

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**IDENTIFICAÇÃO DE SECA COM OS ÍNDICES SPI E
SPEI EM MATO GROSSO E SUAS RELAÇÕES COM A
TEMPERATURA DOS OCEANOS PACÍFICO E
ATLÂNTICO**

FERNANDO ALLYSSON COSTA FERNANDES

MARCELO SACARDI BIUDES
Orientador

**Cuiabá, MT
Janeiro 2024**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**IDENTIFICAÇÃO DE SECA COM OS ÍNDICES SPI E
SPEI EM MATO GROSSO E SUAS RELAÇÕES COM A
TEMPERATURA DOS OCEANOS PACÍFICO E
ATLÂNTICO**

FERNANDO ALLYSSON COSTA FERNANDES

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Física Ambiental da Universidade
Federal de Mato Grosso, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Física Ambiental.*

MARCELO SACARDI BIUDES
ORIENTADOR

Cuiabá, MT
Janeiro 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C837i Fernandes, Fernando Allysson Costa.

Identificação de seca com os índices SPI e SPEI em Mato Grosso e suas relações com a temperatura dos Oceanos Pacífico e Atlântico [recurso eletrônico] / Fernando Allysson Costa Fernandes. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 51 f., il. color., pdf). -- 2024.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2024.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Dinâmica Oceano Atmosfera. 2. Fenômenos de seca. 3. Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA).

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: IDENTIFICAÇÃO DE SECA COM OS ÍNDICES SPI E SPEI EM MATO GROSSO E SUAS RELAÇÕES COM A TEMPERATURA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO

AUTOR: MESTRANDO FERNANDO ALLYSSON COSTA FERNANDES

Dissertação defendida e aprovada em **25 de janeiro de 2024**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES (Presidente Banca / **ORIENTADOR**)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. Profa. Dra. NADJA GOMES MACHADO (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE MATO GROSSO

3. Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE SANTOS QUERINO (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZÔNAS

4. Prof. Dr. RIVANILDO DALLACORT (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO

Cuiabá, 25/01/2024.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 26/01/2024, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **NADJA GOMES MACHADO**, **Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rivanildo Dallacort**, **Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Santos Querino**, **Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6550475** e o código CRC **1BACA948**.

Referência: Processo nº 23108.001491/2024-99

SEI nº 6550475

DEDICATÓRIA

Aos
meus
pais,
e meus
familiares.
Dedico com muito
amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos de laboratório Lucas Barros, Luiz Octávio, Nivalda, Emily Watanabe e Juliana, os demais amigos do PPGFA, André, Amanda, Lucas Ramos, Lucélio, Thamiris, Rafaely, Marlon e Ian. Aos Professores Marcelo e Nadja pela orientação e principalmente pelo incentivo. E aos professores da Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) Sérgio, Iramaia, Leone Curado, Francisco Lobo (Chico), Carmen, Rafael Palácios, Raphael e Josiel Maimone pela contribuição em minha formação. Por fim agradecimento aos demais docentes que fazem parte do PPGFA. Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro durante a realização desta pesquisa.

Epígrafe

Somos nós que existimos no tempo
ou o tempo que existe em nós?
Carlo Rovelli.

A Física é como o sexo. Claro,
pode dar alguns resultados
práticos, mas não é por isso que o
fazemos.
Richard Phillips Feynman.

A ciência é inocente,
e não há nada mais injusto do que
acusá-la.
Émile Durkheim.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Secas	3
2.2 Índices de Seca	4
2.3 Precipitação	5
2.3.1 Sistemas Meteorológicos que Atuam em Mato Grosso	5
2.4 Evapotranspiração	9
2.5 Anomalias De Temperatura De Superfície Do Oceano	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Área de Estudo	14
3.2 Dados Climáticos, Índices Climáticos.....	14
3.3 Índices de Seca SPI e SPEI	16
3.4 Classificação de Eventos de Seca (Run-Theory)	16
3.5 Análises Estatísticas	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1 Tendência de Seca	18
4.2 Número de Ocorrência de Seca, Severidade, Duração e Intensidade da Seca	20
4.3 Correlação do SPI e SPEI com Índices Oceânicos no Atlântico e Pacífico	23
5 CONCLUSÃO	31
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Circulação média em 200 hPa e precipitação acumulada no verão no hemisfério sul, onde BH é a Alta da Bolívia e NEL é a baixa do Nordeste.....	6
Figura 2- Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) obtida da temperatura média de brilho do satélite GOES 12. Período de 16 a 20 de março de 2005.	8
Figura 3- (a) A chegada de uma frente fria desencadeia a formação de nuvens cumulonimbus, frequentemente associadas a chuvas intensas. (b) Quando uma massa de ar quente avança, ocorre a formação de nuvens com menos potencial de precipitação.	9
Figura 4- Impactos do El Niño em escala global.	11
Figura 5- Impactos do La Niña em escala global.....	12
Figura 6 - Índices de anomalias Temperatura de superfície do oceano.	13
Figura 7 - Localização do estado de Mato Grosso no Brasil.	14
Figura 8 - Tendência do SPI (a) e SPEI (b) no período 1970-2022 em Mato Grosso. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas (p-valor > 0.05).	18
Figura 9 - Médias mensais e tendência temporal de SPI e SPEI das regiões Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022. Os limites de severidade estão definidos na Tabela 1. A linha tracejada representa a tendência temporal.....	20
Figura 10 - Número de ocorrência de seca moderada, severa e extrema pelo SPI e SPEI na Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022. Os níveis de severidade foram definidos na Tabela 1.	21
Figura 11 - Média ($\pm$ 95% intervalo de confiança) da severidade (a e b), duração (c e d) e intensidade (e e f) dos eventos de seca pelo SPI e SPEI na Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022.	22
Figura 12 - Correlação do SPI com os índices climáticos: AMO, NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 3.4, NIÑO 4, ONI, PDO, SOI, TNAI e TSAI em Mato Grosso de 1970 a 2022. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas (p-valor > 0.05).	25
Figura 13 - Correlação do SPEI com os índices climáticos: AMO, NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 3.4, NIÑO 4, ONI, PDO, SOI, TNAI e TSAI em Mato Grosso de	

1970 a 2022. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas (p-valor > 0.05).26

Figura 14 - A variabilidade mensal dos índices de TSM e SOI. (a) TSAI, (b) TNAI, (c) Niño 4, (d) Niño 3.4, (e) Niño 3, (f) Niño 1+2, (g) AMO, (h) ONI, (i) PDO e (j) SOI. As barras vermelhas representam anos com seca definida pelo SPI-12 meses.28

Figura 15 - A variabilidade mensal dos índices de TSM e SOI. (a) TSAI, (b) TNAI, (c) Niño 4, (d) Niño 3.4, (e) Niño 3, (f) Niño 1+2, (g) AMO, (h) ONI, (i) PDO e (j) SOI. As barras vermelhas representam anos com seca definida pelo SPEI-12 meses.29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categoria de Seca (LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021).	16
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

AB	Alta da Bolívia
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation Index
AMZ	Amazônia
CER	Cerrado
MMK	Mann Kendall Modificado
NINO 1+2	Região de Niño do Pacífico
NINO 3	Região de Niño do Pacífico
NINO 3.4	Região de Niño do Pacífico
NINO 4	Região de Niño do Pacífico
PAN	Pantanal
PDO	Pacific Decadal Oscillation Index
PET	Potencial de Evapotranspiração
SA	South America (América do Sul)
SOI	Southern Oscillation Index
SPEI	Standardized Precipitation Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SSTA	Sea Surface Temperature Anomaly (Anomalia de Temperatura de Superfície)
TNA	Tropical Northern Atlantic Index
TSA	Tropical Southern Atlantic Index
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

RESUMO

FERNANDES, F. A. C. **IDENTIFICAÇÃO DE SECA ATRAVÉS DO SPI E SPEI EM MATO GROSSO E AS SUAS RELAÇÕES COM OS OCEANOS TROPICAIS**. Cuiabá, 2023. 37f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A precipitação tem diminuído e a temperatura do ar tem aumentado nos três biomas (Amazônia - AMZ, Cerrado - CER e Pantanal - PAN) no Centro-Oeste, tornando-os suscetíveis ao aumento de fenômenos de seca. O objetivo deste trabalho foi analisar as tendências de severidade, intensidade e duração dos eventos de seca entre 1970 e 2022 no estado de Mato Grosso utilizando do *Standardized Precipitation Index* (SPI) e *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI), e suas relações com *Sea Surface Temperature Anomalies* (SSTA) e o *Southern Oscillation Index* (SOI). O SPI e o SPEI foram calculados com dados de precipitação e temperatura do ar do produto ERA5-land. As tendências do SPI e SPEI foram obtidas pelo teste de Mann-Kendal (MK), e o número de ocorrências, severidade, intensidade e duração foram obtidos pelo método de Run-Theory. O SPI e SPEI tenderam a diminuir nos três biomas entre 1970 e 2022. Os eventos de seca moderadas, severas e extremas ocorreram em todos os biomas, com destaque à maior severidade de seca no Pantanal entre 2019 e 2022.

O maior número de ocorrência de secas extremas pelo SPI ocorreu em AMZ e CER entre 2020 e 2022, e os maiores valores de severidade, duração e intensidade ocorreram em CER e PAN no mesmo período. Entretanto, os valores de severidade, duração e intensidade pelo SPEI ocorreram em AMZ e CER. O SPI e SPEI tiveram padrão de correlação semelhante com os índices de SSTA e SOI. O SPI teve correlação negativa fraca com os índices *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Southern Oscillation Index* (SOI), *Tropical Northern Atlantic Index* (TNAI) e *Tropical Southern Atlantic Index* (TSAI), enquanto, o SPEI teve correlação negativa moderada com AMO e TSAI. Este estudo destaca que a intensidade da seca e que nem todas as anomalias do SST tem influência na dinâmica sazonal e interanual da seca em Mato Grosso.

Palavras-chave: Dinâmica Oceano Atmosfera, Fenômenos de seca, Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA).

ABSTRACT

Fernandes, F. A. C. **IDENTIFICATION OF DROUGHT THROUGH SPI AND SPEI IN MATO GROSSO AND ITS RELATIONSHIP WITH THE TROPICAL OCEANS.** Cuiabá, 2023. 37p. Dissertation (master's in environmental physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The precipitation has been decreasing, and air temperature has been increasing in the three biomes (Amazon - AMZ, Cerrado - CER, and Pantanal - PAN) of the Mato Grosso state, making them susceptible to an increase in drought phenomena. The aim of this study was to analyze the trends in severity, intensity, and duration of drought events between 1970 and 2022 in the Mato Grosso state using the *Standardized Precipitation Index* (SPI) and the *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI), and their relationships with *Sea Surface Temperature Anomalies* (SSTA) and the *Southern Oscillation Index* (SOI). The SPI and SPEI were calculated using precipitation and air temperature data from the ERA5-land product. The trends of SPI and SPEI were obtained through the Mann-Kendal (MK) test, and the number of occurrences, severity, intensity, and duration were obtained through the Run-Theory method. The SPI and SPEI tended to decrease in the three biomes between 1970 and 2022. Moderate, severe, and extreme drought events occurred in all biomes, with the Pantanal experiencing the highest severity of drought between 2019 and 2022. The highest number of occurrences of extreme droughts by SPI happened in AMZ and CER between 2020 and 2022, and the highest values of severity, duration, and intensity occurred in CER and PAN during the same period. However, severity, duration, and intensity values by SPEI were observed in AMZ and CER. The SPI and SPEI showed a similar correlation pattern with the SSTA and SOI. The SPI had a weak negative correlation with indices such as the *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Southern Oscillation Index* (SOI), *Tropical Northern Atlantic Index* (TNAI), and *Tropical Southern Atlantic Index* (TSAI), whereas the SPEI exhibited a moderate negative correlation with AMO and TSAI. This study highlights that drought intensity and not all SST anomalies influence the seasonal and interannual dynamics of droughts in Mato Grosso.

Keywords: Ocean Atmosphere Dynamics, Drought Phenomena, Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA).

1 INTRODUÇÃO

A seca é um evento natural que representa uma ameaça à disponibilidade de água regional, resultando em baixa produção agrícola e podendo levar à escassez de alimentos. A seca pode ser classificada em diversos tipos, como secas meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas (BERMAN et al., 2017). A seca apresenta altos riscos para desenvolvimento de doenças respiratórias (MACHADO-SILVA et al., 2020). Este fenômeno pode ser potencializado com ações antrópicas e desencadeia fatores diretos e indiretos. O fator direto está relacionado a baixa disponibilidade hídrica e o fator indireto é relacionado à economia local, uma vez que as alterações nas variáveis climáticas tem influência na produção de grãos (CARVALHO et al., 2020).

A seca pode ser interpretada de diferentes maneiras de acordo a área do conhecimento (WILHITE; SVOBODA; HAYES, 2007; SERRANO; M, 2018; ALMENDRA-MARTÍN et al., 2021), porém o conceito adotado para estudos climatológicos de que a seca é o déficit de precipitação em algum dado período (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010; LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021). Os fenômenos de seca podem ser identificados por meio de índices climáticos, tais como *Standardized Precipitation Index* (SPI) e *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI). O SPI e SPEI foram utilizados para identificar secas em diferentes biomas no Brasil (ANDERSON et al., 2018; GOZZO et al., 2019; MARENGO et al., 2021). O SPI e SPEI compartilham da mesma escala temporal, sendo 3 meses secas meteorológicas, 6 meses secas agrícolas e 12 meses secas hidrológicas (GOZZO et al., 2019).

Estudos têm indicado aumento da temperatura do ar e diminuição da precipitação em algumas regiões do estado de Mato Grosso (ARAUJO et al., 2018; BIUDES et al., 2022; DOS SANTOS et al., 2023). Logo, o déficit de precipitação, aumento de temperatura e alta taxa de evapotranspiração são indicativos de secas prolongadas em Mato Grosso (MARENGO et al., 2021). Como o estado de Mato Grosso tem se destacado como um dos maiores produtores agrícolas do Brasil, e responsável por pelo menos 60% da produção agrícola e distribuição de grãos (EDUARDO VON DENT, 2020; REIS et al., 2023), a ocorrência de fenômenos de seca no estado pode causar impactos sociais e econômicos intensos (RATTIS et al., 2021).

A seca em Mato Grosso influencia na perda da biodiversidade em função desmatamento, incêndios florestais e mudanças climáticas (PECL et al., 2017; IVO et al., 2020; MALDANER et al., 2021), e tem potencial de diminuir a quantidade de recursos hídricos e consequentemente,

diminuir a área de agricultura irrigada no estado (DROOGERS; IMMERZEEL; LORITE, 2010). A agricultura irrigada é uma técnica promissora, mas o maior desafio é conciliar sua expansão com a disponibilidade de recursos hídricos, principalmente em regiões que enfrentam escassez de água (FERREIRA et al., 2023).

Além dos efeitos antrópicos, as secas hidrológicas em Mato Grosso podem se estender por muitos meses em função de *Sea Surface Temperature Anomalies* (SSTA) dos Oceanos Atlântico e Pacífico. Estudos têm relacionado a influência do *El Niño–Southern Oscillation* ENSO na variabilidade na precipitação e temperatura do ar em secas na Amazônia, e no Norte, Nordeste e Sul da América do Sul SA (CAI et al., 2020; DE ANDRADE; GODOI; ARAVÉQUIA, 2023; RISARO; CHIDICHIMO; PIOLA, 2022). Entretanto, a relação da *Sea Surface Temperature Anomalies* (SSTA) com os extremos climáticos de precipitação e temperatura do ar no Centro-Oeste do Brasil é pouco conclusiva, embora com alguma evidência de diminuição da precipitação e aumento da temperatura do ar (DOS SANTOS et al., 2023), por outro lado, os fenômenos de El Niño e seca não apresentam consistência (PICCILLI; GUSTAVO, 2007; BERGIER, 2010; MARENGO; ALVES; TORRES, 2016; MARENGO et al., 2021). Essas discrepâncias destacam a importância do estudo da seca em Mato Grosso.

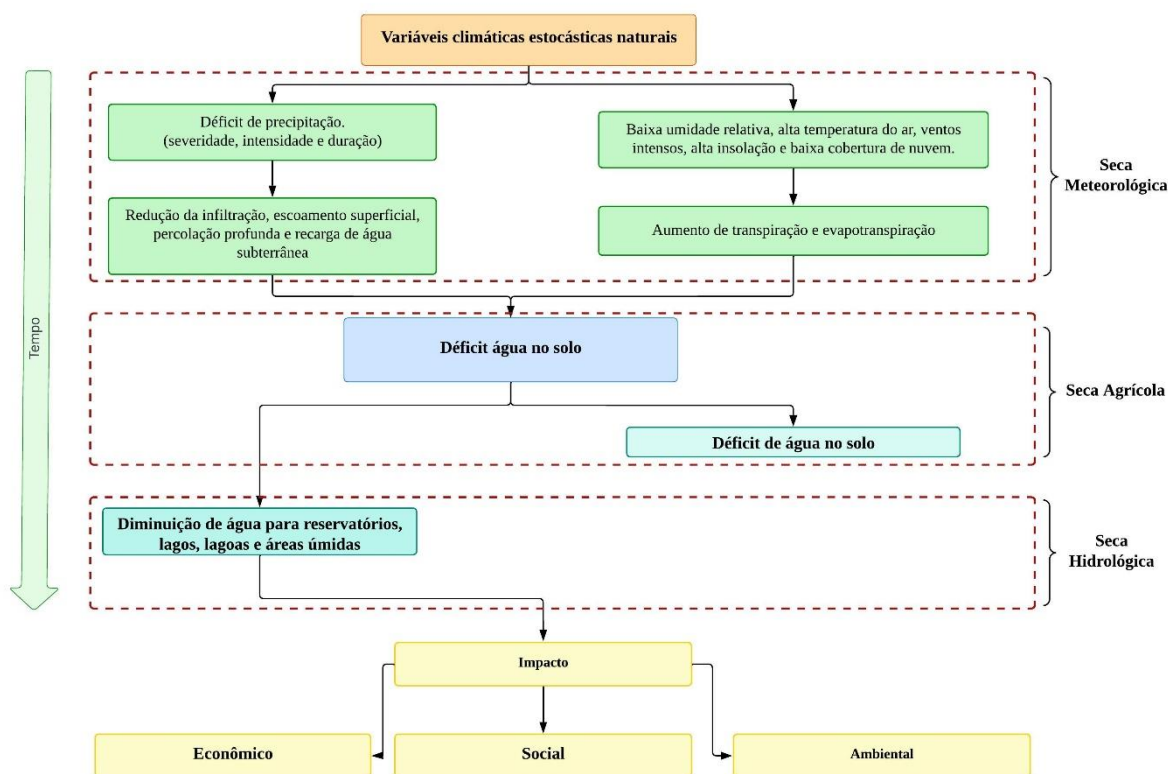
Dada a importância de estudos de secas hidrológicas para tomada de decisões públicas a fim de mitigar o impacto de secas na sociedade (SOLH; VAN GINKEL, 2014) e compreensão da dinâmica da seca em Mato Grosso, o objetivo deste estudo foi analisar as tendências de severidade, intensidade e duração dos eventos de seca entre 1970 e 2022 no estado de Mato Grosso por meio do SPI e SPEI, e suas relações com as SSTA e o *Southern Oscillation Index* (SOI).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secas

Desde os primórdios da humanidade os seres vivos enfrentam fenômenos naturais como a seca (KIEM et al., 2016). Os impactos da seca na sociedade moderna manifestam-se nos setores ambientais e econômicos. Impactos ambientais significativos corresponde a danos ao ecossistema, biodiversidade e recursos hídricos (DING; HAYES; WIDHALM, 2011; WLOSTOWSKI et al., 2022). Por outro lado, os impactos econômicos são delineados por perca na agricultura e pecuária. Do ponto de vista econômico a seca consiste em impactos em atividades humanas, como a agrícola, demanda de água armazenada, atividades como pesca (WILHITE; GLANTZ, 1985). Por fim, o conceito adotado neste trabalho é que a seca é déficit hídrico, onde cada usuário sofre consequência em suas atividades (Figura 1).

O fenômeno da seca é classificado de forma distinta em várias áreas do conhecimento, abrangendo categorias como secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas (QUIRING, 2009; VAN LOON, 2015). Os danos na agricultura devido a eventos de seca são devastadores (WU et al., 2023). A diminuição da precipitação e a escassez de água para irrigação impacta diretamente o desenvolvimento das culturas, resultando em colheitas reduzidas e em casos extremos a perda de safras. Os danos na agricultura geram prejuízos financeiros significativos para os agricultores, mas também afeta a segurança alimentar, aumenta os preços dos alimentos e impacta toda a cadeia de abastecimento agrícola. Além disso, a seca pode resultar em custos adicionais para os agricultores, que muitas vezes são forçados a recorrer a sistemas de irrigação alternativos (SAMIMI et al., 2023), como a perfuração de poços profundos, para mitigar os efeitos adversos da falta de água.



Fonte: Autor.

Figura 1. Fluxograma de Seca seguido de classificações e o impacto.

2.2 Índices de Seca

Em Mato Grosso estudos identificaram a diminuição da precipitação e aumento de temperatura do ar (BIUDES et al., 2022; DOS SANTOS et al., 2023; CURADO et al., 2023), a precipitação e a temperatura do ar são variáveis preditoras de seca, portanto são as principais para o monitoramento de eventos de secas. Com o objetivo de minimizar as consequências da seca, os órgãos climáticos têm a responsabilidade de detectar anomalias na precipitação e aumento das temperaturas do ar, juntamente com índices de seca. Isso é feito com o propósito de orientar as decisões públicas para lidar com essa situação. Existem diversos índices de seca, tais como *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (AMIN ZARGAR et al., 2011; PALMER, 1965; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010).

Dada a escassez de dados meteorológicos, a utilização de índices simples se torna de extrema importância. Nesse contexto, o SPI e o SPEI se destacam devido à disponibilidade de

dados. Embora existam vários bancos de dados obtidos localmente, a falta de informações em alguns deles torna os produtos de reanálise, como o ERA5-Land, de suma importância. O ERA5-Land ganha destaque pela confiabilidade das estimativas das variáveis meteorológicas que oferece (PAMPUCH et al., 2023).

Os índices mais amplamente utilizados em estudos recentes são o SPI e o SPEI, devido à facilidade de obtenção de dados e à precisão na identificação de eventos de seca (MESBAHZADEH et al., 2020; LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021; TOMASELLA et al., 2023). O SPI é um índice padronizado de precipitação que fornece informações sobre as condições climáticas em relação aos meses anteriores. Tanto o SPI quanto o SPEI abrangem escalas temporais de 3, 6 e 12 meses, correspondentes às classificações meteorológicas, agrícolas e hidrológicas das secas (GOZZO et al., 2019).

Secas do tipo meteorológica são caracterizadas pela diminuição da precipitação e umidade relativa do ar, aumento da temperatura do ar e evapotranspiração. Secas do tipo agrícola se manifestam com déficit hídrico no solo, estresse hídrico nas plantas, reduzindo sua biomassa (PAMPUCH et al., 2023). Por fim, secas do tipo hidrológica são principalmente caracterizadas pela diminuição da vazão de rios, níveis de reservatórios, lagos e áreas úmidas reduzidos (VAN LOON, 2015).(V. YEVJEVICH, 1969)

2.3 Precipitação

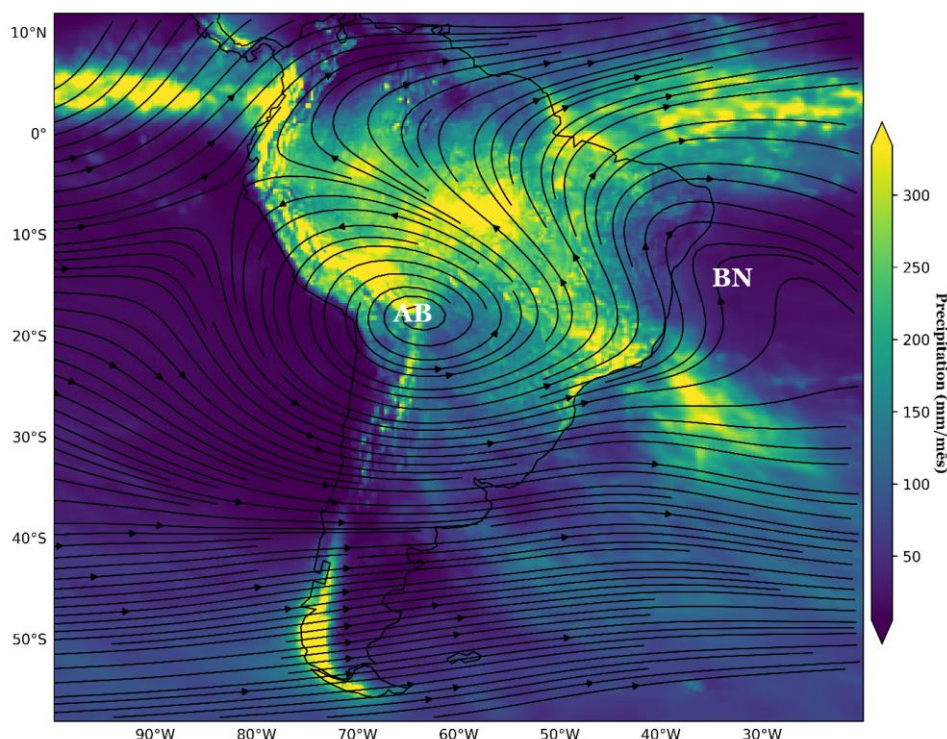
A precipitação é o processo pelo qual a água, seja em forma sólida ou líquida, cai da atmosfera para a superfície terrestre. Em termos gerais, a precipitação pode se manifestar como chuva, neve, granizo, geada e outros fenômenos semelhantes (RODRIGUES; SARDINHA; PITA, 2021). No entanto, é importante observar que apenas a chuva e a neve desempenham um papel significativo na contribuição total de precipitação. Os diferentes tipos de precipitação podem ser categorizados em precipitação convectiva, precipitação ciclônica (associada à convergência em áreas de depressão) e precipitação orográfica, que ocorre devido à elevação de massas de ar úmido ao se chocarem com obstáculos topográficos (OMETTO, 1981). Sistemas atmosféricos que impactam o regime pluviométrico em Mato Grosso

2.3.1 Sistemas Meteorológicos que Atuam em Mato Grosso

No estado de Mato Grosso, o regime pluviométrico é moldado pela interação de diversos sistemas meteorológicos. Destacam-se a Alta da Bolívia (AB), que exerce influência significativa sobre as condições climáticas da região, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é responsável por trazer umidade do oceano Atlântico para o interior do continente, e os Sistemas Frontais (MACHADO et al., 2015; QUERINO et al., 2017). Esses sistemas desempenham papéis distintos no fornecimento de chuva para Mato Grosso.

2.3.1.1 Alta da Bolívia

A AB é um anticiclone em altos níveis que favorece a formação de chuvas convectivas em baixos níveis. Devido ao aquecimento da superfície, ocorre a evaporação da água, e essa umidade ascendente pode levar à condensação em baixos níveis, contribuindo para a formação de nuvens convectivas e, eventualmente, chuvas. O anticiclone é mais intenso nos meses de dezembro e janeiro e enfraquecimento em abril e maio (CAVALCANTI et al., 2009). A circulação da alta troposfera sobre a América do Sul durante o verão é caracterizada por uma onda quase estacionária formada pela AB (Figura 2), um vale a oeste, sobre o Oceano Pacífico, e outro a leste, sobre o nordeste do Brasil, conhecido como Baixa Nordeste (Figura 2).



Fonte: Autor.

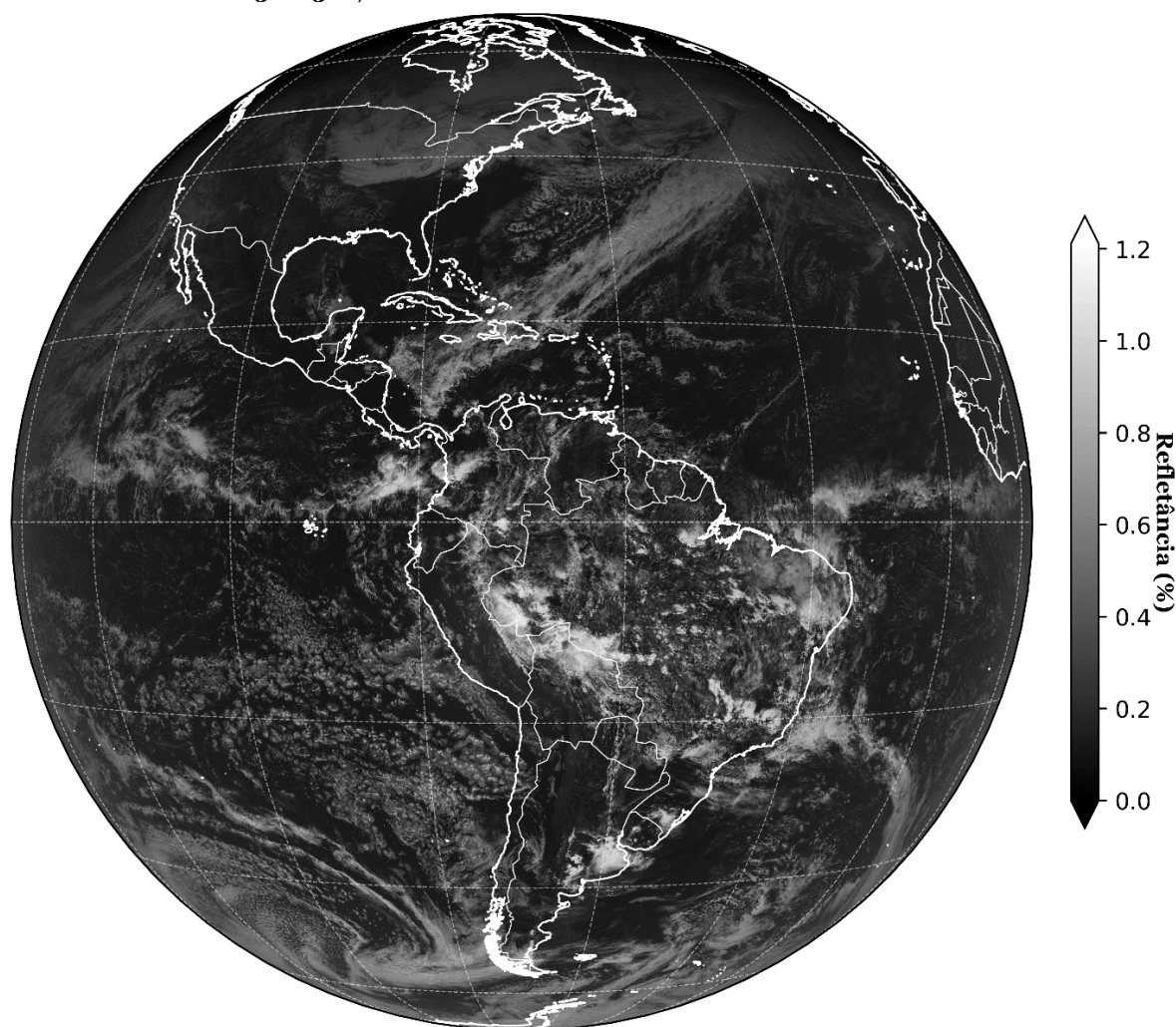
Figura 2- Circulação média em 200 hPa e precipitação acumulada DJF (ERA5-Monthly Reanalysis), onde AB é a Alta da Bolívia e BN é a baixa do Nordeste.

2.3.1.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) descreve uma ampla extensão de nuvens em camadas inferiores da atmosfera (Figura 3), desempenhando um papel fundamental na origem de chuvas intensas e prolongadas, especialmente durante os meses de novembro a março. A ZCAS é caracterizada por uma extensa faixa de nuvens em camadas inferiores da atmosfera, que se forma sobre a região amazônica. Sua formação está relacionada à alta taxa de evapotranspiração na Amazônia, onde a vegetação libera vapor d'água na atmosfera. Quando sistemas frontais, como frentes frias, interagem com essa região, ocorre um processo de resfriamento do ar na superfície. Esse resfriamento do ar aumenta a taxa de condensação, levando à formação de nuvens do tipo cumulonimbus (Figura 4). Essas nuvens são altas e densas, capazes de gerar chuvas intensas e tempestades. A presença da ZCAS cria uma extensa região de nuvens que se estende do Noroeste para o Sudeste, deslocando a umidade atmosférica ao longo dessa faixa.

A ZCAS exerce uma influência crucial sobre o padrão de precipitação na região, contribuindo para a ocorrência de chuvas significativas. Esse fenômeno é particularmente importante para o equilíbrio hidrológico da região, afetando ecossistemas, rios e comunidades locais. A compreensão da Zona de Convergência do Atlântico Sul é essencial para o monitoramento e previsão do clima em áreas afetadas por suas condições meteorológicas específicas. (QUADRO, 1999; MA et al., 2011).

GOES-16 Band-1 2023-12-31 17:00 UTC

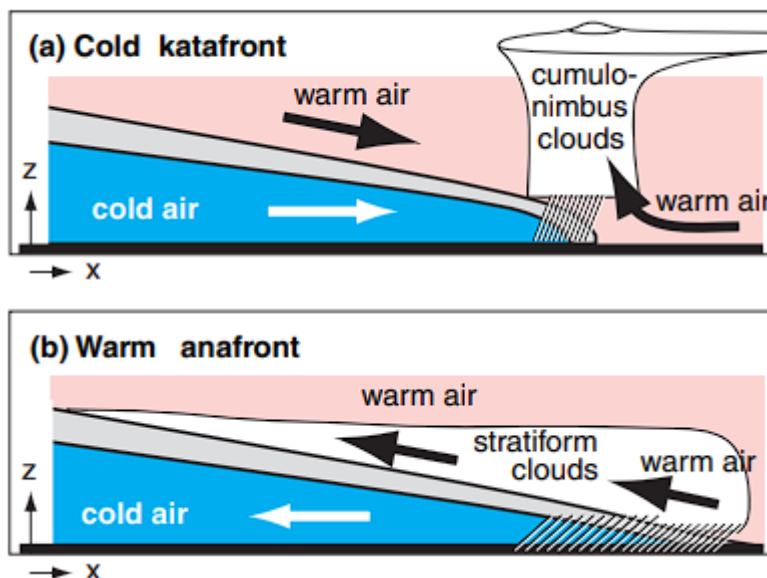


Fonte: Autor

Figura 3- Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) GOES 16 no dia 31/12/2023.

2.3.1.3 Sistemas Frontais

Por fim, os Sistemas Frontais, em específico as frentes frias, atuam como importantes mecanismos de transporte de umidade, contribuindo para a ocorrência de chuvas e temperaturas mais amenas, pois, com a massa de ar frio em contato com a massa de ar quente (Figura 4), resulta na formação de nuvens (ANDRADE, 2005).



Fonte: (ROLAND B. STULL, 2016)

Figura 4- (a) A chegada de uma frente fria desencadeia a formação de nuvens cumulonimbus, frequentemente associadas a chuvas intensas. (b) Quando uma massa de ar quente avança, ocorre a formação de nuvens com menos potencial de precipitação.

2.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo crucial que descreve a quantidade de água perdida para a atmosfera através da evaporação da superfície do solo e da transpiração das plantas (AYOADE, 2006). Estimar a evapotranspiração é fundamental para uma série de aplicações, desde o manejo de recursos hídricos até a previsão de secas. Existem várias abordagens para calcular a evapotranspiração, algumas mais complexas e detalhadas, enquanto outras são mais simplificadas e práticas.

Em alguns casos, métodos complexos que levam em consideração uma série de variáveis meteorológicas, como radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, podem ser usados para estimar a evapotranspiração. No entanto, estudos têm demonstrado que, quando se trata de avaliar índices de seca (MAVROMATIS, 2007), mesmo métodos mais simples, como o método de (THORNTHWAITE, 1948), podem fornecer resultados comparáveis. Portanto, adotar uma abordagem mais simples para calcular a evapotranspiração potencial (PET) pode ser uma opção viável.

O método de Thornthwaite, por exemplo, tem a vantagem de requerer apenas dados de temperatura média mensal. Essa simplicidade o torna amplamente utilizado, especialmente em

situações em que dados meteorológicos mais detalhados podem não estar disponíveis. O PET representa o potencial máximo de evapotranspiração, ou seja, a quantidade de água que poderia ser perdida para a atmosfera sob condições ideais (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010). Por outro lado, a evapotranspiração real é o valor observado na prática, que pode ser menor devido a fatores como a disponibilidade de água no solo e as condições climáticas reais (AYOADE, 2006). Seguindo o método de Thornthwaite, o cálculo mensal do PET (em milímetros) pode ser realizado da seguinte maneira:

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

sendo I o índice térmico real e m é a uma função cúbica de I ($m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492$), onde I pode ser escrito como:

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

e K da equação (1), é um fator de correção em termos da latitude e mês,

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \quad (3)$$

o termo NDM consiste no número de dias do mês e N o número de horas de sol (insolação). O que resulta em:

$$N = \left(\frac{24}{\pi} \right) \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (4)$$

sendo φ a latitude em radianos e δ é a declinação solar que pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$\delta = 0.4093 \sin \left(\frac{2\pi J}{365} - 1.405 \right) \quad (5)$$

sendo J o dia juliano do mês. Por fim obtemos o D_i que é a diferença da precipitação P_i e o Potencial de Evapotranspiração PET_i :

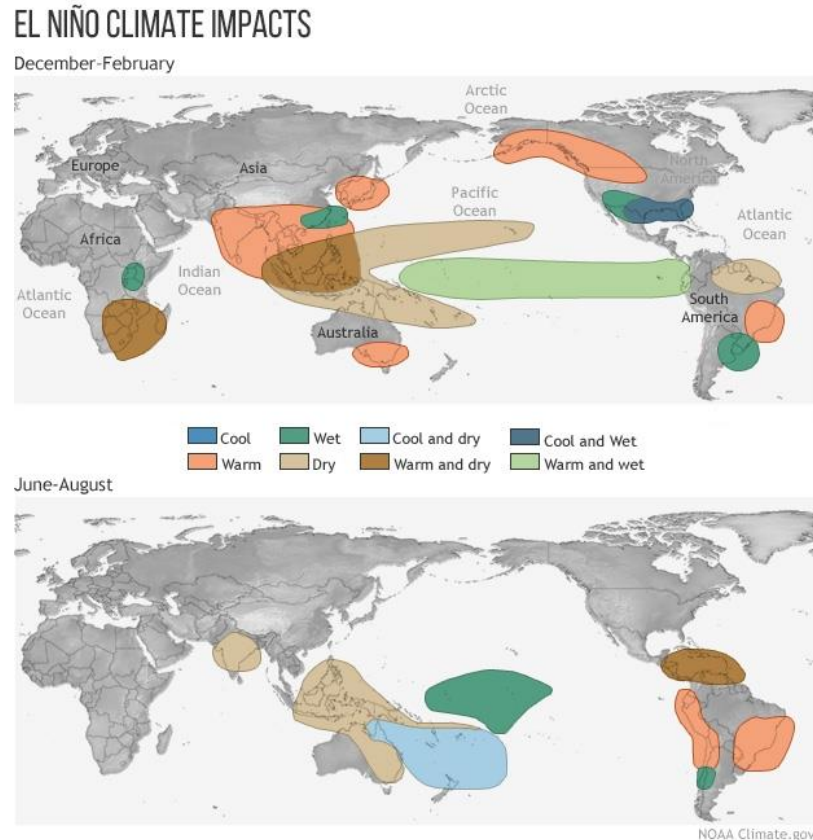
$$D_i = P_i - PET_i. \quad (6)$$

De maneira geral, a diferença entre a precipitação e o potencial de evapotranspiração pode ser considerado um balanço hídrico pois se trata da entrada de água (precipitação) de uma determinada região e de saída (Evapotranspiração).

2.5 Anomalias De Temperatura De Superfície Do Oceano

Quando nos referimos a anomalias, estamos lidando com valores acima ou abaixo do normal, ou seja, no caso de Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA), a temperatura média de superfície tem valores acima ou abaixo do normal. Uma das maneiras de se investigar essas anomalias é através de índices de temperatura de superfície. Existem índices que estão relacionados com as anomalias de temperatura de superfície do Atlântico e do Pacífico.

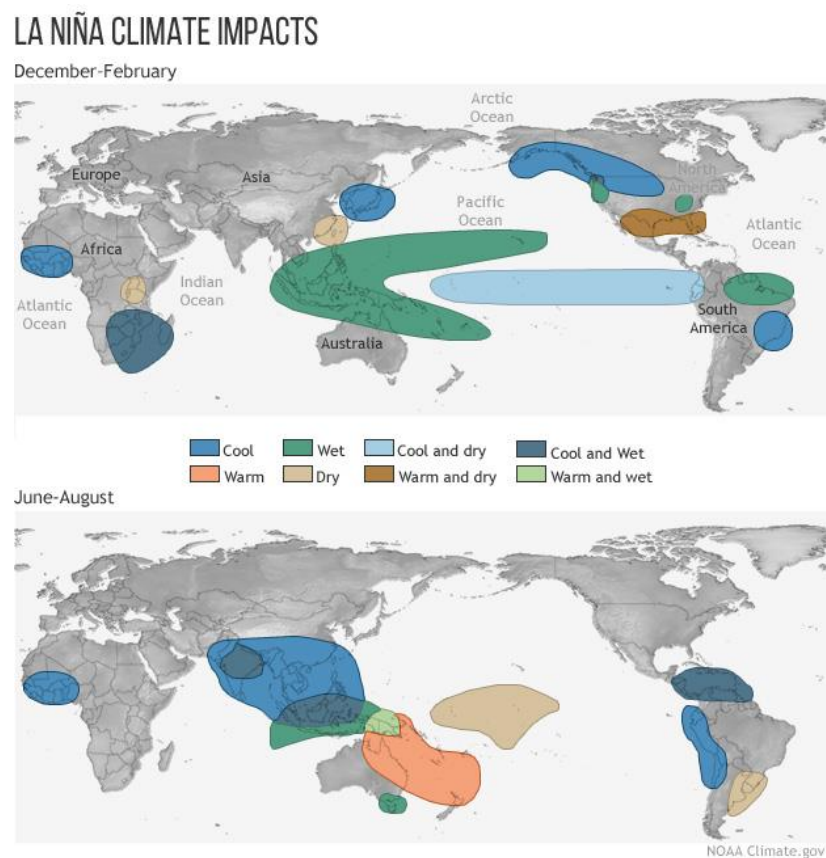
Eventos de El Niño correspondem ao aquecimento acima do normal das águas do pacífico, e geralmente é identificado por meio do índice *Oscillation Niño Index* (ONI) sendo o ONI uma média móvel da região de Niño 3.4 (Figura 7). Os índices Niño 4, Niño 3.4, Niño 3 e Niño 1+2 em conjunto com o ONI identificam anomalias de temperatura de superfície do Oceano Pacífico conhecido como ENOS. Devido ao aquecimento acima do normal, temos impactos diretos na circulação atmosférica, quando temos o aumento da temperatura sob a região equatorial do pacífico, temos uma região de baixa pressão na superfície ascendência de água para atmosfera formando nuvens, o transporte de umidade para a região da américa do sul ocorre por meio da célula de Walker, cujo seus impactos sob a américa do Sul são evidentes (Figura 5).



Fonte: National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA).

Figura 5- Impactos do El Niño em escala global.

Por outro lado, quando ocorre o resfriamento abaixo da média no Oceano Pacífico, surge o fenômeno conhecido como La Niña, que aumenta a pressão na região equatorial do Pacífico, alterando o padrão de circulação. Isso significa que ocorre uma inversão no padrão de circulação da Célula de Walker. O impacto do La Niña contribui para o aumento da precipitação na região nordeste e a diminuição na região sul do Brasil (Figura 6). Na região Centro-Oeste, embora os efeitos do La Niña não sejam tão uniformes, alguns estudos indicam variações significativas na distribuição de chuvas e temperatura, influenciando, assim, os extremos climáticos observados (DOS SANTOS; HERMUCHE, 2013).



Fonte: National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA).

Figura 6- Impactos do La Niña em escala global.

O Pacific Decadal Oscillation (PDO) é outro índice comumente utilizado para monitorar as temperaturas da superfície no Pacífico. Ele exhibe variações entre fases quentes e frias, e durante as fases quentes, o PDO tem influência na região costeira da América do Norte (Figura 7), resultando em mudanças nos padrões de precipitação e temperaturas mais amenas, além de condições mais secas. É importante destacar que, quando o PDO e o fenômeno El Niño-

Oscilação Sul (ENOS) atuam de forma simultânea, eles têm o potencial de intensificar os impactos das condições climáticas na América do Norte (DE OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2018). Por outro lado, o *Southern Oscillation Index* (SOI) é um índice que mede a variação na pressão atmosférica entre as regiões de Taiti e Darwin (Figura 7). Quando o SOI registra uma sequência de valores positivos, isso é geralmente indicativo de um evento de La Niña, enquanto valores negativos frequentes são característicos de um evento de El Niño.

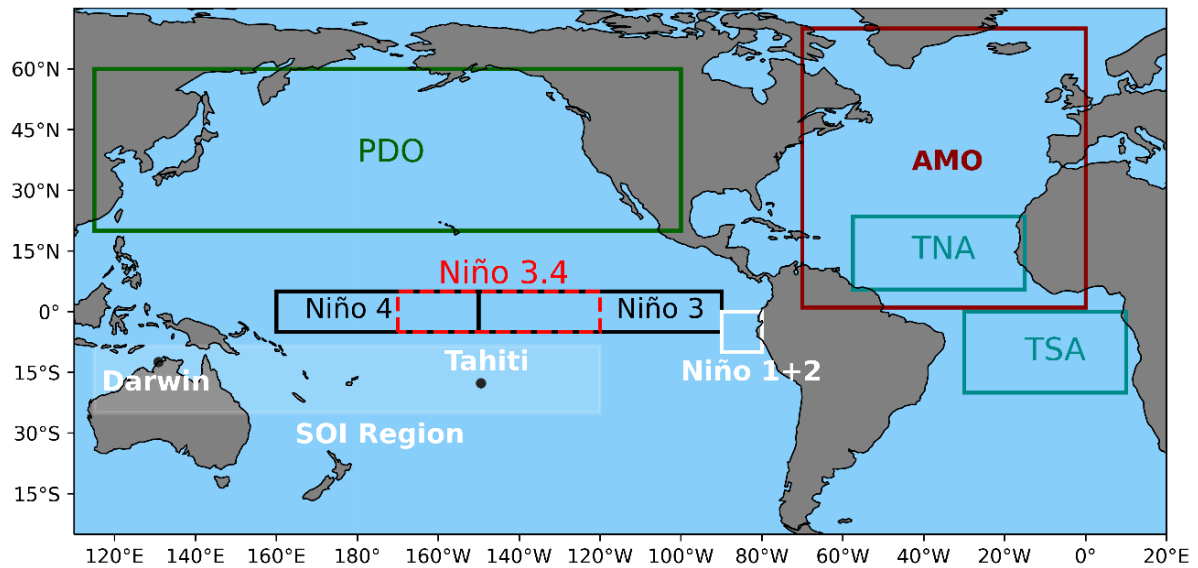


Figura 7 - Índices de anomalias Temperatura de superfície do oceano.

Em geral as anomalias de temperatura de superfície do atlântico são monitoradas através dos índices *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Tropical Northern Atlantic* (TNA) e *Tropical Southern Atlantic* (TSA). O AMO consiste em uma oscilação multidecadal do oceano atlântico de frequência baixa, por outro lado, o TSA e TNA possuem frequências maiores, sendo constantemente monitorados em escalas interanuais (DE FREITAS et al., 2023). O AMO, TNA E TSA possuem fases quente e frias (limiar de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) (SOUZA; REBOITA, 2021). O TNA é um índice que está relacionado a padrões climáticos do Oceano Atlântico, mas se concentra especificamente nas anomalias de temperatura da superfície do mar na região tropical do Atlântico Norte (Figura 7). Essas anomalias são importantes para monitorar as variações climáticas e podem estar relacionadas a fenômenos como El Niño e La Niña por teleconexão. O TSA é semelhante ao TNA, mas concentra-se nas anomalias de temperatura da superfície do mar na região tropical do Atlântico Sul. Essas anomalias também desempenham um papel importante na compreensão dos padrões climáticos e na previsão de fenômenos climáticos, especialmente no que diz respeito ao Oceano Atlântico (DE FREITAS et al., 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O estudo foi conduzido em Mato Grosso, na região Centro-Oeste do Brasil, o qual possui extensão territorial de 903.357 km², sendo o terceiro maior estado do Brasil (SOUZA et al., 2013). O estado possui os biomas Amazônia (AM), Cerrado (CER) e Pantanal (PAN) (Figura 8) e os climas Am na região Amazônica e Aw na região do Cerrado e do Pantanal, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). A precipitação anual em Mato Grosso varia de 1300 mm no Pantanal a 2800 mm na Amazônia e a média anual de temperatura do ar varia entre 24 a 27°C (ALVARES et al., 2013).

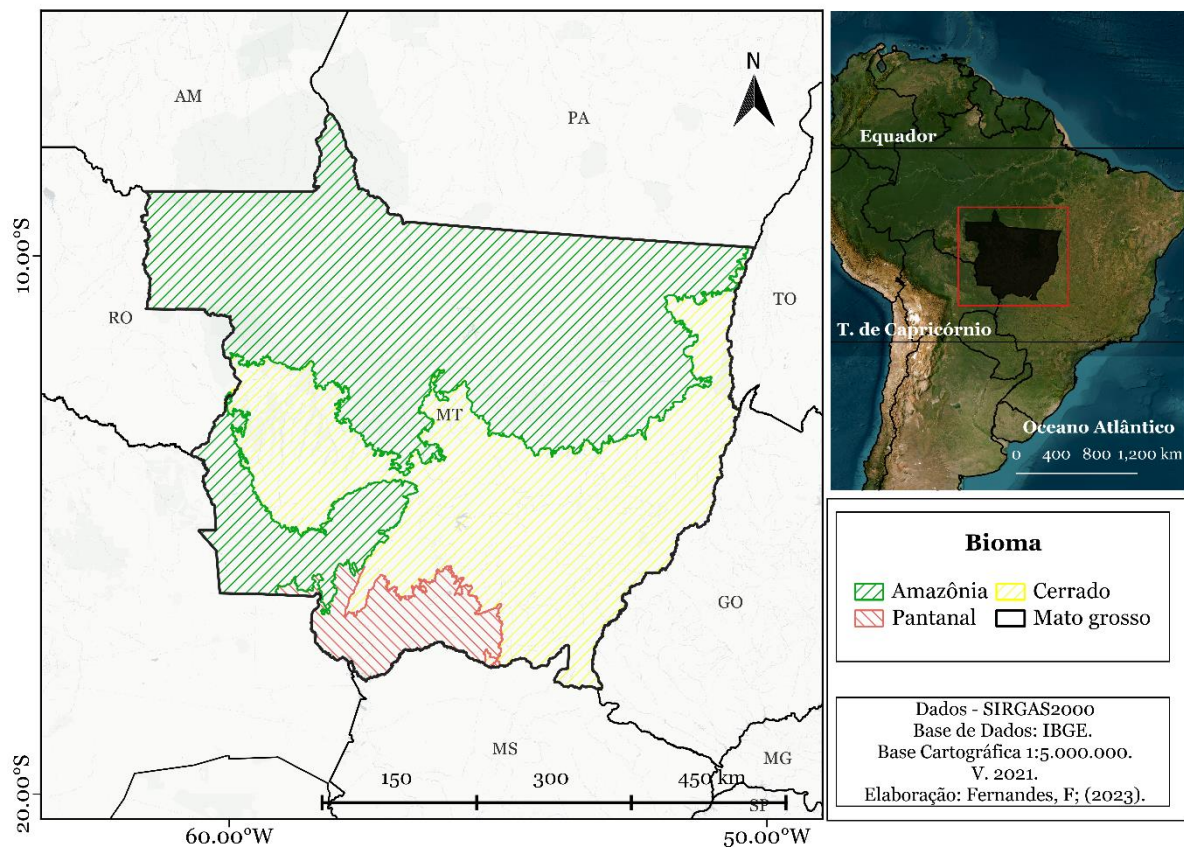


Figura 8 - Localização do estado de Mato Grosso no Brasil.

3.2 Dados Climáticos, Índices Climáticos

A precipitação e a temperatura do ar mensal de 1970 a 2022 do estado de Mato Grosso foram obtidas do produto ERA5-Land Monthly da plataforma Copernicus

(<https://cds.climate.copernicus.eu>), com resolução espacial de 0.1° (~ 9 km). O conjunto de dados do ERA5-Land é uma reiteração dos sistemas de assimilação da reanálise climática ERA5, que fornece uma concepção consistente sobre a evolução dos parâmetros que compõem o sistema terrestre do ERA5 com resolução espacial aprimorada (XU et al., 2022).

Neste estudo, utilizamos índices de Sea Surface Temperature (SST) do Atlântico (*Tropical Northern Atlantic Index* - TNA; *Tropical Southern Atlantic Index* - TSA) e Pacífico (*Niño 1+2*; *Niño 3*; *Niño 4*; *Oceanic Niño Index* - ONI), que representam as temperaturas da superfície do mar nessas regiões. Além disso, também consideramos o índice de teleconexão Pacific Decadal Oscillation (PDO) e o Southern Oscillation Index (SOI). Esses índices foram obtidos do Centro de Previsão Climática (CPC) da plataforma *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (<https://ncei.noaa.gov/access/monitoring/global-temperature-anomalies>).

O índice *Atlantic Multi-decadal Oscillation* (AMO) é calculado a partir nas coordenadas (0° – 60° N e 0° – 80° W) SSTA, em que suas fases positivas e negativas ocorrem quando os valores são maiores que 0.5 e menores que -0.5, respectivamente (ZHOU; LANG; JIANG, 2020). O TNA consiste em um índice que identifica variações de temperatura de superfície do oceano Atlântico ($5,5^\circ$ N– $23,5^\circ$ N, 15° W– $57,5^\circ$ W). Entretanto, os valores positivos de TNA indicam que a temperatura de superfície do Atlântico Tropical Norte é superior ao normal (anomalia quente), enquanto os valores negativos indicam que a SSTA está abaixo do normal (anomalia fria) (ENFIELD et al., 1999). O TSA é um índice semelhante ao TNA, que identifica variações de temperatura de superfície do oceano Atlântico Sul (-20° S, 10° E– 30° W). Entretanto, os valores positivos de TSA indicam que a temperatura de superfície do Atlântico Tropical Sul é superior ao normal (anomalia quente), enquanto os valores negativos indicam que a SST está abaixo do normal (anomalia fria) (ENFIELD et al., 1999).

O PDO é obtido a partir das variações na temperatura da superfície do mar no oceano Pacífico Norte, com fases quentes e frias (SOUZA; REBOITA, 2021). O *Oceanic Niño Index* ONI identifica as temperaturas médias da superfície do mar durante três meses no Pacífico tropical leste-central entre nas coordenadas (120° – 170° W), sendo o principal índice de identificação dos eventos de El Niño e La Niña (SOUZA; REBOITA, 2021). A diferença na pressão observada ao nível do mar *Sea Level Pressure* (SLP) entre o Taiti e Darwin, na Austrália, é a base para o SOI. O SOI é um indicador das mudanças de pressão do ar em larga escala que ocorre do oeste ao leste do Pacífico tropical durante os eventos de El Niño e La Niña (YAN et al., 2011).

3.3 Índices de Seca SPI e SPEI

O *Standardized Precipitation Index* (SPI) é utilizado para identificar fenômenos de seca em escala de 3, 6 e 12 meses, correspondentes às secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas, respectivamente (ALMEIDA et al., 2023). O *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI) é outro índice de seca análogo ao SPI, que utiliza dados de precipitação e potencial de evapotranspiração (PET) que neste trabalho foi estimada pelo método de Thornthwaite, o SPI e SPEI são ajustados a uma distribuição Gamma ou Pearson tipo III. Ambos requerem uma série temporal de dados mensais de precipitação e evapotranspiração de no mínimo 30 anos (SHEKHAR; SHAPIRO, 2019; LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021) para classificar as secas (Tabela 1).

Tabela 1 - Categoria de Seca (LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021).

Valores de SPI e SPEI	Classificação de Seca
$-1.00 < SPI \text{ ou } SPEI < -1.49$	Seca Moderada
$-1.50 < SPI \text{ ou } SPEI < -1.99$	Seca Severa
$SPI \text{ ou } SPEI < -2.00$	Seca Extrema

3.4 Classificação de Eventos de Seca (Run-Theory)

A Run-Theory é um método probabilístico que tem objetivo de determinar as características da seca, como severidade, intensidade e duração (V. YEVJEVICH, 1969; WU et al., 2019). O evento de seca é definido pela data de início e término da seca e um valor que representa a severidade (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010; LIU, C; YANG, C; YANG, Q, 2021). O SPI e SPEI têm sido usados como indicadores de seca (GOZZO et al., 2019; TOMASELLA et al., 2023). A duração de um fenômeno de seca é a quantidade de meses em que o SPI e SPEI estiveram abaixo do limiar (Tabela 1). A severidade (i.e., magnitude) de seca é a soma absoluta dos valores de SPI ou SPEI. A intensidade de seca é a razão entre a severidade e duração (AMIN ZARGAR et al., 2011).

3.5 Análises Estatísticas

O SPI e SPEI foram calculados na escala temporal de 12 meses nos três biomas (AMZ, CER e PAN) de janeiro de 1970 a novembro de 2022. Médias e intervalo de confiança de $\pm 95\%$ da severidade, intensidade e duração dos eventos de seca dos períodos de 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2010, 2010-2019 e 2020-2022 foram calculados pelo método de bootstrap com 1000 iterações. O método bootstrap é uma técnica estatística que desempenha um papel crucial na obtenção de estimativas de amostras aleatórias repetidas a partir de um conjunto de dados, mantendo o tamanho da amostra original. Ao combinar o método bootstrap e a análise do intervalo de confiança, os pesquisadores podem obter estimativas robustas e confiáveis em uma ampla gama de situações estatísticas, tornando essa abordagem uma ferramenta fundamental em várias áreas da pesquisa e análise de dados (HINKLEY, 1988; MACKINNON; NIELSEN; WEBB, 2023; GALVAO; PARKER; XIAO, 2023).

As magnitudes das tendências nos índices de SPI e SPEI foram calculadas usando o método Theil-Sen. O método de Theil-Sen é insensível a outliers e tem sido significativamente mais preciso do que a regressão linear simples para dados distorcidos e dados heterocedásticos (OHLSON; KIM, 2015), e a significância dessas tendências foi calculada pelo teste de Mann-Kendall Modificado (MMK) (HAMED; RAMACHANDRA RAO, 1998). Além disso, foi utilizado o método de correlação de Pearson (BENESTY et al., 2009) para avaliar a relação do SPI e SPEI com os índices de SSTA (Pacífico e Atlântico) e SOI.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tendência de Seca

O *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI) e o *Standardized Precipitation Index* (SPI) tiveram somente tendências negativas em Mato Grosso, o que indica aumento de eventos de seca (Figura 9). O SPEI diminuiu em grande parte do estado de Mato Grosso (norte, leste e sudoeste), por outro lado, o SPI diminuiu somente na região nordeste, abrangendo os biomas da Amazônia e Cerrado (Figura 9).

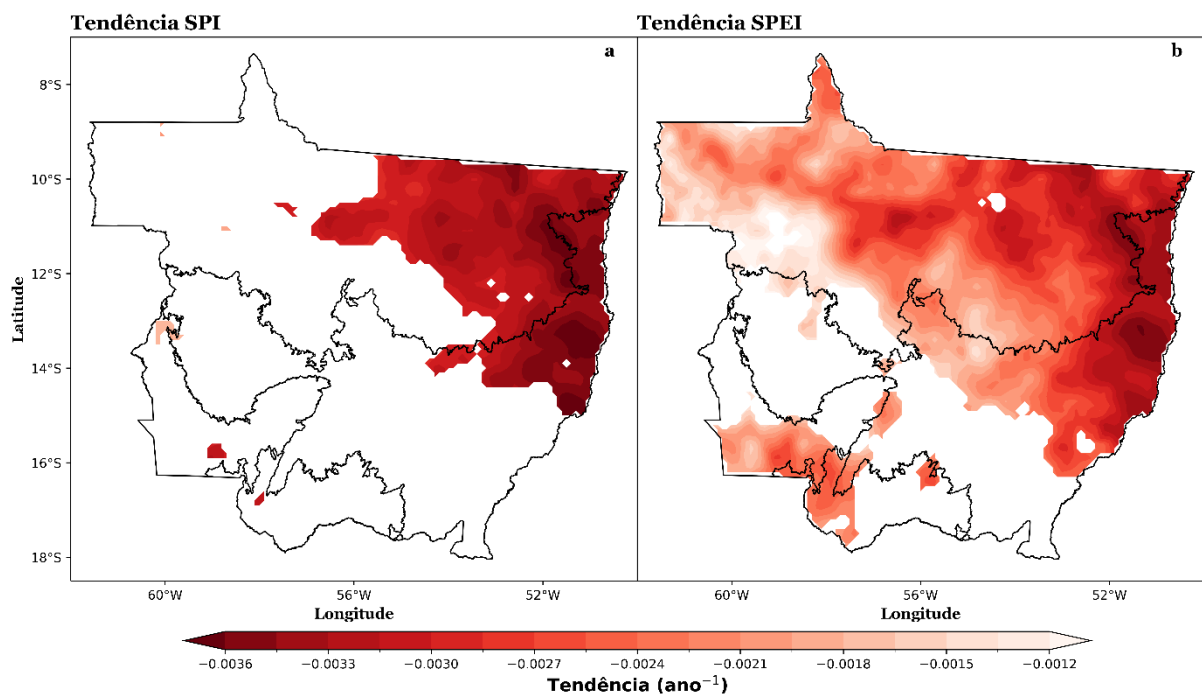


Figura 9 - Tendência do SPI (a) e SPEI (b) no período 1970-2022 em Mato Grosso. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas ($p\text{-valor} > 0.05$).

As médias mensais de SPI e SPEI têm diminuído de maneira semelhante nas regiões da Amazônia (AMZ), Cerrado (CER) e Pantanal (PAN) (Figura 10). As tendências do SPEI foram maiores que do SPI, e os eventos mais severos registrados ocorreram em PAN em novembro de 2019, quando o SPEI registrou fenômenos de seca extrema durante dois anos (Figura 10). Os padrões espaço-temporais de tendência do SPI e SPEI tiveram o mesmo sinal, ou seja, tenderam a diminuir em Mato Grosso. No entanto, a série do SPEI teve maior amplitude e homogeneidade que do SPI devido à inclusão da evapotranspiração potencial (PET), o que evidencia que SPEI é mais apropriado para monitoramento de seca que outros índices que utilizam apenas

precipitação (TOMASELLA et al., 2023). O aumento dos eventos de seca em Mato Grosso estão relacionados à diminuição da precipitação e ao aumento da temperatura do ar e do período de estiagem no estado (BIUDES et al., 2022; DOS SANTOS et al., 2023), e à substituição da vegetação natural por superfície com menor biomassa vegetal (BEUCHLE et al., 2015; COHN et al., 2016; GARRETT et al., 2018; FLACH et al., 2021). A vegetação natural desempenha um papel fundamental nos fluxos energéticos e hidrológicos entre a superfície e atmosfera (WANG et al., 2023).

A substituição da vegetação natural, que frequentemente apresenta uma biomassa substancial, por vegetação de porte reduzido exerce um impacto significativo sobre a hidrologia da região. Esse fenômeno reduz a disponibilidade de água na superfície, resultando em um aumento da energia disponível na forma de calor sensível (aumento de temperatura), enquanto há uma diminuição da parcela destinada à evapotranspiração na forma de calor latente (Ivo et al., 2020; Machado et al., 2020; Pinheiro et al., 2022). Consequentemente, há um prolongamento do período de estiagem, um aumento do déficit de pressão de vapor e um incremento nas temperaturas do ar. Essas mudanças, ampliam a demanda evaporativa atmosférica, contribuindo para a intensificação dos eventos de seca (Sherwood and Fu, 2014). Porém, as mudanças da cobertura em escala regional não são os únicos fatores preponderante em estudos sobre seca, pois as anomalias de precipitação e mudança na circulação atmosférica também podem contribuir para modificar o padrão espaço-temporal das secas (MARENGO et al., 2021).

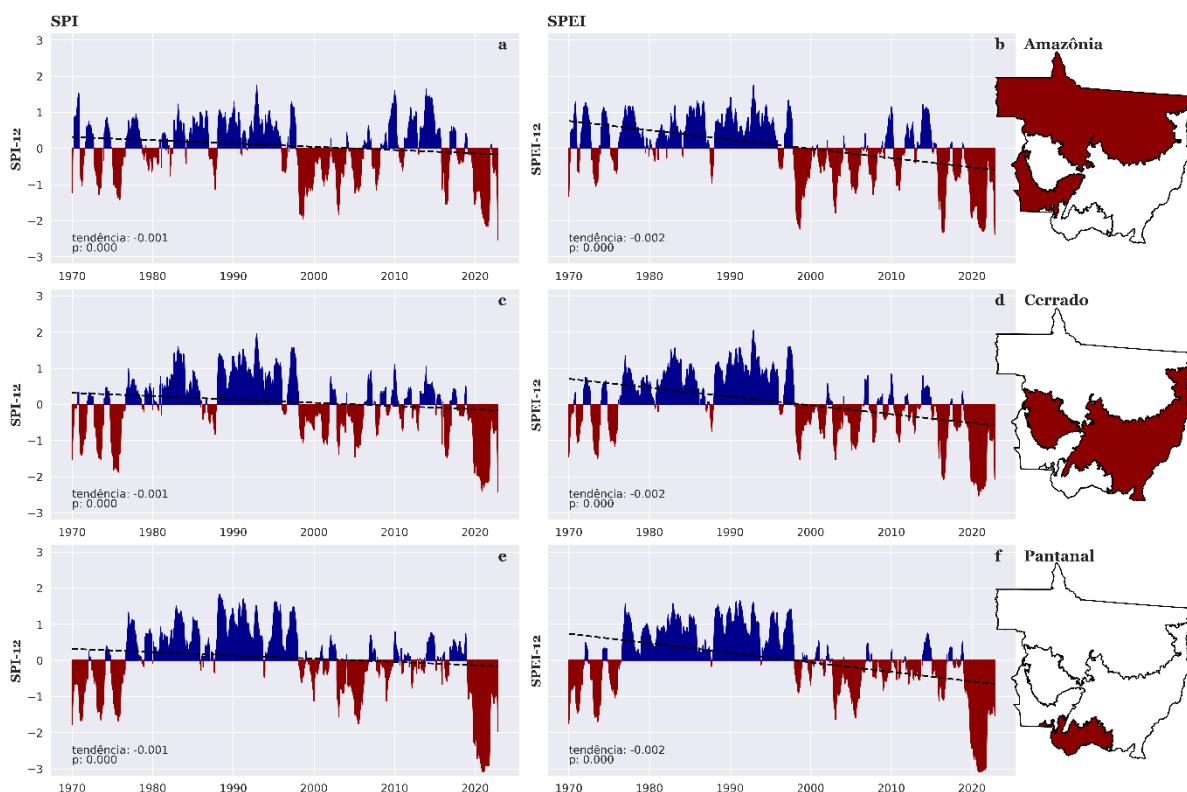


Figura 10 - Médias mensais e tendência temporal de SPI e SPEI das regiões Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022. Os limites de severidade estão definidos na Tabela 1. A linha tracejada representa a tendência temporal.

Esses resultados indicam um padrão de aumento nos eventos de seca em Mato Grosso. Isso significa que os biomas do estado têm experimentado condições de seca mais intensas de 2000 a 2022. A redução na disponibilidade de água no solo leva ao acúmulo de material combustível, aumentando a quantidade de biomassa seca propensa a incêndios e esses eventos de incêndios tem aumentado no pantanal devido à seca de 2019-2020 (MARENGO et al., 2021). Além disso, a diminuição da água disponível no solo contribui para o aumento da temperatura da superfície, proporcionando mais energia para elevar a temperatura local. Essa interação resulta em uma região mais seca, caracterizada por baixa umidade relativa do ar.

4.2 Número de Ocorrência de Seca, Severidade, Duração e Intensidade da Seca

O número de ocorrência de secas tendeu a aumentar significativamente em todo estado de Mato Grosso (Figura 11). O número de ocorrências de secas moderadas e severas diminuiu de 1970 a 2022, enquanto o de secas extremas aumentou de 2010 a 2022 no CER e no PAN e de 2020 a 2022 na AMZ, exceto em 1980-1989 quando não se observou eventos de seca

expressivos em todo estado (Figura 11). O maior número de ocorrência de secas moderadas, severas e extremas identificadas pelo SPI ocorreu no PAN seguido pela AMZ (Figuras 11a, 11b e 11c), e o maior número de ocorrência de seca identificadas pelo SPEI ocorreu no CER, seguido pelo PAN (Figuras 11d, 11e e 11f).

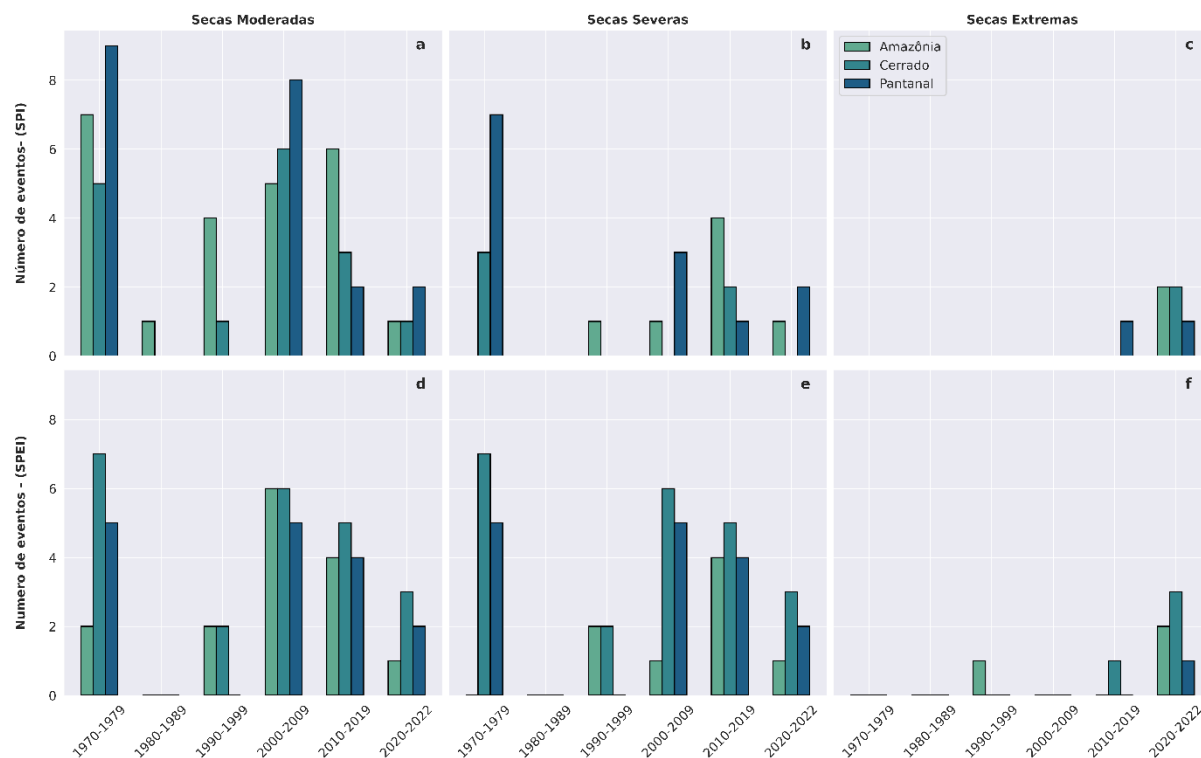


Figura 11 - Número de ocorrência de seca moderada, severa e extrema pelo SPI e SPEI na Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022. Os níveis de severidade foram definidos na Tabela 1.

Os padrões temporais de severidade, duração e intensidade dos eventos de seca moderada obtidos pelo SPI e SPEI foram semelhantes, e tenderam a aumentar no período 2000-2022 (Figura 12). Em geral, os maiores valores de severidade, duração e intensidade ocorreram no período 2020-2022 em ambos os índices, exceto a duração dos eventos de seca na AMZ pelo SPI. As secas de maior severidade registradas em Mato Grosso ocorreram predominantemente no período de 2010 a 2022 (Figuras 12a e 12b). Os eventos de seca mais intensos foram observados nas regiões do CER e PAN quando considerado o indicador SPI, enquanto, pelo SPEI, as secas mais severas foram registradas nos biomas CER e AMZ. Quanto à duração das secas, os maiores períodos ocorreram no CER e PAN entre 2020 e 2022 pelo SPI, e na AMZ e PAN entre 2010 e 2022 pelo SPEI (Figuras 12c e 12d.)

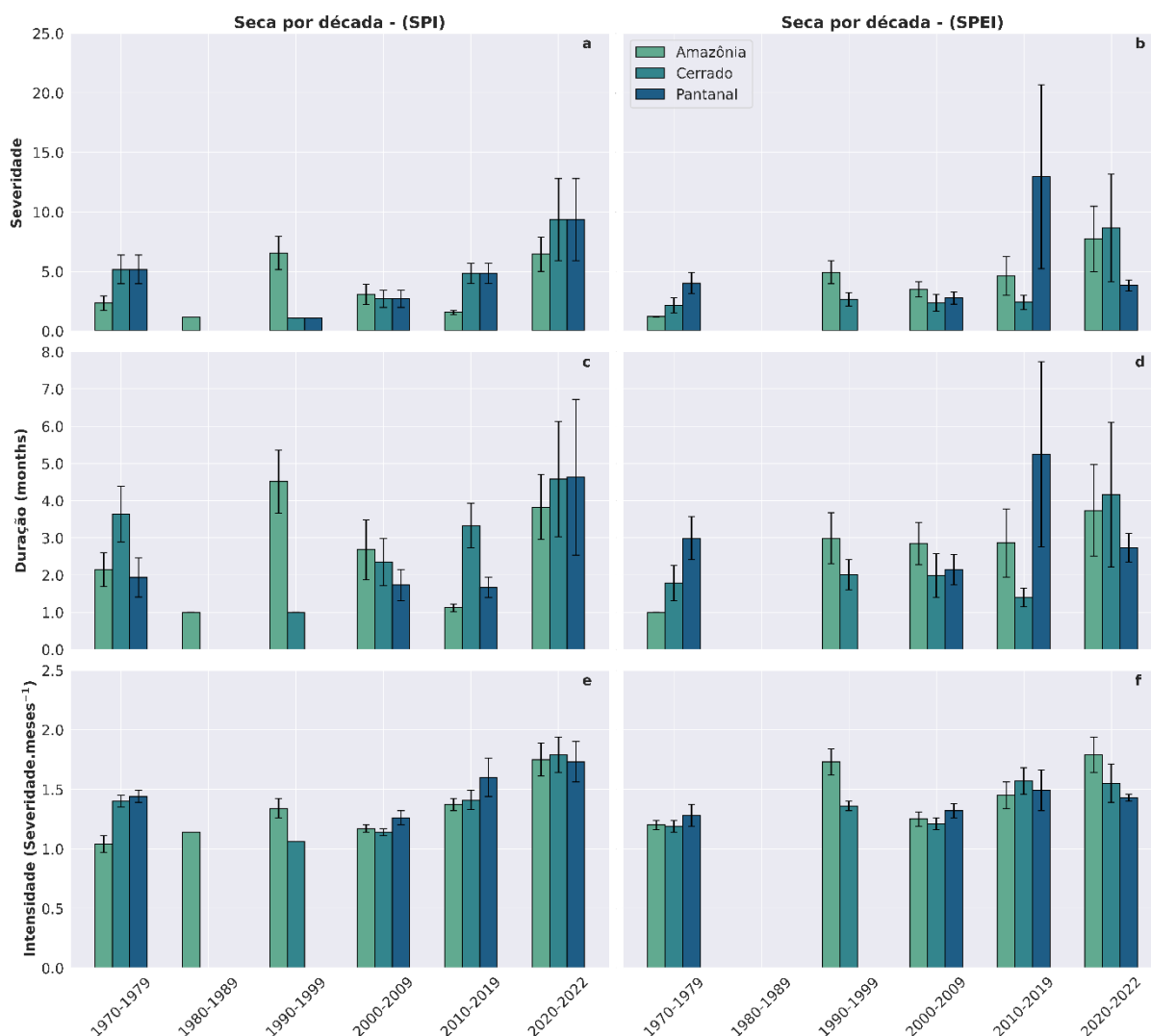


Figura 12 - Média ($\pm$ 95% intervalo de confiança) da severidade (a e b), duração (c e d) e intensidade (e e f) dos eventos de seca pelo SPI e SPEI na Amazônia, Cerrado e Pantanal de Mato Grosso de 1970 a 2022.

O número de ocorrência, severidade, duração e intensidade dos eventos de seca tem aumentado. A priori, o aumento pode ser de origem antrópica ou natural. Os principais fatores antrópicos são em decorrência de desmatamento e incêndios florestais, que alteram o ciclo hidrológico (KUMAR et al., 2022). Estudos realizados em Mato Grosso identificaram que o estado tem a maior área de incêndios florestais nos anos de 2001-2020 (BARROS-ROSA et al., 2022; SILVA; LOPES; SANTOS, 2023). Além disso há indícios que em incêndios de alta intensidade formam-se nuvens do tipo pyrocumulonimbus (pyroCB), que podem gerar tempestades. Em casos extremos, o aumento na quantidade de fumaça na atmosfera altera a microfísica, resultando na formação de raios (MCRAE; SHARPLES; FROMM, 2015; HANLON et al., 2021). Em Mato Grosso, há evidência de fenômenos de feedback, que são de

origem dos incêndios florestais, embora maior parte dos incêndios na região são de origem antrópica (PINTO NETO et al., 2023). Essa interação cria um ciclo de retroalimentação no qual as atividades humanas que desmatam florestas e ampliam as áreas de cultivo agrícola contribuem para o aumento da frequência de incêndios florestais. Por sua vez, esses incêndios podem intensificar ainda mais as transformações na cobertura do solo (SILVA; LOPES; SANTOS, 2023). Embora os incêndios desempenhem um papel significativo na alteração da cobertura do solo, as principais mudanças líquidas entre as classes ocorrem na agricultura, pastagem e vegetação, com frequente substituição da vegetação natural pela agricultura (PICOLI et al., 2020). Entre os anos de 2006 e 2017, foram desmatados cerca de 4,1 milhões de hectares de florestas naturais na Amazônia e 2,8 milhões de hectares no Centro-Oeste do Brasil (Mato Grosso), ao mesmo tempo em que houve um aumento de 59,5% nas áreas destinadas à produção de soja (Picoli et al., 2020).

Os fatores naturais que agravam os eventos de seca incluem a diminuição da precipitação e o aumento da temperatura do ar, que podem ser influenciados por variações climáticas decorrentes de fenômenos como El Niño e La Niña. Em Mato Grosso, identificaram uma correlação significativa entre os índices de Niño 3 e Niño 1+2 e a precipitação total (PRCPTOT) (DOS SANTOS et al., 2023). Isso sugere que a precipitação no Centro-Oeste pode ser influenciada pelas *Sea Surface Temperature Anomaly* (SSTA). Pois, durante eventos de El Niño, as regiões norte e nordeste tendem a enfrentar uma redução na precipitação, enquanto a região sudeste costuma experimentar um aumento nas anomalias de precipitação (CAI et al., 2020). Além disso, durante o período de 2000 a 2019, os biomas de Mato Grosso passaram por notáveis variações no padrão de evapotranspiração. Na Amazônia, observou-se uma diminuição de 20% na evapotranspiração durante a estação chuvosa, enquanto no Cerrado registrou-se um aumento de 20% a 40%, e no Pantanal, um aumento expressivo de 60% a 80% (Biudes et al., 2022). Essas mudanças persistentes no padrão da evapotranspiração apontam para uma iminente escassez de água no solo, indicando a presença de um déficit hídrico na região. Logo, essas variações têm implicações significativas para a disponibilidade de água na região. O SPEI, por fim, é mais indicado para os três biomas devido ao controle de balanço hídrico na região.

4.3 Correlação do SPI e SPEI com Índices Oceânicos no Atlântico e Pacífico

O padrão espacial de correlação do SPI e SPEI com a *Sea Surface Temperature Anomalies* (SSTA) e *Southern Oscillation Index* (SOI) foram semelhantes, com maior

amplitude nas correlações envolvendo SPEI (Figuras 13 e 14). As correlações do SPI e SPEI com SSTA e SOI variaram de negativamente moderada a positivamente fraca. *Atlantic Multidecal Oscillation* (AMO), *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA), *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA) e SOI correlacionaram negativamente com o SPI e SPEI em todo Mato Grosso, exceto algumas regiões do norte com o SOI (Figuras 13 e 14). Por outro lado, os índices *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 3.4, NIÑO 4 e *Oceanic Niño Index* (ONI) correlacionaram negativamente com o SPI e SPEI em todo Mato Grosso, exceto na região norte, onde os índices de Niño tiveram correlação positiva ou não tiveram correlação. O SPEI obteve maiores valores de correlação com as SSTA que o SPI, embora o padrão de correlação seja semelhante, os índices com maiores valores de correlação são AMO, TNA e TSA (Figura 14).

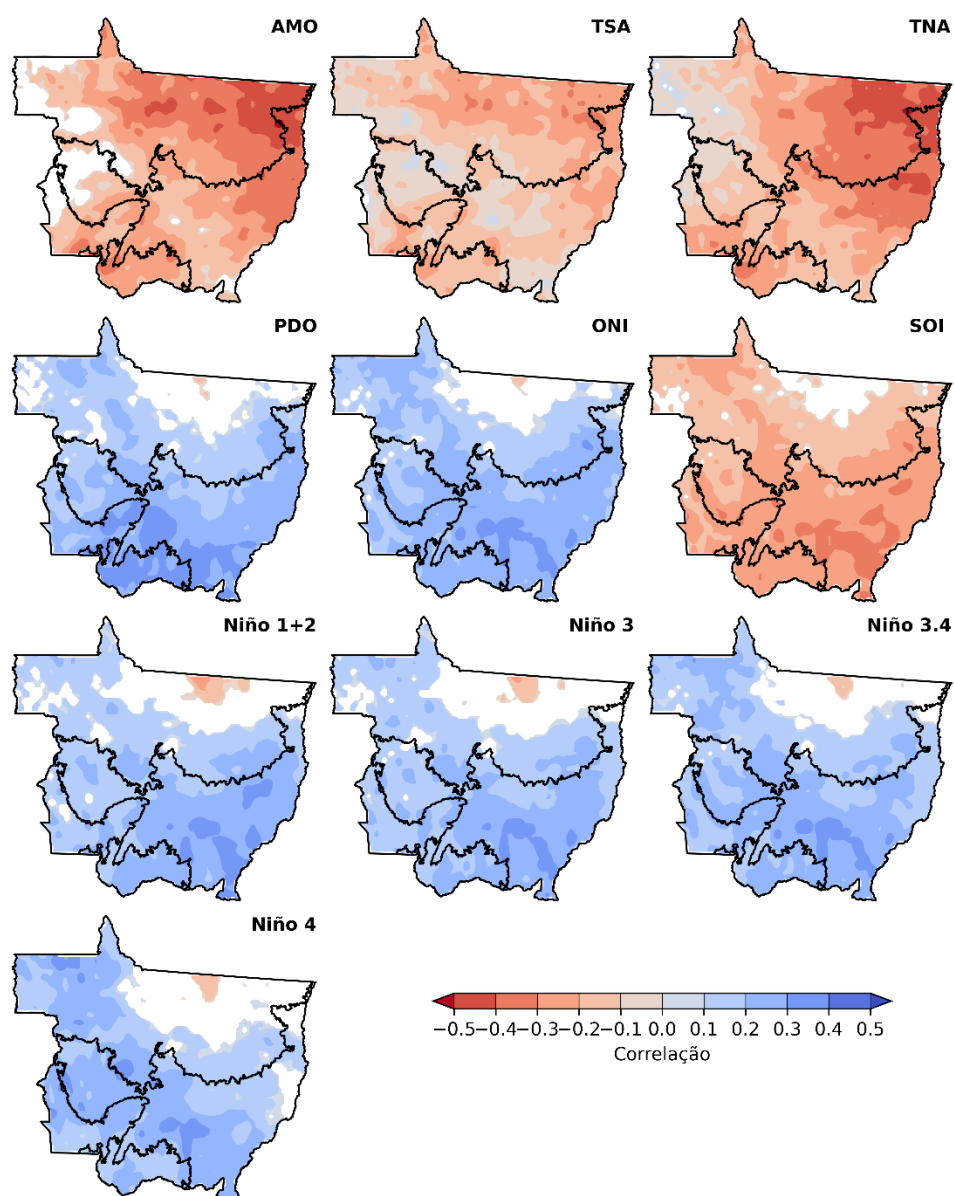


Figura 13 - Correlação do SPI com os índices climáticos: AMO, NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 3.4, NIÑO 4, ONI, PDO, SOI, TNAI e TSAI em Mato Grosso de 1970 a 2022. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas ($p\text{-valor} > 0.05$).

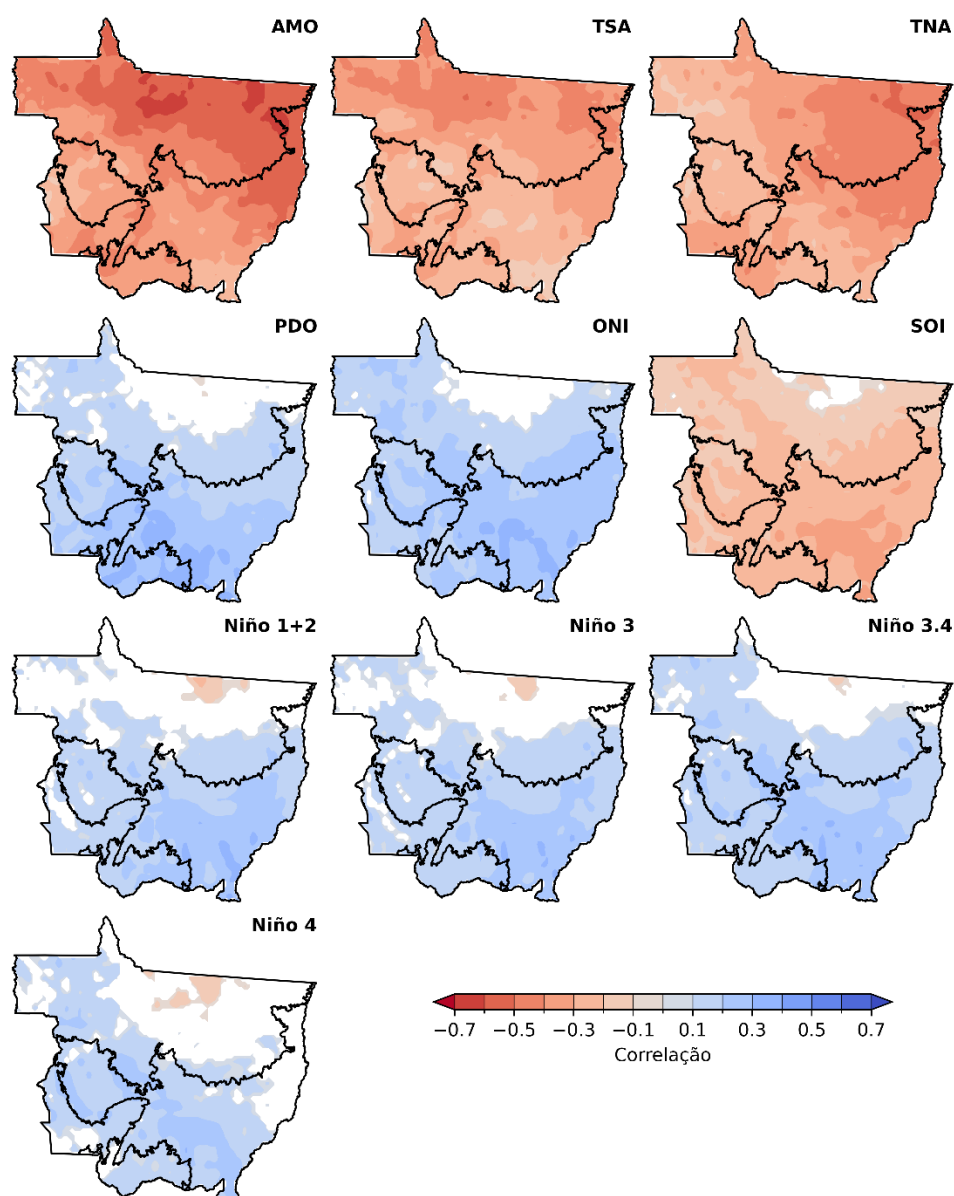


Figura 14 - Correlação do SPEI com os índices climáticos: AMO, NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 3.4, NIÑO 4, ONI, PDO, SOI, TNAI e TSAI em Mato Grosso de 1970 a 2022. As regiões em branco indicam a ausência de correlações significativas ($p\text{-valor} > 0.05$).

Embora as tendências de redução no SPI e SPEI podem ter contribuições de fatores regionais, como o uso da terra e a cobertura do solo, ressalta-se que ambos os índices tiveram correlações significativas com a SSTA e o SOI, sugerindo uma relação estatística entre as secas ocorridas em Mato Grosso e esses fenômenos globais. Isso destaca a possibilidade de que o aquecimento da superfície oceânica, um fenômeno de escala global, possa estar exercendo uma influência direta sobre as condições de seca em nível regional.

No entanto, o aquecimento da superfície oceânica se desenvolve em diferentes escalas temporais antes de manifestar seus impactos sobre o continente. Como resultado, o momento preciso em que esses fenômenos podem desencadear eventos de seca apresenta incertezas, devido à complexa variabilidade espaço-temporal do sistema climático (MARENGO et al., 2021). Esses intervalos temporais (lags), representam o período necessário que as consequências do aquecimento se manifestem nos eventos de seca. Uma abordagem eficaz para compreender e analisar esses lags temporais é por meio da técnica de Cross-Correlation (Bourke et al., 2023). Embora os índices AMO, TNA e TSA tenham uma relação estatisticamente significativa com SPI e SPEI, obtivemos as séries temporais desses índices para identificar se os eventos de seca ocorrem quando a temperatura de superfície do Pacífico e do Atlântico está acima do normal (Figuras 15 e 16).

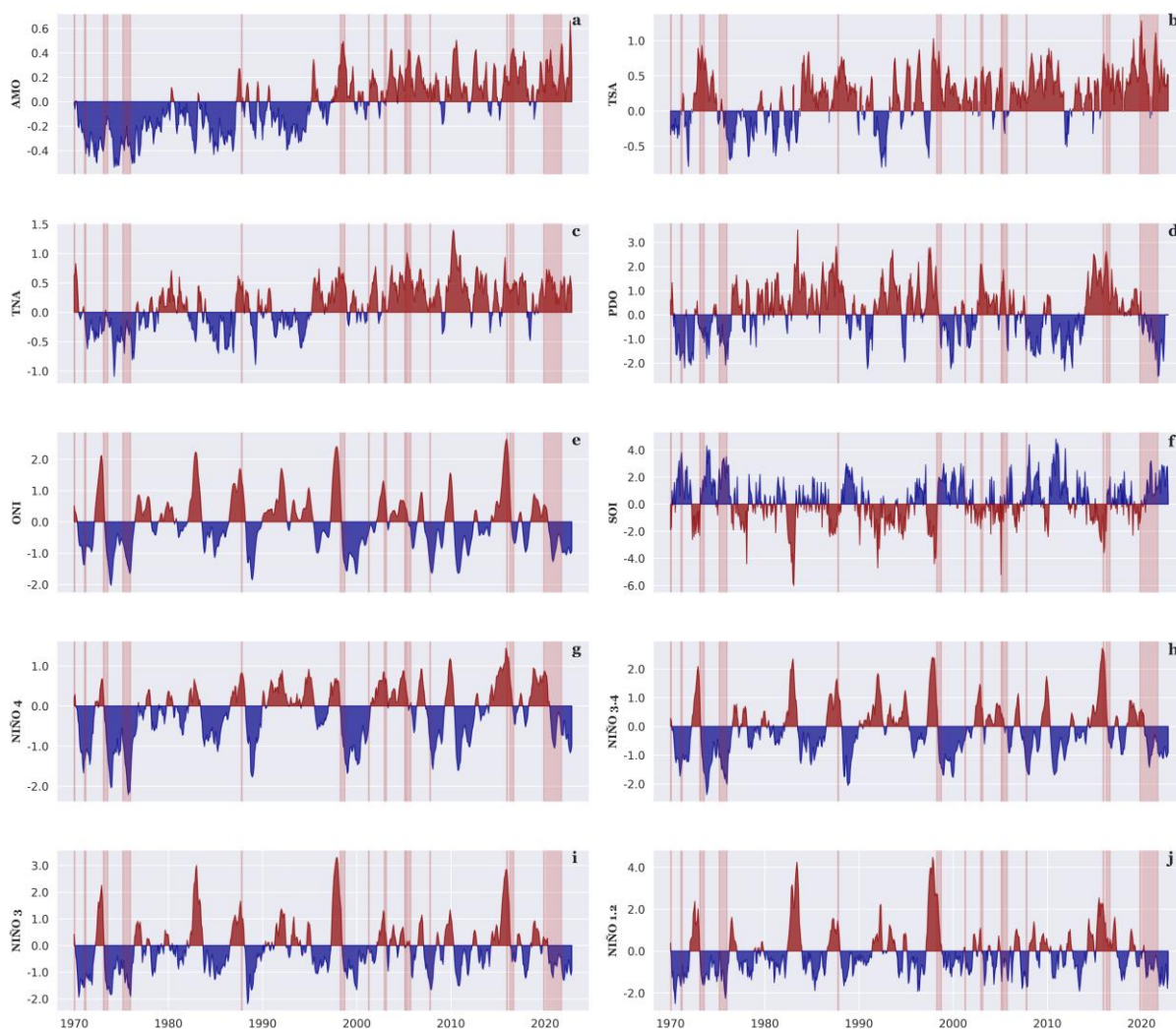


Figura 15 - A variabilidade mensal dos índices de TSM e SOI. (a) TSAI, (b) TNAI, (c) Niño 4, (d) Niño 3.4, (e) Niño 3, (f) Niño 1+2, (g) AMO, (h) ONI, (i) PDO e (j) SOI. As barras vermelhas representam anos com seca definida pelo SPI-12 meses.

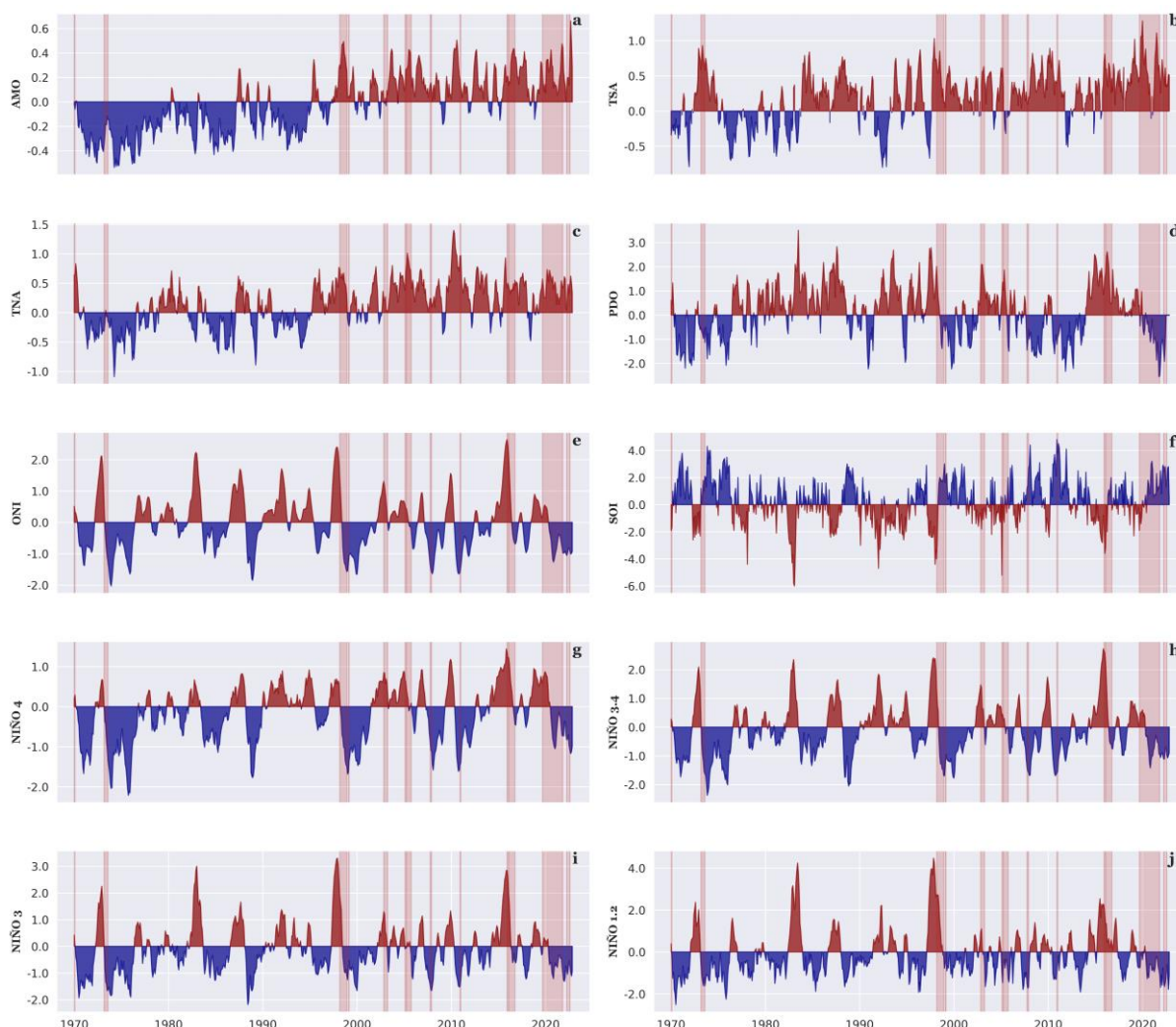


Figura 16 - A variabilidade mensal dos índices de TSM e SOI. (a) TSAI, (b) TNAI, (c) Niño 4, (d) Niño 3.4, (e) Niño 3, (f) Niño 1+2, (g) AMO, (h) ONI, (i) PDO e (j) SOI. As barras vermelhas representam anos com seca definida pelo SPEI-12 meses.

Os índices climáticos com as maiores associações aos eventos de seca, conforme apontados pelos indicadores SPI e SPEI, são derivados do Oceano Atlântico, que inclui a AMO, TNA e TSA. Além disso, desde 1989, a AMO entrou em uma fase de aquecimento (Marengo et al. em 2021), período em que houve uma pronunciada coincidência entre os eventos de seca registrados até o presente e os picos de aquecimento observados tanto na TNA quanto na TSA. Isso sugere que os eventos de seca identificados pelo SPI e SPEI ocorreram predominantemente durante fases quentes do TNA e TSA. No período de 1989 a 2022, tanto o AMO quanto o TNA e o TSA mostraram um aumento nas temperaturas de superfície do oceano. Adicionalmente, ressalta-se que as temperaturas de superfície nas regiões de TNA e TSA não tiveram um padrão de dipolo durante esse mesmo período.

O PDO, que oscila entre fases quentes e frias do oceano Pacífico (MANTUA et al., 1997; WU, 2013), e os índices dos eventos de ENSO (ONI, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4 e Niño 1+2) correlacionaram positivamente com o SPI e SPEI em quase todo Mato Grosso. Em geral, os eventos de seca registrados pelo SPI e SPEI coincidem com as fases quentes do PDO. Além disso, o ONI demonstra uma resposta consistente a esses eventos de seca. No entanto, é importante ressaltar que também há ocorrências de secas durante eventos de El Niño e La Niña, o que evidencia uma complexa interação desses eventos de seca e as SSTA (MARENGO; ALVES; TORRES, 2016; THIELEN et al., 2020; MARENGO et al., 2021). Por outro lado, o SOI é uma anomalia de pressão de superfície mensal (YAN et al., 2011), e correlacionou negativamente com o SPI e SPEI na maior parte de Mato Grosso, i.e.. os valores de pressão estão elevados o SPI e SPEI tenderam a diminuir, porém os fenômenos de seca coincidiram com as baixas e altas de SOI (Figuras 15f e 16f).

Embora as séries temporais sugiram uma possível relação entre as variáveis, não podemos afirmar que as condições de seca são influenciadas exclusivamente pelas SSTA. Isso ocorre porque a formação das chuvas é amplamente afetada por fatores atmosféricos em larga escala, bem como por processos de advecção oceânica e continental. No contexto da Amazônia, tanto a evaporação oceânica quanto a continental desempenham papéis significativos. Enquanto a evaporação oceânica contribui com aproximadamente 58% da precipitação média, a evaporação continental responde por 42% desse total (Mu et al., 2023). É importante realçar que a climatologia da *South America* (SA) é influenciada pelo Sistema de Monções da América do Sul (SAMS) com duas estações bem definidas (seco e úmido) (VERA et al., 2006; LEYBA et al., 2023). Além disso, sistemas atmosféricos de alta pressão continentais desempenham um papel fundamental na ocorrência de eventos de seca. Isso ocorre devido à sua capacidade de influenciar diretamente as condições físicas da atmosfera. Esses sistemas interagem de maneira complexa com a cobertura vegetal local, resultando na atenuação da evapotranspiração (ET) e no aumento do albedo (QUERINO et al., 2016; ANGELINI et al., 2021).

A vegetação, por meio de processos de evapotranspiração, modula a umidade e a temperatura do ar local, criando microclimas que afetam a pressão atmosférica. No entanto, as mudanças na cobertura do solo, devido à expansão agrícola e ao desmatamento, alteram o albedo da superfície, afetando o equilíbrio de energia na atmosfera (QUERINO et al., 2016; ANGELINI et al., 2021). O aumento de calor sensível nessas áreas pode induzir temperaturas mais elevadas, potencialmente contribuindo para a formação de áreas de alta pressão locais.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi identificada tendência de diminuição no *Standardized Precipitation Index* (SPI) e *Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI) em todo Mato Grosso de 1970 a 2022. O SPEI registrou secas extremas em uma área maior que o SPI, o que pode ser consequência da utilização da variável evapotranspiração potencial (PET), sendo o mesmo mais efetivo. Houve aumento do número de ocorrência dos fenômenos de seca e da sua severidade, duração e intensidade em Mato Grosso. Os fenômenos de secas de maior duração e intensidade identificados pelo SPI ocorreram na região do Pantanal (PAN) e Cerrado (CER), enquanto a maior duração e intensidade identificados pelo SPEI ocorreram na Amazônia (AMZ) e PAN.

A baixa correlação do SPI e SPEI com os índices climáticos evidenciam a complexa relação entre a seca e as *Sea Surface Temperature Anomaly* (SSTA) e *Southern Oscillation Index* (SOI). As SSTA do Oceano Atlântico têm maior influência no ciclo de seca em Mato Grosso que do Oceano Pacífico, visto que os índices climáticos com maior correlação com o SPI e o SPEI foram o *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Tropical Northern Atlantic* (TNA) e *Tropical Northern Atlantic* (TNA). Os eventos de seca pelo SPI e SPEI ocorreram nas fases quentes do AMO, TNA e TSA, mas não houve predominância de eventos de seca durante os fenômenos de La Niña ou El Niño. Portanto, os eventos de seca em Mato Grosso não têm relação direta com os fenômenos La Niña ou El Niño, podendo ser mera casualidade.

Esses resultados evidenciam tendências e relações cíclicas espaciais dos eventos de seca em Mato Grosso, os quais são essenciais para o setor agrícola e para tomada de decisões a fim de mitigar o efeito das secas para a sociedade. Esses resultados destacam a necessidade de promover práticas de conservação de água e uso sustentável dos recursos hídricos, bem como de incentivar medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas em Mato Grosso.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. P. DE et al. Análise multivariada do SPI no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 336–362, 24 fev. 2023.
- ALMENDRA-MARTÍN, L. et al. Agricultural Drought Trends on the Iberian Peninsula: An Analysis Using Modeled and Reanalysis Soil Moisture Products. **Atmosphere**, v. 12, n. 2, p. 236, fev. 2021.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AMIN ZARGAR et al. A review of drought indices. **Environmental reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.
- ANDERSON, L. O. et al. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, p. 20170411, 8 out. 2018.
- ANDRADE, K. M. CLIMATOLOGIA E COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS FRONTAIS SOBRE A AMÉRICA DO SUL. 2005.
- ANGELINI, L. P. et al. Surface Albedo and Temperature Models for Surface Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration Using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. **Sensors**, v. 21, n. 21, p. 7196, jan. 2021.
- ARAÚJO, A. G. DE J. et al. Relationships between variability in precipitation, river levels, and beef cattle production in the Brazilian Pantanal. **Wetlands Ecology and Management**, v. 26, n. 5, p. 829–848, 1 out. 2018.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. [s.l.] Difel, 2006.
- BARROS-ROSA, L. et al. Fire probability mapping and prediction from environmental data: What a comprehensive savanna-forest transition can tell us. **Forest Ecology and Management**, v. 520, p. 120354, 15 set. 2022.
- BENESTY, J. et al. Pearson Correlation Coefficient. Em: COHEN, I. et al. (Eds.). **Noise Reduction in Speech Processing**. Springer Topics in Signal Processing. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. p. 1–4.
- BERGIER, I. **River level sensitivity to SOI and NAO in Pantanal and Amazonia**. [s.l.: s.n.].
- BERMAN, J. D. et al. Drought and the risk of hospital admissions and mortality in older adults in western USA from 2000 to 2013: a retrospective study. **The Lancet Planetary Health**, v. 1, n. 1, p. e17–e25, abr. 2017.
- BEUCHLE, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 1 mar. 2015.
- BIUDES, M. S. et al. Evapotranspiration Seasonality over Tropical Ecosystems in Mato Grosso, Brazil. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, p. 2482, jan. 2022.

CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, abr. 2020.

CARVALHO, M. Â. C. C. DE et al. Drought Monitoring Based on Remote Sensing in a Grain-Producing Region in the Cerrado–Amazon Transition, Brazil. **Water**, v. 12, n. 12, p. 3366, dez. 2020.

CAVALCANTI, I. F. DE A. et al. **Tempo e clima no Brasil**. [s.l.: s.n.].

COHN, A. S. et al. Patterns and processes of pasture to crop conversion in Brazil: Evidence from Mato Grosso State. **Land Use Policy**, v. 55, p. 108–120, 1 set. 2016.

CURADO, L. F. A. et al. Trends and Patterns of Daily Maximum, Minimum and Mean Temperature in Brazil from 2000 to 2020. **Climate**, v. 11, n. 8, p. 168, ago. 2023.

DE ANDRADE, F. M.; GODOI, V. A.; ARAVÉQUIA, J. A. Why Above-Average Rainfall Occurred in Northern Northeast Brazil during the 2019 El Niño? **Meteorology**, v. 2, n. 3, p. 307–328, set. 2023.

DE FREITAS, A. A. et al. Atmospheric and Oceanic Patterns Associated with Extreme Drought Events over the Paraná Hydrographic Region, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 1, p. 12, jan. 2023.

DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. et al. Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro - Brazil. **Atmospheric Research**, v. 212, p. 91–105, 1 nov. 2018.

DING, Y.; HAYES, M. J.; WIDHALM, M. Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, v. 20, n. 4, p. 434–446, 1 jan. 2011.

DOS SANTOS, L. O. F. et al. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. **Atmosphere**, v. 14, n. 3, p. 426, mar. 2023.

DOS SANTOS, N. B.; HERMUCHE, P. M. Influência dos Fenômenos El Niño e La Niña na temperatura de superfície nos biomas brasileiros. 2013.

DROOGERS, P.; IMMERZEEL, W. W.; LORITE, I. J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 9, p. 1351–1359, set. 2010.

EDUARDO VON DENT. Produção agrícola no estado do Mato Grosso e a relação entre o agronegócio e as cidades: o caso de Lucas do Rio Verde e Sorriso | Ateliê Geográfico. 17 ago. 2020.

ENFIELD, D. B. et al. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7841–7848, 1999.

FERREIRA, F. L. V. et al. Spatial–Temporal Variability of Climatic Water Balance in the Brazilian Savannah Region River Basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, jan. 2023.

FLACH, R. et al. Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. **World Development**, v. 146, p. 105582, 1 out. 2021.

GALVAO, A. F.; PARKER, T.; XIAO, Z. Bootstrap Inference for Panel Data Quantile Regression. **Journal of Business & Economic Statistics**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2023.

GARRETT, R. D. et al. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 53, p. 233–243, 1 nov. 2018.

GOZZO, L. F. et al. Climatology and Trend of Severe Drought Events in the State of Sao Paulo, Brazil, during the 20th Century. **Atmosphere**, v. 10, n. 4, p. 190, abr. 2019.

HAMED, K. H.; RAMACHANDRA RAO, A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1, p. 182–196, 30 jan. 1998.

HANLON, H. M. et al. Future changes to high impact weather in the UK. **Climatic Change**, v. 166, n. 3, p. 50, 30 jun. 2021.

HINKLEY, D. V. Bootstrap Methods. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 50, n. 3, p. 321–337, 1 jan. 1988.

IVO, I. O. et al. Effect of fires on biophysical parameters, energy balance and evapotranspiration in a protected area in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 19, p. 100342, 1 ago. 2020.

KIEM, A. S. et al. Natural hazards in Australia: droughts. **Climatic Change**, v. 139, n. 1, p. 37–54, 1 nov. 2016.

KUMAR, S. et al. Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 964, 19 jan. 2022.

LEYBA, I. M. et al. The South Atlantic Ocean as a moisture source region and its relation with precipitation in South America. **Climate Dynamics**, v. 61, n. 3, p. 1741–1756, 1 ago. 2023.

LIU, C; YANG, C; YANG, Q. **Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China | Scientific Reports**. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-020-80527-3>>. Acesso em: 2 set. 2022.

MA, H.-Y. et al. Mechanisms for Precipitation Variability of the Eastern Brazil/SACZ Convective Margin. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3445–3456, 1 jul. 2011.

MACHADO, N. G. et al. SEASONAL AND INTERANNUAL PATTERN OF METEOROLOGICAL VARIABLES IN CUIABÁ, MATO GROSSO STATE, BRAZIL. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 33, n. 3, p. 477–488, 7 jul. 2015.

MACHADO-SILVA, F. et al. Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. **Ecological Indicators**, v. 109, p. 105817, 1 fev. 2020.

MACKINNON, J. G.; NIELSEN, M. Ø.; WEBB, M. D. Fast and reliable jackknife and bootstrap methods for cluster-robust inference. **Journal of Applied Econometrics**, v. 38, n. 5, p. 671–694, 2023.

MALDANER, M. E. et al. Effects of Climate Change on the Distribution of Key Native Dung Beetles in South American Grasslands. **Agronomy**, v. 11, n. 10, p. 2033, out. 2021.

MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production*. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069–1080, 1 jun. 1997.

MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, 2021.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R. Regional climate change scenarios in the Brazilian Pantanal watershed. **Climate Research**, v. 68, n. 2–3, p. 201–213, 4 maio 2016.

MAVROMATIS, T. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 7, p. 911–924, 2007.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. p. 6, 1993.

MCRAE, R. H. D.; SHARPLES, J. J.; FROMM, M. Linking local wildfire dynamics to pyroCb development. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 3, p. 417–428, 5 mar. 2015.

MESBAHZADEH, T. et al. Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP). **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. e1856, 2020.

OHLSON, J. A.; KIM, S. Linear valuation without OLS: the Theil-Sen estimation approach. **Review of Accounting Studies**, v. 20, n. 1, p. 395–435, 1 mar. 2015.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. [s.l.] Agronomica Ceres, 1981.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. [s.l.] U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.

PAMPUCH, L. A. et al. A Review on Clustering Methods for Climatology Analysis and Its Application over South America. **International Journal of Geosciences**, v. 14, n. 9, p. 877–894, 6 set. 2023.

PECL, G. T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**, v. 355, n. 6332, p. eaai9214, 31 mar. 2017.

PICCILLI, A.; GUSTAVO, D. Avaliação da previsão hidroclimática no Alto Paraguai. 2007.

PICOLI, M. C. A. et al. Impacts of Public and Private Sector Policies on Soybean and Pasture Expansion in Mato Grosso—Brazil from 2001 to 2017. **Land**, v. 9, n. 1, p. 20, jan. 2020.

- PINTO NETO, O. et al. Evidence of a link between Amazon fires and lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 249, p. 106095, 1 ago. 2023.
- QUADRO, M. F. L. DE. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, p. 210–210, nov. 1999.
- QUERINO, C. A. S. et al. Spatiotemporal NDVI, LAI, albedo, and surface temperature dynamics in the southwest of the Brazilian Amazon forest. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 026007, abr. 2016.
- QUERINO, C. A. S. et al. BALANÇO DE ONDAS CURTAS SOBRE FLORESTA SAZONALMENTE ALAGÁVEL DO PANTANAL MATO-GROSSENSE. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 1 ago. 2017.
- QUIRING, S. M. Monitoring Drought: An Evaluation of Meteorological Drought Indices. **Geography Compass**, v. 3, n. 1, p. 64–88, 2009.
- RATTIS, L. et al. Climatic limit for agriculture in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 12, p. 1098–1104, dez. 2021.
- REIS, J. A. V. DOS et al. Training Sources and Preferences for Agricultural Producers and Professionals in Middle-North Mato Grosso, Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 4712, jan. 2023.
- RISARO, D. B.; CHIDICHIMO, M. P.; PIOLA, A. R. Interannual Variability and Trends of Sea Surface Temperature Around Southern South America. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, 2022.
- RODRIGUES, A.; SARDINHA, R. A.; PITA, G. **Fundamental Principles of Environmental Physics**. [s.l.] Springer Nature, 2021.
- ROLAND B. STULL. **Practical Meteorology An Algebra-based Survey of Atmospheric Science - version 1.02b. isbn 978-0-88865-283-6**. Disponível em: <https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/>. Acesso em: 4 jan. 2024.
- SAMIMI, M. et al. Adapting irrigated agriculture in the Middle Rio Grande to a warm-dry future. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 45, p. 101307, 1 fev. 2023.
- SERRANO, V.; M, S. **A global dataset of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) for drought analysis and monitoring**. , 1 fev. 2018. Disponível em: <<https://digital.csic.es/handle/10261/160091>>. Acesso em: 29 maio. 2023
- SHEKHAR, A.; SHAPIRO, C. A. What do meteorological indices tell us about a long-term tillage study? **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 161–170, 1 out. 2019.
- SILVA, R. M. DA; LOPES, A. G.; SANTOS, C. A. G. Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116664, 15 jan. 2023.
- SOLH, M.; VAN GINKEL, M. Drought preparedness and drought mitigation in the developing world's drylands. **Weather and Climate Extremes**, High Level Meeting on National Drought Policy. v. 3, p. 62–66, 1 jun. 2014.

SOUZA, A. P. et al. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NO ESTADO DE MATO GROSSO. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 15 nov. 2013.

SOUZA, C. A. DE; REBOITA, M. S. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terrae Didactica**, v. 17, p. e021009–e021009, 28 fev. 2021.

THIELEN, D. et al. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PLOS ONE**, v. 15, n. 1, p. e0227437, 7 jan. 2020.

THORNTON, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

TOMASELLA, J. et al. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 2173–2190, 1 mar. 2023.

V. YEVJEVICH. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. VUJICA YEVJEVICH: Fort Collins, Colorado State University, 1967, 19 p. (Hydrology paper no. 23). **Journal of Hydrology**, v. 7, p. 353–353, 1 jan. 1969.

VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. **WIREs Water**, v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.

VERA, C. et al. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 4977–5000, 15 out. 2006.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 1 abr. 2010.

WANG, H. et al. Land cover change in global drylands: A review. **Science of The Total Environment**, v. 863, p. 160943, 10 mar. 2023.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **WATER INTERNATIONAL**, p. 17, 1985.

WILHITE, D.; SVOBODA, M.; HAYES, M. Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness. **Water Resources Management**, v. 21, p. 763–774, 1 maio 2007.

WLOSTOWSKI, A. N. et al. Dry landscapes and parched economies: A review of how drought impacts nonagricultural socioeconomic sectors in the US Intermountain West. **WIREs Water**, v. 9, n. 1, p. e1571, 2022.

WU, C.-R. Interannual modulation of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific. **Progress in Oceanography**, v. 110, p. 49–58, 1 mar. 2013.

WU, D. et al. Historical agricultural drought patterns and drought-related factors over western China. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 7, p. 1016–1032, 19 maio 2023.

WU, R. et al. Run Theory and Copula-Based Drought Risk Analysis for Songnen Grassland in Northeastern China. **Sustainability**, v. 11, n. 21, p. 6032, jan. 2019.

XU, J. et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? A comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China. **Journal of Hydrology**, v. 605, p. 127353, 1 fev. 2022.

YAN, H. et al. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2,000 years from precipitation proxies. **Nature Geoscience**, v. 4, n. 9, p. 611–614, set. 2011.

ZHOU, X.; LANG, X.; JIANG, D. Teleconnections between the Atlantic Multidecadal Oscillation and eastern China summer precipitation during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age. **The Holocene**, v. 30, n. 12, p. 1694–1705, 1 dez. 2020.