiação, usando a fração de radiação fotossinteticamente ativa (obtido por sensoriamento remoto) e estimativas independentes de radiação fotossinteticamente ativa e outros dados medidos *in situ*.

4 ÁREAS E EVENTOS DE ESTUDO

Embora secas possam ocorrer em qualquer lugar, as características da seca geralmente variam entre os eventos e, mais importante ainda, de região para região (AWANGE; MPELASOKA; GONCALVES, 2016). Para a análise das secas no Brasil foram escolhidas quatro polígonos de estudo, em áreas da Amazônia, da Região Nordeste, da Região Sudeste, e do Estado do Rio Grande do Sul, conforme mostra a Figura 9. Essas regiões foram definidas por se diferenciarem em questão de clima, posição geográfica, relevo, vegetação, entre outros fatores que influenciam nos eventos de secas. Para cada polígono, foi escolhido um período de tempo para análise relativo a um determinado evento de seca recente.

Figura 9: Localização dos polígonos a serem analisados.



A seguir são apresentadas as principais características das regiões nos polígonos delimitados e dos eventos de secas definidos para análise neste estudo.

4.1 AMAZÔNIA: SECA DE 2010

Na parte da Amazônia ao sul do equador, o período de dezembro a março é considerado estação chuvosa, enquanto que o período de estação seca corresponde aos meses de junho a setembro (MARENGO; ESPINOZA, 2016). Os maiores eventos de secas registrados na Amazônia nos últimos anos ocorreram em 2005, 2010 e 2015-2016.

Neste sentido, a seca de 2010 foi mais severa que a de 2005, e estava relacionada à ocorrência sucessiva de um evento El Niño e um forte aquecimento da Temperatura da Superfície do Mar no Atlântico Norte Tropical (do inglês, TNA-SST), seguido por uma rápida transição a um forte evento de La Niña, entre 2010 e 2011 (MARENGO et al., 2011; PANISSET et al., 2017). Desta forma, considerando o período de estudo, de janeiro de 2003 a dezembro de 2016, de forma a obter uma investigação do efeito da seca em tempo posterior a ocorrência da mesma, foi escolhido para análise o evento de seca de 2010.

Em 2010, os impactos da seca foram observados tanto no sudoeste quanto no sudeste da bacia amazônica, durante o inverno (PANISSET et al., 2017). Ainda, Lewis et al. (2011) aponta os epicentros da seca da Amazônia em 2010 na parte sul da bacia amazônica, estando um destes epicentros localizado sobre o estado do Mato Grosso. Assim, de forma a abranger as áreas com maior impacto das secas no período de estudo, o polígono escolhido para estudo, na região da Amazônia, foi definido sobre a região sul da Amazônia, na parte norte do estado do Mato Grosso, região caracterizada por grande presença de desmatamento.

Conforme Jimenez, Libonati e Peres (2018), o sul da Amazônia, e particularmente o sudeste da Amazônia, inclui o arco do desmatamento e é a região mais seca ao longo da Bacia Amazônica. O polígono escolhido está localizado em grande parte sobre o estado do Mato Grosso. No Mato Grosso, de 1988 a 2019 aproximadamente 146.159,00 km² de floresta nativa foi desmatada, segundo o portal TerraBrasilis⁷ do INPE. Ainda, conforme a plataforma MapBiomias⁸, em 2019 aproximadamente 322.542,54 km² de área no estado é destinada a agropecuária, e 502.435,95 km² é composta por floresta.

⁷ Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation>>. Acesso em: 03 de outubro de 2020.

⁸ Disponível em: <<https://plataforma.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 03 de outubro de 2020.

4.2 REGIÃO NORDESTE: SECA DE 2012

Na região Nordeste, o polígono definido para análise está localizado na região do semiárido, estando em grande parte sobre o estado da Bahia, na região norte - nordeste deste estado. Os reduzidos valores de disponibilidade hídrica observados no Nordeste Brasileiro, em particular na região Semiárida, ocorrem por contribuição dos baixos índices de precipitação, da irregularidade do seu regime, de temperaturas elevadas durante todo o ano, da baixa capacidade de armazenamento total de água, entre outros fatores (ANA, 2019).

No semiárido o período seco ocorre entre os meses de junho e novembro (MELATI et al., 2019), sendo que as maiores condições de seca na região Nordeste ocorrem durante o mês de outono (JIMENEZ et al., 2019).

Entre 2010 e 2017, um evento extremo de seca atingiu o Nordeste, influenciado pelos fenômenos de La Niña em 2011/2012 e de El Niño em 2015/2016. Este evento de seca, que se intensificou em 2012 e se estendeu até 2015, é considerado o mais severo das últimas décadas, provocando impactos em muitos distritos do semiárido (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Durante a La Niña de 2012 o Nordeste declarou estado de emergência na maioria dos distritos da região, por consequência da seca considerada a mais severa dos últimos 30 anos (MARENGO et al., 2013). Dessa forma, buscando avaliar os maiores registros de seca do Nordeste, dentro do período de 2003 a 2016, foi definido para análise, neste estudo, o ano de 2012.

4.3 REGIÃO SUDESTE: SECA DE 2014

As precipitações sobre a Região Sudeste do Brasil apresentam um ciclo anual bem definido, com volumes máximos nos meses de dezembro a fevereiro (verão) e valores mínimos durante o período de junho a agosto (inverno) (MARENGO et al., 2015).

No final do ano de 2013, a região Sudeste foi afetada por um episódio muito intenso de ZCAS, que gerou precipitação escassa e altas temperaturas na porção sul dessa região, atingindo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e o sul de Minas Gerais, e mesmo após a dissipação da ZCAS no final de dezembro de 2013, a precipitação permaneceu reduzida (NOBRE et al., 2016). Assim, em 2014, a Região Sudeste enfrentou um grande episódio de escassez de chuva, principalmente sobre o estado de São Paulo (MARENGO et al., 2015).

Considerando o que foi mencionado, foi definido o evento de seca de 2014 para análise na região do Sudeste. Da mesma forma, o polígono definido para avaliação da seca foi

alocado em grande parte sobre o estado de São Paulo, na porção centro - norte do estado, abrangendo ainda a parte sul do estado de Minas Gerais.

4.4 ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL: SECA DE 2012

No estado do Rio Grande do Sul, apesar de que as chuvas ocorrem de forma equilibrada o ano todo, o estado se caracteriza por uma grande variação sazonal de temperatura, com verões quentes e invernos bastante frios (RIO GRANDE DO SUL, 2020). A estação mais favorável para ocorrência de secas no Rio Grande do Sul é o verão, principalmente nos meses de janeiro, fevereiro e março (NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2009).

Como mencionado no item 3.1.4, foram registradas secas no estado em 2005, 2009, 2012, 2015, 2020. Segundo (GROSS, 2015), os anos com maiores números de decretos de emergência por estiagem no estado foram 2004, 2005 e 2012, onde foi observado que 82,45, 84,01 e 84,21% dos municípios decretaram situação de emergência. Considerando o que foi mencionado, e tendo em vista o período de estudo, de 2003 a 2016, foi definido para análise o episódio de seca de 2012.

Em relação à localização do polígono de estudo, no estado do Rio Grande do Sul, este cobre praticamente todo o estado, estando levemente deslocado para norte e noroeste. Conforme Nedel, Sausen e Saito (2009) há maior frequência de ocorrência de secas nas regiões ao norte e noroeste do estado, e ainda, o estudo de Gross (2015) observou que a maioria dos decretos de situação de emergência foram registrados em municípios da região norte do estado.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de produtos de sensoriamento remoto, disponibilizados na plataforma Google Earth Engine, para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2016. As variáveis analisadas foram temperatura de superfície, precipitação, armazenamento total de água, ET e índices de vegetação. Foram obtidos dados para todo o período de análise (janeiro de 2003 a dezembro de 2016), dentro dos quatro polígonos de estudo, apresentados no item 4 – ÁREAS E EVENTOS DE ESTUDO. Os produtos de sensoriamento remoto utilizados são apresentados a seguir.

- **MOD11 – Temperatura de superfície**

A temperatura de superfície (em inglês, LST) é obtida a partir do produto MOD11, do MODIS (instrumento dos satélites Terra e Aqua da NASA). Este é um produto global, que possui resolução espacial de 1 km. Como este trabalho buscou os valores de médias mensais dos produtos, conforme será descrito no item 5.2, foi utilizado o produto MOD11A2, que possui resolução temporal de 8 dias, diferente do produto MOD11A1 que possui resolução diária, sendo que cada valor de pixel no MOD11A2 é uma média simples de todos os pixels LST do MOD11A1 correspondentes coletados naquele período de 8 dias (WAN; HOOK; HULLEY, 2015).

Os dados do MOD11 estão disponíveis no Google Earth Engine desde a data de 05/03/2000 e seguem sendo atualizados até o presente. Neste produto, além das bandas de temperatura de superfície diurna e noturna, são disponibilizadas também as camadas de indicador de qualidade (em inglês, QC ou QA). Neste estudo foi utilizada a banda de temperatura de superfície diurna e seu indicador de qualidade (“QC_Day”), de forma a manter apenas os pixels classificados em boa qualidade. No Google Earth Engine este produto está disponível com nome “MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km”.

Os dados do Google Earth Engine para LST, obtida pelo do produto MOD11, também podem ser consultados em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/>>.

- **IMERG – Precipitação**

Os dados de precipitação foram obtidos a partir da missão GPM (*Global Precipitation Measurement*), lançada em parceria da NASA com a JAXA, que buscou fornecer uma nova geração de observações de chuva, após o sucesso da missão TRMM (HOU et al., 2014). O

algoritmo utilizado do GPM é o IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* - Recuperações multi-satélites integradas para GPM), um algoritmo unificado dos EUA que fornece o produto de precipitação, a partir da análise dos vários satélites (constelação) do GPM (HUFFMAN et al., 2019).

O produto GPM utilizado foi o disponível no Google Earth Engine com o nome “GPM: Monthly Global Precipitation Measurement (GPM) v6”. Este produto global apresenta resolução temporal mensal e resolução espacial de 0,1°, correspondendo a aproximadamente 11,1 km. Os dados para este produto estão disponíveis no Google Earth Engine desde 01/06/2000 e atualmente seguem sendo atualizados. Os dados de precipitação do produto GPM encontram-se disponíveis para download também pelo site: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGM_06/summary>.

- **GRACE – Anomalia no armazenamento total de água**

A missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), missão conjunta das agências espaciais NASA e *German Aerospace Center* - DLR) consiste em dois satélites gêmeos lançados em 2002, para realizar medições das mudanças do campo gravitacional da Terra, e com isso, detectar mudanças regionais de massas de água da Terra (SWENSON, 2012). Assim, os resultados do GRACE são apresentados na forma de anomalias de armazenamento de água terrestre.

Os dados da missão GRACE são processados por três diferentes centros de processamento, o CSR (*U. Texas / Center for Space Research*), o GFZ (*GeoForschungsZentrum Potsdam*) e o JPL (*NASA Jet Propulsion Laboratory*). Neste estudo, foram utilizados os produtos GRACE do JPL, como utilizado em estudos anteriores (e.g. Behrangi et al., 2017; Melati et al., 2019).

No Google Earth Engine, os produtos do GRACE são encontrados com o nome “GRACE Monthly Mass Grids – Land”, com dados disponíveis para o período de 01 de abril de 2002 a 03 de fevereiro de 2017. A resolução temporal do GRACE é mensal, e a resolução espacial é de 1 grau, correspondendo a aproximadamente 111 km. O Quadro 2 apresenta os meses nos quais não há dados disponíveis no GRACE. Foram utilizados os dados de 2003 a 2016, de anomalia de armazenamento de água terrestre assim como são disponibilizados no Google Earth Engine. Ainda, os dados do GRACE-JPL também se encontram disponíveis para download pelo site: <<https://grace.jpl.nasa.gov/>>.

Quadro 2: Períodos sem resultados disponíveis no GRACE.

GRACE – Sem dados		
junho, 2002	março, 2013	junho, 2015
julho, 2002	agosto, 2013	outubro, 2015
junho, 2003	setembro, 2013	novembro, 2015
janeiro, 2011	fevereiro, 2014	abril, 2016
junho, 2011	julho, 2014	setembro, 2016
maio, 2012	dezembro, 2014	outubro, 2016
outubro, 2012	-	-

- **GLEAM – Evapotranspiração**

Para a ET, foi utilizado o produto obtido do modelo GLEAM, método baseado em índices de vegetação, que para estimar a ET utiliza a equação de Priestley-Taylor. A ET obtida pelo modelo GLEAM não é disponibilizada no catálogo aberto do Google Earth Engine. Assim, esses dados foram obtidos através de uma biblioteca privada de dados, no Google Earth Engine, do grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala – HGE, do IPH. Conforme Gorelick et al. (2017), os usuários do Google Earth Engine podem acessar e analisar dados do catálogo público, bem como seus próprios dados privados usando uma biblioteca de operadores fornecida pela API do Earth Engine. Esses dados também estão disponíveis para download no site do GLEAM, em: <<https://www.gleam.eu/>>.

Os dados de ET do GLEAM possuem resolução temporal mensal e resolução espacial de 0,25° (aproximadamente 27,8 km).

- **MOD16 – Evapotranspiração**

Ainda, foram utilizados dados de ET do produto MOD16, do MODIS (instrumento dos satélites Terra e Aqua da NASA), baseado em índices de vegetação, e que utiliza a equação de Penman-Monteith para cálculo da ET. Este produto global está disponível do Google Earth Engine (“MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m”), com resolução temporal de 8 dias e resolução espacial de 500 metros. Ainda, os dados de ET do MOD16 também podem ser acessados pelo link: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/>>.

De forma a utilizar apenas os resultados do MOD16 com boa qualidade, foi utilizada a camada de indicador de qualidade “ET_QC”, disponibilizada pelo produto MOD16 para selecionar os pixels com Boa Qualidade, e sem presença significativa de cobertura de nuvens (céu claro/limpo).

- **MOD13 – EVI e NDVI**

Os dados de NDVI e EVI utilizado neste estudo foram obtidos do produto MOD13, do MODIS. Este é um produto global, com resolução temporal de 16 dias. Conforme Didan (2015), o algoritmo para este produto escolhe o melhor valor de pixel disponível de todas as aquisições do período de 16 dias. No Google Earth Engine este produto é disponibilizado com resolução espacial de 500m e 1km, sendo a segunda escolhida para este estudo, em função da grande dimensão da área de estudo (de 500 km x 500 km). Assim, o produto escolhido do Google Earth Engine é o “MOD13A2.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 1km”, que está disponível com dados desde 18 de fevereiro de 2000 até o presente. Os dados do MOD13 também podem ser obtidos pelo link: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/>>.

O produto MOD13 disponibiliza, entre outros dados, o NDVI, o EVI, e também as camadas de indicador de qualidade (em inglês, QA ou QC), que classifica os pixels em Qualidade Boa, Qualidade Média, Gelo e Neve, e Com Cobertura de Nuvens (onde o objeto não é visível). Neste estudo foi utilizado o indicador de qualidade (“SummaryQA”), de forma a selecionar apenas os pixels classificados em Boa Qualidade.

- **MOD17 – GPP**

O produto de Produtividade Primária Bruta (GPP) do MOD17A2H, versão 6, é um composto cumulativo de valores de 8 dias com base no conceito de eficiência de uso de radiação, que pode, potencialmente, ser usado como entrada em modelos para calcular a energia terrestre, carbono, processos do ciclo da água e biogeoquímica da vegetação (RUNNING; MU; ZHAO, 2015).

Assim, para determinar o GPP foi usado o produto “MOD17A2H.006: Terra Gross Primary Productivity 8-Day Global 500m” disponível no Google Earth Engine, para o período de 05 de março de 2000 até o presente. O GPP no MOD17 é um produto global, possui unidade em kgC/m², e apresenta resolução temporal de 8 dias e resolução espacial de 500 m. Ainda, os dados do MOD17, de GPP, também podem ser consultados através do site: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv006/>>.

O MOD17 disponibiliza as camadas de indicador de qualidade (Psn_QC), que classifica os pixels conforme a qualidade, a cobertura de nuvens, entre outros. Assim, foi utilizado o indicador de qualidade para selecionar os pixels com Boa Qualidade, e os pixels sem presença significativa de cobertura de nuvens (céu claro/limpo).

- **Síntese dos Produtos de Sensoriamento Remoto**

O Quadro 3 apresenta dados gerais dos produtos utilizados neste estudo, como nome do produto utilizado, resolução espacial e temporal, frequência de obtenção do dado, e referência.

Quadro 3: Síntese de informações dos produtos utilizados.

Variável	Produto	Resolução espacial	Resolução temporal	Unidade	Período	Fonte
Precipitação	GPM - IMERG	0,1°	mensal	mm/mês	01/06/2000 - atual	Huffman et al., 2019
Armazenamento total de água	GRACE	1°	mensal	cm/mês	01/04/2002 - 03/02/2017	Swenson, 2012
Temperatura de superfície	MOD11	1 km	8 dias	Kelvin	05/03/2000 - atual	Wan et al., 2015
Evapotranspiração	GLEAM	0,25°	mensal	mm/mês	01/01/2003 - 31/12/2018	Martens et al., 2017
	MOD16	500m	8 dias	mm/mês	01/01/2001 - atual	Mu et al., 2011
EVI e NDVI	MOD13	1 km	16 dias	-	18/02/2000 - atual	Didan, 2015
GPP (Produção primária bruta)	MOD17	500 m	8 dias	kgC/m ²	05/03/2000 - atual	Running et al., 2015

5.2 ANÁLISE DOS DADOS

Foram utilizados os valores das variáveis obtidas a partir dos produtos apresentados no item anterior. Os dados foram avaliados em escala mensal, e dessa forma foram calculados os valores médios em cada mês, para as variáveis que tinham resolução temporal menor que um mês (8 dias ou 16 dias). As análises conduzidas com as variáveis são apresentadas a seguir.

Comportamento no período de seca

Primeiro, foram elaboradas figuras ilustrando o comportamento de cada variável (precipitação, ET, temperatura da superfície, armazenamento total de água e índices de vegetação) em relação à média da série temporal (janeiro de 2003 a dezembro de 2016), e mostrando a diferença no período seco e durante eventos de secas, em cada um dos quatro polígonos analisados (regiões do Brasil). Neste caso, a ET é obtida da média entre o produto MOD16 e o modelo GLEAM.

Nesta análise são comparados os valores absolutos dos produtos, considerando toda a série temporal, com os valores obtidos nos meses de secas em determinada região, e com os valores nos meses de seca no cenário de seca extrema.

Padrões temporais

Para verificar os padrões temporais das secas foram calculadas as anomalias mensais (z-score) de cada variável, para toda a série temporal (janeiro de 2003 a dezembro de 2016), em cada região. O z-score indica o quanto, e em que sentido, uma variável se desvia de sua média, conforme seu desvio padrão. Esse tipo de análise, para detecção de secas por produtos de sensoriamento remoto, já foi realizada em outros estudos (e.g. Anderson et al., 2010)). O z-score é calculado para cada variável, conforme mostra a Equação 1.

$$Z = \frac{(\bar{X}_m - \overline{(X_m)})}{\sigma(\bar{X}_m)} \quad (1)$$

O Z é o z-score; X é a variável analisada; \bar{X}_m é o valor médio espacial para cada mês m; $\overline{(X_m)}$ é a média de \bar{X}_m para o mesmo mês do ano, ao longo de todo o período (janeiro de 2003 a dezembro de 2016); e $\sigma(\bar{X}_m)$ é o desvio padrão de \bar{X}_m da série temporal total, sobre o mesmo mês do ano.

Com os resultados do z-score foram elaboradas figuras de anomalias mensais para todos os meses e anos do período analisado. Assim, essas figuras, em forma de *heatmap*, possibilitam a visualização de meses versus anos, indicando as maiores anomalias positivas e negativas de cada uma das variáveis, destacando assim os períodos de eventos de secas mais extremos.

Ainda, foram obtidos gráficos, a partir dos resultados do z-score, com médias móveis de 3 meses, para análise do comportamento das variáveis em período anterior e posterior (de dois anos) à seca analisada em cada região. Nesses gráficos, a área hachurada representa o período característico de secas de cada região, registrado pela literatura.

Conforme Anderson et al., (2010), quaisquer valores z entre 1 e -1 (ou seja, dentro de 1 desvio padrão da média) são considerados como representativos da variação normal dos dados. Os intervalos de confiança foram estabelecidos como: P = 0,1 (90%) para $-1,65 \leq z\text{-score} \leq 1,65$; P = 0,05 (95%) para $-1,96 \leq z\text{-score} \leq 1,96$; e, P = 0,01 (99%) para $-2,57 \leq z\text{-score} \leq 2,57$ (LEE; WONG, 2001). Esses intervalos são representados nos gráficos de z-score.

Com essas análises de padrões temporais é possível observar como cada variável representou o evento de seca em cada região, e ainda, verificar a abrangência temporal das anomalias, em que período inicia a situação anômala e quanto tempo demora para retornar ao estado de normalidade.

Correlações entre variáveis

Com os valores absolutos de cada variável analisada, dentro do intervalo temporal de 2003 a 2016, foram elaboradas imagens destacando a correlação entre cada uma dessas variáveis, dentro de cada polígono.

A correlação foi obtida a partir do cálculo do coeficiente de correlação, como mostra a Equação 2. A equação do coeficiente de correlação utiliza os dados de duas matrizes (X e Y), no caso, serão comparadas duas variáveis, a partir dos seus valores absolutos obtidos no intervalo amostral de 2003 a 2016.

$$\text{Correlação (X, Y)} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde \bar{x} e \bar{y} são as médias amostrais de cada uma das matrizes (variáveis), e x e y são os valores em determinada data do intervalo, de cada uma das matrizes (variáveis). No caso, para estas análises, foi necessário preencher as falhas do produto GRACE, de armazenamento total de água, e para tanto foi utilizado preenchimento linear.

O coeficiente de correlação resulta em um valor entre 1 e -1, onde resultados mais próximos de 1 indicam correlação positiva e resultados mais próximos de -1 indicam correlação negativa, entre as variáveis analisadas. Da mesma forma, quando o coeficiente de correlação se aproxima de zero, este indica pouca ou nenhuma correlação entre as variáveis.

Correlações entre variáveis – comparação por região

Por fim, com os resultados de cada variável, em valores absolutos, para cada mês da série temporal (2003 a 2016), foram gerados gráficos comparando os resultados obtidos. Assim, estes gráficos de correlações são plotados a partir do valor, em cada mês do intervalo de interesse, de duas variáveis (ex.: precipitação versus NDVI), obtendo-se o comportamento das variáveis quando analisadas em conjunto. Esses gráficos abrangem os resultados de todas as quatro regiões de estudo, e comparam todas as variáveis, de duas em duas. Dessa forma, é possível observar o que ocorre com uma variável quando outra aumenta ou reduz de valor, e ainda é possível comparar esta tendência para cada região. Novamente, nas falhas do produto GRACE foi utilizado interpolação linear.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos anexos 1 - 4 são apresentados mapas de cada uma das regiões de estudo, com delimitação do polígono definido para análise, apresentando os resultados de anomalias das variáveis obtidas por sensoriamento remoto (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, ET e índices de vegetação) nos períodos de secas definidos para estudo. Estes resultados foram considerados na validação das áreas de estudo, por serem regiões que sofreram impactos dos eventos de secas registrados, em grande parte de sua área. A seguir são apresentados os resultados para cada região, e ao final é apresentada uma análise comparativa do comportamento das secas em cada região.

6.1 AMAZÔNIA

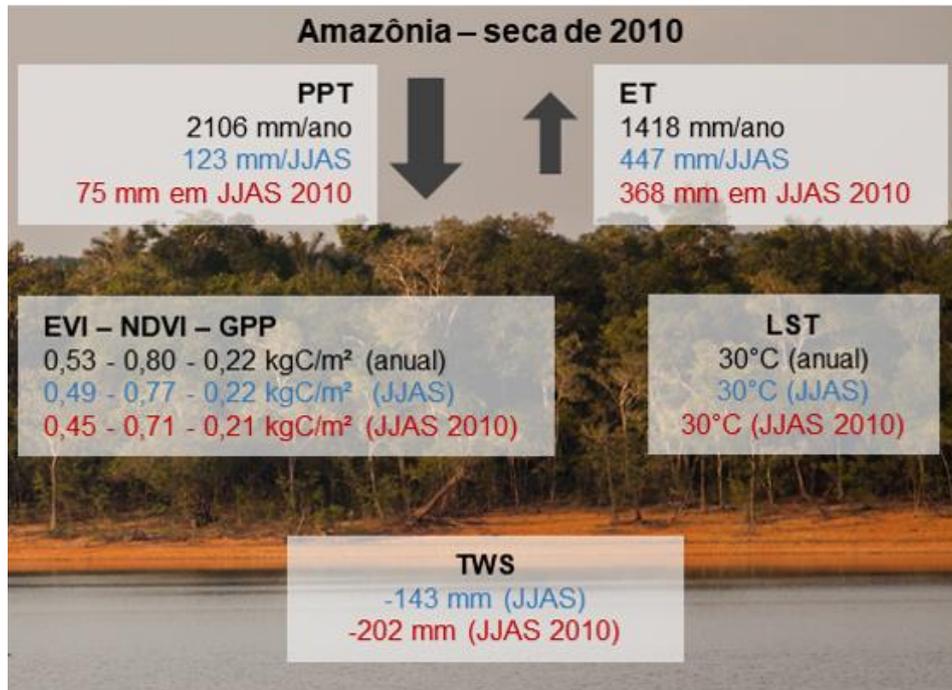
Comportamento no período de seca

No sul da Amazônia, a estação seca ocorre nos meses de junho a setembro (JJAS) (MARENGO; ESPINOZA, 2016), e o evento extremo de seca escolhido para análise foi o de 2010. No polígono definido ao sul da Amazônia brasileira, analisando as médias dos valores das variáveis, no período de 2003 a 2016, foi obtida a análise disposta na Figura 10.

As maiores alterações observadas em situações de seca ocorrem nos produtos de chuva, ET e armazenamento total de água. A chuva no período de JJAS corresponde a aproximadamente 5,9% do valor anual total, e no ano de 2010 esse valor caiu para 3,6%. Importante destacar que no cenário anual a precipitação média é maior que a ET, porém, no período de seca, a ET é maior que a precipitação.

A anomalia do armazenamento total de água, durante os meses de JJAS de 2010, teve variação de -59 mm em relação à média para este período. Em relação aos índices de vegetação, o NDVI sofreu a maior alteração em períodos de seca, em comparação ao EVI. Nesse sentido, Samanta et al. (2010) identificaram que, durante a seca de 2005, não houveram evidências de esverdeamento em grande escala das florestas amazônicas, concluindo que neste período as florestas amazônicas não cresceram. As demais variáveis (LST e GPP) não alteraram o valor médio, em função da seca, no período analisado.

Figura 10: Médias das variáveis analisadas no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – JJAS (azul) e no período de seca em 2010 – evento extremo (vermelho).



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

Padrões temporais

Para cada variável e produto analisado, foram obtidos os valores de anomalias mensais no polígono definido para análise na Amazônia. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 11, para o período de 2003 a 2016, sendo que o branco na variável de anomalia do armazenamento total de água (b) representa os meses sem dados disponíveis. Em termos de precipitação, é bastante destacado, nos últimos meses de 2015, as anomalias negativas dessa variável. Esse foi um dos anos de seca extrema na Amazônia, assim como 2010, que apresentou anomalias negativas menores que 2015, porém presentes durante grande parte de 2010, de fevereiro a outubro, com menores valores registrados em abril e setembro.

O armazenamento total de água também revela grande impacto no ano de 2010, com anomalias bastante negativas em um longo intervalo temporal, se estendendo para 2011, com recuperação a partir da metade do ano. Os produtos de ET (GLEAM e MOD16) indicam anomalias negativas desde a metade do ano de 2010 até o começo de 2011. A temperatura de superfície apresentou valores bastante positivos no início de 2010, período anterior ao começo da seca deste ano. De 2015 para 2016 também foram registradas anomalias muito positivas de temperatura de superfície.

Dos índices de vegetação, o NDVI parece apresentar anomalias mais negativas no período de seca na Amazônia, se comparado ao EVI. As anomalias de NDVI tiveram grande período de duração se estendendo de 2010 até a primeira metade de 2011. Em relação ao GPP, este se encontrou com valores inferiores à média principalmente na metade de 2010 e de 2011, com destaque para fevereiro de 2011.

A Figura 12 apresenta os gráficos de séries temporais mensais, com os resultados de anomalias mensais (z-score) para cada variável e produto analisado, no polígono da Amazônia, considerando o período de 2003 a 2016. Esses gráficos mostram o comportamento de cada variável na Amazônia, durante o evento de seca de 2010, e nos períodos de dois anos antes e após o ano de 2010. A área hachurada dos gráficos indica o período correspondente aos meses de junho a setembro, que é característico por ser a estação seca da região (MARENCO; ESPINOZA, 2016).

Os gráficos de anomalias mensais mostram um período mais longo de anomalias negativas de precipitação no ano de 2010, comparado aos demais anos. Em relação ao armazenamento total de água, houve uma grande anomalia negativa em 2010, que se estendeu até metade de 2011, com os valores mais negativos registrados entre setembro e outubro de 2010, como também observaram Frappart, Ramillien e Ronchail (2013). A ET, tanto calculada pelo modelo GLEAM, quanto pelo produto MOD16, apresentou anomalias negativas, iniciadas no período de seca em 2010, e que se estenderam até valores mais negativos entre agosto e outubro, sendo que ambos os produtos seguiram registrando valores negativos em 2011, principalmente o produto MOD16.

Em 2010, a temperatura de superfície indicou valores acima da média, principalmente nos períodos anterior e após a estação seca. Isso ocorreu devido a menor cobertura de nuvens, logo, mais radiação líquida na superfície, e ainda, por haver menos ET, teve mais energia utilizada para aquecer a superfície e gerar calor sensível. Os índices de vegetação tiveram anomalias negativas em 2010, com destaque para os meses de agosto, setembro (NDVI e EVI) e outubro (GPP). Até a metade de 2011, principalmente o NDVI seguiu apresentando valores negativos. Em relação ao GPP, essa variável começou a registrar anomalias negativas no final do período de secas (setembro a outubro), e seguiu dessa forma até se recuperar na metade do ano de 2011.

De forma geral, percebe-se que, para a Amazônia, durante a seca de 2010, houve anomalias bastante negativas de armazenamento total de água, por um longo intervalo de tempo. Com exceção da temperatura de superfície, todas as demais variáveis apresentaram alguns dos menores valores de anomalias negativas no período de setembro-outubro de 2010. O armazenamento total de água, a ET (produto MOD16), o NDVI e o GPP demonstraram

que apenas na metade de 2011, aproximadamente, seus valores retornaram às condições médias normais.

Figura 11: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.

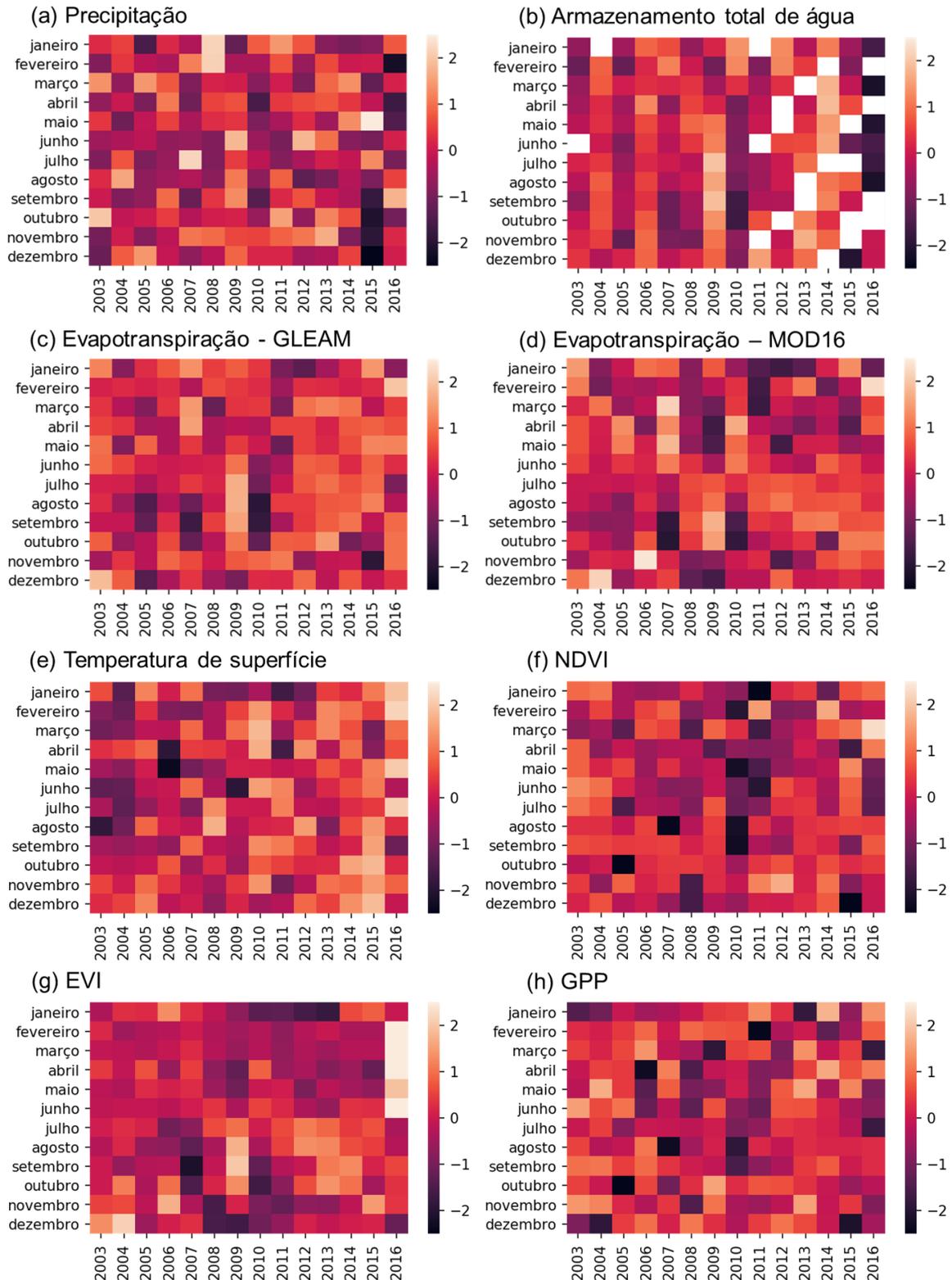
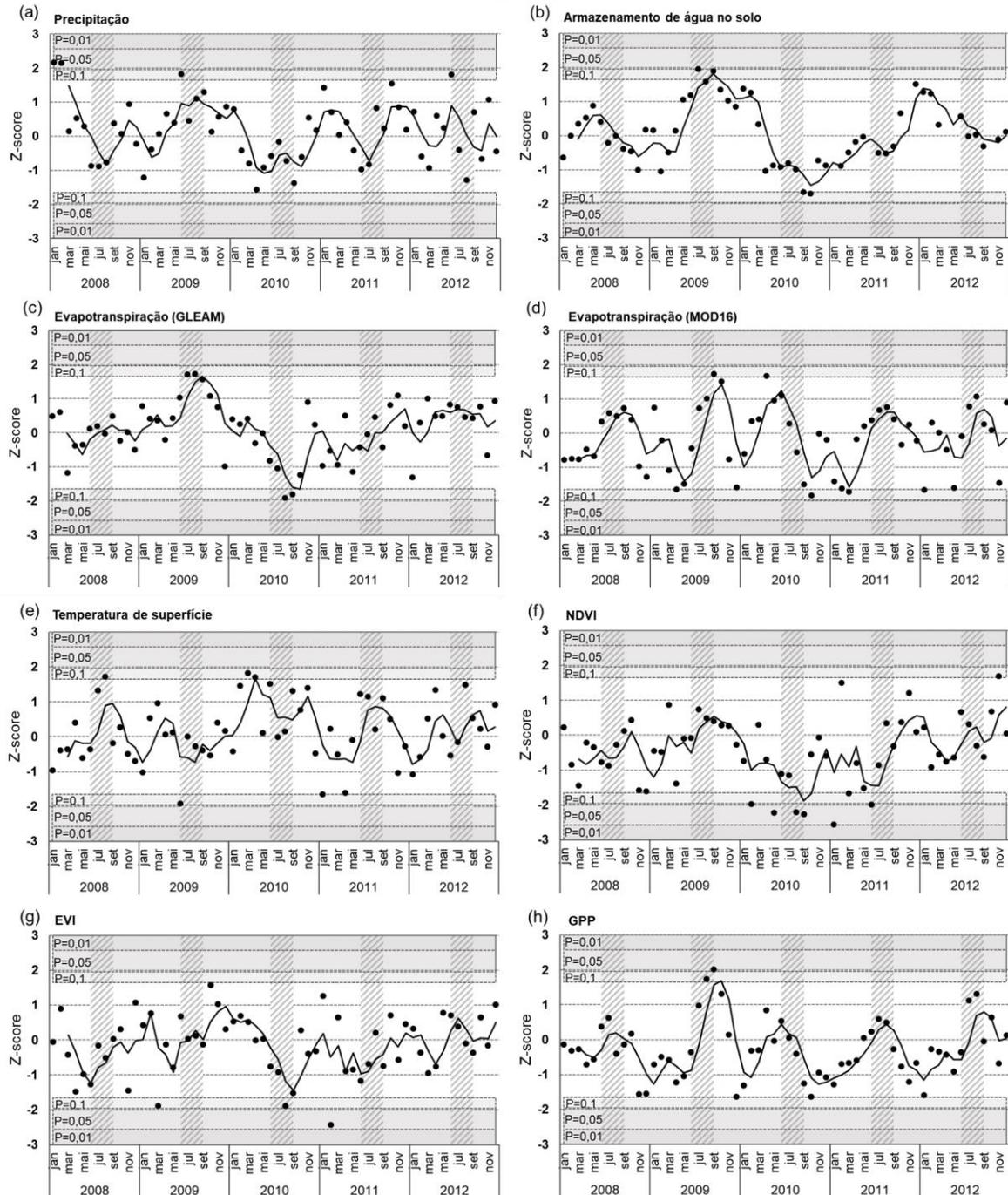


Figura 12: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Amazônia, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.



Correlações entre variáveis

As correlações entre as variáveis são apresentadas na Figura 13, considerando os valores absolutos das variáveis, para todo o período analisado (2003 - 2016). A maior correlação

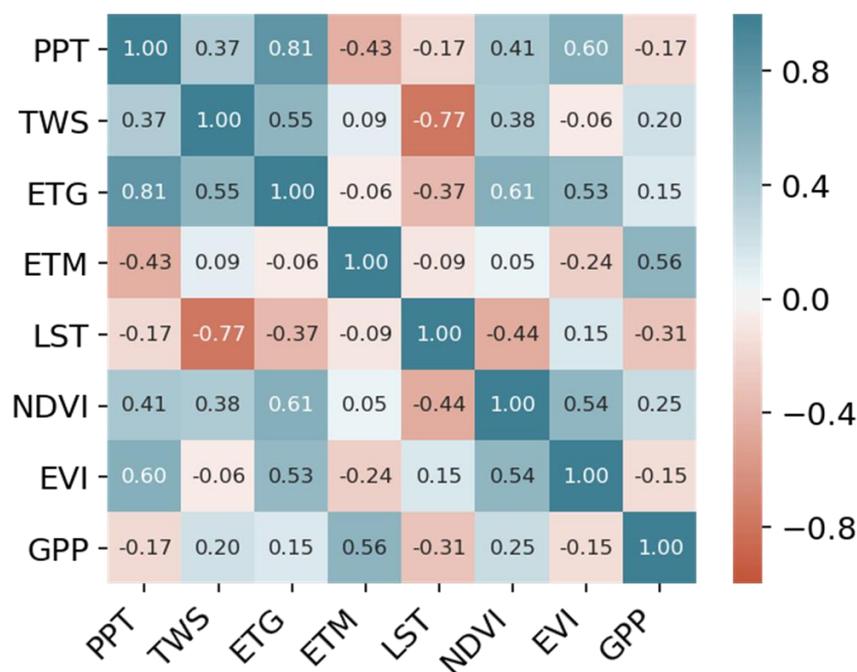
positiva (0,81) é observada entre a ET do modelo GLEAM e a precipitação, sendo verificado correlação negativa entre a precipitação e a ET do produto MOD16. Aqui, destaca-se ainda a baixa correlação (de -0,06) entre os produtos GLEAM e MOD16, de estimativa de ET.

Esta diferença entre ET do modelo GLEAM e ET do produto MOD16 é bastante relevante. No sul da Amazônia (área de interesse), a ET tem pico na estação chuvosa, porque no período seco ela é limitada pela falta de água. Na Amazônia central ocorre o inverso, e o pico é na estação seca, devido à menor cobertura de nuvens (DA ROCHA et al., 2009). Ainda, conforme Ruhoff et al. (2013), as estimativas de ET pelo algoritmo MOD16 são mais precisas durante a estação seca e menos na estação chuvosa.

Em relação aos índices de vegetação, NDVI e EVI se correlacionam de forma positiva com a precipitação (principalmente o EVI). O maior valor de correlação negativa (-0,77) ocorreu entre a temperatura de superfície e o armazenamento total de água, porém, a temperatura na Amazônia apresenta baixa variação nos valores absolutos, dessa forma, as correlações com essa variável não são muito significativas.

Assim, por esta análise, verifica-se que com a redução da precipitação e aumento da temperatura, ocorre a redução no armazenamento total de água e nos índices de vegetação. Ainda, os resultados de correlação não indicaram grandes correlações entre os índices de vegetação, sendo que NDVI e EVI apresentaram apenas 0,54 de correlação.

Figura 13: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Amazônia, para o período de 2003 a 2016.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

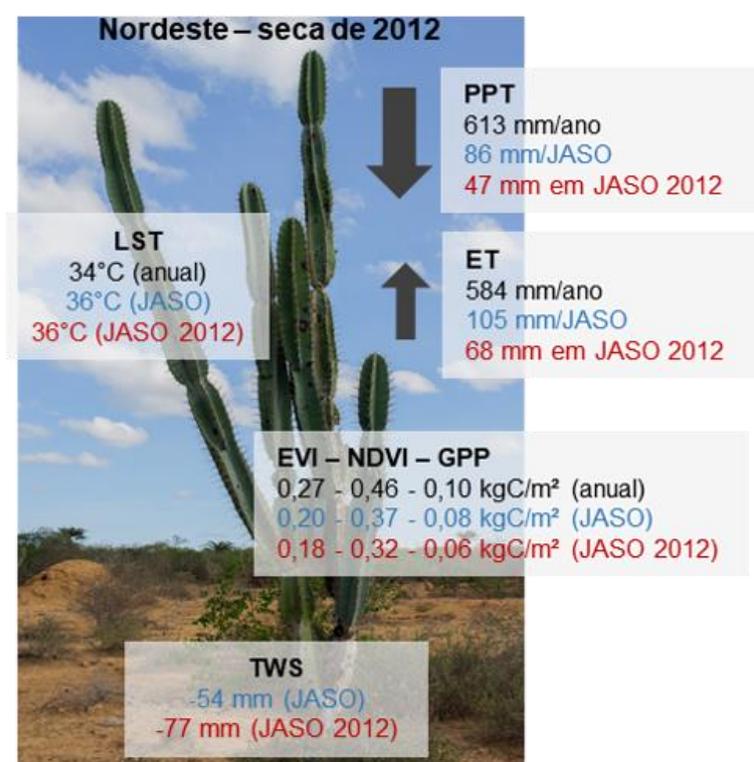
6.2 REGIÃO NORDESTE

Comportamento no período de seca

O período seco no semiárido, local do polígono da Região Nordeste, ocorre de junho a novembro (MELATI et al., 2019), assim, para manter a análise de 4 meses (conforme foi utilizada na região da Amazônia), foi definido o intervalo entre os meses de julho e outubro (JASO) para análise do período seco. O evento extremo de seca foi representado pelo ano de 2012. Assim, para o polígono da Região Nordeste, a Figura 14 apresenta os valores médios das variáveis analisadas, obtidos entre 2003 e 2016.

No Nordeste Brasileiro é observada a ocorrência de baixos índices de precipitação e irregularidade do seu regime, temperaturas elevadas durante todo o ano, e baixa capacidade de armazenamento total de água (ANA, 2019). Isso é evidenciado na Figura 14, onde a média da precipitação total no período seco (JASO) é de 86 mm, e em 2012 esse valor foi de apenas 47 mm para JASO. A ET registrou comportamento muito parecido ao da precipitação, chamando atenção que o valor médio de precipitação é pouco maior que o de ET, no cenário anual, porém, no período de seca, a ET tem valor médio maior que a precipitação.

Figura 14: Médias das variáveis analisadas no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – JASO (azul) e no período de seca em 2012 – evento extremo (vermelho).



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

Os índices de vegetação apresentam redução de valores nos períodos secos, comparado ao cenário anual. O armazenamento total de água sofreu pouca alteração, se mantendo baixo no período de seca, e a temperatura de superfície não sofreu alteração comparando os cenários com e sem seca. Conforme Marengo, Cunha e Alves (2016), no ano hidrológico de 2011-2012, o acumulado de precipitação na região do semiárido não ultrapassou 500 mm, resultando no estresse hídrico vegetativo e conseqüentemente na baixa produtividade vegetal.

Padrões temporais

Considerando os padrões temporais de comportamento das variáveis no Nordeste, a Figura 15 apresenta as anomalias mensais, para o intervalo de 2003 a 2016, de cada variável. No período de 2011 até 2014 o semiárido apresenta uma grande área com deficiência hídrica, onde o balanço hídrico é negativo em razão da falta de chuva, temperatura elevadas e secura do ar (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

Pela Figura 15 é bastante evidente a concentração de valores negativos de anomalias, a partir de 2012, para as variáveis de armazenamento total de água, ET, NDVI, EVI e GPP. Em 2012, a precipitação apresentou anomalias mais negativas entre os meses de março a julho. Conforme Marengo et al. (2013), a situação da seca no Nordeste piorou entre abril e maio de 2012.

No ano hidrológico de 2013-2014, o acumulado de precipitação na região semiárida foi maior do que nos anos anteriores (706 mm) o que resultou em impactos da seca menos intensos. Porém, no ano hidrológico 2015-2016, observou-se um déficit pluviométrico, e a seca voltou a impactar a produtividade vegetal (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

A Figura 16, de séries temporais de anomalias mensais, mostra que a precipitação foi mais baixa nos meses que antecedem a época de secas na região (área hachurada), e seguiu apresentando anomalias negativas até a metade de 2013. O mesmo comportamento foi observado na ET do modelo GLEAM. A ET do produto MOD16 e os índices de vegetação tiveram também registros de anomalias mensais baixas antes da época de secas em 2012, porém, a recuperação pareceu ocorrer apenas em 2014. De maneira geral, os produtos de ET apresentam comportamento muito similar entre si.

A temperatura de superfície apresentou anomalias médias muito altas antes do período seco (JASO) de 2012, e no começo de 2013. Reflexo do comportamento da chuva e da temperatura, o armazenamento total de água começou a apresentar médias negativas no período seco de 2012, e continuou assim pelos anos seguintes (gráfico mostra apenas 2 anos, mas até 2016, último ano analisado, as anomalias seguiram negativas).

Figura 15: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.

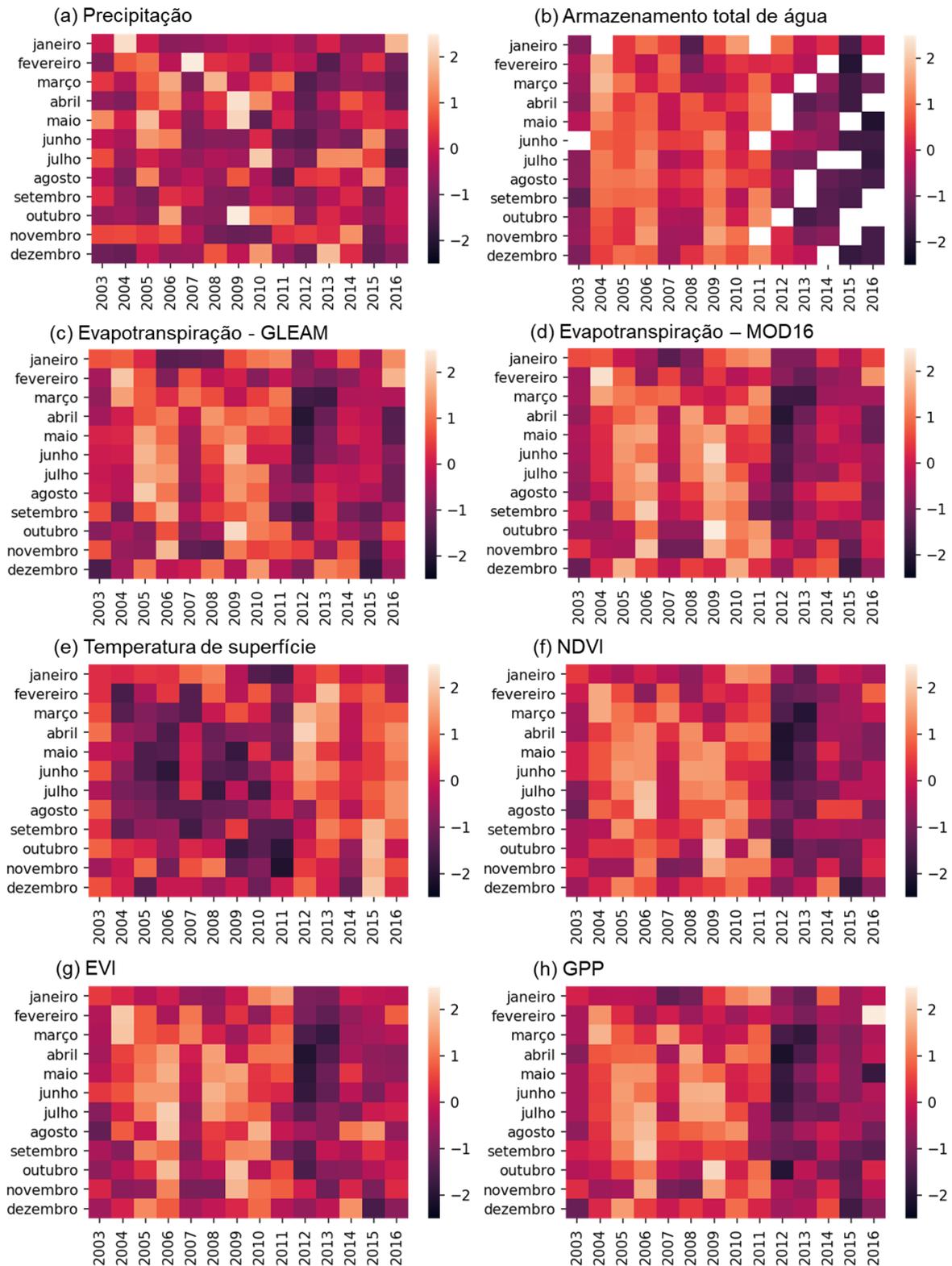
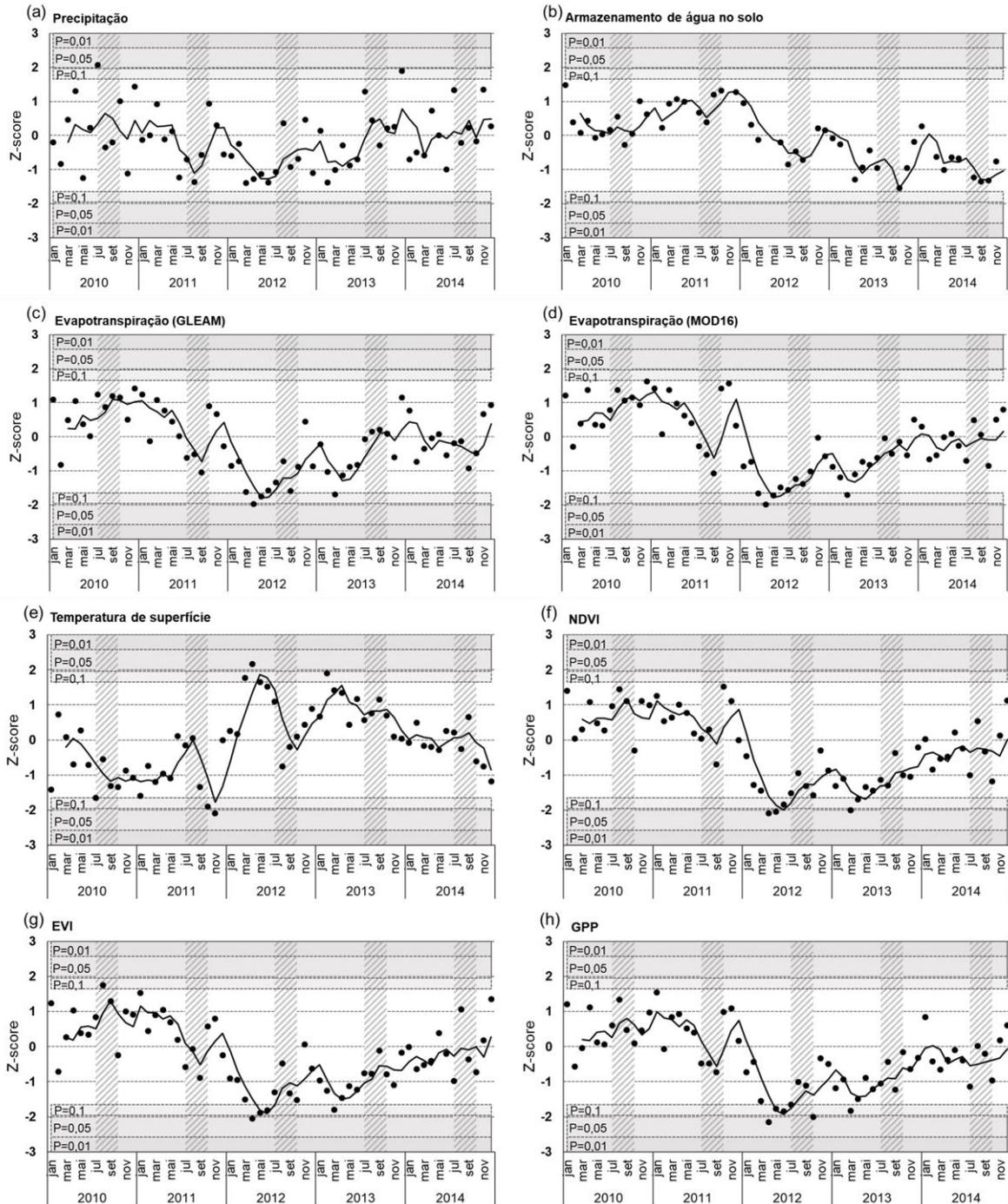


Figura 16: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Nordeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.

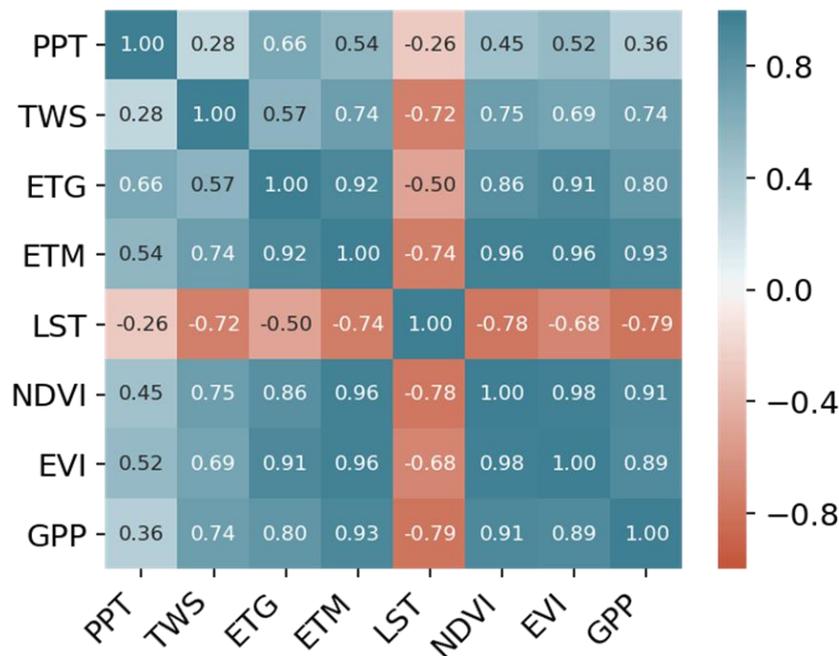


Correlações entre variáveis

A Figura 17 apresenta as correlações entre os valores absolutos das variáveis analisadas, no período de 2003 a 2016. Por esta análise é evidente a correlação negativa da temperatura com as demais variáveis, principalmente com os índices de vegetação, com a ET estimada

pelo MOD16 e com o armazenamento total de água. Ainda, a ET do produto MOD16 possui correlação muito positiva com os índices de vegetação (acima de 0.9), e com o armazenamento total de água (0,74). Em contrapartida, a ET estimada pelo GLEAM possui correlação superior a ET do MOD16 somente quando relacionada com a precipitação.

Figura 17: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Região Nordeste, para o período de 2003 a 2016.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

6.3 REGIÃO SUDESTE

Comportamento no período de seca

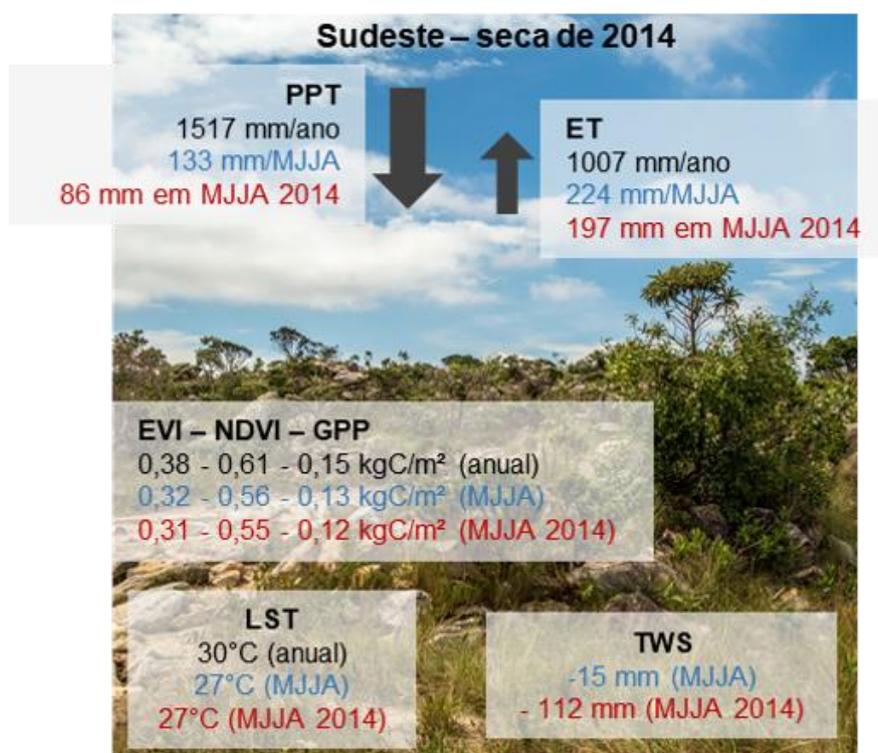
Na Região Sudeste do Brasil a precipitação apresenta valores mínimos durante o período de inverno (junho a agosto) (MARENGO et al., 2015). Sabendo disso, e considerando a média de valores por mês obtidos pelas análises deste estudo, o período definido para análise de secas no Sudeste foi a estação de inverno, abrangendo os meses de maio a agosto (MJJA). O evento extremo de seca analisado no polígono do Sudeste foi o ocorrido em 2014.

Assim, obteve-se os resultados apresentados na Figura 18 em relação aos valores médios anuais das variáveis no Sudeste, e em comparação aos períodos de secas (MJJA) e ao período de secas em 2014.

A precipitação na época de secas (MJJA) abrange 8,8% da precipitação anual, sendo que, durante a seca de 2014, esse valor reduziu para 5,7% em MJJA. comportamento similar é observado para a ET média, onde na época de secas (MJJA) é observada 22,3% da ET anual, e no ano de 2014, apenas 19,6%. Como o inverno corresponde a estação seca no Sudeste, a temperatura em MJJA é mais baixa que a média anual. Os índices de vegetação sofrem redução dos seus valores na época de seca.

Em relação à média de anomalia do armazenamento total de água, percebe-se grande diferença entre a média total do período de MJJA, de -15 mm, para a média em MJJA de 2014, de -112 mm. Ainda, a anomalia do armazenamento total de água, pelas médias mensais de todo o período, apresenta resultados mais negativos nos meses de agosto a novembro (ASON), com média de -95 mm/ASON, e em ASON de 2014 essa média chegou a -203 mm/ASON.

Figura 18: Médias das variáveis analisadas no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – MJJA (azul) e no período de seca em 2014 – evento extremo (vermelho).



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

Padrões temporais

Nesta seção é apresentado o comportamento das anomalias mensais das variáveis, no polígono da Região Sudeste, para período de 2003 a 2016 (Figura 19), e o comportamento

das séries temporais mensais considerando apenas o evento de seca de 2014 e os anos próximos (Figura 20).

Figura 19: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.

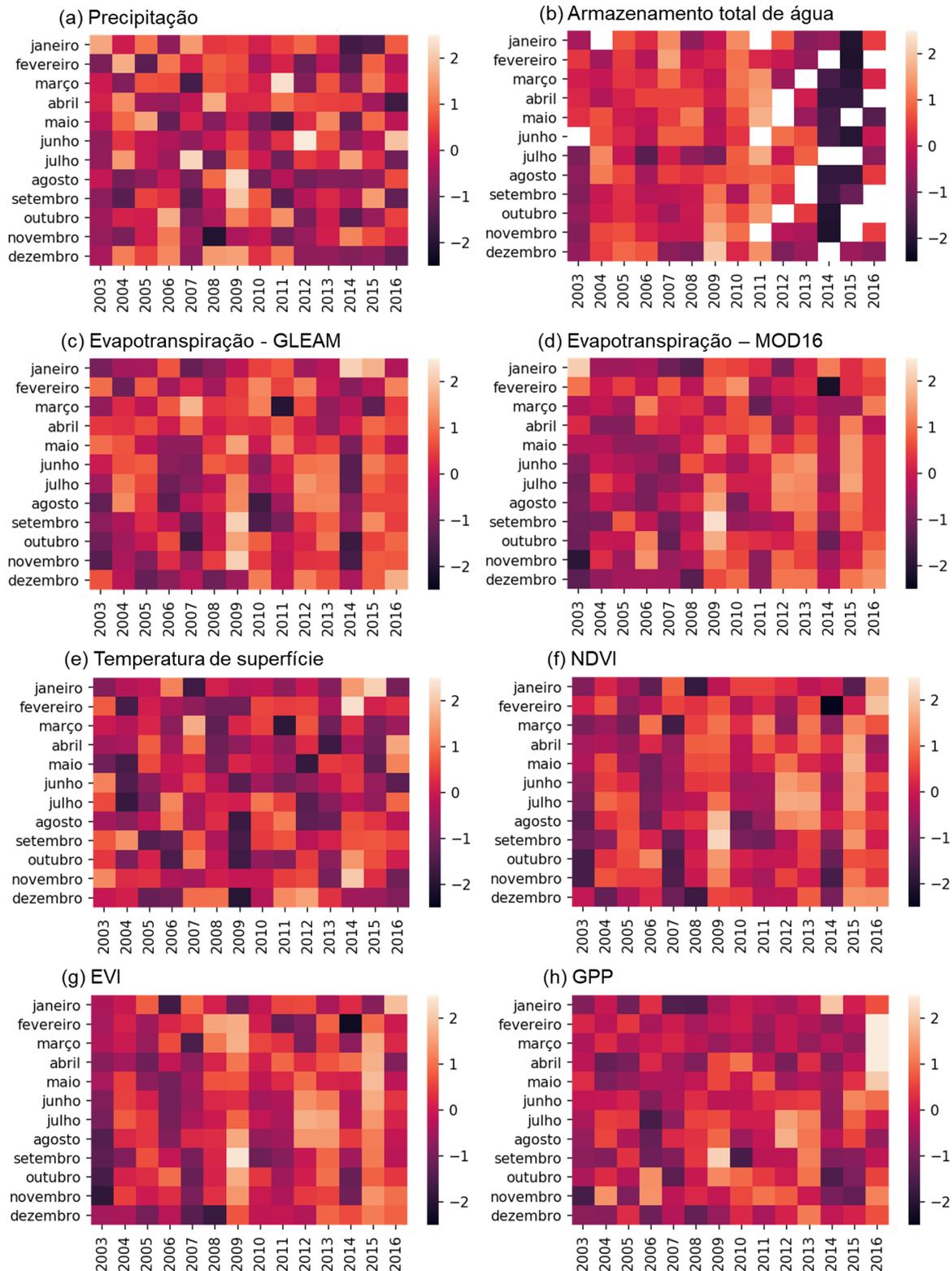
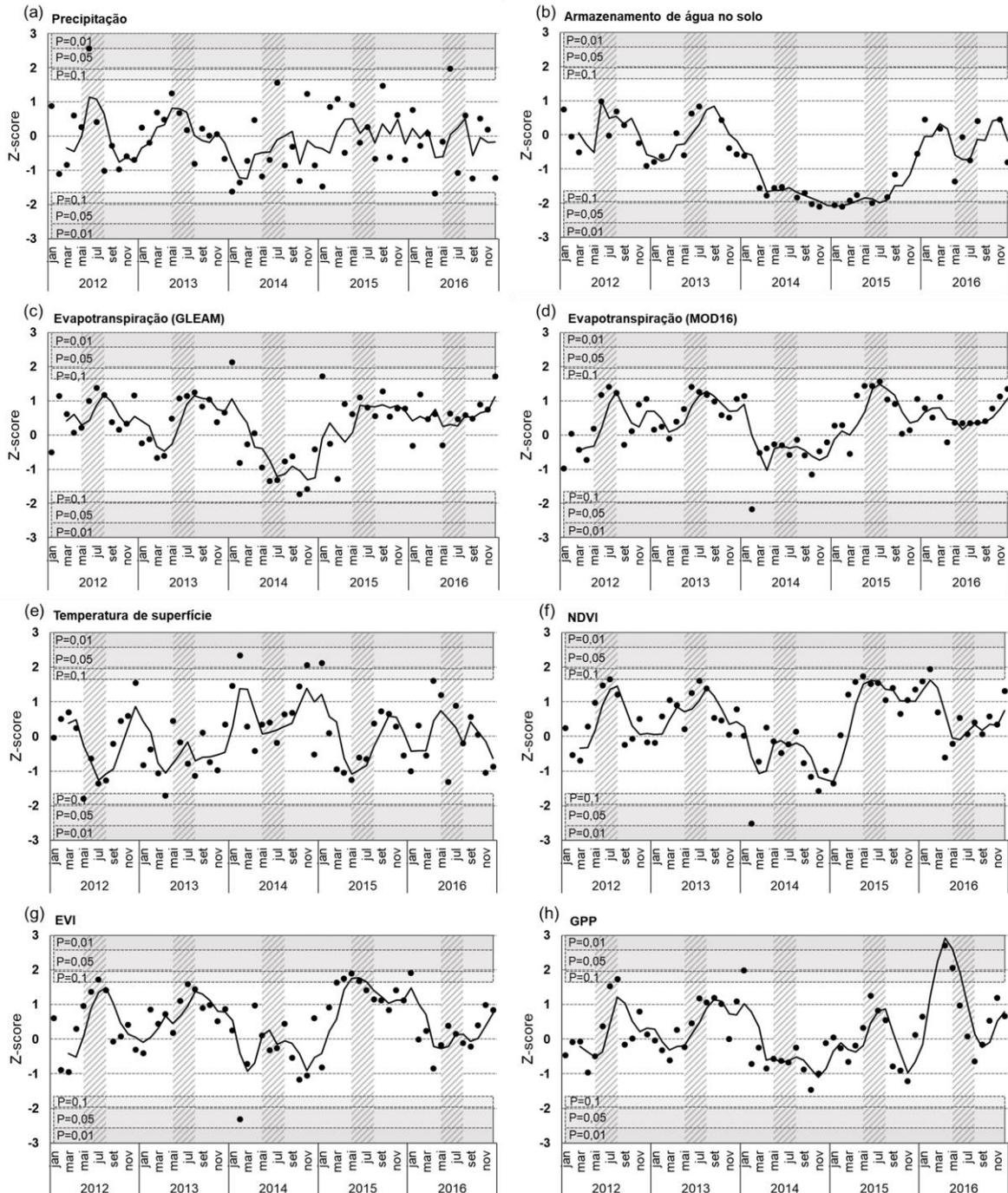


Figura 20: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono da Região Sudeste, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.



Analisando a Figura 19 percebe-se que a precipitação na região do polígono esteve abaixo da média desde o começo de 2014, o que é corroborado pelas séries temporais mensais durante o evento de seca (Figura 20). Em relação à variação do armazenamento total de água, a Figura 19 mostra que em 2014 e 2015 a região registrou anomalias negativas

que não haviam sido observadas em nenhum outro momento da série temporal (2003 a 2016), com valores muito baixos. Pela Figura 20 nota-se que essas anomalias negativas seguem até a recuperação somente 2 anos depois, em 2016.

A ET em ambos os produtos (GLEAM e MOD16) apresentou valores mais positivos antes do evento de 2014, enquanto que em 2014 registrou valores de anomalias mais negativos, com recuperação em 2015 e 2016 (Figura 19). Ainda, conforme a Figura 20, a ET estimada por ambos os produtos começou 2014 com anomalias positivas. A ET do produto MOD16 começou a apresentar anomalias negativas antes de MJJA de 2014, com recuperação somente em 2015, chegando a anomalias positivas na metade deste ano. Para a ET estimada pelo modelo GLEAM, os menores valores médios mensais foram observados no período de MJJA de 2014 e no final de 2014, com recuperação no começo de 2015, e anomalias positivas na metade de 2015.

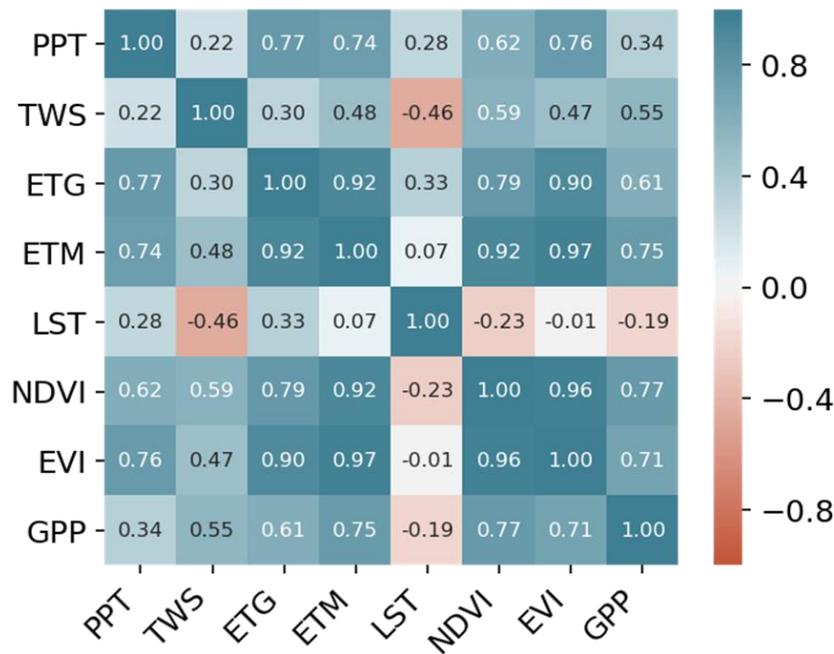
A temperatura de superfície tem valores próximos à média durante o período de secas de 2014 (MJJA), porém, apresenta valores anômalos positivos nos períodos anteriores e posteriores a MJJA de 2014 (Figura 20). Conforme a Figuras 19 e 20, os índices de vegetação EVI e NDVI registraram valores de anomalias negativas em 2014, porém, em 2015 registraram valores muito acima da média mensal histórica. O GPP, por sua vez, se recuperou em 2015, retornando ao valor médio, e em 2016 registrou valores anômalos muito altos positivamente.

Correlações entre variáveis

Considerando as relações entre as variáveis analisadas, conforme mostra a Figura 21, as maiores correlações negativas foram observadas para a variável de temperatura de superfície, quando comparada à variação no armazenamento total de água (-0,46), e ainda, quando comparada aos índices de vegetação, principalmente o NDVI (-0,23) e o GPP (-0,19).

Em relação às correlações positivas, destaca-se a relação da precipitação com os produtos de ET (0,77 para o GLEAM e 0,74 para o MOD16), e com os índices EVI (0,76) e NDVI (0,62). Os índices de vegetação se correlacionaram melhor com a ET estimada pelo MOD16 (entre 0,75 e 0,97). O armazenamento total de água apresentou relativamente baixa correlação com a precipitação (0,22).

Figura 21: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono da Região Sudeste, para o período de 2003 a 2016.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

6.4 ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Comportamento no período de seca

A Figura 22 apresenta, para o polígono do Rio Grande do Sul, as médias das variáveis analisadas. No estado, as chuvas são bem distribuídas o ano todo, sendo março e agosto os meses com menos chuva, pela série histórica avaliada (2003-2016), com média de 112 e 117 mm, respectivamente. Ainda, outubro é o mês com mais chuvas, com média de 208 mm. Os demais meses concentram valores médios de precipitação mensal entre 127 mm e 167 mm. Ainda, o estado se caracteriza por apresentar grande variação sazonal de temperatura, o que é evidenciado pelas médias mensais das variáveis, onde a temperatura em DJFM (verão) é 5°C maior que a média anual, chegando a 7°C de diferença em DJFM de 2012.

Em termos de ET, o polígono do Rio Grande do Sul apresentou os valores mais altos de ET nos meses de secas, comparado aos demais polígonos. Isso ocorre principalmente devido à maior radiação líquida neste período, havendo assim, maior disponibilidade de energia.

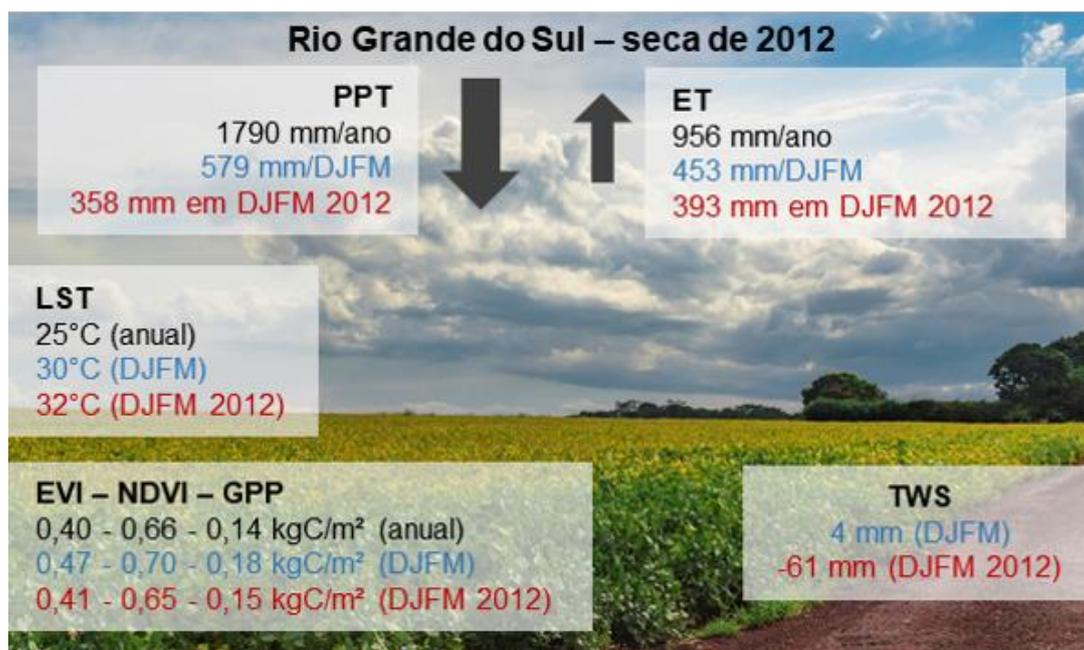
Ainda, o polígono do Rio Grande do Sul foi o único, entre os quatro polígonos avaliados, onde a ET no período seco não ultrapassa a precipitação no período seco, indicando, novamente, que o estado apresenta grande concentração de chuvas durante todo o ano.

Contudo, em 2012, ano de seca extrema, a ET no período seco (DJFM) teve média maior que a precipitação, para o mesmo período.

Os índices de vegetação são maiores no período de secas (DJFM) pois durante a época de verão há maior energia disponível, e, dessa forma, nesta época ocorre o crescimento de culturas e as colheitas, com destaque para a soja na parte norte do estado. Porém, durante a seca de 2012, a média dos índices de vegetação em DJFM foram próximos a média anual, com valores menores que a média do período.

Conforme Anderson et al. (2016), no estado do Rio Grande do Sul, o setor agrícola sofreu grandes perdas em função das secas de 2009 e 2012, sendo que a produção de milho foi significativamente afetada. Isso também é evidenciado pela análise da variação do armazenamento total de água, sendo que o polígono do Rio Grande do Sul foi o único a apresentar valores positivos dessa variável, considerando a média no período seco (DJFM). Porém, em DJFM de 2012 as médias de anomalia do armazenamento total de água caíram muito, chegando a um valor médio de -61 mm neste período.

Figura 22: Médias das variáveis analisadas no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. Médias anuais totais (preto), no período seco – DJFM (azul) e no período de seca em 2011/2012 – evento extremo (vermelho).



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

Padrões temporais

Analisando os padrões temporais de anomalias mensais (Figura 23 e Figura 24) percebe-se uma redução da precipitação média nos meses de setembro de 2011 a janeiro de 2012,

período esse que antecedeu e deu início a seca. A precipitação seguiu baixa entre março e junho de 2012 (após o período seco).

Figura 23: Anomalias mensais de cada uma das variáveis analisadas, no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP.

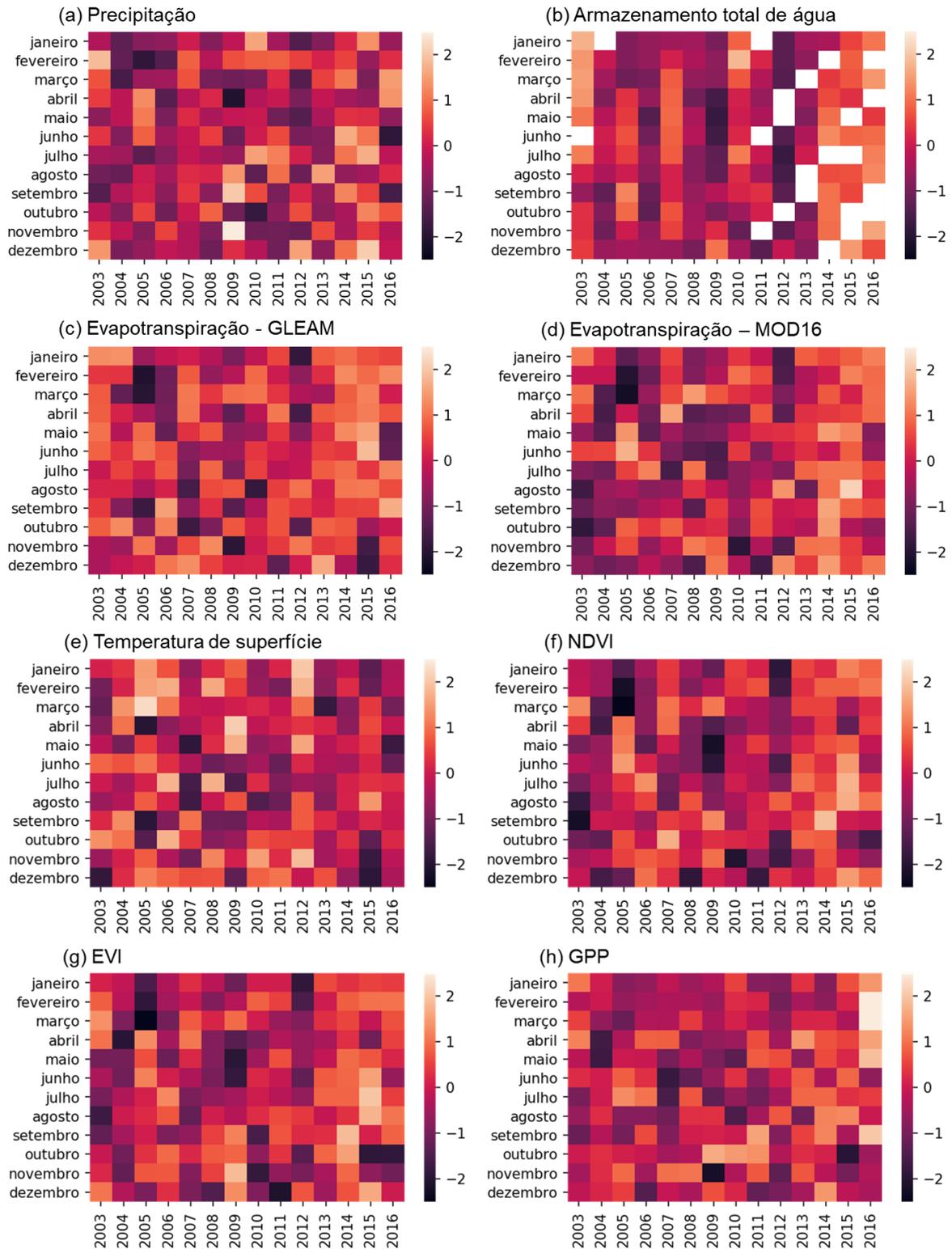
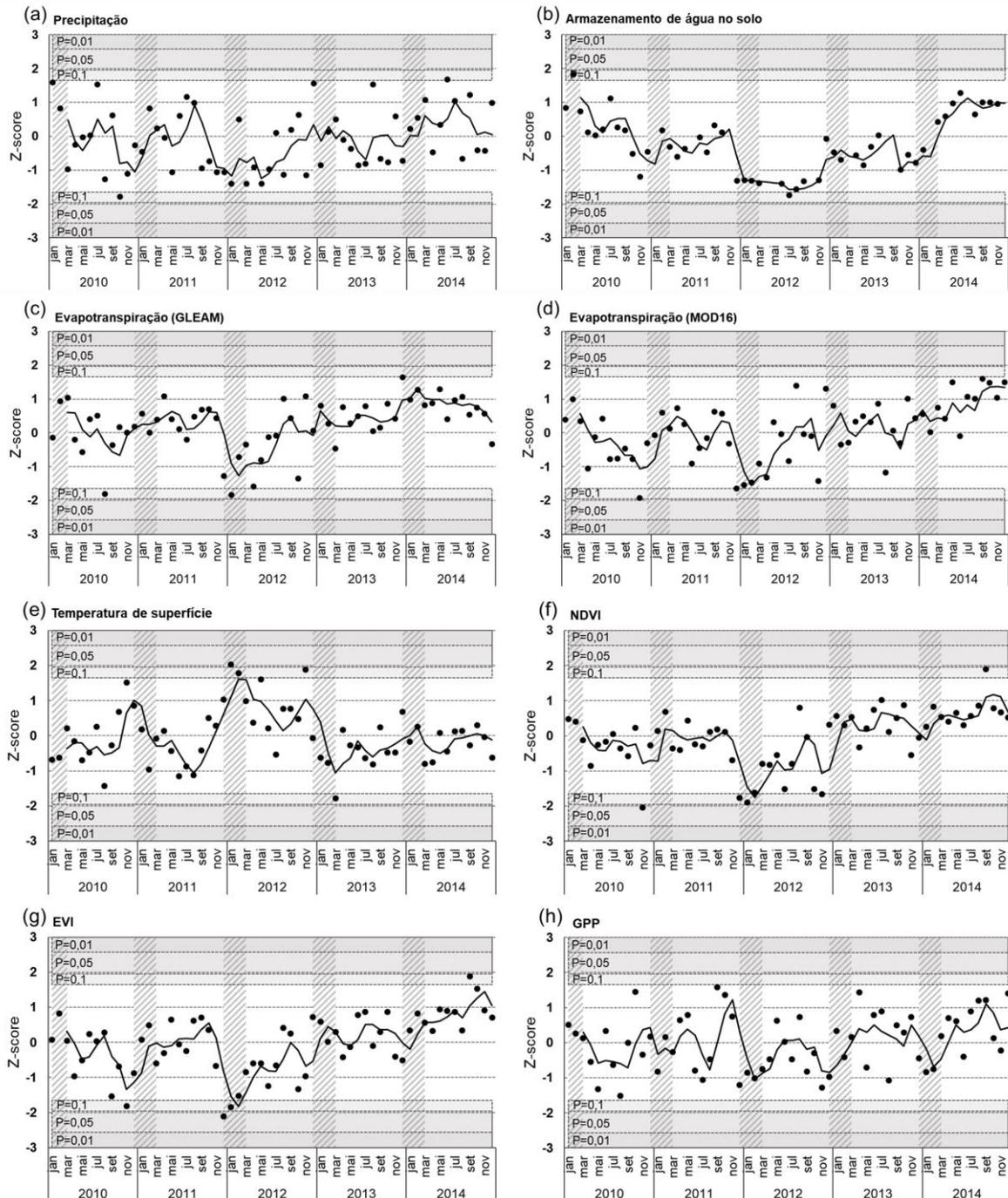


Figura 24: Séries temporais mensais, de anomalias mensais, para cada uma das variáveis analisadas, no polígono do Rio Grande do Sul, no período de 2003 a 2016. (a) Precipitação. (b) Anomalia do armazenamento total de água. (c) Evapotranspiração do modelo GLEAM. (d) Evapotranspiração do MOD16. (e) Temperatura de superfície. (f) NDVI. (g) EVI. (h) GPP. As linhas tracejadas horizontais representam os níveis de confiança. A área hachurada vertical representa o período característico de secas na região.



A variação do armazenamento total de água apresentou anomalias muito negativas em 2012, e seguiu com valores abaixo da média em 2013, com recuperação somente em 2014. Ainda, pela Figura 23 percebe-se as anomalias negativas no armazenamento total de água, para outros eventos extremos de seca, em 2005 e 2009, onde os valores foram mais baixos

que a média em 2006, 2008 e 2009. Assim, a variável de variação do armazenamento total de água se mostrou muito eficiente para indicar períodos de secas mais extremas.

Ambos os produtos de estimativa de ET (GLEAM e MOD16) apresentaram redução e valores médios em dezembro de 2011 e no começo de 2012, com recuperação a partir da metade de 2012, e com maior concentração de anomalias positivas a partir de 2013. A temperatura de superfície foi muito maior no ano de 2012, que em anos anteriores e posteriores a seca. Em relação a temperatura de superfície percebe-se ainda presença de anomalias muito positivas nos anos de 2005 e 2009 (Figura 23).

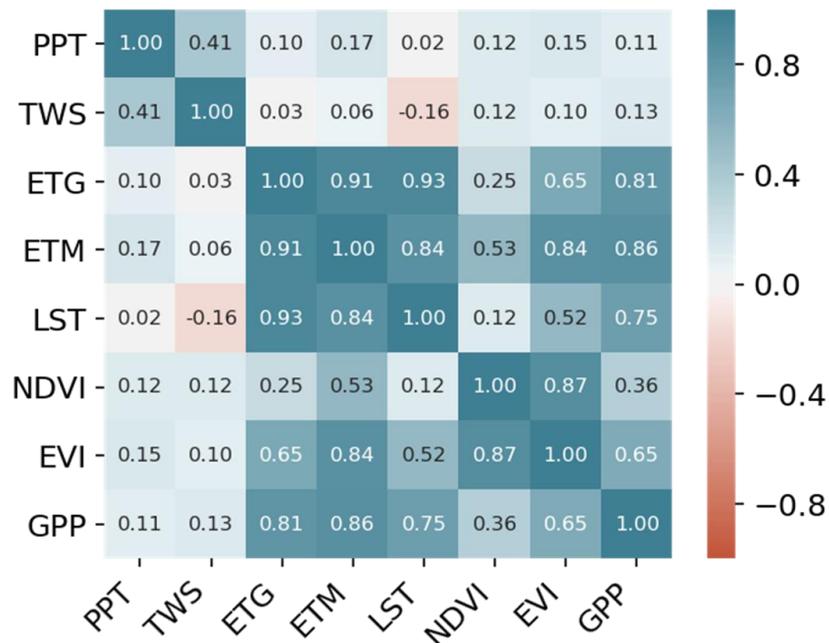
Os índices de vegetação indicaram valores anômalos negativamente em dezembro de 2011 e no começo de 2012. Conforme as séries temporais de anomalias mensais (Figura 24), anomalias mais negativas foram observadas para o NDVI e o EVI, com recuperação gradual em 2012, atingindo os valores médios. Ainda, na estação (DJFM) seca de 2012/2013 houve novamente redução dos valores médios dos índices de vegetação, o que pode estar relacionado as anomalias positivas de temperatura de superfície, registradas em meses anteriores (destaque para novembro).

Correlações entre variáveis

Considerando as correlações entre as variáveis, mostradas na Figura 25, é evidente que a precipitação não possui correlação forte com nenhuma das demais variáveis, sendo que a maior correlação identificada com essa variável foi para o armazenamento total de água (0,41). Isso provavelmente ocorre pelo fato de a precipitação ser bem distribuída durante o ano no estado do Rio Grande do Sul, não havendo variações sazonais, como ocorre com outras variáveis. O mesmo comportamento é observado para o armazenamento total de água, que teve maior correlação identificada com a precipitação.

No polígono do Rio Grande do Sul a temperatura de superfície apresentou forte correlação positiva com ambos os produtos de ET, principalmente com o modelo GLEAM (0,93). A temperatura se correlacionou bem com o GPP (0,75), e com o EVI (0,52), porém, não teve boa correlação com o NDVI. O GPP também teve forte correlação positiva com ambos os produtos de ET. Ainda, a resposta de ambos os produtos de estimativa de ET (GLEAM e MOD16) apresentaram forte correlação positiva (0,91).

Figura 25: Correlação entre os valores absolutos das variáveis, no polígono do Rio Grande do Sul, para o período de 2003 a 2016.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

6.5 SÍNTESE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DAS SECAS EM CADA REGIÃO

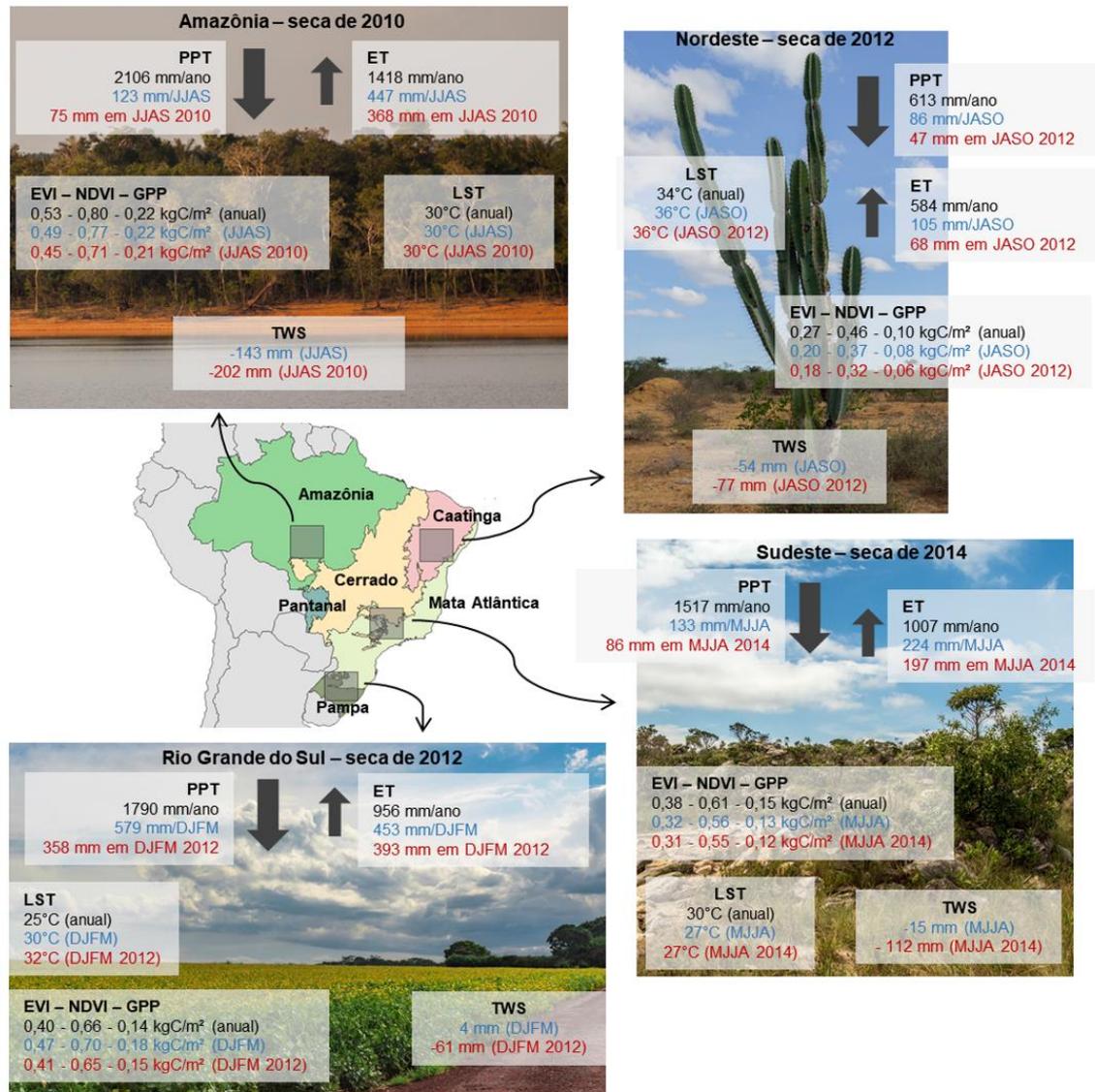
Considerando os resultados apresentados nos itens anteriores, em relação ao comportamento das variáveis no período de secas, a Figura 26 apresenta uma síntese comparativa entre todas as regiões analisadas. A maioria dos eventos extremos de secas analisados neste estudo foram relacionados a eventos de El Niño e La Niña. A seca da Amazônia em 2010 começou durante um evento El Niño (moderado) e então se tornou mais intensa durante o La Niña (moderada). Ainda, em 2015 a Amazônia enfrentou novamente uma seca extrema, com presença de El Niño forte.

Durante o La Niña de 2012, mesmo ano de inundações na Amazônia, o Nordeste enfrentou uma seca extrema (MARENGO et al., 2013), que foi potencializada posteriormente pelo El Niño de 2015. As secas no estado do Rio grande do Sul também são afetadas por eventos de El Niño e La Niña (GROSS, 2015; NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2009) sendo que o evento extremo de seca de 2012 ocorreu em presença do fenômeno La Niña (moderada).

Já a seca extrema de 2014, na Região Sudeste, foi provocada por anomalia da ZCAS que reduziu o regime de chuvas na porção sul do Sudeste. Além disso, houve a atuação de um

sistema de alta pressão que gerou um bloqueio atmosférico e impediu a chegada da umidade, transportada pelo JBN da Amazônia, e ainda, impediu a formação da ZCAS neste período.

Figura 26: Síntese comparativa do comportamento das variáveis no período de secas, em cada uma das regiões de interesse.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

Outro ponto importante é a duração desses eventos extremos de seca, que na Amazônia e no Rio Grande do Sul tiveram curta duração, estando presentes por apenas alguns meses. Entretanto, o Nordeste é caracterizado pela alta concentração de secas, assim, devido ao clima da região, o evento extremo de seca teve duração muito maior, de aproximadamente 5 anos. No Sudeste, devido à duração do bloqueio atmosférico na região em 2014, a seca foi

bastante intensa, e como o episódio se repetiu em 2015 (em menor intensidade), esse evento teve duração de 2 anos, aproximadamente.

Correlação do comportamento das variáveis

A partir das médias obtidas das variáveis analisadas, destaca-se que a Amazônia e as regiões Nordeste e Sudeste apresentam diferença de média pluviométrica ao longo do ano, sendo os meses de inverno normalmente os menos chuvosos. Ainda, essas regiões apresentam temperaturas elevadas o ano todo, e, principalmente na Amazônia, as temperaturas mantêm uma média relativamente constante.

No Rio Grande do Sul, diferente das demais regiões analisadas, a precipitação é aproximadamente constante durante o ano todo, sendo um pouco mais reduzida nos meses de verão, onde há maior disponibilidade de energia, sendo este o período marcado pela presença de secas no estado.

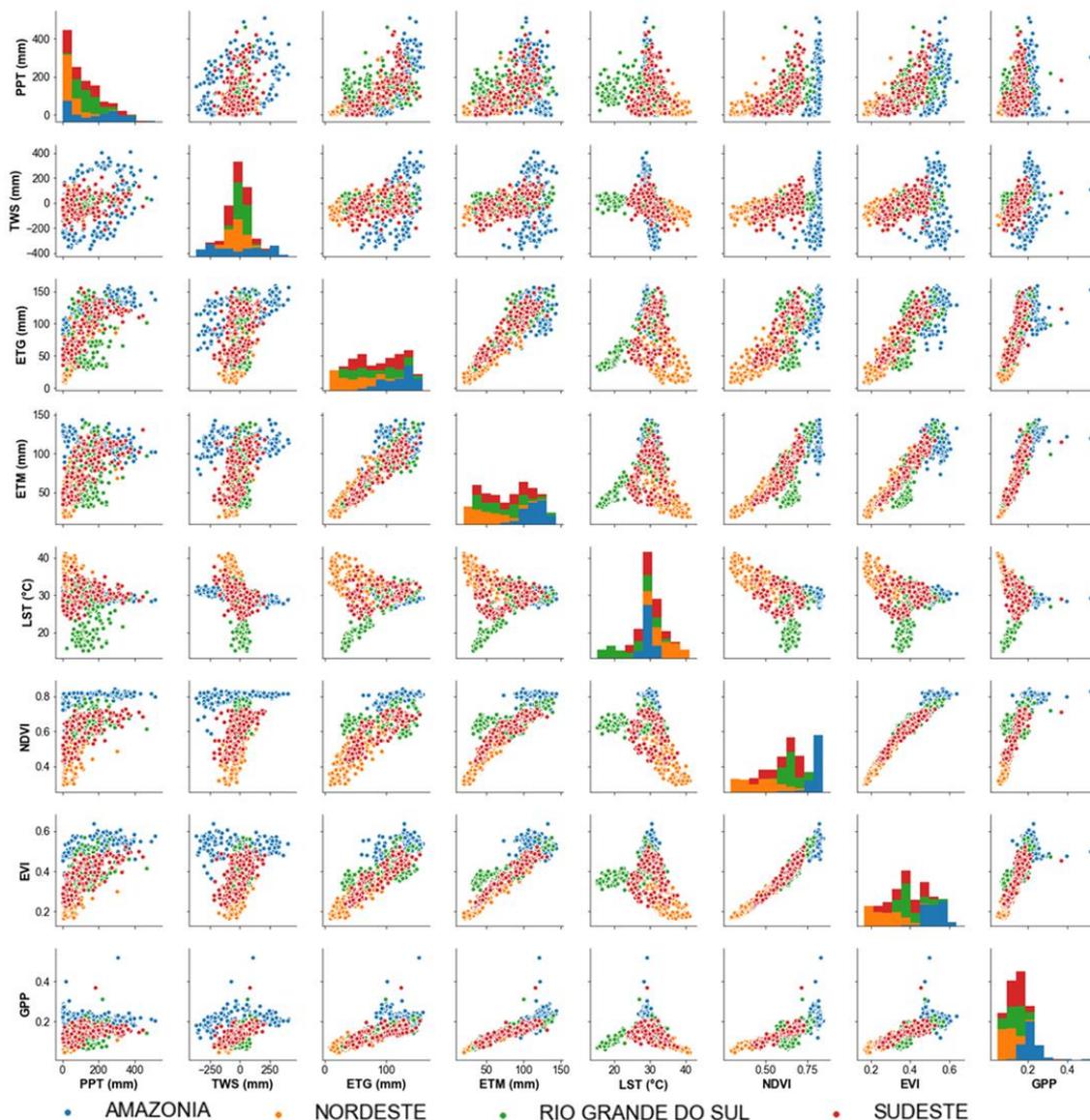
A Figura 27 apresenta a correlação dos valores absolutos das variáveis analisadas, para o período de 2003 a 2016, comparando os resultados para todas as regiões. As maiores correlações foram identificadas entre os índices de vegetação. Ainda, foram identificadas fortes correlações entre os índices de vegetação e os produtos de ET, exceto para o polígono da Amazônia (pouca ou nenhuma correlação), e para o NDVI no polígono do Rio Grande do Sul (correlação mais baixa).

Em relação à temperatura de superfície, foram identificadas correlações mais fortes desta com a ET e com os índices de vegetação. No Rio Grande do Sul percebe-se uma correlação linear e positiva entre temperatura e ET (GLEAM e MOD16), e no Nordeste essa correlação é negativa. Considerando o NDVI, EVI e GPP, estes apresentam correlação negativa com a temperatura no Nordeste. No Rio Grande do Sul, o GPP indica correlação positiva com a temperatura.

Na Amazônia, percebe-se forte correlação positiva entre precipitação e ET-GLEAM. A temperatura de superfície na Amazônia apresenta baixa variação nos valores absolutos, por isso as correlações com essa variável não são significativas nesta região.

No Nordeste, há correlação positiva da variação de armazenamento total de água com o ET-GLEAM, e com o NDVI e o GPP, e ainda, correlação negativa com a temperatura de superfície. No Sudeste e no Rio Grande do Sul, a precipitação se correlaciona positivamente com a ET (GLEAM e MOD16) e com o NDVI e o EVI.

Figura 27: Correlação entre as variáveis, para o período de 2003 a 2016, em todos os polígonos.



PPT = precipitação; TWS = anomalia do armazenamento total de água; ETG = evapotranspiração pelo modelo GLEAM; ETM = evapotranspiração pelo produto MOD16; LST = Temperatura de Superfície.

O presente estudo utilizou-se de uma série de produtos de sensoriamento remoto, que indicavam resultados de determinadas variáveis hidrológicas e climáticas, para avaliar o comportamento de eventos extremos de secas no Brasil. Como perspectivas futuras tem-se o estudo de outros produtos, para verificar se todos obtêm os mesmos resultados. Por exemplo, pode-se utilizar produtos de estimativa de ET que se baseiam na temperatura de superfície, com o modelo SSEBop (SENAY; KAGONE; VELPURI, 2020) ou o Alexi (ANDERSON et al., 2011).

Parar auxiliar na compreensão do comportamento das secas, são indicadas análises que possam abranger uma maior área de estudo, ampliando para mais polígonos de interesse.

Ainda, seria interessante abranger mais eventos de secas nestas regiões e fazer comparativos dos impactos causados nas variáveis, em eventos distintos na mesma região. Além disso, uma próxima etapa deste estudo poderia envolver a análise de eventos extremos de secas em outras regiões do país. Por fim, principalmente na Amazônia, seria interessante analisar os impactos de eventos de secas, em locais de floresta intacta e em áreas de mudança do uso da terra.

7 CONCLUSÕES

A análise de diversas variáveis climatológicas e hidrológicas e dos índices de vegetação possibilitou a avaliação do comportamento de secas extremas, em diferentes regiões do Brasil, sendo a precipitação a variável que determina a estação seca nestas regiões. Para os polígonos estudados nas regiões da Amazônia, Nordeste e Sudeste e Rio Grande do Sul, o período de secas (4 meses) corresponde a aproximadamente 5,9, 14,1, 8,8 e 32,3% da chuva total anual, respectivamente. Na época de secas, a média de ET é maior que a média de precipitação nessas regiões, porém, no estado do Rio Grande do Sul a precipitação média é sempre superior à ET.

Com os resultados deste estudo, foi possível verificar o comportamento de cada uma das variáveis analisadas, obtidas por sensoriamento remoto, verificando a presença de alterações nessas variáveis, devido a um evento extremo de seca em cada região de estudo. Analisando a seca extrema da Amazônia, em 2010, houve grande redução de precipitação, o que gerou redução no armazenamento total de água, e nos índices EVI e NDVI. O armazenamento total de água, a ET e o NDVI e GPP só se recuperaram na metade de 2011. De forma geral, foi identificada baixa correlação entre os produtos de ET e entre os índices de vegetação.

O Nordeste se caracteriza por apresentar baixa capacidade de armazenamento total de água. Durante o evento extremo de seca em 2012, esse a variação no armazenamento total de água foi ainda mais negativa, chegando à média de -77 mm no período seco (JASO). Em período anterior ao início da estação seca, a precipitação, a ET e os índices de vegetação já apresentavam anomalias muito negativas. Depois de 2012, os produtos de ET, armazenamento total de água e índices de vegetação seguiram apresentando resultados com anomalias bastante negativas. Todas as variáveis se correlacionam de forma positiva, exceto a temperatura de superfície, que só apresentou correlações negativas. O armazenamento total de água seguiu registrando anomalias negativas até 2016.

No Sudeste a estação de secas ocorre durante o verão, portanto, as temperaturas são menores que as médias anuais. No evento extremo de seca em 2014, a variação na média do armazenamento total de água, nos meses posteriores à época de secas (agosto a novembro - ASON) foi de -203 mm, valor este muito menor que a média para este período (-95 mm/ASON). O armazenamento total de água só indicou recuperação em 2016. A ET e os produtos de vegetação também indicaram anomalias muito negativas no período de secas, com recuperação em 2015.

O estado do Rio Grande do Sul foi a única região deste estudo a apresentar valores positivos de variação no armazenamento total de água, considerando a média no período

seco. Contudo, durante o período seco de 2012, a média da variação no armazenamento de água teve grande redução comparado a média para este período, alcançando valores negativos. Os índices de vegetação têm maiores valores médios no Rio Grande do Sul durante a estação seca, pois é nessa época que há maior energia disponível, e ocorre o crescimento e a colheita das safras no estado.

Este estudo também possibilitou que as variáveis fossem avaliadas conforme seu tempo de resposta e de recuperação em relação à determinado evento de seca. Neste sentido, a anomalia de armazenamento total de água, obtida pelo produto GRACE, representou muito bem os eventos de secas. Foi possível observar a duração do evento a partir do ponto em que as anomalias de armazenamento de água ficam muito negativas, até elas atingirem valores médios novamente.

As respostas das variáveis foram comparadas, e foram estabelecidas correlações entre elas, nas diferentes regiões de estudo. Em relação às correlações, na Amazônia, a ET obtido pelo produto GLEAM teve maior correlação com a chuva que o produto do MOD16, e para os índices de vegetação, o que melhor teve correlação foi o EVI. No Nordeste, o produto GLEAM apresentou melhor correlação com a precipitação, e entre os índices de vegetação, a melhor correlação com a chuva foi do EVI.

Para o Sudeste, ambos os produtos de estimativa de ET se correlacionaram bem com a precipitação, e em relação aos índices de vegetação, a melhor correlação foi do EVI com a chuva. No Rio Grande do Sul a precipitação não teve boa correlação com nenhuma das variáveis. Observou-se correlações mais fortes da temperatura com o ET estimado pelo produto GLEAM (correlação muito forte, de 0,93).

De forma geral, a partir da análise de variáveis obtidas por sensoriamento remoto, este estudo conseguiu identificar os padrões característicos de eventos extremos de secas, a duração e intensidade dos eventos, e comparar estes eventos em diferentes regiões do Brasil. Foi possível determinar as correlações entre as variáveis analisadas, e verificar o comportamento das mesmas em cenários com e sem a presença de secas. Esta análise pode ser útil para a identificação dos impactos que eventos extremos de escassez hídrica podem gerar para o meio ambiente, e para a população de determinada região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual** Brasília Agência Nacional de Águas (ANA), , 2019.

ANA. **Sistema Cantareira**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/sistema-cantareira>. Acesso em: 7 nov. 2020.

ANDERSON, Liana O.; MALHI, Yadvinder; ARAGÃO, Luiz E. O. C.; LADLE, Richard; ARAI, Egidio; BARBIER, Nicolas; PHILLIPS, Oliver. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist**, [S. l.], v. 187, n. 3, p. 733–750, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x>. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x>.

ANDERSON, M. C. et al. Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 223–239, 2011. DOI: [10.5194/hess-15-223-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-223-2011). Disponível em: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/223/2011/>.

ANDERSON, Martha C.; ALLEN, Richard G.; MORSE, Anthony; KUSTAS, William P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 122, p. 50–65, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712000326>.

ANDERSON, Martha C.; ZOLIN, Cornelio A.; SENTELHAS, Paulo C.; HAIN, Christopher R.; SEMMENS, Kathryn; TUGRUL YILMAZ, M.; GAO, Feng; OTKIN, Jason A.; TETRAULT, Robert. 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: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715302212>.

AWANGE, Joseph L.; MPELASOKA, Freddie; GONCALVES, Rodrigo M. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 566–567, p. 1472–1488, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.031>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716312025>.

BAGLEY, Justin E.; DESAI, Ankur R.; HARDING, Keith J.; SNYDER, Peter K.; FOLEY, Jonathan A. Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? **Journal of Climate**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 345–361, 2014. DOI: [10.1175/JCLI-D-12-00369.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1).

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 212–213, p. 198–212, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169498002534>.

BEER, Christian et al. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. **Science**, [S. l.], v. 329, n. 5993, p. 834 LP – 838, 2010. DOI: [10.1126/science.1184984](https://doi.org/10.1126/science.1184984). Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/329/5993/834.abstract>.

BEHRANGI, Ali; GARDNER, Alex S.; REAGER, John T.; FISHER, Joshua B. Using GRACE to constrain precipitation amount over cold mountainous basins. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 219–227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL071832>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016GL071832>.

BIGGS, Trent; PETROPOULOS, George P.; VELPURI, Naga Manohar; MARSHALL, Michael; GLENN, Edward P.; NAGLER, Pamela L.; MESSINA, Alex. Remote Sensing of Actual

Evapotranspiration from Cropland: Chapter 3. *In*: THENKABAIL, Prasad S. (org.). **Remote sensing handbook, Vol. III: Remote sensing of water resources, disasters, and urban studies**. [s.l.] : CRC Press, 2015. Disponível em: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70176490>.

CAI, Wenju et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0040-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>.

CARVALHO, Miguel Ângelo Vargas; OYAMA, Marcos Daisuke. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 305–316, 2013.

CARVALHO, Leila M. V; BARBARA, Santa; JONES, Charles; BARBARA, Santa. The South Atlantic Convergence Zone : Intensity , Form , Persistence , and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall The South Atlantic Convergence Zone : Intensity , Form , Persistence , and Relationships with Intrasea. [S. l.], v. 0442, n. January, 2004. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0088.

CHAPIN III, F. Stuart; MATSON, Pamela A.; MOONEY, Harold Alfred. **Earth's Climate System**. 2. ed. [s.l.] : Springer Science+Business Media, LLC 2011, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>.

CLICRBS. Saiba os prejuízos da seca de 2005 e 2009 no RS. [S. l.], 2009. Disponível em: <http://www.clicrbs.com.br/especial/rs/ambiente/19,0,2506312,Saiba-os-prejuizos-da-seca-de-2005-e-2009-no-RS.html>. Acesso em: 9 nov. 2020.

COELHO, Caio A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 46, n. 11, p. 3737–3752, 2016. DOI: 10.1007/s00382-015-2800-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais** Porto Alegre, 2013.

CPTEC-INPE. **EL NIÑO**. 2020a. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt>. Acesso em: 27 set. 2020.

CPTEC-INPE. **LA NIÑA**. 2020b. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/lanina/pt>. Acesso em: 27 set. 2020.

DA ROCHA, Humberto R. et al. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [S. l.], v. 114, n. G1, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>.

DE NYS, Erwin; ENGLE, Nathan L.; MAGALHÃES, Antonio Rocha. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE; Banco Mundial, 2016.

DIDAN, K. **MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006** NASA EOSDIS Land Processes DAAC, , 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>. Acesso em: 6 out. 2020.

FERREIRA, Nivaldo Silveira. **Zona de convergência intertropical**. 1996. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit_1.html. Acesso em: 9 nov. 2020.

FISHER, Joshua B.; TU, Kevin P.; BALDOCCHI, Dennis D. Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 112, n. 3, p. 901–919, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425707003938>.

FRAPPART, Frédéric; RAMILLIEN, Guillaume; RONCHAIL, Josyane. Changes in

terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 33, n. 14, p. 3029–3046, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3647>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.3647>.

FREITAS, Marcos Airton de Sousa. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 19, p. 19–30, 1998. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.1998.1175>.

G., Allen Richard; MASAHIRO, Tasumi; RICARDO, Trezza. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S. l.], v. 133, n. 4, p. 380–394, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380). Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).

G1. Seca deixa mais da metade do Amazonas em estado de emergência. [S. l.], 2010.

G1 RS. Quase 7 meses depois, seca ainda afeta mais de 140 municípios no RS. [S. l.], 2012. Disponível em: <http://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: 9 nov. 2020.

G1 RS. **Seca já fez 14 municípios decretarem situação de emergência no RS**. 2015a. Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/campo-e-lavoura/noticia/2015/04/seca-ja-fez-14-municipios-decretarem-situacao-de-emergencia-no-rs.html>. Acesso em: 9 nov. 2020.

G1 RS. **Candiota é a 15ª cidade a decretar emergência por causa da seca no RS**. 2015b. Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/05/candiota-e-15-cidade-decretar-emergencia-por-causa-da-seca-no-rs.html>. Acesso em: 9 nov. 2020.

GAO, Xiang; HUETE, Alfredo R.; NI, Wenge; MIURA, Tomoaki. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 74, n. 3, 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: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001504>.

GAÚCHA ZH. **Seca atual já supera a de 2005 no Rio Grande do Sul**. 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: 9 nov. 2020.

GAÚCHA ZH. **Estiagem no RS é a mais severa desde a safra de 2012**. 2020. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/campo-e-lavoura/noticia/2020/01/estiagem-no-rs-e-a-mais-severa-desde-a-safra-de-2012-ck5362tja01y401ody8tlh62r.html>. Acesso em: 9 nov. 2020.

GETIRANA, Augusto. Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. **Journal of Hydrometeorology**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 591–599, 2016. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0096.1. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>.

GOMES, Ana Carla dos Santos; COSTA, Gabriel Brito; SILVA, Julio Tóta Da; COUTINHO, Maytê Duarte Leal; COSTA, Micejane da Silva; FITZJARRALD, David Roy. SECA E A SAÚDE DAS POPULAÇÕES RESIDENTES EM REGIÕES DA AMAZÔNIA BRASILEIRA NOS ANOS DE 2005, 2010 E 2015. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 23, p. 289–306, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.50256>.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike; ILYUSHCHENKO, Simon; THAU, David; MOORE, Rebecca. 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: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>.

GROSS, Joceli Augusto. **ÍNDICE DE ANOMALIA DE CHUVA IAC) DOS MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO SUL AFETADOS PELAS ESTIAGENS NO PERÍODO DE 1991 A 2012**. 2015. Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2015.

HOU, Arthur Y.; KAKAR, Ramesh K.; NEECK, Steven; AZARBARZIN, Ardeshir A.; KUMMEROW, Christian D.; KOJIMA, Masahiro; OKI, Riko; NAKAMURA, Kenji; IGUCHI, Toshio. The Global Precipitation Measurement Mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 95, n. 5, p. 701–722, 2014. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00164.1. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 83, n. 1, 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: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>.

HUETE, Alfredo R. MODIS VEGETATION INDEX ALGORITHM THEORETICAL BASIS v3. **Environmental Sciences**, [S. l.], n. Mod 13, 1999.

HUFFMAN, George J. et al. **Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06 for the NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)**. [s.l.] : National Aeronautics and Space Administration, 2019.

IBGE. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 9 nov. 2020.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, Juan C.; MATTAR, Cristian; BARICHIVICH, Jonathan; SANTAMARÍA-ARTIGAS, Andrés; TAKAHASHI, Ken; MALHI, Yadvinder; SOBRINO, José A.; SCHRIER, Gerard Van der. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 33130, 2016. DOI: 10.1038/srep33130. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep33130>.

JIMENEZ, Juan C.; LIBONATI, Renata; PERES, Leonardo F. Droughts Over Amazonia in 2005, 2010, and 2015: A Cloud Cover Perspective. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 6, p. 227, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00227. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00227>.

JIMENEZ, Juan C.; MARENGO, Jose A.; ALVES, Lincoln M.; SULCA, Juan C.; TAKAHASHI, Ken; FERRETT, Samantha; COLLINS, Matthew. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. n/a, n. n/a, 2019. DOI: 10.1002/joc.6453. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.6453>.

KUMMEROW, C. et al. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 1965–1982, 2000. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C1965:TSOTTR%3E2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C1965:TSOTTR%3E2.0.CO).

LAIPELT, Leonardo; RUHOFF, Anderson L.; FLEISCHMANN, Ayan S.; KAYSER, Rafael H.; KICH, Elisa D.; DA ROCHA, Humberto R.; NEALE, Christopher M. **Assessment of an Automated Calibration of the SEBAL Algorithm to Estimate Dry-Season Surface-Energy Partitioning in a Forest–Savanna Transition in Brazil** *Remote Sensing*, 2020. DOI: 10.3390/rs12071108.

LEE, J.; WONG, D. W. S. **Statistical analysis with ArcView GIS** Hoboken, NJ, USA John Wiley and Sons, Inc., , 2001.

LETTENMAIER, Dennis P.; ALSDORF, Doug; DOZIER, Jeff; HUFFMAN, George J.; PAN, Ming; WOOD, Eric F. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 51, n. 9, p. 7309–7342, 2015. DOI: 10.1002/2015WR017616. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2015WR017616>.

LEWIS, Simon L.; BRANDO, Paulo M.; PHILLIPS, Oliver L.; VAN DER HEIJDEN, Geertje M. F.; NEPSTAD, Daniel. The 2010 Amazon Drought. **Science**, [S. l.], v. 331, n. 6017, p. 554 LP – 554, 2011. DOI: 10.1126/science.1200807. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/331/6017/554.abstract>.

LIU, W. T.; JUÁREZ, R. I. Negrón. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using

NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 22, n. 17, p. 3483–3501, 2001. DOI: 10.1080/01431160010006430. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160010006430>.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016. DOI: 10.1002/joc.4420. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.

MARENGO, Jose A.; ALVES, Lincoln M.; ALVALA, Regina C. S.; CUNHA, A. N. A. Paula; BRITO, Sheila; MORAES, Osvaldo L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 90, p. 1973–1985, 2018. a. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000501973&nrm=iso.

MARENGO, Jose A.; ALVES, Lincoln M.; SOARES, Wagner R.; RODRIGUEZ, Daniel A.; CAMARGO, Helio; RIVEROS, Marco Paredes; PABLÓ, Amelia Diaz. Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00642.1. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>.

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ALVES, Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. [S. l.], n. November, 2016.

MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos Afonso; SELUCHI, Marcelo Enrique; CUARTAS, Adriana; ALVES, Lincoln Muniz; MENDIONDO, Eduardo Mario; OBREGÓN, Guillermo; SAMPAIO, Gilvan. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, [S. l.], v. 0, n. 106 SE-, p. 31–44, 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110101>.

MARENGO, Jose A.; SOUZA, Carlos M.; THONICKE, Kirsten; BURTON, Chantelle; HALLADAY, Kate; BETTS, Richard A.; ALVES, Lincoln M.; SOARES, Wagner R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 6, p. 228, 2018. b. DOI: 10.3389/feart.2018.00228. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00228>.

MARENGO, Jose A.; TOMASELLA, Javier; ALVES, Lincoln M.; SOARES, Wagner R.; RODRIGUEZ, Daniel A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 38, n. 12, 2011. DOI: 10.1029/2011GL047436. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, [S. l.], v. 129, n. 3, p. 1189–1200, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1840-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARTENS, B.; MIRALLES, D. G.; LIEVENS, H.; VAN DER SCHALIE, R.; DE JEU, R. A. M.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D.; BECK, H. E.; DORIGO, W. A.; VERHOEST, N. E. C. 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: 10.5194/gmd-10-1903-2017. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/10/1903/2017/>.

MELATI, Maurício D.; FLEISCHMANN, Ayan S.; FAN, Fernando M.; PAIVA, Rodrigo C. D.; ATHAYDE, Gustavo B. Estimates of groundwater depletion under extreme drought in the Brazilian semi-arid region using GRACE satellite data: application for a small-scale aquifer. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 2789–2802, 2019. DOI: 10.1007/s10040-019-02065-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02065-1>.

MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 453–469, 2011. DOI: 10.5194/hess-15-453-2011. Disponível em:

<https://hess.copernicus.org/articles/15/453/2011/>.

MORAES, Elisabete Caria De. **Capítulo 1: Fundamentos De Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE, 2002. Disponível em: http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf.

MOTA, F. S. Da; AGENDES, M. O. De O.; ROSSKOFF, J. L. Da C.; SILVA, J. B. Da; SIGNORINI, E.; ALVES, E. G. P.; ARAUJO, S. M. B. Risco de Secas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 709–720, 1992.

MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven 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: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711000691>.

NEDEL, Anderson Spohr; SAUSEN, Tania Maria; SAITO, Silvia Midori. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003 – 2009 - Parte I: Seca. [S. l.], n. V, p. 2003–2007, 2009.

NOBRE, Carlos A.; MARENGO, Jose A.; SELUCHI, Marcelo E.; CUARTAS, L. Adriana; ALVES, Lincoln M. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. [S. l.], n. February, p. 252–262, 2016.

NOBRE, Paulo; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature , Wind Stress , and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, [S. l.], v. 9, p. 2464–2479, 1996. DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<2464>

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; PONZONI, Flávio Jorge. Introdução ao Sensoriamento Remoto (INPE). [S. l.], p. 68, 2001.

OBREGÓN, Guillermo O.; MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos A. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Clim Res**, [S. l.], v. 61, p. 93–107, 2014. DOI: 10.3354/cr01241.

PANISSET, Jéssica S.; LIBONATI, Renata; GOUVEIA, Célia Marina P.; MACHADO-SILVA, Fausto; FRANÇA, Daniela A.; FRANÇA, José Ricardo A.; PERES, Leonardo F. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 1096–1104, 2017. DOI: 10.1002/joc.5224. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5224>.

PURKIS, Samuel J.; KLEMAS, Victor V. Remote sensing basics. *In: Remote Sensing and Global Environmental Change*. 1. ed. [s.l.] : Blackwell Publishing Ltd., 2011. p. 6–17. DOI: 10.1002/9781118687659.

REBELLO, Vitor Paiva Alcoforado; GETIRANA, Augusto; FILHO, Otto Corrêa Rotunno; VENKATARAMAN, Lakshmi. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S. l.], v. 18, p. 100294, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100294>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938519301685>.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; PORFÍRIO, Rosmeri; ROCHA, D. A.; AMBRIZZI, Tércio. REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL : UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA Departamento de Ciências Atmosféricas , Universidade de São Paulo (DCA / USP), São Paulo , SP , Brasil Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , Centro de Previsão de Tempo e Estudo. [S. l.], p. 185–204, 2010.

RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 5. ed. Porto Alegre: Rio Grande do Sul. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental, 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; RUNNING, S. W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande

basin. **Hydrological Sciences Journal**, [S. I.], v. 58, n. 8, p. 1658–1676, 2013. DOI: 10.1080/02626667.2013.837578. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.837578>.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006**NASA EOSDIS Land Processes DAAC, , 2015. Disponível em: Running, S., Mu, Q., Zhao, M. Acesso em: 8 out. 2020.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006**NASA EOSDIS Land Processes DAAC, , 2017. DOI: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.

RUNNING, S. W. et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, [S. I.], v. 15, n. 17, p. 3587–3620, 1994. DOI: 10.1080/01431169408954346. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431169408954346>.

SAMANTA, Arindam; GANGULY, Sangram; HASHIMOTO, Hirofumi; DEVADIGA, Sadashiva; VERMOTE, Eric; KNYAZIKHIN, Yuri; NEMANI, Ramakrishna R.; MYNENI, Ranga B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, [S. I.], v. 37, n. 5, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009GL042154>. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009GL042154>.

SENAY, Gabriel B.; KAGONE, Stefanie; VELPURI, Naga M. Operational Global Actual Evapotranspiration: Development, Evaluation and Dissemination. **Sensors (Basel, Switzerland)**, [S. I.], v. 20, n. 7, p. 1915, 2020. DOI: 10.3390/s20071915. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32235521>.

SHUTTLEWORTH, W. James. Global Scale Influences on Hydrometeorology. *In: Terrestrial Hydrometeorology*. 1. ed. [s.l.] : John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

SILVA, João Pedro Rodrigues; REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. I.], v. 25, p. 355–377, 2019.

SWENSON, S. C. **GRACE MONTHLY LAND WATER MASS GRIDS NETCDF RELEASE 5.0**NASA PO.DAAC, , 2012. DOI: 10.5067/TELND-NC005. Disponível em: http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_LAND_NC_RL05. Acesso em: 2 out. 2020.

UOL NOTÍCIAS. Rios Solimões e Amazonas têm maior seca da história. [S. I.], 2010.

VAN LOON, Anne F. et al. Drought in the Anthropocene. **Nature Geoscience**, [S. I.], v. 9, n. 2, p. 89–91, 2016. DOI: 10.1038/ngeo2646. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>.

WAGLE, Pradeep; BHATTARAI, Nishan; GOWDA, Prasanna H.; KAKANI, Vijaya G. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S. I.], v. 128, p. 192–203, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271616304774>.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>. Acesso em: 9 nov. 2020.

WILHITE, Donald A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. **Drought: A Global Assessment**, [S. I.], v. 1, p. 3–18, 2000. Disponível em: <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>.

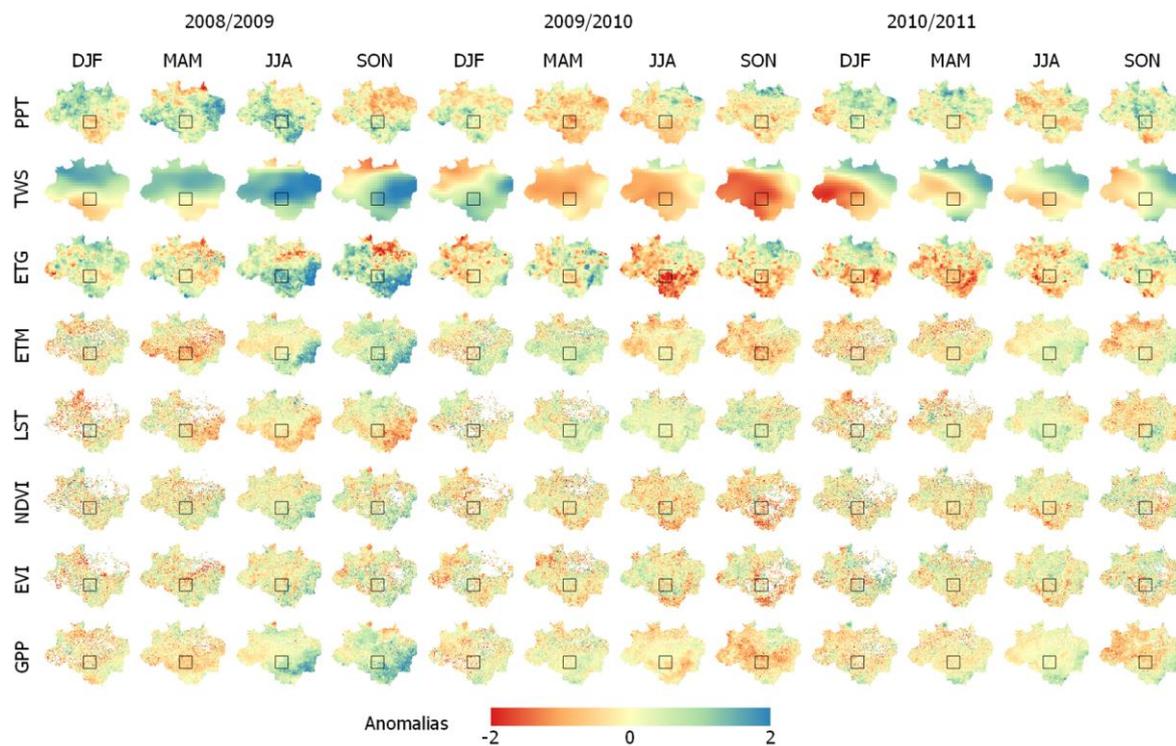
YANG, Xiuqin; YONG, Bin; REN, Liliang; ZHANG, Yuqing; LONG, Di. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via ChinaFLUX ET measurements. **International Journal of Remote Sensing**, [S. I.], v. 38, n. 20, p. 5688–5709, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2017.1346400. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1346400>.

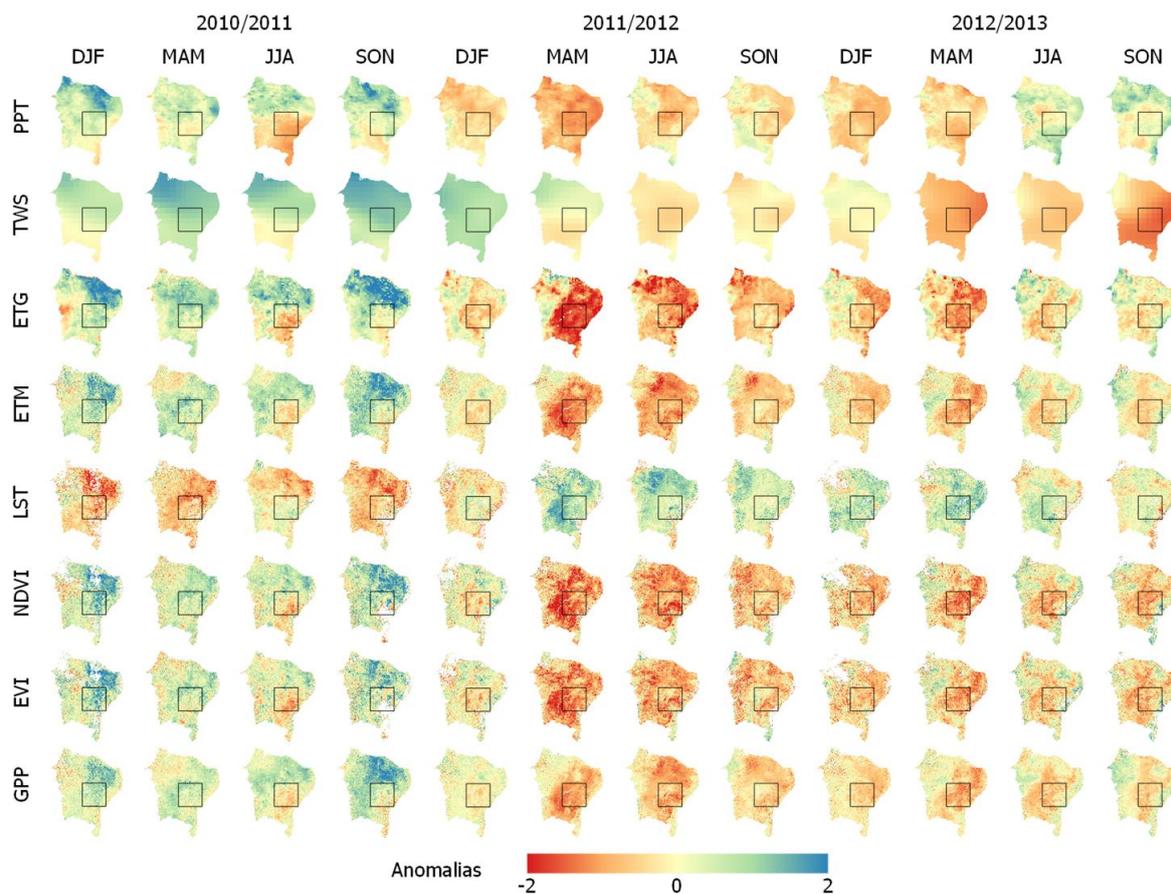
ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 701–708, 2001. DOI: 10.1029/2000WR900325.

ANEXOS

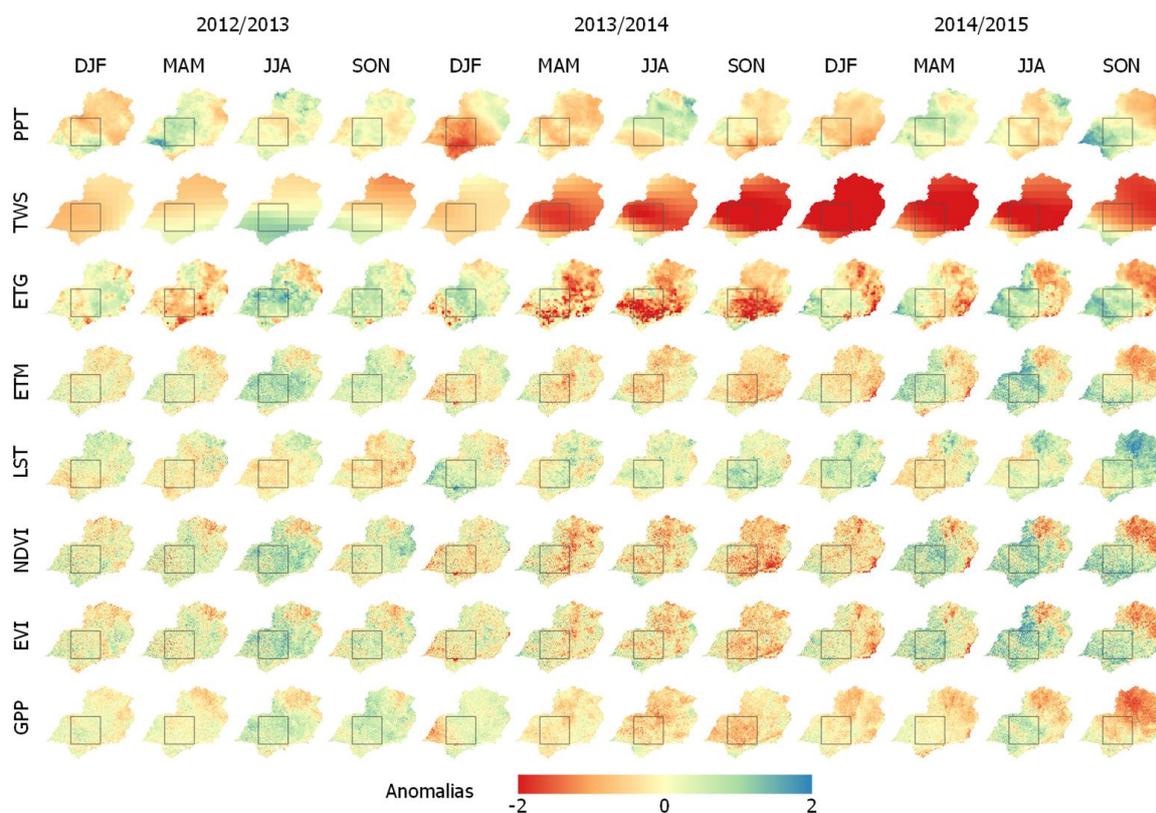
Anexo 1: Mapa da Região da Amazônia Legal, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.



Anexo 2: Mapa da Região Nordeste do Brasil, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.



Anexo 3: Mapa da Região Sudeste do Brasil, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.



Anexo 4: Mapa do estado do Rio Grande do Sul, com as anomalias das variáveis (temperatura de superfície, precipitação, armazenamento de água, evapotranspiração e índices de vegetação), nos períodos de secas definidos para estudo, com delimitação do polígono definido para análise.

