

Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas

**Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA**

GABRIELA SOARES PEREIRA

**APLICAÇÃO DO ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO (SPI) E DE
VAZÃO (SSI) PARA ANÁLISE DE EVENTOS DE SECA NA BACIA DO RIO
SUAÇUÍ GRANDE/MG**

Área de concentração:
Regulação e Governança de Recursos Hídricos

Projeto de Pesquisa vinculado a Linha:
Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

Orientadora: Ana Carolina Vasques Freitas
Coorientador: Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor

Itabira, MG

2022

Gabriela Soares Pereira

**APLICAÇÃO DO ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO (SPI) E DE
VAZÃO (SSI) PARA ANÁLISE DE EVENTOS DE SECA NA BACIA DO RIO
SUAÇUÍ GRANDE/MG**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) na Universidade Federal de Itajubá.

Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

APROVADA EM 12 DE JULHO DE 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Ana Carolina Vasques Freitas
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dr. Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dr. Fernando Neves Lima
Instituto de Engenharias Integradas – UNIFEI

Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN

Itabira, MG
2022

DEDICATÓRIA

A meus pais, com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todos os meus caminhos percorridos para chegar até aqui. Acredito que tudo aconteceu como deveria ser e sob os cuidados Dele.

A meus pais, José Carlos e Nilza, agradeço imensamente por todo o apoio que sempre me deram nos meus estudos. A eles e a minha irmã, Camilla, agradeço também pela presença, amor, confiança e incentivo. Ao João, meu amor, pelo companheirismo, paciência e pelos momentos de leveza e recarga de energias, importantes para que eu pudesse continuar nessa caminhada.

A minha orientadora, Prof. Dra. Ana Carolina Vasques, e ao meu co-orientador, Roberto Monte-Mor, por toda orientação, dedicação, paciência, incentivo, confiança, pelos ensinamentos valiosos, dentre tantas outras formas de suporte para a realização desta pesquisa. Obrigada!

A todos os docentes do Profágua, que me transmitiram seus ensinamentos e contribuíram para o meu crescimento acadêmico.

Aos meus amigos da turma do mestrado de 2019, com os quais obtive e compartilhei apoios e momentos especiais durante esses últimos anos.

Aos meus amigos da vida e meus demais familiares por compreenderem as minhas ausências e por continuarem me incentivando a concluir mais essa etapa.

Ao meu trabalho, por me permitir conciliar e desenvolver vida profissional e acadêmica.

A presente pesquisa foi realizada com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

“O simples bater de asas de uma borboleta no Brasil pode ocasionar um tornado no Texas.”

Edward Lorenz, 1969.

RESUMO

Pereira, Gabriela Soares. **Aplicação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e de Vazão (SSI) para análise de eventos de seca na bacia do rio Suaçuí Grande/MG.** 2022. 144 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2022.

A água doce é essencial em todos os aspectos da vida e do desenvolvimento sustentável; contudo, a pressão sobre os recursos hídricos vem se intensificando e as mudanças climáticas têm provocado alterações na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, tais como inundações e secas. A bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande, objeto deste estudo, é uma bacia localizada no estado de Minas Gerais com área aproximadamente de 12.413 km² e tem enfrentado situações críticas de escassez hídrica. Visando estudar a situação atual de seca na região, foram analisados dois índices: o Índice Padronizado de Vazão (SSI) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), utilizando-se dados observados de vazão e precipitação de estações fluviométricas e pluviométricas, respectivamente, para o período de janeiro de 1985 a dezembro de 2019. Para estudar as projeções futuras foi analisado o SPI, para o cenário RCP8.5, por meio de dados simulados de precipitação do modelo climático regionalizado Eta-HadGEM2-ES, para o período de 2025 a 2055. Foram realizadas análises da duração, severidade, intensidade e frequência dos eventos de seca. Mapas da frequência dos eventos de seca também foram elaborados para contribuir com a análise espacial. Além disso, foi realizada uma avaliação da correlação existente entre o SSI e o SPI. A partir das análises, foi possível identificar que, a partir de meados de 2010, passam a ocorrer eventos de seca mais prolongados, frequentes e intensos na bacia do rio Suaçuí Grande, sendo que, a partir de meados de 2015, esses eventos de seca são mais perceptíveis, apresentando, maiores durações ou recorrências. Estações pluviométricas localizadas em municípios com altitudes mais elevadas apresentaram valores negativos de SPI-12 menos intensos desde 2010. Por meio do SSI-12 pode-se verificar a ocorrência de eventos de seca ainda mais intensos do que os identificados por meio do SPI-12, especialmente a partir de 2015 até o final da série histórica. Observou-se que as correlações entre o SPI e o SSI aumentam gradativamente de acordo com a escala temporal, indicando, possivelmente, que as alterações no regime de precipitação impactam fortemente a disponibilidade hídrica nos cursos d'água e reservatórios da bacia. Quando se avalia os eventos de seca históricos simulados a partir do modelo ETA-HadGEM2-ES, verifica-se que o modelo identifica os eventos mais intensos e duradouros iniciados a partir de meados de 2010, embora superestime os mesmos e apresente dificuldade em diferenciar as estações localizadas em altitudes mais elevadas. Com relação a projeção de seca futura, o modelo identifica que a predominância de eventos de seca iniciada a partir de 2010 se estenderá até 2028. Com relação à frequência de eventos de secas extremas e excepcionais, verificou-se que estes aumentam nas estações de Malacacheta, São João Evangelista e Rio Vermelho, sendo que esta última é a estação que apresenta as maiores frequências para esses eventos, tanto na série de dados observados, quanto para as projeções futuras. Em relação as secas excepcionais, estas serão mais frequentes no futuro em quase toda a bacia (87,5% das estações), em especial nas porções sudeste e sudoeste, com exceção de Água Boa.

Palavras-chave: Eta-HadGEM2-ES, mudanças climáticas, eventos extremos.

ABSTRACT

Pereira, Gabriela Soares. **Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Streamflow Index (SSI) for the analysis of drought events in the Suaçuí Grande river basin/MG.** 2022. 144 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2022.

Fresh water is essential in all aspects of life and sustainable development; however, pressure on water resources has intensified and climate change has caused changes in the frequency and intensity of extreme weather events, such as floods and droughts. The Suaçuí Grande river basin, object of this study, is located in Minas Gerais state, having approximately 12,413 km² and facing critical situations of water scarcity. In order to study the current drought situation in the region, two indices were analyzed: the Standardized Streamflow Index (SSI) and the Standardized Precipitation Index (SPI), using observed flow and precipitation data from fluvimetric and pluviometric stations, respectively, for the period from January 1985 to December 2019. To study the future projections, the SPI was analyzed, for the RCP8.5 scenario, through simulated precipitation data from the regionalized climate model Eta-HadGEM2-ES, for the period from 2025 to 2055. Analysis of duration, severity, intensity and frequency of drought events were carried out. Maps of the drought events frequency were also prepared to contribute to the spatial analysis. In addition, an assessment of the existing correlation between the SSI and the SPI was performed. From the analyses, it was possible to identify that, from mid-2010, more prolonged, frequent and intense drought events began to occur in the Suaçuí Grande river basin, and, from mid-2015, these drought events are more noticeable, presenting longer durations or recurrences. Rainfall stations located in municipalities with higher altitudes showed lesser intense negative values of SPI-12 since 2010. Through the SSI-12 it is possible to verify the occurrence of drought events even more intense than those identified through the SPI-12, especially from 2015 until the end of the historical series. It was observed that the correlations between the SPI and the SSI gradually increase according to the time scale, possibly indicating that changes in the rainfall regime strongly impact water availability in watercourses and reservoirs of the basin. When the historical drought events, simulated using the ETA-HadGEM2-ES model, are evaluated, it appears that the model identifies the most intense and lasting events that started in mid-2010, although it overestimates them and have difficulty to distinguish the stations located at higher altitudes. Regarding the projection of future drought, the model identifies that the predominance of drought events, that started from 2010, will extend until 2028. Regarding the frequency of extreme and exceptional drought events, it was found that these increase in the Malacacheta, São João Evangelista and Rio Vermelho stations, with the latter presenting the highest frequencies for these events, both in the observed dataset and for future projections. Regarding exceptional droughts, these will be more frequent in the future in almost the entire basin (87.5% of the seasons), especially in the southeast and southwest portions, with the exception of Água Boa.

Keywords: Eta-HadGEM2-ES, climate change, extreme events.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propagação da seca na era do Antropoceno. Fatores climáticos em amarelo e fatores humanos em marrom.	26
Figura 2 - Fluxograma das etapas de cálculo do SPI.	35
Figura 3 - Representação esquemática do cálculo do SPI.	35
Figura 4 - Distribuição normal com o SPI tendo uma média de 0 e uma variância de 1.	39
Figura 5 - Fluxograma de atividades desta pesquisa.	43
Figura 6 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande.	44
Figura 7 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande.	46
Figura 8 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande com a indicação das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste trabalho.	48
Figura 9 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande com hipsometria e indicação das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste trabalho.	49
Figura 10 – Representação da duração, intensidade e severidade dos eventos de seca.	55
Figura 11 – Gráfico da média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção para o município de Mathias Lobato.	61
Figura 12 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção, para o município de Mathias Lobato.	62
Figura 13 – Gráficos de SPI-12 gerados para os dados observados (1985 a 2019) para cada estação pluviométrica utilizada neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.	64
Figura 14 - Gráficos de SPI-12 gerados para os dados simulados do PRESENTE (1985 a 2019), do modelo Eta-HadGEM2-ES, para cada um dos municípios das estações pluviométricas utilizadas neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.	69
Figura 15 - Gráficos de SPI-12 gerados para os dados simulados do FUTURO (2025 a 2055), do modelo Eta-HadGEM2-ES, para cada um dos municípios das estações pluviométricas utilizadas neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.	70
Figura 16 – Mapa de frequência da seca na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.	74
Figura 17 - Mapa de frequência da seca na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.....	75
Figura 18 - Mapa de frequência de seca extrema na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.	77
Figura 19 - Mapa de frequência de seca extrema na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.....	78
Figura 20 - Mapa de frequência de seca excepcional na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.	79
Figura 21 - Mapa de frequência de seca excepcional na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.....	80
Figura 22 – Frequência relativa das categorias de seca para P01-Mathias Lobato tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	81
Figura 23 – Frequência relativa das categorias de seca para P02-Campanário tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.	82
Figura 24 – Frequência relativa das categorias de seca para P03-São Pedro do Suaçuí tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.	82

Figura 25 – Frequência relativa das categorias de seca para P04-Santa Maria do Suaçuí tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	83
Figura 26 – Frequência relativa das categorias de seca para P05-Água Boa tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	83
Figura 27 – Frequência relativa das categorias de seca para P06-Malacacheta tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	84
Figura 28 – Frequência relativa das categorias de seca para P07-Rio Vermelho tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	84
Figura 29 – Frequência relativa das categorias de seca para P08-São João Evangelista tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.....	85
Figura 30 – Gráficos de SSI-12 gerados para dados de estações fluviométricas indicadas no mapa hipsométrico da bacia do rio Suaçuí Grande.....	86
Figura 31 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Mathias Lobato.....	89
Figura 32 – Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Mathias Lobato.....	105
Figura 33 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Campanário.	105
Figura 34 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São Pedro do Suaçuí.....	106
Figura 35 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Santa Maria do Suaçuí.....	106
Figura 36 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Água Boa.....	107
Figura 37 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Malacacheta.....	107
Figura 38 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Rio Vermelho.	108
Figura 39 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São João Evangelista.	108
Figura 40 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Mathias Lobato.	109
Figura 41 – Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Campanário.	109
Figura 42 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São Pedro do Suaçuí.....	110
Figura 43 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Santa Maria do Suaçuí.....	110
Figura 44 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Água Boa.....	111
Figura 45 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Malacacheta.	111
Figura 46 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Rio Vermelho.	112
Figura 47 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São João Evangelista.	112

Figura 48 – Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.	113
Figura 49 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.	113
Figura 50 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.	114
Figura 51 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.	114
Figura 52 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.	115
Figura 53 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.	115
Figura 54 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.	116
Figura 55 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.	116
Figura 56 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.	117
Figura 57 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.	117
Figura 58 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.	118
Figura 59 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.	118
Figura 60 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.	119
Figura 61 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.	119
Figura 62 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.	120
Figura 63 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.	120
Figura 64 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.	121
Figura 65 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.	121
Figura 66 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.	122
Figura 67 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.	122
Figura 68 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.	123
Figura 69 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.	123
Figura 70 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.	124
Figura 71 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.	124
Figura 72 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.	125
Figura 73 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.	125
Figura 74 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.	126
Figura 75 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.	126

Figura 76 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.....	127
Figura 77 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.....	127
Figura 78 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.....	128
Figura 79 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.....	128
Figura 80 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.....	129
Figura 81 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.....	129
Figura 82 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P02-Campanário.....	130
Figura 83 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P02-Campanário.....	130
Figura 84 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.....	131
Figura 85 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.....	131
Figura 86 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.....	132
Figura 87 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.....	132
Figura 88 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P05-Água Boa.....	133
Figura 89 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P05-Água Boa.....	133
Figura 90 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P06-Malacacheta.....	134
Figura 91 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P06-Malacacheta.....	134
Figura 92 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P07-Rio Vermelho	135
Figura 93 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P07-Rio Vermelho	135
Figura 94 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P08-São João Evangelista	136
Figura 95 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P08-São João Evangelista	136
Figura 96 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.....	137
Figura 97 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.....	137
Figura 98 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.....	138

Figura 99 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.....	138
Figura 100 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.....	139
Figura 101 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.....	139
Figura 102 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.....	140
Figura 103 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.....	140
Figura 104 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.....	141
Figura 105 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.....	141
Figura 106 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.....	142
Figura 107 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.....	142
Figura 108 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Mathias Lobato.....	143
Figura 109 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de São Pedro do Suaçuí.....	143
Figura 110 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Santa Maria do Suaçuí.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de seca do SPI, com base no U.S. Drought Monitor.....	31
Tabela 2 – Estações pluviométricas e fluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.....	47
Tabela 3 - Série de dados mensais e falhas identificadas nas estações pluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.....	58
Tabela 4 – Ordem e estações utilizadas para a realização do preenchimento de falhas por regressão linear simples nas estações pluviométricas deste estudo.....	59
Tabela 5 - Série de dados diários e falhas identificadas nas estações fluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.....	60
Tabela 6 – Intervalo de classificação dos resultados para o PBias.....	62
Tabela 7 – REQM, PBias e sua classificação antes e após a correção do viés para os dados simulados.....	63
Tabela 8 –Intensidade, duração, severidade e frequência de seca na escala de SPI-12 para os dados observados.....	65
Tabela 9 - Intensidade, duração, severidade e frequência de seca na escala de SPI-12 para os dados simulados para o futuro.....	72
Tabela 10 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca na bacia do rio Suaçuí Grande.	73
Tabela 11 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca extrema na bacia do rio Suaçuí Grande.....	76
Tabela 12 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca excepcional na bacia do rio Suaçuí Grande.....	81
Tabela 13 – Valores da correlação entre os índices SSI e SPI nas escalas 1, 3, 6, 12 e 24 meses, para os três municípios com estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Suaçuí Grande.....	88

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	OBJETIVO GERAL	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1.	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS	20
3.2.	DEFINIÇÕES DE SECA.....	24
3.2.1.	Seca meteorológica	25
3.2.2.	Seca agrícola	27
3.2.3.	Seca hidrológica	27
3.2.4.	Seca socioeconômica.....	28
3.3.	ÍNDICES DE SECA.....	29
3.3.1.	Índice Padronizado de Precipitação (<i>Standardized Precipitation Index - SPI</i>).....	30
3.3.2.	Índice Padronizado de Vazão (<i>Standardized Streamflow Index - SSI</i>)	39
3.4.	MONITORAMENTO DA SECA	40
4.	METODOLOGIA	43
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
4.2.	COLETA E ANÁLISE DOS DADOS.....	45
4.2.1.	Dados observados.....	47
4.2.2.	Dados simulados	50
4.3.	ANÁLISES DE SECA	52
4.3.1.	SPI.....	53
4.3.2.	SSI.....	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1.	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA E VERIFICAÇÃO DOS DADOS	57
5.1.1.	Dados observados.....	57
5.1.2.	Dados simulados	60
5.2.	SPI DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (DADOS OBSERVADOS)	63
5.3.	SPI DO MODELO Eta/HadGEM2-ES (DADOS SIMULADOS - PRESENTE E FUTURO)	68
5.4.	SSI DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	85
5.5.	ANÁLISE VAZÃO VERSUS PRECIPITAÇÃO	87
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90

REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A – Média mensal (mm) de dados observados, modelo sem correção e modelo corrigido	105
APÊNDICE B – Desvio padrão de dados observados, modelo sem correção e modelo corrigido.....	109
APÊNDICE C – SPI 1, 3, 6 e 12 para os dados observados das estações pluviométricas	113
APENDICE D – SPI 12 para o modelo ETA/HADGEM2-ES (presente e futuro).....	129
APÊNDICE E – SSI 1, 3, 6 e 12 para os dados observados das estações fluviométricas	137
APÊNDICE F – Comportamento de SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de SSI-12 sobrepondo SPI-12 para as estações fluviométricas e pluviométricas	143

1. INTRODUÇÃO

A água é a substância mais importante para a vida, mas, apesar de abundante na Terra, segundo a UNESCO (2003), apenas 2,53% dela corresponde a água doce, ao passo que o restante, 97,47%, consiste em água salgada. Para a mesma agência, além de a água doce corresponder a uma pequena parcela do total, cerca de dois terços dela se encontram em geleiras e coberturas permanentes de neve, restando então, somente 0,84% do total como água doce disponível, a qual ainda se distribui de forma desigual pelas regiões do planeta.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Água e Saneamento (*United Nations Water - UN-WATER*, 2018), a água doce, em quantidade e qualidade suficientes, é essencial em todos os aspectos da vida e do desenvolvimento sustentável. Ainda segundo essa organização, a Terra já perdeu 70% de suas zonas úmidas naturais ao longo do último século e, em consequência, também perdeu significativamente a fauna e flora dos ecossistemas de água doce. Portanto, se o ambiente natural continuar sendo degradado e se mantiverem as pressões sobre os recursos hídricos mundiais, 45% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial e 52% da população de todo o mundo estarão em risco até 2050 (UN-WATER, 2018).

A incerteza climática é uma das maiores ameaças na gestão contemporânea dos recursos hídricos (SARAVI *et al.*, 2009). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC*, 2018b), as mudanças climáticas podem ocorrer devido a processos internos naturais ou forças externas, tais como variações nos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra.

Segundo Nobre *et al.* (2011), os impactos associados às mudanças climáticas serão sentidos em todo o mundo e, provavelmente, terão implicações profundas para a população humana. Segundo o último relatório de avaliação do IPCC (2022), consistente com as projeções anteriormente realizadas, mudanças múltiplas e simultâneas nos processos físicos associados ao sistema climático tornaram-se mais acentuadas, incluindo aumento da temperatura média global, perda de volume de gelo, aumento do nível do mar e mudanças nos padrões globais de precipitação. Estas mudanças resultaram em eventos extremos mais intensos, afetando negativamente os sistemas naturais e humanos em todo o mundo, contribuindo para a perda e degradação de ecossistemas, incluindo recifes de corais tropicais; redução da segurança hídrica e alimentar; aumento dos danos à infraestrutura; mortalidade e morbidade adicionais; migração

e deslocamento humano; meios de subsistência danificados; aumento dos problemas de saúde mental; e aumento da desigualdade.

Para a UN-Water (2018), os efeitos das mudanças climáticas serão notados, em sua maioria, nas alterações do ciclo hidrológico, que afetarão a disponibilidade global de água, a qualidade da água, e influenciarão na alteração da intensidade e frequência de eventos climáticos extremos, tais como as inundações e as secas.

Enquanto as inundações são imediatas e perceptíveis, as secas são fenômenos insidiosos que, de acordo com Abel *et al.* (2019), podem colaborar com a escassez hídrica, gerando dificuldades no acesso à água, afetando a agricultura, o abastecimento, intensificando a pobreza, culminando em conflitos pelo uso da água, e estimulando deslocamentos e migrações que podem, então, agravar ainda mais as pressões sobre recursos hídricos de outras localidades ou causar outros tipos de problemas sociais e econômicos.

Segundo Gardner (2009), qualquer diminuição no escoamento, por consequência das mudanças climáticas, associadas a episódios de seca, ameaçará o abastecimento de água superficial, os habitats ao longo de cursos d'água e também poderá alterar processos geomórficos fluviais, impactar na diminuição da umidade do solo e, dessa forma, trazer implicações adversas.

De acordo com o IPCC (2022), os riscos para a América do Sul, especificamente, diante dos níveis crescentes de aquecimento global, são: risco para a segurança hídrica; efeitos graves para a saúde devido a epidemias crescentes, em particular doenças transmitidas por vetores; degradação dos ecossistemas dos recifes de corais devido ao processo branqueamento; risco para a segurança alimentar devido a secas frequentes/extremas; danos à vida e infraestrutura devido a inundações, deslizamentos de terra, elevação do nível do mar, tempestades e erosão costeira.

A bacia do rio Suaçuí Grande, objeto de estudo desta dissertação, está localizada na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce e ao longo dos últimos anos, registros de eventos de seca e estiagem têm sido contabilizados em municípios da bacia, por meio do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC). Baixas vazões em determinados períodos, medidas por uma estação fluviométrica da região, motivaram a publicação, pelo Instituto Mineiro de Recursos Hídricos (IGAM, 2018, 2019 e 2021), de algumas deliberações normativas declarando situação crítica de escassez hídrica superficial.

Além disso, com base em divulgação da Agência Minas (2021), cinco dos 29 municípios da bacia do rio Suaçuí Grande já integravam a área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene)¹ e, em 2021, todos os demais passaram a integrá-la. Essa inclusão permite aos municípios afetados pelas condições geográficas e climáticas, mais oportunidades de recursos para obras de infraestrutura, os quais antes não eram disponibilizados, além de maior facilidade de atrair empresas.

Devido a essas evidências que vêm sendo observadas, este trabalho propõe avaliar a ocorrência de alterações nos padrões de precipitação e alterações nos padrões de vazão na bacia do rio Suaçuí Grande em um cenário de aquecimento global, de modo a identificar áreas prioritárias para atuação, em curto e médio prazo, visando orientar ações preventivas e mitigatórias desses eventos adversos. Dessa forma, os resultados deste estudo poderão subsidiar a tomada de decisão dos comitês da bacia, prefeituras municipais, e outros atores interessados na busca pela garantia, especialmente, da segurança hídrica para a região.

Pelo disposto, este trabalho é aderente à área de concentração “Regulação e Governança de Recursos Hídricos”, por contribuir na tomada de decisão de atores que atuam na gestão dos recursos hídricos da bacia, e também está em concordância com a linha de pesquisa “Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água”, pois, a partir de seus resultados, será possível identificar a ocorrência atual e futura de eventos de seca que podem comprometer a segurança hídrica para as populações que vivem na bacia, para a conservação dos ecossistemas e para as necessidades econômicas.

¹ A Sudene, criada em 1959, com sede em Recife, era uma autarquia diretamente subordinada à Presidência da República com a missão de combater o quadro de seca, desemprego, êxodo rural e domínio oligárquico na região nordeste. Com a ditadura militar, a Sudene foi mantida, mas sob forte intervenção da máquina burocrática estatal e o órgão perdeu a ligação direta com a presidência da República, passando a se vincular a uma secretaria do Ministério do Planejamento. Já na redemocratização do país, sucumbiram à corrupção. Em 2001, foi substituída por uma estrutura mais enxuta, na forma de Agência de Desenvolvimento. (Câmara dos deputados, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e de Vazão (SSI) para análise de eventos de seca na bacia do rio Suaçuí Grande/MG, de modo a identificar áreas prioritárias para ações de mitigação em curto e médio prazo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Aplicar o Índice Padronizado de Precipitação – SPI e o Índice Padronizado de Vazão – SSI para avaliar a ocorrência de secas históricas;
- b) Aplicar o Índice Padronizado de Precipitação – SPI em um cenário futuro a partir do modelo regionalizado ETA-HadGEM2-ES para avaliar a projeção de ocorrência de secas futuras;
- c) Analisar a intensidade, severidade, duração e frequência das secas históricas e projetadas pelo modelo;
- d) Avaliar a correlação entre os dois índices (SPI e SSI) de modo a verificar se a alteração nos padrões de precipitação influencia nos padrões de vazão;
- e) Elaborar mapas de ocorrência e intensidade de seca para auxiliar na identificação de áreas prioritárias para atuação na bacia, visando orientar ações preventivas e mitigatórias desses eventos adversos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS

De acordo com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2019), desde a década de 1880 a temperatura média da superfície global aumentou cerca de 1 °C e as temperaturas médias nos anos de 2015 a 2018 foram as mais altas, sendo que em 2018 observou-se temperaturas de 0,83 °C mais altas do que a média para o período de 1951 a 1980. Conforme Berlato e Cordeiro (2017), o aumento da temperatura média global e as mudanças na frequência de eventos extremos são indicadores de que estão ocorrendo alterações climáticas no planeta.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018b), a mudança climática refere-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, usando testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persiste por um longo período, geralmente décadas ou mais.

Ainda segundo o painel (IPCC, 2018a), a intensidade e frequência de alguns eventos extremos de clima e tempo vem passando por alterações ao longo dos anos, associado ao aumento na temperatura média global anual observado em muitas regiões, bem como seus impactos sobre os sistemas natural e humano.

Corroborando com isso, a UN-Water (2018) diz que os efeitos das mudanças climáticas, serão notados, em sua maioria, nas alterações no ciclo hidrológico, e então, afetarão a disponibilidade global e a qualidade da água e influenciarão a ocorrência dos eventos climáticos extremos (como inundações e secas).

De um modo geral, eventos extremos são ocorrências que impedem o funcionamento normal de um sistema (BROSKA *et al.*, 2020). No caso do sistema climático, autores conceituam eventos extremos de seca e de chuva, sendo o primeiro caracterizado pela ocorrência de precipitação abaixo da média por um longo período de tempo (EMBRAPA, 2021), enquanto o segundo se caracteriza pela ocorrência de precipitação intensa em um curto período de tempo ou ininterrupta por vários dias consecutivos (REIS *et al.*, 2018).

De acordo com o IPCC (2018b), um evento climático extremo é um evento raro em um determinado local e época do ano. Um evento raro é determinado por meio da análise da

distribuição estatística de uma determinada variável meteorológica de interesse. O IPCC (2018b) também define impacto, risco e desastre como:

- Impacto: efeitos da mudança do clima sobre os sistemas humanos e naturais, sendo que podem ter resultados benéficos ou adversos para os meios de subsistência, saúde e bem-estar, ecossistemas e espécies, serviços, infraestrutura e ativos econômicos, sociais e culturais;
- Risco: potencial de consequências adversas de um perigo relacionado ao clima para os sistemas humano e natural, resultante de interações entre esse perigo, vulnerabilidade e exposição do sistema afetado. O risco integra a probabilidade de exposição ao perigo e a severidade de seu impacto e também pode descrever o potencial de consequências adversas das respostas de adaptação ou mitigação à mudança do clima;
- Desastre: alterações graves no funcionamento normal de uma comunidade ou sociedade devido a eventos físicos perigosos que interagem com condições sociais vulneráveis, levando a efeitos humanos, materiais, econômicos ou ambientais adversos generalizados que exigem resposta de emergência imediata para satisfazer necessidades humanas críticas e que podem exigir suporte para recuperação.

De acordo com a *American Meteorological Society* (AMS, 2013), a seca, objeto de estudo desta dissertação, é o tipo de desastre climático de maior alcance a cada ano. O relatório “*The Human Cost of Disasters 2000-2019*”, elaborado pela *United Nations Office for Disaster Risk Reduction – UNDRR* (ESCRITÓRIO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A REDUÇÃO DO RISCO DE DESASTRES, 2021), aponta que houve um aumento acentuado nos registros de desastres no período de 2000-2019 em comparação com os 20 anos anteriores (1980-1999), sendo que as inundações são o tipo desastre mais prevalente no mundo, atingindo 1,65 bilhões de pessoas, enquanto as secas ocupam o segundo lugar neste ranking, atingindo 1,43 bilhões.

O relatório ainda aponta que, no mundo, durante o período de 2000 a 2019, foram perdidos 128 bilhões de dólares devido à ocorrência de eventos de secas. Mesmo estando em 4º lugar na lista de desastres com maiores perdas econômicas, estes eventos correspondem a um valor expressivo.

Estudos tem demonstrado que os eventos climáticos extremos estão ficando mais frequentes e intensos. De acordo com Zúñiga-Bello (2007), foram registrados 27 eventos extremos no México, dentre eles furações, secas e inundações, entre 1980 e 2003 (23 anos), dos quais 55%

aconteceram nos últimos 5 anos do período de análise. Spinoni *et al.* (2013) encontraram que a seca na Europa apresentou frequência, intensidade e duração crescentes nas últimas décadas do período de 1961 a 2010.

Conforme Cunha *et al.* (2019), em relação a eventos extremos de seca, é provável que a severidade desses aumente na África Austral, Estados Unidos, Sul da Europa, Brasil e Sudeste Asiático, entre outras áreas, devido ao aumento da evapotranspiração e à diminuição da precipitação. Maiores detalhes sobre os eventos extremos no Brasil, serão descritos a seguir.

Eventos extremos no Brasil

Segundo o IPCC (2018a), os maiores impactos dos eventos extremos ocorrerão em setores mais intimamente relacionados com as questões climáticas, tais como os recursos hídricos, agricultura e segurança alimentar², silvicultura, saúde e turismo. Um exemplo disso é o impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil, onde, a partir de simulações feitas considerando um horizonte de 100 anos, Assad *et al.* (2004) chegaram ao resultado de que, no caso de um aumento na temperatura global de 1°C, a área total inapta de café (mais especificamente da espécie *Coffea Arábica*) aumentaria nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, mesmo com incremento de 15% na precipitação pluvial. Mais especificamente em Minas Gerais, a área inapta para a cultura passaria de 24,1% para 43,3%. Num cenário mais pessimista, com um aumento na temperatura de 5,8°C e incremento de 15% na precipitação pluvial, seria possível o cultivo desta espécie em apenas 2,6% da área, ao sul do estado de Minas Gerais, concentrados em regiões montanhosas e de difícil manejo, inviabilizando a produção de café.

De modo complementar, Reboita *et al.* (2018) encontraram, para o estado de Minas Gerais como um todo, uma tendência de aumento de chuvas no verão e uma redução no inverno, enquanto, para a temperatura média do ar, o aumento no estado pode chegar até 5°C no período de 2070-2095.

O Banco Mundial (2015b), a partir de dados do IBGE de 2015, avaliou que, devido aos eventos extremos, tanto de seca quanto de chuva, ocorre uma perda anual, associada ao setor agrícola, de aproximadamente R\$ 11 bilhões (1% do PIB agrícola). Adicionalmente, os autores do estudo encontraram que, nos anos em que ocorreram as maiores perdas, estas se relacionaram

² Segurança alimentar: é quando todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos que atendam às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável (World Food Summit, 1996).

principalmente a eventos de secas, como no caso de 2004 a 2006 no Sul e Sudeste, e em 2012 a 2013 no Nordeste.

Segundo Coelho *et al.* (2015), os verões de 2001 e 2014 foram marcados por importantes eventos de seca no sudeste do Brasil, e seus impactos afetaram os recursos hídricos, a produção de alimentos e a geração de energia na região mais populosa do país.

O estudo de Cunha *et al.* (2019) avaliou o período de 2011 a 2019 no Brasil e foram observados eventos de seca em todo o país, sendo os mais severos distribuídos entre os anos de 2011 e 2017, e tendo o ano hidrológico 2014/15, na maior parte do país, se destacando pela maior ocorrência de secas severas e moderadas.

No Brasil, diferente do que prevalece no mundo, de acordo com ANA (2020c), as secas são a tipologia de desastre que atinge o maior número de pessoas, a exemplo de 2018, onde 43,32 milhões foram afetadas. Pelas cheias, no mesmo ano, foram afetadas 1,4 milhão de pessoas.

De acordo com o CEPED-UFSC (2013a), no decorrer do período entre 1991 a 2012 ocorreram 19.517 registros oficiais de estiagem e seca no Brasil, sendo 2.219 no estado de Minas Gerais. Quanto aos resultados desses eventos em Minas CEPED-UFSC (2013b), também foi registrado um total de 4.260.410 afetados, 2.168 desalojados, 125 feridos, 12.833 enfermos, 1.822 desabrigados, 75 óbitos e 15.786 pessoas afetadas por outros tipos de danos nesses 22 anos analisados.

A bacia do rio Doce localiza-se nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e em sua porção mineira se encontra a área de estudo desta dissertação, a sub-bacia do rio Suaçuí Grande. Lima (2016) e Lima *et al.* (2019) calcularam índices de seca anualmente nas Unidades de Análise (UA) da bacia do rio Doce e identificaram que as secas ficaram mais intensas nos últimos 15 anos (2000-2015) da série histórica analisada (1985-2015), sendo que os anos hidrológicos³ mais críticos foram 1994/95, 2000/01 e 2014/15, dos quais este último foi o mais crítico de todos. Os autores verificaram ainda que a bacia do rio Doce apresenta uma condição climática severa de seca, em média, a cada sete anos.

Adicionalmente, Jesus *et al.* (2020) analisaram dados de 71 estações pluviométricas e uma estação de vazão da bacia do rio Doce com séries históricas mensais de 30 anos (1987 a 2017), e identificaram que os anos hidrológicos de 1994/95, 2000/01 e 2013/17 foram os que

³ Ano hidrológico: período de 12 meses começando no início da estação chuvosa, até o fim da estação seca seguinte (ANA, 2015). O ano hidrológico pode ter início numa data diferente do ano civil e depende da região.

apresentaram as secas meteorológicas mais severas, enquanto as secas hidrológicas foram observadas nos anos de 1994/95, 2000/01, 2015/16 e 2016/17. Esses tipos de seca serão abordados na sequência.

3.2. DEFINIÇÕES DE SECA

Os eventos extremos de seca podem ser classificados como desastres naturais climatológicos, conforme o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, elaborado pelo Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED-UFSC, 2013a), baseando-se na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE).

A seca, segundo a AMS (2013), se trata de uma característica temporária natural do ciclo climático, sendo o resultado de uma interação complexa entre: (i) deficiências naturais de precipitação, ou evapotranspiração excessiva ao longo de vários períodos de tempo e diferentes extensões de área; e (ii) demandas de água para uso humano e ambiental, que podem ser acentuadas por ineficiências na distribuição, planejamento e gestão. Para o IPCC (2018b), seca é um período de tempo anormalmente seco, longo o suficiente para causar um sério desequilíbrio hidrológico, sendo um termo relativo; portanto, qualquer discussão em termos de déficit de precipitação deve se referir à atividade específica relacionada à precipitação que está em discussão; por exemplo, quando afeta a produção agrícola ou o abastecimento público.

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020b), os períodos de escassez são intensificados pelas alterações no ciclo da água decorrentes das mudanças climáticas ou do aumento de demandas e, apesar de estarem em curso várias ações para melhor gestão dos recursos hídricos, a ocorrência desses eventos ainda é um enorme desafio para os gestores.

A UN-Water (2018) considera as secas como fenômenos insidiosos, similares a doenças que se iniciam silenciosamente, enquanto as inundações são consideradas fenômenos mais midiáticos, por serem imediatas e visíveis.

Segundo Wilhite e Glantz (1985), existiam divergências consideráveis sobre o conceito de seca; por exemplo, no nordeste brasileiro, alguns cientistas e legisladores sugeriram que a região havia sido afetada por uma seca durante cinco anos, porém meteorologistas observaram que o registro de chuvas indicava que em apenas dois dos cinco anos a região poderia ter, de fato,

experimentado seca. Diante dessas divergências, os autores realizaram uma revisão de mais de 150 definições de seca publicadas para determinar as características mais essenciais. Assim, sugeriram que as definições de seca devem incorporar medidas físicas e sociais com significado local ou regional. Desse modo, as definições de seca foram agrupadas pelos autores em quatro tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

De acordo com UNDRR (2019), os diferentes tipos de seca podem ser distinguidos pelos seus efeitos no ciclo hidrológico e pelos impactos na sociedade e no meio ambiente. Para a AMS (2013), as secas meteorológica, agrícola e hidrológica são definidas por parâmetros físicos, hidrometeorológicos ou biológicos, enquanto a seca socioeconômica está associada aos impactos na sociedade. Panagoulia e Dimou (1998) já diziam que os efeitos secundários e terciários da seca geralmente se estendem além de suas fronteiras espacialmente definidas, sendo que fatores humanos ou sociais podem agravá-los.

Os tipos de seca se desenvolvem um após o outro em um processo em que cada uma das secas se distingue pelas variáveis que as influenciam (inclusive humanas), pelo tempo de ocorrência, e pelos impactos que geram (relacionados a oferta e demanda da água) (VAN LOON *et al.*, 2016), como pode ser observado no esquema da Figura 1.

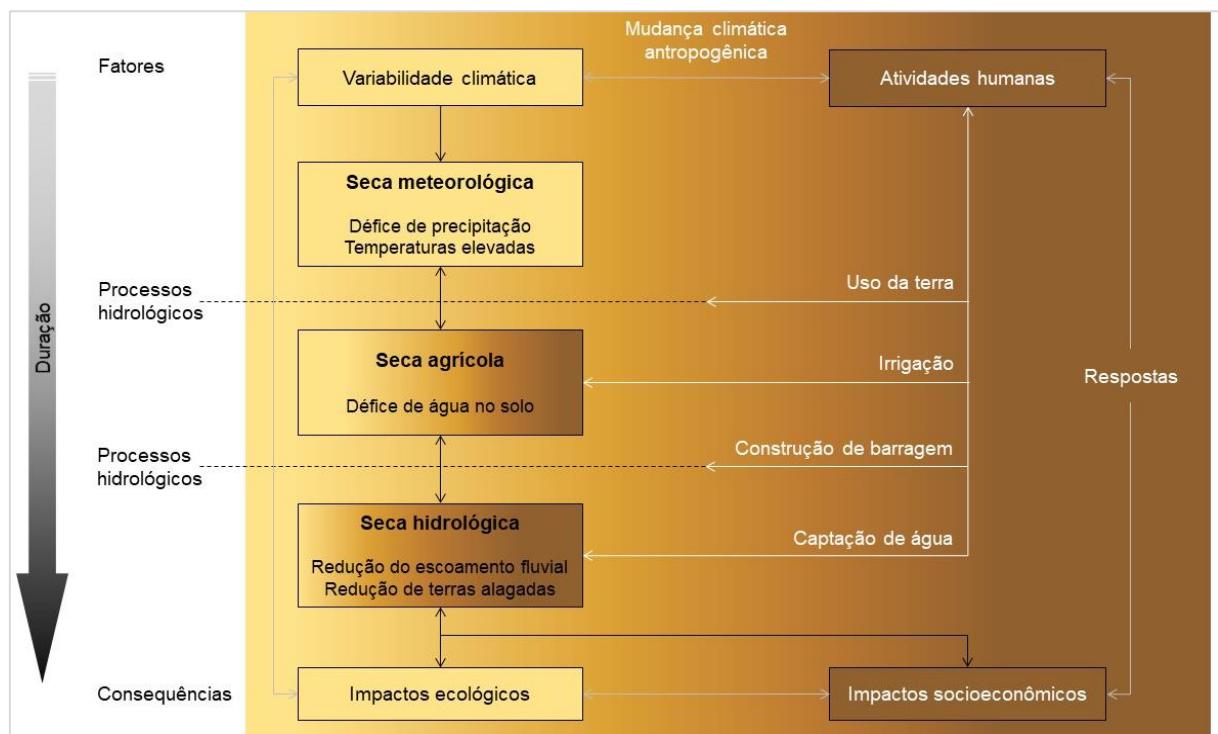
De acordo com Van Loon *et al.* (2016), em uma era geológica profundamente influenciada pelo homem, é preciso reconhecer que a influência antropogênica é tão essencial para a seca quanto a variabilidade natural do clima.

São apresentadas a seguir, de forma um pouco mais detalhada, as definições de cada tipo de seca, as quais são classificadas considerando as escalas de tempo e a oferta e demanda de água.

3.2.1. Seca meteorológica

Pode-se dizer que os tipos de seca seguem uma sequência temporal, e a seca meteorológica se trata da primeira a acontecer (MENDES, 2017). Ela se caracteriza, simplesmente, pela falta de precipitação por um longo período de tempo (MISHRA e SINGH, 2010; AMS, 2013; PEDRO-MONZONÍS *et al.*, 2015). Segundo o IPCC (2018b), um período com déficit de precipitação anormal é definido como uma seca meteorológica.

Figura 1 - Propagação da seca na era do Antropoceno⁴. Fatores climáticos em amarelo e fatores humanos em marrom.



Fonte: adaptado de Van Loon *et al.* (2016).

Segundo Pedro-Monzonís *et al.* (2015), a origem dessa falta de precipitação está associada ao comportamento global do sistema oceano-atmosfera, no qual fatores naturais e humanos, tais como o desmatamento ou o aumento dos gases de efeito estufa, têm forte influência. No sul do Brasil, por exemplo, as secas meteorológicas são causadas por fatores climáticos, tais como o fenômeno La Niña⁵ do tipo Pacífico Leste e outros (CHAGAS *et al.*, 2018).

A definição da UNDRR (2019), mais recente, diz que a seca meteorológica é um período de meses a anos com déficit na precipitação ou no balanço hídrico climatológico (ou seja, precipitação menos evapotranspiração potencial) em uma determinada região. O déficit é definido em relação à climatologia de longo prazo. Essas secas são frequentemente acompanhadas por temperaturas acima do normal e precedem e causam outros tipos de secas. Ainda segundo a UNDRR (2019), a seca meteorológica é causada por anomalias persistentes

⁴ “Antropoceno é um termo formulado por Paul Crutzen, Prêmio Nobel de Química de 1995. O prefixo grego ‘antropo’ significa humano e o sufixo ‘ceno’ denota as eras geológicas. É o momento em que nos encontramos hoje: a Época dos Humanos.” (Fonte: Museu do Amanhã, 2021)

⁵ La Niña: é um estado oceânico frio que se desenvolve sobre o Pacífico equatorial central a leste, em que, durante esse fenômeno, essencialmente, o deslocamento da circulação atmosférica e global do ciclo do vento contribui para grandes mudanças nas temperaturas e clima em todo o mundo (ZHENG *et al.*, 2022).

nos padrões de circulação atmosférica em grande escala, que muitas vezes são desencadeadas por temperaturas anômalas da superfície do mar na região tropical ou devido a teleconexões.

3.2.2. Seca agrícola

A seca agrícola pode ser caracterizada pelo déficit de umidade existente no solo, que prejudica o atendimento das necessidades de uma cultura, afetando o seu desenvolvimento e diminuindo o seu rendimento (PEDRO-MONZONÍS *et al.*, 2015). A falta de água para a cultura é causada pelo desequilíbrio entre a água disponível no solo, a demanda de água da cultura e a sua evapotranspiração (MENDES, 2017).

A seca agrícola vincula as características meteorológicas da seca aos impactos agrícolas, associando a escassez de precipitação a níveis mais elevados de evapotranspiração e déficits de umidade do solo (AMS, 2013).

De acordo com Brunini *et al.* (2002 *apud* BLAIN e BRUNINI, 2006), a seca agrícola é a adversidade climática que mais traz danos à agricultura paulista, mesmo estando esta última amparada por forte desenvolvimento tecnológico. Um exemplo disso são os enormes prejuízos sofridos pela agricultura paulista em 1963 e 1964, causados por uma seca extrema ocorrida no Estado.

Mais uma vez, trazendo a definição da UNDRR (2019), a seca agrícola (ou seca da umidade do solo) é um período com baixa umidade no solo resultante de precipitação abaixo da média. Isso afeta a produção agrícola, causa degradação da terra e afeta a função do ecossistema em geral.

3.2.3. Seca hidrológica

A seca hidrológica pode ser entendida como a insuficiência de recursos hídricos nos rios ou reservatórios para atendimento das demandas de água já estabelecidas em uma dada região (CAMPOS e STUDART, 2001). Ela é observada após a seca meteorológica e a agrícola, pois é necessário um período maior de tempo para que os déficits de precipitação se manifestem nos rios e reservatórios (FERNANDES *et al.*, 2010; MENDES, 2017).

Um exemplo disso é o estudo de Petrunaro e Massera da Hora (2019), que identificaram uma seca hidrológica no período de agosto a novembro de 2014 que acarretou o esvaziamento de 0,41 m do reservatório da barragem de Juturnaíba, o qual possui o maior volume de água represada no estado do Rio de Janeiro e que abastece a 630 mil pessoas.

De acordo com Van Loon *et al.* (2016), pode-se entender que as ações humanas influenciamativamente no desenvolvimento da seca, ou seja, essas ações podem intensificar ou acelerar a ocorrência dos efeitos da seca para uma região, fazendo com que ela evolua de uma seca meteorológica para uma seca hidrológica. Quanto mais demanda por água, mais rápido os efeitos da seca serão sentidos.

Para a UNDRR (2019), a seca hidrológica ocorre quando o fluxo do rio e o armazenamento de água em aquíferos, lagos ou reservatórios caem abaixo dos níveis médios de longo prazo. A seca hidrológica se desenvolve lentamente porque envolve água armazenada que é esgotada, mas não reabastecida. Séries temporais dessas variáveis são utilizadas para analisar a ocorrência, duração e severidade das secas hidrológicas.

3.2.4. Seca socioeconômica

Conforme Valadão *et al.* (2010), os efeitos de um longo período de seca dependem não somente de sua duração e intensidade, mas também das condições socioeconômicas e culturais da população atingida.

A seca socioeconômica consiste na associação da seca ocorrente ao desequilíbrio entre oferta e demanda de bens econômicos, como a própria água, alimentos, dentre outros (MISHRA e SINGH, 2010; AMS, 2013; MENDES, 2017), resultando em perda de receitas, afetando diretamente as populações. Esse tipo de seca traz impactos sociais, econômicos e, também, ambientais (ZSELECZKY e YOSEF, 2014). Os impactos sociais podem ser relacionados à saúde (física e mental) e, em alguns casos, envolvem migrações em massa (AMS, 2013).

Esse tipo de seca está vinculado aos outros três tipos (FERNANDES *et al.*, 2010) e, provavelmente, receberá mais atenção que esses outros à medida que as mudanças climáticas e a população aumentem (ZHAO *et al.*, 2019).

Silva Neto *et al.* (2016) relataram, em seu estudo, que o governo do Ceará, para contornar uma situação de seca e alavancar a produção agrícola do semiárido nordestino brasileiro, utilizou os perímetros irrigados para atender a uma demanda regional e internacional de seus produtos. Um dos exemplos abordados pelos autores trata-se do Perímetro Irrigado do Tabuleiro de Russas (PITR), iniciado em 2003, mas que, em 2015 passou a sofrer com a redução do volume de água, sendo afetada a sua disponibilidade para o cultivo e, consequentemente, a vida de milhares de empregados. Os autores concluíram que as variações climáticas interferem na vida da

população dos perímetros irrigados e trazem implicações de natureza social e econômica para os mais vulneráveis.

3.3. ÍNDICES DE SECA

É possível identificar o tipo de seca que está ocorrendo em determinada região utilizando alguns indicadores estatísticos, denominados índices de secas. Para Fernandes *et al.* (2009) e WMO - *World Meteorological Organization* e GWP - *Global Water Partnership* (2016), os índices de seca têm por objetivo medir a severidade e o período de tempo em que a seca ocorre, e são calculados por meio de algoritmos numéricos, que consideram variáveis climáticas ou hidrometeorológicas, tais como precipitação, temperatura, escoamento superficial, dentre outras. Ainda segundo os autores, os índices permitem monitorar as secas e fornecem informações para subsidiar tomadas de decisão.

Existem inúmeros índices de mensuração de seca, contudo, o Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index* – SPI) é um dos índices mais utilizados no monitoramento delas (BLAIN *et. al.*, 2010; CARMO, 2018). Segundo Tadesse (2006, *apud* LIMA, 2016) o SPI é utilizado no monitoramento da seca em mais de 50 países.

De acordo com Hayes *et al.* (2011), em 2009, o SPI foi recomendado pela Organização Mundial Meteorológica (WMO) como índice universal de seca meteorológica para uso generalizado em países que desejam monitorar as mesmas, devendo ele ser o índice padrão disponível em todo o mundo, em adição aos índices e indicadores locais exclusivos.

Diversos órgãos no Brasil vêm fazendo uso do SPI para realizar o monitoramento da seca, como: o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2021a), o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021), o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2020) e a ANA com o Monitor de Secas do Brasil (BANCO MUNDIAL, 2015a).

De acordo com Fernandes *et al.* (2021), para o monitoramento da seca é importante considerar mais de um indicador, uma estratégia bastante comum, tendo em vista que a combinação entre eles permite uma avaliação mais completa e acurada, aumentando a confiabilidade dos estudos, sendo importante também considerar que, independentemente dos indicadores a serem utilizados, há incertezas que podem estar relacionadas à deficiência na densidade de estações hidrometeorológicas, na escala temporal, na resolução espacial, na resolução radiométrica, ou

correções atmosféricas, sendo estes últimos quando se tratarem de dados oriundos de sensores a bordo de satélites.

Nesse sentido, cabe mencionar que existem também índices de seca baseados na análise de séries históricas de vazão, sendo um deles o Índice Padronizado de Vazão (*Standardized Streamflow Index - SSI*). De acordo com Vicente-Serrano *et al.* (2012), a inclusão de índices de vazão (como o SSI) pode melhorar o desempenho dos sistemas de monitoramento, comparado àqueles que utilizam somente o SPI.

Maiores detalhes sobre o SPI e sobre o SSI, são apresentados a seguir.

3.3.1. Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index - SPI*)

De acordo com os desenvolvedores do índice, McKee *et al.* (1993), o SPI usa a precipitação padronizada para a definição de seca, e, portanto, conceitualmente, este índice representa o z-score, ou seja, a diferença da precipitação em relação à média de um período de tempo especificado, dividida pelo desvio padrão, no qual a média e o desvio padrão são determinados a partir de registros anteriores (pelo menos 30 anos de dados). Ainda segundo os autores, a série histórica de precipitação é ajustada a uma distribuição Gama para que se obtenha a probabilidade de distribuição de frequência da precipitação. Posteriormente, a função normal inversa (Gaussiana) é aplicada a esta probabilidade para obtenção do SPI. O cálculo resultante da precipitação padronizada é linearmente proporcional ao déficit de precipitação e permite a especificação de probabilidade, porcentagem da média e déficit de precipitação acumulado.

O SPI fornece um indicador da severidade da seca e pode ser calculado para diferentes escalas de tempo, as quais estão relacionadas com a quantidade cumulativa de precipitação analisada (JULIANI e OKAWA, 2017). Essas escalas de tempo (1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses) representam escalas de tempo arbitrárias, mas típicas, para análise dos déficits de precipitação que apresentam alguma relação com os impactos agrícolas e hidrológicos em uma área (SARAVI *et al.*, 2009; Banco Mundial, 2015a).

Segundo a WMO e GWP (2016), os valores trimestrais do SPI (3 meses ou menos) podem ser úteis para o monitoramento dos efeitos iniciais da seca, valores semestrais (6 meses ou menos) para monitorar impactos agrícolas, e valores anuais (12 meses ou mais) para impactos hidrológicos.

De acordo com McKee *et al.* (1993), um evento de seca pode ser identificado a partir de um valor negativo de SPI, funcionando como um indicador em que, a cada escala de tempo, uma definição funcional e quantitativa de seca pode ser estabelecida.

As categorias de seca com base no SPI, criadas por McKee *et al.* em 1993, acabaram por sofrer ajustes ao longo do tempo e, considera-se para este trabalho a escala utilizada pelo monitor de seca americano (*U.S. Drought Monitor*), que serviu de base para algumas instituições que monitoraram a seca no Brasil, como, de acordo com o Banco Mundial (2015a), a plataforma do Monitor de Secas do Nordeste e, de acordo com Fernandes *et al.* (2021), o Cemaden.

A Tabela 1 apresenta as categorias de intensidade da seca para determinadas faixas de valores do SPI, além de apresentar também, de forma geral, os impactos possíveis para cada categoria, considerando o Monitor de Secas (ANA, 2022). Contudo, importante destacar que os impactos da seca dependem muito da duração desses eventos, mesmo que sejam de menor intensidade. Conforme UNDRR (2019), eventos mais longos e generalizados podem desencadear efeitos em cascata, cuja severidade está diretamente relacionada ao déficit hídrico.

Tabela 1 - Categorias de seca do SPI, com base no *U.S. Drought Monitor*.

Valores de SPI	Categoria de seca	Descrição	Impactos possíveis
-0,5 a -0,7	S0	Seca fraca	Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
-0,8 a -1,2	S1	Seca moderada	Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
-1,3 a -1,5	S2	Seca grave	Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comuns; restrições de água impostas.
-1,6 a -1,9	S3	Seca extrema	Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições
≤ -2.00	S4	Seca excepcional	Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência.

Fonte: National Drought Mitigation Center – NDMC (2021) e adaptado de ANA (2022).

Para este trabalho também se considera que um evento de seca é contabilizado como sendo o número de meses consecutivos com valor abaixo de -0,5, sendo que a duração mínima considerada para o evento é de 1 mês. Assim, o evento começa quando o SPI atinge valores menores -0,5 e termina quando o SPI atinge valores maiores que -0,5, ou seja, os valores de limiar definem o início e o final do evento de seca, como em Saravi *et al.* (2009).

Segundo a WMO e GWP (2016), as vantagens da utilização do SPI são:

- é um método fácil de calcular;
- usa apenas dados de precipitação;
- é aplicável em todos os regimes climáticos e permite a comparação com climas muito diferentes;
- é possível de ser calculado para curtos períodos de registro e que contenham dados ausentes, sendo, portanto, um índice valioso para regiões com pouca cobertura espacial e temporal de dados pluviométricos;
- possui um programa para uso em computadores pessoais que foi distribuído para mais de 200 países ao redor do mundo pelo *National Drought Mitigation Center* (NDMC);
- é possível de ser calculado em várias escalas de tempo, permitindo que seja utilizado em uma ampla gama de aplicações.

Apesar de todas as vantagens, é importante, também, considerar as limitações do SPI que, ainda segundo a WMO e GWP (2016) e Mishra e Singh (2010), consistem nas seguintes:

- a precipitação é a única entrada, então o SPI é deficiente ao contabilizar o componente da temperatura, que é importante para o balanço geral da água e o uso da água de uma região. Essa desvantagem pode dificultar a comparação de eventos com valores de SPI semelhantes, mas com cenários de temperatura diferentes;
- a flexibilidade do SPI de ser calculado para curtos períodos de registro, ou quando há muitos valores ausentes na série temporal, também pode levar ao uso indevido do resultado, pois o cálculo pode ser realizado para qualquer conjunto de dados fornecido;
- o SPI pressupõe uma distribuição estatística, que pode não ser apropriada para todas e quaisquer condições, particularmente ao examinar eventos de curta duração ou início ou término da seca;

- existem muitas versões de programas para cálculo do SPI disponíveis, implementadas em vários pacotes de *software* de computação diferentes dos encontrados no código-fonte distribuído pela NDMC e, desse modo, é importante verificar a integridade desses algoritmos e a consistência da saída com as versões publicadas;

Na sequência, apresenta-se alguns trabalhos na literatura que fizeram uso do SPI para a região sudeste do Brasil e para a bacia do rio Doce.

Júlio *et. al.* (2015) realizaram uma análise, por meio do SPI, da variabilidade temporal dos períodos chuvosos e secos e a relação desses eventos com a produção de café nos municípios de Viçosa, Caratinga, Caparaó e Aimorés, todos localizados na mesorregião da Zona da Mata de Minas. Foram analisados dados de precipitação do período de 1982 a 2012. Os autores concluíram que o SPI se apresentou como um bom índice para a caracterização dos períodos secos e chuvosos na região de cafeicultura de montanha, podendo ser observado que, nos períodos mais críticos de demanda de água, a ocorrência de eventos climáticos apresentou estreita relação com a produção da cafeicultura de montanha da região.

Lima (2016) avaliou alguns índices de severidade de secas na bacia do rio Doce, como o Índice de Porcentagem Normal – IPN, o Método dos Decis – MD, o Índice de Anomalia de Chuva – RAI e o SPI, e concluiu que os índices RAI e SPI constituem-se nos mais apropriados para a avaliação de secas mensais e trimestrais na bacia hidrográfica do rio Doce.

Oliveira Júnior *et. al* (2017) desenvolveram um trabalho sobre a relação entre o SPI e os Relatórios de Ocorrência de Incêndio (ROIs) no Parque Nacional do Itatiaia, localizado entre os estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. Apesar da série temporal de queimadas no Parque ser pequena, os autores encontraram um padrão relacional entre os ROIs, o índice SPI anual e episódios moderados e fortes de El Niño – Oscilação Sul (ENOS).

Juliani e Okawa (2017) realizaram um estudo no qual desenvolveram curvas de Severidade-Duração-Frequência e derivaram um mapa isoetal para a área de influência do clima semiárido no Estado de Minas Gerais. A identificação dos eventos de seca e a análise de suas condições foram avaliadas por meio do SPI para uma escala de tempo de 12 meses. A distribuição Gama apresentou bons resultados para a série de precipitação acumulada móvel de 12 meses, apresentando um bom ajuste para quase a totalidade dos registros de dados.

Sobral *et al.* (2018) utilizaram o SPI e o índice padronizado de reconhecimento de seca (RDI_{st}) para estudar episódios anuais de seca intensa no Estado do Rio de Janeiro. Os resultados

espaciais do SPI e do RDI_{st} caracterizaram de forma satisfatória os episódios intensos de seca no estado. Assim, os autores concluíram que, uma vez que os resultados para ambos os índices foram similares e o RDI_{st} requer outros dados, além dos de precipitação, o índice SPI caracteriza de forma mais eficiente a severidade da seca no Rio de Janeiro.

Finalmente, Jesus *et. al* (2020) aplicaram o SPI e o Índice Padronizado de Vazão (SSI) para identificar a ocorrência e a intensidade das secas na bacia hidrográfica do rio Doce. O SPI permitiu identificar os principais eventos meteorológicos de seca nos anos hidrológicos de 1994/95 e 2000/01, e em um período consecutivo de quatro anos hidrológicos (2013-2017). Através do coeficiente de correlação de Pearson, os autores observaram a influência da seca meteorológica sobre a hidrológica em escala anual e sazonal. Além disso, de acordo com os resultados encontrados pelos autores, o SPI apresentou maior correlação com o SSI nas estações da primavera e do verão.

Cálculo do SPI

De acordo com WMO e GWP (2016), o SPI pode ser calculado utilizando dados baseados em estações pluviométricas ou em conjuntos de dados de precipitação em pontos de grade.

Segundo McKee *et al.* (1993), o cálculo do SPI pode ser ilustrado conforme a sequência apresentada pelo fluxograma da Figura 2. O esquema da Figura 3 também contribui para o entendimento do cálculo. Contudo, ressalta-se que a escala utilizada para considerar o evento de seca foi a do monitor dos Estados Unidos, conforme apresentado na Tabela 1.

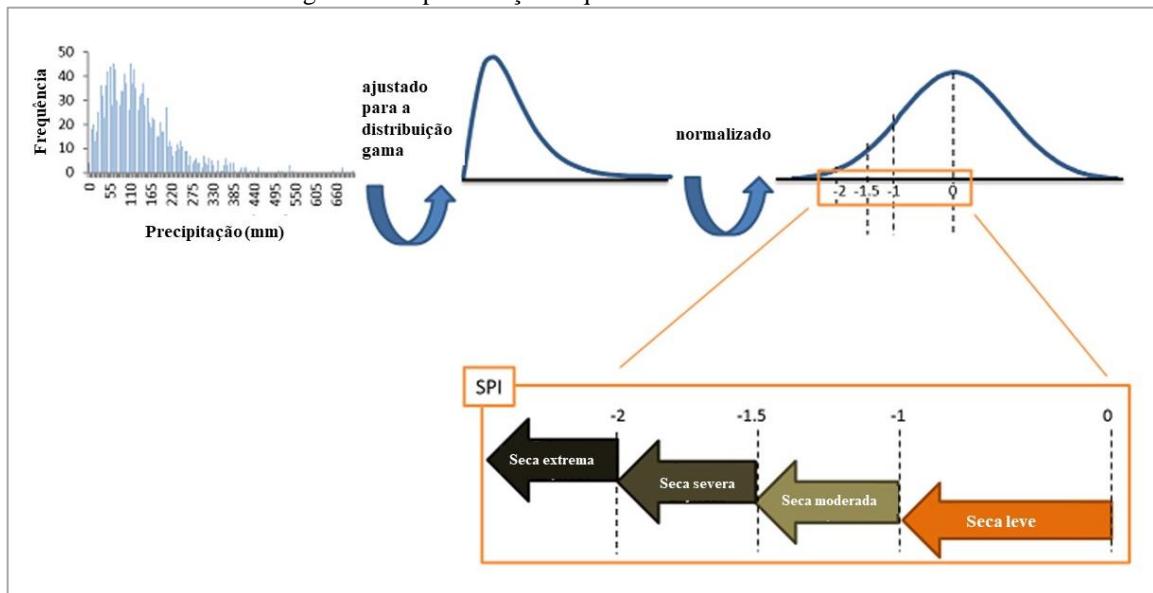
A forma como é calculado o SPI, descrita na sequência, pode ser encontrada no trabalho de Fernandes *et al.* (2009), o qual utiliza a distribuição Gama, conforme o presente estudo. Segundo Fernandes *et al.* (2021), essa distribuição tem sido amplamente utilizada, pois apresenta um ajuste confiável à distribuição de precipitação.

Figura 2 - Fluxograma das etapas de cálculo do SPI.



Fonte: Adaptado de McKee et al. (1993).

Figura 3 - Representação esquemática do cálculo do SPI.



Fonte: Adaptado de Japan Meteorological Agency, 2022.

A distribuição Gama é definida pela função de densidade de probabilidade dada pela Equação 1, a seguir.

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

$\alpha > 0$ = parâmetro de forma (adimensional);

$\beta > 0$ = parâmetro de escala (mm);

$x > 0$ = total de precipitação (mm);

$\Gamma(x)$ = função Gama.

A função Gama é obtida por meio da Equação 2.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (\text{Eq. 2})$$

Para estimar os parâmetros de forma α e escala β , utiliza-se o método da máxima verossimilhança (THOM, 1966), mostrado nas Equações 3 a 5.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x) \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

\bar{X} = média aritmética da precipitação pluvial (mm);

\ln = logaritmo neperiano;

N = número de observações de precipitação.

Os resultados dos parâmetros de forma e escala são então usados para encontrar a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observado para uma determinada escala de tempo mensal. A probabilidade cumulativa é dada pela Equação 6.

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (\text{Eq. 6})$$

Substituindo $t = \frac{x}{\beta}$, a equação anterior transforma-se na função Gama incompleta, representada pela Equação 7, a seguir.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\text{Eq. 7})$$

Uma vez que a função Gama é indeterminada para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa toma o seguinte aspecto, apresentado na Equação 8.

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo:

$H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa;

q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);

$G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

Sendo que m é o número de zeros em uma série temporal de precipitação, Thom (1966) indica que q pode ser estimado por $\frac{m}{n} + 1$ e usa tabelas da função Gama incompleta para determinar a probabilidade cumulativa $G(x)$. McKee *et al.* (1993) usam um método analítico, junto com um código de software sugerido por Press *et al.* (1988), para determinar a probabilidade cumulativa.

A distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ é então transformada em uma variável aleatória normalizada (Z) com média zero e desvio padrão 1, onde a variável (Z) corresponderá ao valor de SPI. Essa é uma transformação equiprobabilística que Panofsky e Brier (1958) definiram como uma característica essencial para transformar uma variável de distribuição Gama em uma variável com uma distribuição normal, onde a probabilidade de ser menor que um valor dado será igual à probabilidade de ser menor que o valor correspondente da variável transformada. As probabilidades cumulativas empíricas foram bem desenvolvidas por Panofsky e Brier (1958), onde os dados de precipitação são ordenados em ordem crescente de magnitude e onde o tamanho da amostra é dado pela Equação 9.

$$q = \frac{m}{n + 1} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo:

- m = número de ordem dos valores iguais a zero em uma série climatológica;
 n = tamanho da amostra.

Visto que seria desnecessário reproduzir vários gráficos para cada localidade e em todas as escalas temporais possíveis e para cada mês do ano, o valor de (Z) ou SPI é obtido mais facilmente pela aproximação matemática desenvolvida por Abramowitz e Stegun (1965), que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal a variável (Z), em que Z é definido pelas Equações 10 e 11.

$$Z = SPI = -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$Z = SPI = +\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo t definido pelas Equações 12 e 13.

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (\text{Eq. 13})$$

Os coeficientes utilizados nas equações acima são:

$$C_o = 2,515517;$$

$$C_1 = 0,802853;$$

$$C_2 = 0,010328;$$

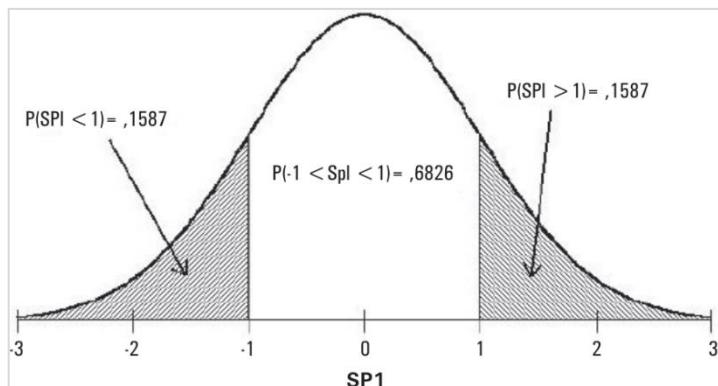
$$d_1 = 1,432788$$

$$d_2 = 0,189269;$$

$$d_3 = 0,001308.$$

A Figura 4 ilustra que, durante o período base, no qual os parâmetros Gama são estimados, o SPI terá uma distribuição normal com valor esperado 0 e variância 1. Um índice com essas características é desejável, de modo a permitir comparações de valores do índice para diferentes localidades e regiões.

Figura 4 - Distribuição normal com o SPI tendo uma média de 0 e uma variância de 1.



Fonte: Domingos (2006) *apud* Fernandes *et al.* (2009).

O SPI também pode ser obtido multiplicando $H(x)$ (Equação 8) pelo inverso da distribuição normal (Ψ^{-1}), como apresentado na Equação 14.

$$\text{SPI} = \Psi^{-1}[H(x)] \quad (\text{Eq. 14})$$

3.3.2. Índice Padronizado de Vazão (*Standardized Streamflow Index - SSI*)

O SSI foi introduzido por Modarres em 2007 e mais aprofundado por Telesca *et al.* em 2012. Vicente-Serrano *et al.* (2012) realizaram uma descrição mais completa do cálculo do SSI, sendo que, de acordo com esses autores, a capacidade do SSI de adicionar informações confiáveis e diretas sobre a extensão espacial e severidade das condições de seca hidrológica fornece uma maneira conveniente de quantificar o nível de risco de uma forma precisa e que é facilmente compreendida pelos usuários finais.

Conforme a WMO e GWP (2016), o SSI possui como dados de entrada o fluxo de água de um curso d'água em uma escala de tempo diária ou mensal, permitindo o monitoramento das condições hidrológicas em múltiplas escalas temporais.

Modarres (2007) descreveu o SSI como sendo semelhante ao SPI em que, para um dado período, o SSI é dado pela diferença entre a taxa de fluxo no intervalo de tempo considerado e a média da série dividido pelo desvio padrão da mesma.

O SSI pode ser calculado para dados observados e previsões futuras, fornecendo uma perspectiva sobre os períodos de fluxo alto e baixo associados as secas e cheias (WMO e GWP,

2016). Segundo Telesca *et. al* (2012), o SSI permite comparações espaciais e temporais precisas das condições hidrológicas de um curso d’água ou de um conjunto de cursos d’água.

De acordo com a WMO e GWP (2016), as vantagens do SSI é que se trata de um índice de fácil uso, que necessita de um único parâmetro de entrada e pode ser calculado usando o programa de cálculo do SPI. Apesar disso, é importante ressaltar que este índice considera apenas o fluxo do curso d’água no contexto do monitoramento da seca, sem considerar outras influências. A classificação da seca pelo SSI se baseia na mesma classificação do SPI (MODARRES, 2007). Portanto, neste trabalho serão utilizados os índices SPI e SSI, considerando a mesma classificação da Tabela 1, apresentada no item 3.3.1, uma vez que este estudo visa fazer uma análise complementar utilizando os dois índices.

Cálculo do SSI

Uma descrição completa do cálculo do índice SSI pode ser encontrada em Vicente-Serrano *et al.* (2012). O cálculo de SSI se dá conforme o cálculo de SPI, apresentado no item 3.3.1. Neste trabalho, também se utilizou a distribuição Gama para SSI, que se ajustou bem aos dados e que, de acordo com Sutanto e Van Lanen (2022), é amplamente aplicável para dados de vazão.

3.4. MONITORAMENTO DA SECA

Segundo a WMO e GWP (2016), monitorar as secas é muito importante, pois, geralmente, elas atingem áreas maiores do que outros eventos extremos e afetam diversos setores ao mesmo tempo, fazendo delas os eventos extremos naturais que trazem os maiores prejuízos, se considerarmos um horizonte de tempo anual. Além disso, já que se iniciam em um processo mais lento, as secas permitem que sejam observadas as alterações de alguns parâmetros, como a precipitação, o fluxo de água, dentre outros, por meio de índices de seca; o que possibilita haver tempo para a tomada de decisão e busca de soluções para o problema.

A seguir, são descritos os monitoramentos de secas realizados por algumas instituições no Brasil.

a) Monitoramento de secas pelo CEMADEN

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2022) realiza o monitoramento de curto prazo, que abrange os impactos na agricultura, utilizando o Índice Integrado de Seca (IIS), que consiste na combinação do SPI com o Índice de Suprimento

de Água para a Vegetação (VSWI) ou com o Índice de Saúde da Vegetação (VHI) e a Umidade do Solo. O CEMADEN também realiza o monitoramento a longo prazo, abrangendo os impactos nos recursos hídricos, utilizando o SPI e o Índice Padronizado de Vazão na escala 12.

b) Monitoramento de secas pelo INPE-CPTEC

O INPE-CPTEC (2021a) monitora os eventos de seca que atingem o território brasileiro por meio do SPI. O objetivo é fornecer uma interface simples e de fácil interpretação para a sociedade. Além dos mapas do Brasil com a plotagem das escalas do índice SPI, o INPE-CPTEC também divulga boletins sobre o clima.

c) Monitoramento de secas pelo INMET

O INMET (2021) também realiza monitoramento de precipitação para o território brasileiro por meio do SPI e apresenta uma interface simples que possibilita extrair mapas das diferentes escalas do índice.

d) Monitoramento de secas pela ANA

Diante da necessidade de resposta à ocorrência de eventos de secas que não se desse apenas de forma emergencial, foi desenvolvido o Monitor de Secas, em meados de 2013 a 2015, inicialmente para a região Nordeste do Brasil e, a partir de 2018, foi expandido para outras regiões do país. Em 2020, o Distrito Federal e 17 Estados do país, de todas as regiões, estavam contempladas pelo monitor coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021; BANCO MUNDIAL, 2015a).

Segundo o Banco Mundial (2015a), o Monitor de Secas reúne informações federais e estaduais para produção de um mapa que mostra a situação atual da seca, num processo de cooperação institucional, onde ocorre a validação das informações por parte de instituições com capilaridade nas regiões, com o objetivo de se obter um instrumento de planejamento que permita fornecer respostas eficientes e efetivas à população por meio de ações planejadas e preventivas.

De acordo com a ANA (2020b), a iniciativa também contou com o apoio financeiro do Banco Mundial e de parcerias internacionais como a Comissão Nacional da Água do México (Conagua), o Centro Nacional de Mitigação de Secas dos Estados Unidos, além de instituições governamentais e acadêmicas da Espanha. Na sua mais nova fase, o Monitor conta com a ANA como instituição central do processo, sendo responsável pela coordenação ao nível federal e pela articulação com os Estados da região, assim como, sua expansão para outros Estados.

O Monitor poderá ajudar a melhorar o alerta precoce e a previsão de secas, assim como deverá servir como subsídio para a tomada de decisões e políticas públicas em escala federal, estadual e local. Ao mesmo tempo, três planos de preparação para a seca na região semiárida estão sendo elaborados em diferentes níveis (bacia hidrográfica, região metropolitana e município). Estes planos ilustrarão a mudança de paradigma para uma gestão mais proativa das secas.

O Monitor de Secas constitui-se, assim, um instrumento de apoio à tomada de decisão gradual, visando tanto a preparação, como a resposta aos efeitos das secas, a partir da indicação de sua severidade e sua tendência de duração (curto, médio ou longo prazo) (Banco Mundial, 2015a).

De acordo com o Banco Mundial (2015a), o Monitor de Secas está fundamentado em três indicadores de secas, sendo dois deles meteorológicos, que contemplam curto e longo prazos (o SPI e o Indicador Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração – SPEI), e um hidrológico de curto prazo (indicador padronizado de escoamento, SRI).

4. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho seguiu o fluxograma de atividades apresentado na Figura 5. As atividades são mais bem descritas na sequência.

Figura 5 - Fluxograma de atividades desta pesquisa.



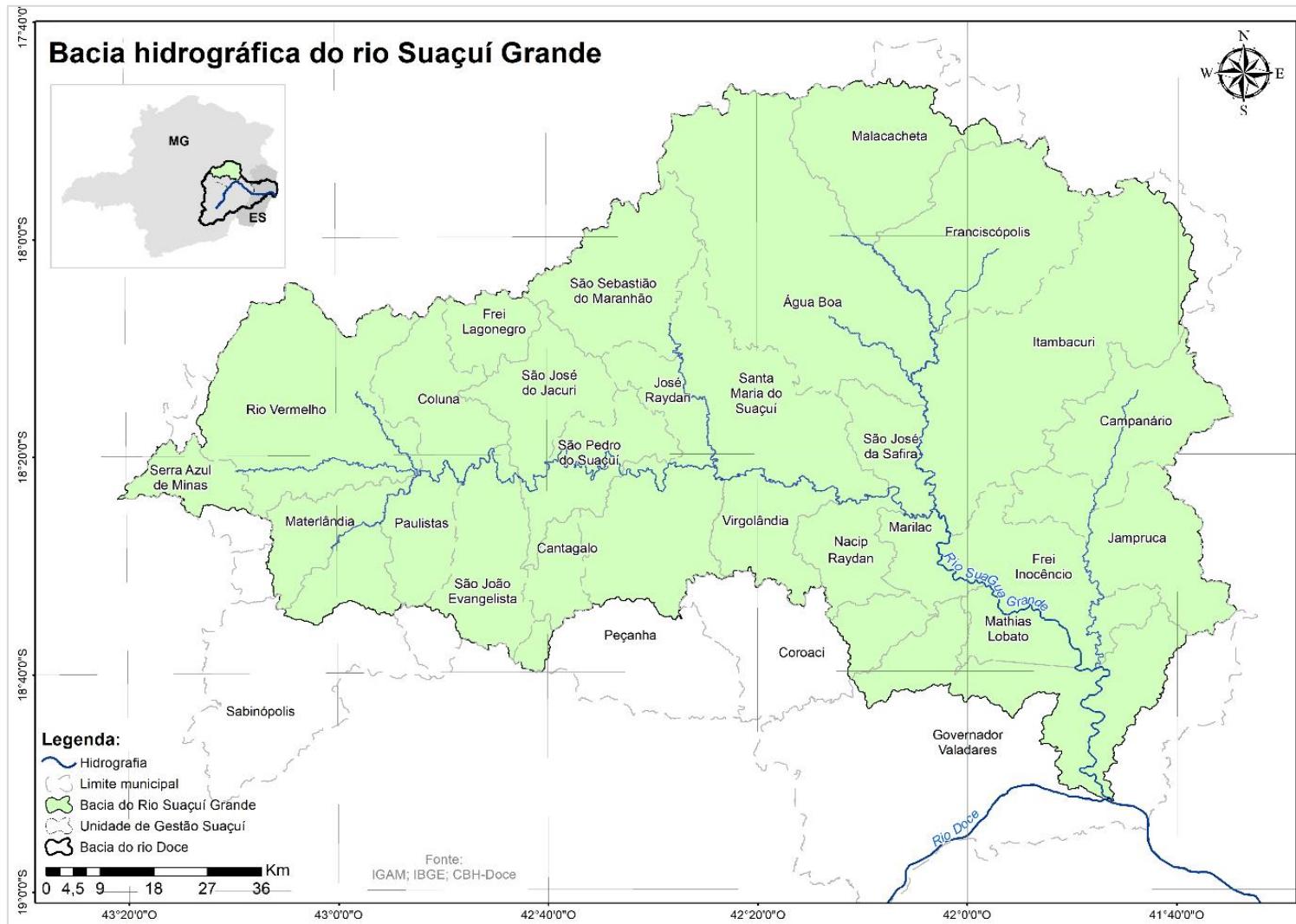
Fonte: A autora deste estudo (2021).

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área deste estudo consiste na bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande (Figura 6), que fica localizada na Unidade de Gestão de Recursos Hídricos do Suaçuí (UGRH Suaçuí), uma das unidades de gestão ou sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Doce.

A bacia do rio Suaçuí Grande tem aproximadamente 12.413 km² e se encontra totalmente inserida no Estado de Minas Gerais. É composta por 29 municípios, dos quais 19 estão inseridos por inteiro na bacia, enquanto 10 estão parcialmente inseridos. Além disso, 26 sedes municipais localizam-se dentro dos limites da área de estudo.

Figura 6 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Suaçuí (CBH-Suaçuí), instituído em 2005 pelo Decreto Estadual N° 44.200 de 29/12/2005 (ALMG, 2005), é o órgão que atua na gestão de recursos hídricos de todo o território da UGRH Suaçuí, que inclui as bacias dos rios Suaçuí Grande, Suaçuí Pequeno, Corrente Grande, dentre outras bacias incrementais.

De acordo com o Consórcio Ecoplan-Lume (2010), o rio Suaçuí Grande nasce no município de Serra Azul de Minas, no Parque Estadual do Pico do Itambé, no maciço rochoso da Serra do Espinhaço, com o nome de rio Vermelho e segue seu curso até se encontrar com os rios Turvo Grande e Cocais, em Paulistas, onde recebe o nome de rio Suaçuí Grande. São cerca de 300 km até desaguar no rio Doce, em Governador Valadares.

A Figura 7 apresenta o mapa hipsométrico da bacia, revelando altitudes que vão desde 139 a 2.028 metros de altitude em relação ao nível do mar. O bioma da UGRH Suaçuí e, consequentemente, da bacia do rio Suaçuí Grande, é predominantemente o da Mata Atlântica e, quanto ao uso do solo, há a predominância da pecuária (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

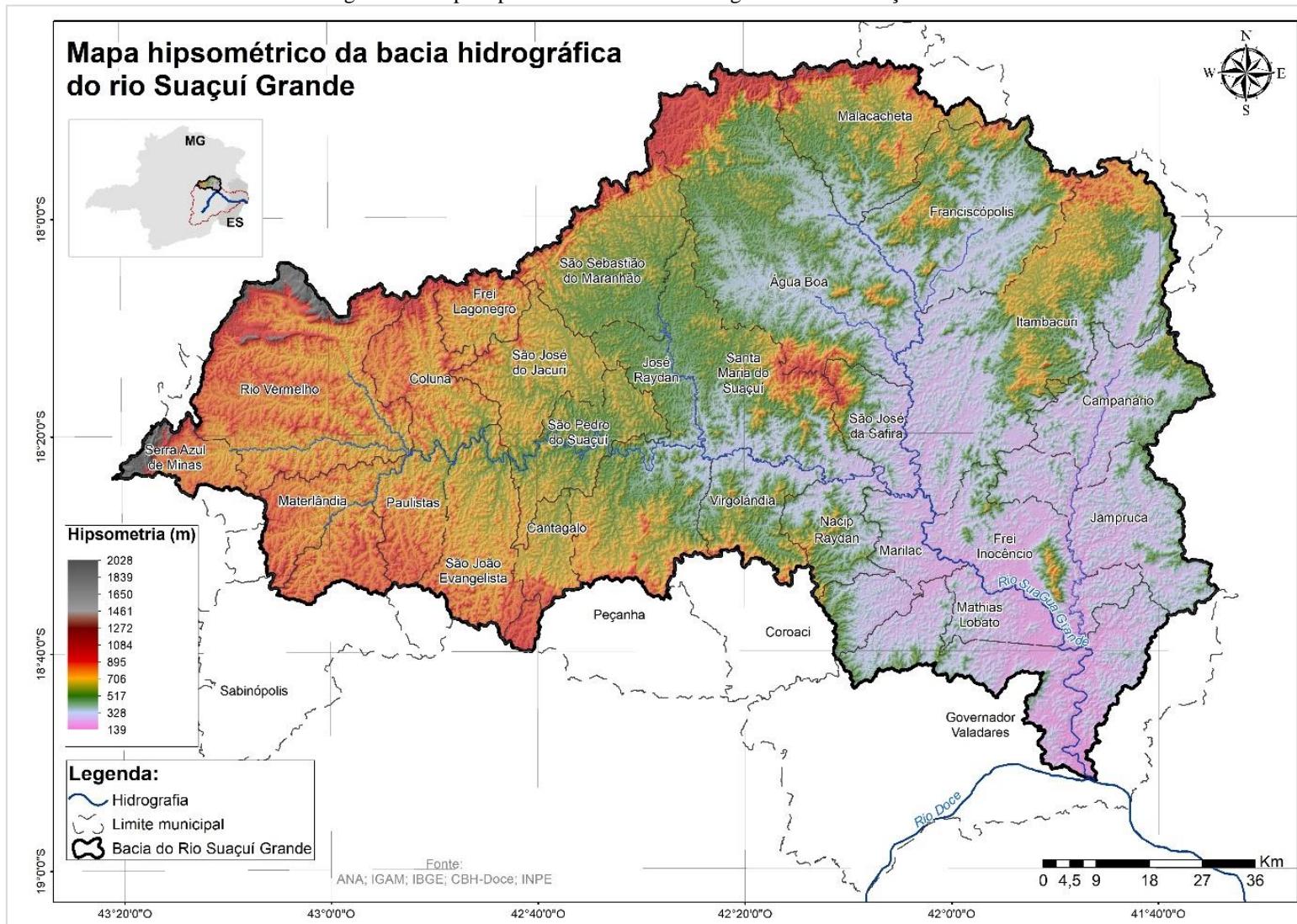
Considerando a classificação climática de Köppen-Geiger, Reboita *et al.* (2015) realizaram um estudo para identificar os aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais e elaboraram um mapa da classificação climática para o Estado, analisando o período de 1998 a 2012. Pelo estudo, é possível notar que na porção alta da bacia do rio Suaçuí Grande, mais especificamente em torno dos municípios de Serra Azul de Minas e Rio vermelho, ocorre o clima Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), enquanto no restante da bacia o clima é Aw (clima tropical de savana com estação seca no inverno).

O ano hidrológico na bacia do rio Doce, segundo estudo de Marques (2010), se inicia em outubro e termina em setembro do ano seguinte. Adicionalmente, segundo IGAM (2016), a região sudeste do Brasil, onde se localiza a bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande, apresenta uma estação chuvosa nos meses de outubro a março e uma estação de seca nos demais meses.

4.2. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Neste trabalho foram utilizados dados mensais e diários observados de estações pluviométricas e fluviométricas e dados simulados de precipitação pelo modelo climatológico Eta-HadGEM2-ES (em pontos de grade).

Figura 7 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

4.2.1. Dados observados

Para este estudo, os dados observados foram obtidos a partir de 8 estações pluviométricas e 4 estações fluviométricas disponíveis para a bacia do Suaçuí Grande na plataforma Hidroweb da ANA (2020a), as quais estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações pluviométricas e fluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.

Estações Pluviométricas					
ID	Nº Estação	Município	Altimetria (m)	Latitude (° ‘ “)	Longitude (° ‘ “)
P01	1841001	Mathias Lobato	174	-18 34 29	-41 55 04
P02	1841003	Campanário	240	-18 14 19	-41 44 55
P03	1842004	São Pedro do Suaçuí	420	-18 21 30	-42 35 44
P04	1842008	Santa Maria do Suaçuí	420	-18 12 04	-42 27 19
P05	1742019	Água Boa	600	-17 59 32	-42 23 38
P06	1742017	Malacacheta	-	-17 50 44	-42 04 32
P07	1843012	Rio Vermelho	720	-18 16 47	-43 00 02
P08	1842020	São João Evangelista	532	-18 33 10	-42 45 51
Estações fluviométricas					
ID	Nº Estação	Município	Altimetria (m)	Latitude (° ‘ “)	Longitude (° ‘ “)
F01	56891900	Mathias Lobato	252	-18 34 29	-41 55 04
F02	56851000	Campanário	248	-18 14 21	-41 43 52
F03	56860000	São Pedro do Suaçuí	420	-18 21 40	-42 36 18
F04	56870000	Santa Maria do Suaçuí	377	-18 12 06	-42 27 17

Fonte: ANA (2020a).

O mapa da Figura 8 indica a localização dessas estações na área de estudo, conforme o número de identificação apresentado na Tabela 2. Já o mapa da Figura 9, apresenta a localização dessas estações sobre o mapa hipsométrico da bacia.

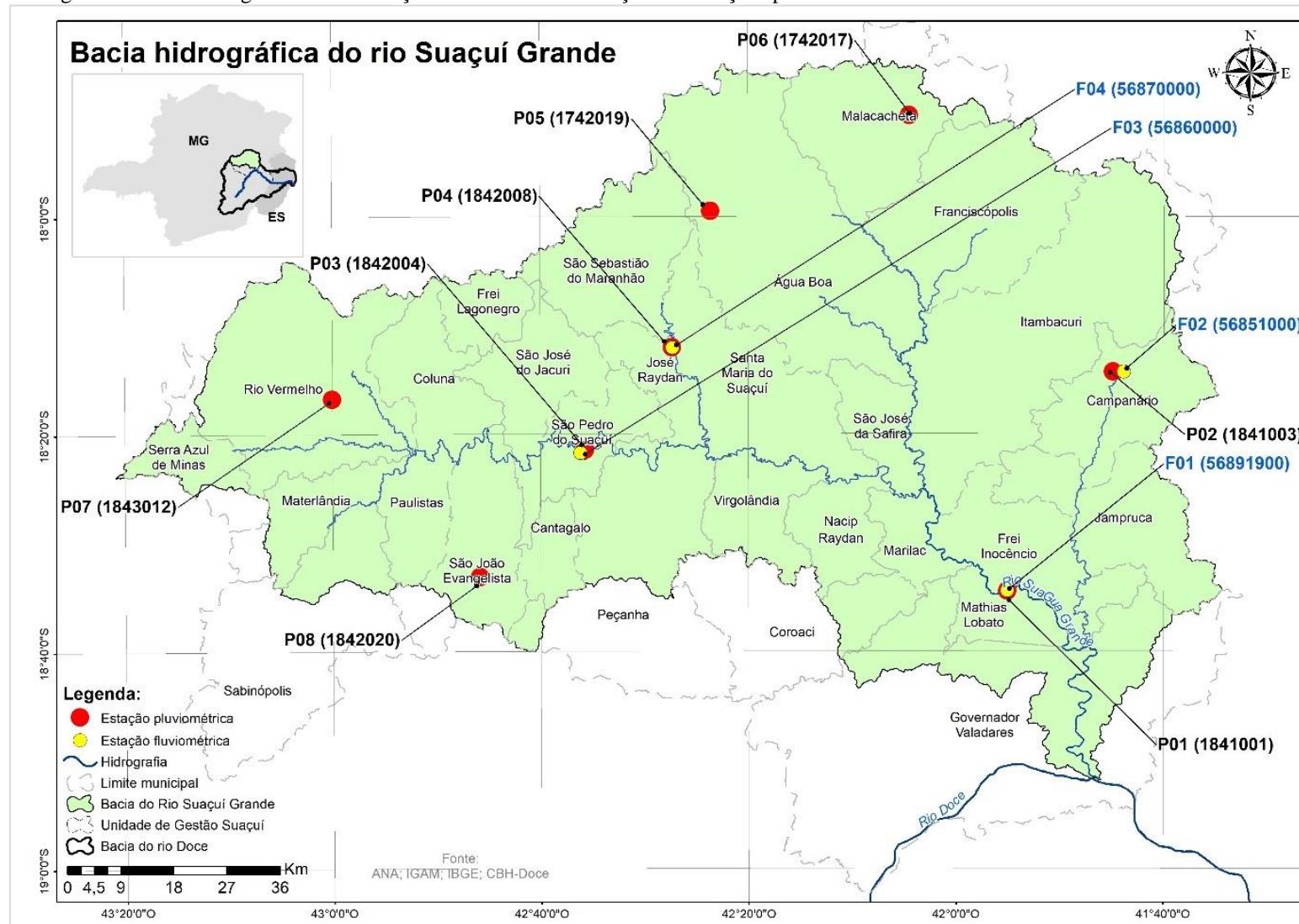
Após a coleta dos dados, os mesmos foram submetidos a uma análise de consistência e preenchimento de falhas utilizando regressão linear simples. Esta análise se encontra descrita na seção de Resultados e Discussão.

4.2.1.1. Construção do mapa hipsométrico

Foi elaborado um mapa hipsométrico da bacia em estudo para verificar se há influência do relevo local nosnos padrões de seca. Para a construção do mapa hipsométrico foram utilizadas imagens SRTM, com informações de altitude, extraídas do Topodata (INPE, 2021c), por meio do site <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/><https://earthexplorer.usgs.gov/>.

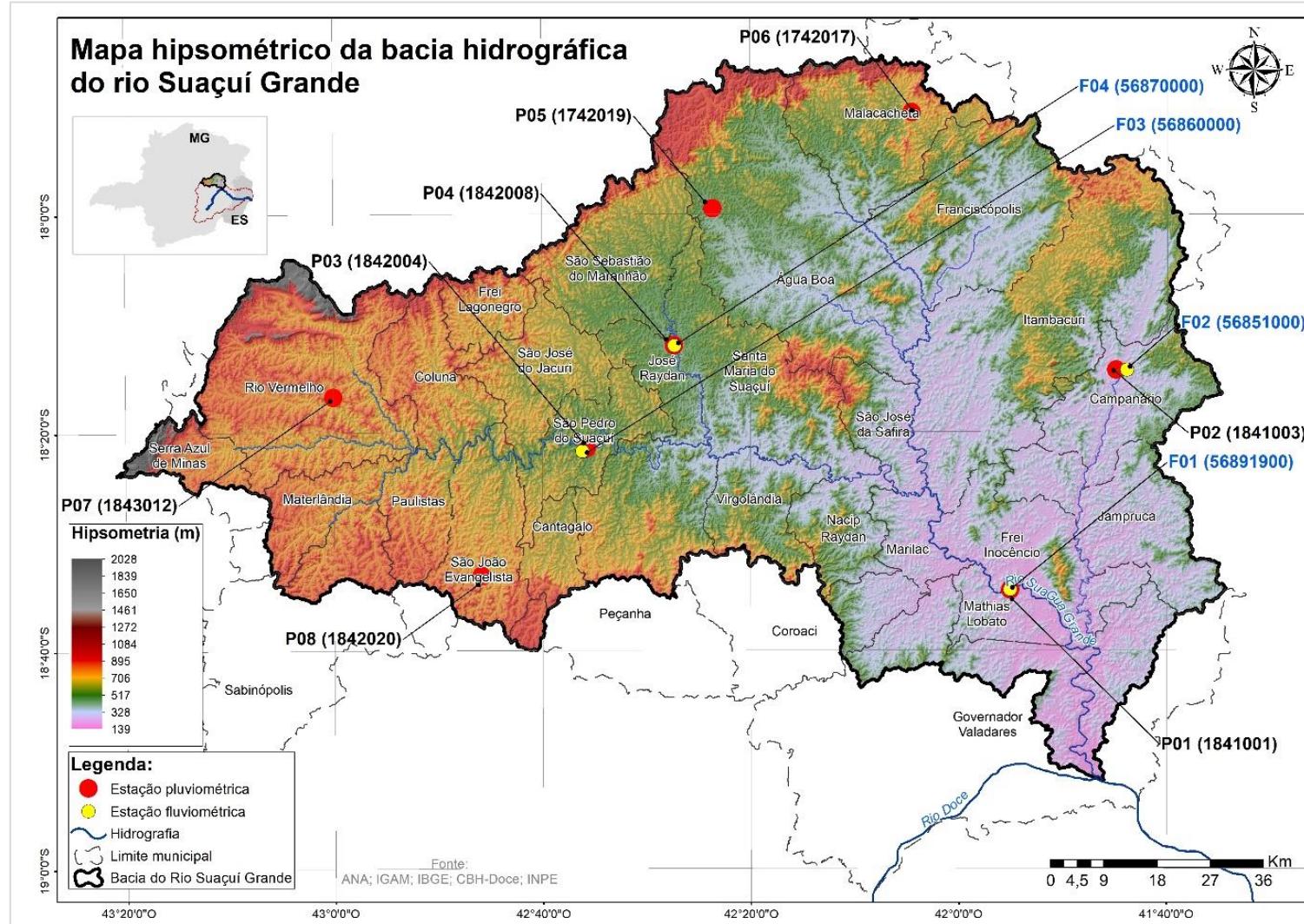
As imagens utilizadas para abranger toda a bacia do Suaçuí Grande foram: 17S435ZN; 17S42_ZN; 18S435ZN e 18S42_ZN. Os mapas foram elaborados utilizando o software ArGIS 10.3.1. O resultado dos mapas pode ser observado nas Figuras 7 e 9, já mencionadas.

Figura 8 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande com a indicação das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste trabalho.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

Figura 9 - Bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande com hipsometria e indicação das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste trabalho.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

4.2.2. Dados simulados

Os dados simulados de precipitação referentes ao clima do presente e ao cenário futuro foram coletados por meio da Plataforma Projeta (<https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>), gerados pelo Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CHOU *et al.*, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; LYRA *et al.*, 2017; BRASIL, 2016).

Os modelos climáticos regionais (MCRs) são ferramentas importantes para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos processos hidrológicos (BILLERBECK *et al.*, 2021). O conjunto de dados disponível na Plataforma Projeta CPTEC é proveniente das simulações com o modelo climático regional atmosférico Eta (MESINGER *et al.*, 2012). Estes dados foram regionalizados por meio do processo de *downscaling* dinâmico (redução de escala), utilizando modelos climáticos globais acoplados, que atuam como modelos forçantes, provendo as condições de contorno para o modelo regional. Os modelos climáticos regionais incorporam representações da dinâmica climática regional, em resoluções que variam de 5 a 50 km (BILLERBECK *et al.*, 2021), portanto, geralmente melhoraram a representação de variáveis de interesse como precipitação (ARGÜESO *et al.*, 2013).

As simulações utilizando o modelo climático global HadGEM2-ES (COLLINS *et al.*, 2011) como condição de contorno são as únicas disponíveis na plataforma com resolução espacial de 5 km para a região sudeste do Brasil (sudesteD2-BR), enquanto as simulações regionalizadas com os outros modelos globais têm resolução de 20 km. Por isso, as simulações regionalizadas com o modelo HadGEM2-ES foram escolhidas para utilização neste trabalho.

O cenário escolhido para o clima do futuro é o denominado RCP8.5. RCP, do inglês *Representative Concentration Pathways*, são Trajetórias de Concentração Representativas e os cenários baseados em RCP são chamados de RCPy, onde 'y' se refere ao nível de forçamento radiativo (em watts por metro quadrado, ou W/m²) resultante do cenário no ano 2100 (IPCC, 2022).

O RCP8.5 corresponde a altas emissões de gases de efeito estufa, sendo que o dióxido de carbono equivalente excede 1.000 ppm até o final do século XXI, o que faz com que a forçante radiativa atinja 8,5 W/m² até o ano 2.100. Essa radiação corresponde a energia excedente que fica retida em cada m² na Terra, alterando o balanço entre a radiação solar, que entra, e a radiação terrestre, que sai. Deve-se ressaltar que este cenário, apesar de ser o mais pessimista, é o mais próximo das tendências observadas, considerando as atuais concentrações de gases de

efeito estufa na atmosfera (PCLIMA, 2019); por isso, esse foi o cenário escolhido para este estudo, juntamente com o cenário histórico que representa o clima do presente.

Como os dados do cenário histórico se estendem até dezembro de 2005 e a série observada deste estudo corresponde a janeiro de 1985 a dezembro de 2019, foram utilizados dados do clima futuro (cenário RCP8.5) para complementar os 14 anos finais (2006 a 2019) dos 35 anos totais da série.

Após a obtenção dos dados simulados de precipitação, estes foram submetidos a uma correção de viés, de modo a corrigir erros sistemáticos presentes nos modelos de circulação geral. Neste estudo, foi utilizada uma técnica simples, o escalonamento linear (*Linear Scaling - LS*), o qual, de acordo com Billerbeck *et al.* (2021), apresentou o melhor desempenho geral.

De acordo com Shrestha *et al.* (2017), nos últimos anos, técnicas simples de correção de viés foram ofuscadas por outras mais populares e complexas e, em estudo realizado pelos autores, eles verificaram não haver nenhuma diferença significativa entre as saídas obtidas com o método LS (técnica simples) e com o mapeamento de quantil (técnica complexa), as quais exibiram desempenhos quase idênticos. Os autores concluíram, assim, que um método simples como o LS é suficiente para análise hidrológica em resolução mensal.

O trabalho de Shrestha *et al.* (2017) disponibiliza uma planilha em Excel que pode ser utilizada para a correção do viés. Assim, utilizou-se os dados observados para corrigir, tanto os próprios dados históricos simulados, quanto, os dados futuros simulados. Após a correção do viés, os dados para o clima do futuro foram preparados para entrada no *software RStudio* para o cálculo do SPI.

Para avaliar a performance dos dados simulados corrigidos, foram calculados o erro sistemático (viés ou, no inglês, *bias*) e a raiz do erro quadrático médio (REQM ou RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*).

Conforme Lehmann e Casella (1998) e Brito *et al.* (2019), o viés é uma expressão estatística que indica erro sistemático, ou seja, o quanto os resultados baseados nas simulações se afastam das observações, sendo uma métrica utilizada para averiguar a capacidade dos modelos de circulação geral em simular o sistema climático. Pode ser definido pela Equação 15.

$$Viés = \bar{M} - \bar{O} \quad (\text{Eq. 15})$$

Sendo:

$$\bar{M} = \text{valor médio anual dos dados derivados dos modelos};$$
$$\bar{O} = \text{valor médio anual dos dados derivados das observações}.$$

Segundo os mesmos autores, o método estatístico REQM também é utilizado na validação dos modelos e expressa o quanto as simulações oriundas de um modelo são precisas em relação aos dados observados, sendo que, quanto mais próximo de zero, mais próximo das observações será o resultado do modelo. O REQM pode ser definido pela Equação 16.

$$\text{REQM} = \sqrt{\left(\frac{\sum_i (M - O)^2}{N} \right)} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde N é o número total da série, M representa o valor anual dos dados derivados dos modelos e O denota o valor anual dos dados observados.

Sendo:

$$N = \text{número total da série};$$
$$M = \text{valor anual dos dados derivados dos modelos};$$
$$O = \text{valor anual dos dados observados}.$$

4.3. ANÁLISES DE SECA

O cálculo de SPI foi realizado para as escalas de 1, 3, 6 e 12 meses, que são amplamente utilizadas em estudos sobre índices de seca, com o intuito de identificar desde as secas meteorológicas de curto prazo até as de longo. A escala de 12 meses foi a mais utilizada nas análises, enquanto as outras escalas foram consideradas para avaliar a relação entre a precipitação e a vazão. Considerou-se os dados observados no período de janeiro de 1985 a dezembro de 2019. Para o mesmo período e para as mesmas escalas, foi calculado o SSI, com o intuito de avaliar a seca hidrológica e correlacionar os dados. Também foi realizado o cálculo de SPI-12 considerando os dados simulados para o clima do futuro (2025 a 2055).

Como mencionado anteriormente, para ambos os índices, foi utilizado o *software* livre RStudio, que é um novo editor visual para o *software* livre R (RSTUDIO, 2021). O R é um ambiente de *software* livre para computação estatística e gráficos (R PROJECT, 2021).

4.3.1. SPI

O pacote utilizado no RStudio para o cálculo do SPI é denominado de SPEI versão 1.7. Este pacote é comumente utilizado para o Cálculo do Índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado (SPEI) e do SPI, sendo de autoria de Santiago Beguería e Sergio M. Vicente-Serrano, conforme informações obtidas dentro do próprio *software*.

Para o cálculo do SPI no RStudio, os dados observados (1985 a 2019) e simulados para o cenário futuro (2025 a 2055) de cada município com estação pluviométrica foram organizados em uma planilha de Excel contendo três colunas (ano, mês e precipitação acumulada no mês). Foi utilizado um período de calibração de 1985 a 2014 e a distribuição estatística Gama. A calibração para um determinado período permite estabelecer uma linha de base tanto para o clima do presente quanto para o clima do futuro.

Para cada uma das 8 estações pluviométricas (dados observados) deste estudo foram calculados o SPI nas escalas 1, 3, 6 e 12 meses, enquanto para os dados simulados foi calculado o SPI somente na escala de 12 meses. As informações geradas foram utilizadas para elaborar os gráficos de SPI no Excel e os mapas de ocorrência e intensidade de seca para a escala de 12 meses (análise de frequência por categoria de seca).

Finalmente, será elaborado um documento com os mapas e diretrizes para orientar ações preventivas e mitigatórias em relação aos eventos de seca moderada a extrema na área de estudo. Este documento poderá nortear o plano de gestão de recursos hídricos na bacia do Suaçuí Grande.

4.3.1.1. Intensidade, duração, severidade e frequência da seca

De acordo com Saravi *et al.* (2009), nos estudos de seca é importante caracterizar o início e o fim de uma seca, bem como sua intensidade, duração, frequência e severidade (ou magnitude). Para o presente estudo, foram considerados os conceitos definidos por Saravi *et al.* (2009), os quais são abordados a seguir.

A intensidade da seca pode ser medida pelo desvio de um índice climático do seu valor normal (WILHITE, 1983 *apud* DUPIGNY-GIROUX, 2001). Já a duração da seca está intimamente ligada ao seu início e término e, às vezes, é expressa em termos do número de dias consecutivos sem chuva (SARAVI *et al.*, 2009). No presente trabalho considerou-se o número de meses em que o SPI se manteve abaixo de -0,5.

A severidade de um evento de seca, conforme Thompson (1999), corresponde ao déficit hídrico acumulado ao longo do período de seca e a média desse déficit hídrico acumulado ao longo do período de seca é a intensidade média. A Equação 17, a seguir, representa o cálculo da severidade de seca adotado neste trabalho.

$$SS = - \left(\sum_{i=1}^n SPIij \right) \quad (\text{Eq. 17})$$

Sendo:

SS : Severidade da Seca;

n : número de meses com evento de seca (SPI abaixo de -0,5) na escala de tempo j .

Para Dalezios *et al.* (2000), a frequência de um evento extremo é geralmente expressa pelo seu período de retorno ou intervalo de ocorrência, que pode ser definido como o intervalo de tempo médio entre dois eventos da severidade considerada ou de maior severidade. A frequência relativa pode ser expressa pela Equação 18, a seguir.

$$FR = \frac{n}{N} \times 100 \quad (\text{Eq. 18})$$

Sendo:

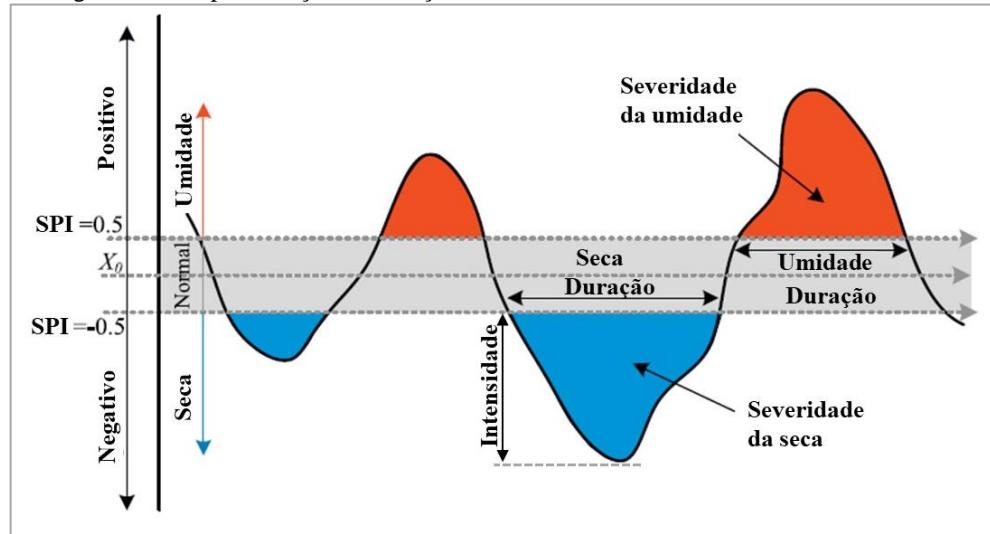
n : número de meses com períodos de seca (SPI abaixo de -0,5);

N : número total de meses da série histórica considerada.

A Figura 10 ilustra um pouco sobre essas variáveis, representando duração, intensidade e severidade dos eventos de seca.

Dessa forma, foi elaborada uma planilha para calcular essas variáveis para o SPI12 dos dados observados e simulados para o futuro. A partir dos resultados obtidos com o cálculo de intensidade, duração, frequência e severidade, foi possível construir gráficos para apresentação de cada categoria de seca em cada estação, bem como uma tabela com os dados compilados e, por fim, alguns mapas da frequência relativa para as categorias de seca excepcional e seca extrema, além da seca total.

Figura 10 – Representação da duração, intensidade e severidade dos eventos de seca.



Fonte: Adaptado de Wu e Chen (2019).

Para cada uma dessas categorias foram elaborados mapas para o clima do presente e futuro, totalizando 6 mapas. Para construção desses mapas, foi utilizado o método de interpolação IDW, por meio do software ArcGis 10.3.1, da ESRI. O IDW, do inglês *Inverse Distance Weighting*, significa Inverso da Distância Ponderada e, por sua vez, é o método que realiza a estimativa da variável ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos n postos mais próximos, o que é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (JIMENEZ e DOMEQ, 2008).

4.3.2. SSI

Para o cálculo do SSI, no *software RStudio*, o pacote utilizado foi o *standaRdized*, versão 1.0, que fornece funções e métodos para o cálculo de valores diários de índice padronizado, como Índice Padronizado de Precipitação (SPI), Índice de Evapotranspiração de Precipitação Padronizado (SPEI) ou Índice Padronizado de Vazão (SSI), sendo de autoria de Willem Maetens, conforme informações obtidas dentro do próprio *software*.

Foi realizado o cálculo de SSI para as 3 estações fluviométricas com mais dados, sendo desconsiderada a estação de Campanário, por conter muitas falhas ao final da série temporal. Assim, foi calculado o SSI para as estações de Mathias Lobato, São Pedro do Suaçuí e Santa Maria do Suaçuí. Também não foi realizado o preenchimento de falhas, uma vez que o pacote

aceita falhas diárias, a princípio, de 10% (limite de tolerância), podendo-se alterar este limite de tolerância no algoritmo.

Os dados fluviométricos diários foram organizados em uma planilha do Excel, em CSV, contendo somente uma coluna (data [ano-mês-dia] e valor de vazão). Foram testadas as distribuições estatísticas Gama, Gama3, Weibull3 e Gev, sendo que a distribuição Gama foi a que melhor se ajustou, segundo o teste de Kolmorov-Sminov ao nível de 95% de significância, para a maioria dos meses em todas as estações e, portanto, padronizou-se esta distribuição para o cálculo do SSI. Como já mencionado, de acordo com Sutanto e Van Lanen (2022), a distribuição Gama é aplicável amplamente para dados de vazão.

Os resultados de SSI gerados no RStudio foram extraídos e plotados em Excel para criação dos gráficos. Foi realizada uma análise de correlação entre os dados de SSI e SPI, nas escalas 1, 3, 6, 12 e 24, de modo a verificar a relação entre a seca meteorológica e hidrológica, mas, para isso, foi feito cálculo de SPI com dados diários utilizando o mesmo pacote, o standaRdized.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA E VERIFICAÇÃO DOS DADOS

5.1.1. Dados observados

Antes de utilizar os dados observou-se a recomendação feita por Tucci (2001) para que dados coletados sejam submetidos a uma análise de consistência e verificação de falhas, de modo a identificar e corrigir os erros. Segundo o autor, as medições de chuva e vazão podem apresentar dados ausentes ou falhas devido a erros na observação ou na anotação do operador, ou devido a problemas no equipamento automático. No caso de as séries temporais apresentarem dados ausentes, o autor indica que deve ser realizado o preenchimento das falhas por meio de alguns métodos, tais como ponderação regional, regressão linear, ou outros.

Desse modo, após análise dos dados, a série temporal adotada foi de janeiro de 1985 até dezembro de 2019, por ser o período comum com menor presença de inconsistências ou falta de dados a todas as estações pluviométricas e fluviométricas. Esse período corresponde a 35 anos de informações. Considerou-se o ano civil, tendo em vista que o cálculo de SPI no RStudio, *software* utilizado, considera dados mensais de janeiro a dezembro e não o ano hidrológico, o que não acarreta prejuízos a análise proposta neste estudo.

A porcentagem de falhas presentes nas estações pluviométricas localizadas na bacia do Suaçuí Grande pode ser verificada na Tabela 3, a seguir. Pode-se notar que, especialmente para novembro de 2018, nenhuma das estações pluviométricas selecionadas apresentam dados. Além disso, o período de abril de 1991 a setembro de 1992 da estação de Água Boa, apesar de possuir dados, esses não apresentavam consistência quando comparados às demais estações da bacia.

Desse modo, os períodos inconsistentes das estações pluviométricas passaram por um preenchimento de falhas para permitir a análise do índice de seca SPI. Como as estações continham várias falhas, foi utilizada a regressão linear simples, onde, conforme Tucci (2001), as informações pluviométricas de um posto Y com falhas são correlacionadas com as informações de um posto X vizinho. Foi utilizado em cada caso o coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão como parâmetro para a escolha do posto vizinho. Assim, o posto X, que apresentou maior valor de coeficiente de determinação, foi utilizado para

preencher a falha do posto Y. Foi também elaborado um mapa de hipsometria, já apresentado na Figura 9, para permitir analisar, além da verificação da estação com melhor correlação (e, portanto, maior coeficiente de determinação), a distância entre as estações e a diferença de elevação do terreno entre elas.

Tabela 3 - Série de dados mensais e falhas identificadas nas estações pluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.

ID	Estação	Município	Série comum entre as estações (considerando ano civil)	Falhas (meses sem dados ou com dados inconsistentes)	Porcentagem de falhas na série comum
P01	1841001	Mathias Lobato	Jan/1985 a dez/2019	nov/2018	0,24%
P02	1841003	Campanário		abr/2008 nov/2018	0,48%
P03	1842004	São Pedro do Suaçuí		out/2009 dez/2009 nov/2011 fev/2012 mar/2012 out/2016 out/2018 nov/2018	1,90%
P04	1842008	Santa Maria do Suaçuí		jan/2017 nov/2018	0,48%
P05	1742019	Água Boa		dez/2017 nov/2018 abr/1991 a set/1992	2,14%
P06	1742017	Malacacheta		nov/2018	0,24%
P07	1843012	Rio Vermelho		out/2013 nov/2018 mar/2019	0,71%
P08	1842020	São João Evangelista		out/2011 nov/2018	0,48%

Fonte: Autora deste estudo (2021).

Como todas as estações pluviométricas apresentaram falha no mês de novembro de 2018, foi necessário, além das próprias estações do Hidroweb, também utilizar os dados pluviométricos da rede de monitoramento de desastres naturais do CEMADEN (2021) e da plataforma de coleta de dados (PCD) do INPE (2021b) de alguns dos municípios das estações com falha, assim como Reboita *et al.* (2015) realizaram em seu estudo. Após a obtenção destes dados, foi realizada a regressão linear simples para efetuar o preenchimento.

Para cada estação pluviométrica deste estudo, e para cada período de falhas, o preenchimento, por regressão linear, se deu na ordem e com as estações apresentadas na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Ordem e estações utilizadas para a realização do preenchimento de falhas por regressão linear simples nas estações pluviométricas deste estudo.

ID	Nº Estação	Município	Falhas (meses sem dados ou com dados inconsistentes)	Estação utilizada para a regressão linear
P06	1742017	Malacacheta	nov/2018	Foi utilizada a estação 313920101A do CEMADEN, do município de Malacacheta
P05	1742019	Água Boa	dez/2017 nov/2018	Foi utilizada a estação 310060901A do CEMADEN, do município de Água Boa
			abr/1991 a set/1992	Foi utilizada a estação do município de Malacacheta, do Hidroweb, preenchida anteriormente
P01	1841001	Mathias Lobato	nov/2018	Foi utilizada a estação A532 do INPE, do município de Governador Valadares
P02	1841003	Campanário	abr/2008	Foi utilizada a estação do município de Mathias Lobato, do Hidroweb, preenchida anteriormente
			nov/2018	Foi utilizada a estação 311080601A do CEMADEN, do município de Campanário
P04	1842008	Santa Maria do Suaçuí	jan/2017 nov/2018	Foi utilizada a estação do município de Água Boa, do Hidroweb, preenchida anteriormente
P03	1842004	São Pedro do Suaçuí	out/2009 dez/2009 nov/2011 fev/2012 mar/2012 out/2016 out/2018 nov/2018	Foi utilizada a estação do município de Santa Maria do Suaçuí, do Hidroweb, preenchida anteriormente
P08	1842020	São João Evangelista	out/2011 nov/2018	Foi utilizada a estação do município de São Pedro do Suaçuí, do Hidroweb, preenchida anteriormente
P07	1843012	Rio Vermelho	out/2013 nov/2018 mar/2019	Foi utilizada a estação do município de São João Evangelista, do Hidroweb, preenchida anteriormente

Fonte: Autora deste estudo (2021).

Com relação as falhas nos dados diários das estações fluviométricas presentes na bacia do rio Suaçuí Grande, essas são apresentadas na Tabela 5, a seguir. Pode-se notar que na estação fluviométrica de Campanário há uma ausência significativa de dados, de janeiro de 2015 a dezembro de 2016, ficando inviável utilizar essa estação para o estudo, tendo em vista que o período adotado para a série de dados fluviométricos seria o mesmo adotado para os dados pluviométricos, que vai de janeiro de 1985 a dezembro de 2019. A vazão é um parâmetro de mais difícil medição e obtenção, com poucas estações disponíveis para coleta de dados.

Tabela 5 - Série de dados diários e falhas identificadas nas estações fluviométricas da bacia do Suaçuí Grande.

ID	Estação	Município	Série comum entre as estações fluviométricas e pluviométricas	Falhas	Porcentagem de falhas na série comum
F01	56891900	Mathias Lobato	Jan/1985 a dez/2019	01/12/1988 a 31/12/1988	0,0024%
F02	56851000	Campanário		01/01/2015 a 31/12/2016	0,0572%
F03	56860000	São Pedro do Suaçuí		01/12/1988 a 31/12/1988 31/12/2017 31/10/2018	0,0026%
F04	56870000	Santa Maria do Suaçuí		01/12/1988 a 31/12/1988 13/11/2015 a 15/11/2015 01/01/2017 a 31/01/2017 27/10/2017 a 29/10/2017 09/11/2019 a 20/11/2019	0,0063%

Fonte: Autora deste estudo (2021).

O pacote StandaRdized do *software RStudio* utiliza dados diários e considera um limite padrão de até 10% de valores de NA (sem resposta) nos dados, sendo que, se esta porcentagem for ultrapassada, o algoritmo não é executado. Contudo, o usuário pode modificar esta porcentagem para mais ou para menos antes de executar o algoritmo. Devido a isto, as falhas diárias existentes nas estações fluviométricas não foram preenchidas, optando-se por rodar o algoritmo considerando o limite para a porcentagem de valores de NA permitidos em até 20%. Durante o cálculo de SSI, apenas a escala de 3 meses apresentou valores de NA acima de 10%.

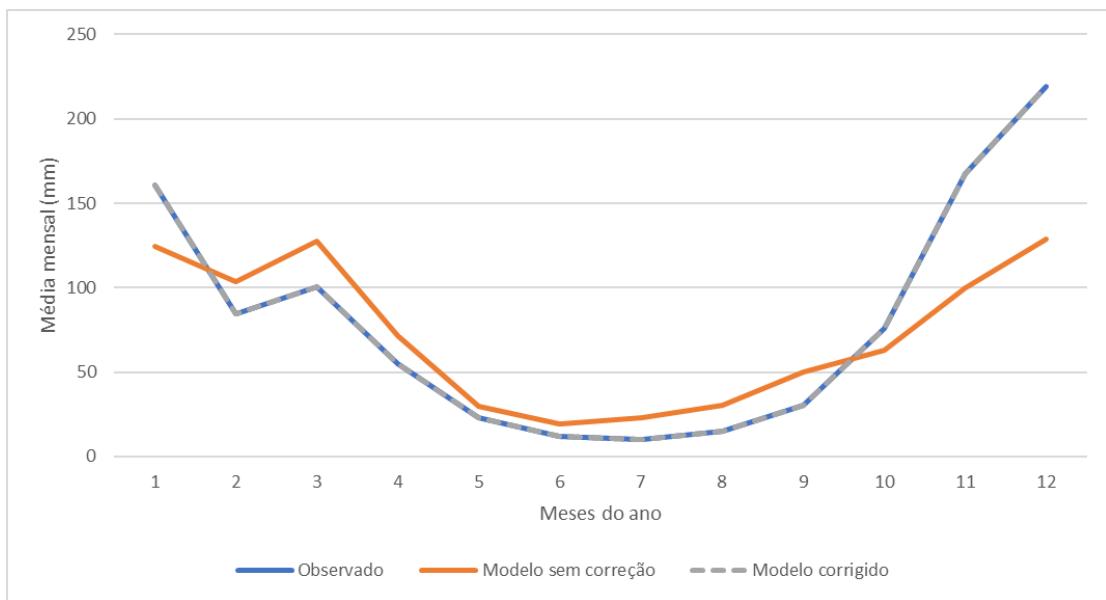
5.1.2. Dados simulados

Como mencionado, para os dados simulados foi realizada a correção do viés por meio da técnica de escalonamento linear (*Linear Scaling – LS*), conforme trabalho de Shrestha *et al.* (2017), utilizando-se os dados observados para corrigir, tanto os próprios dados históricos simulados, quanto os dados para o clima do futuro.

O gráfico da Figura 11 apresenta a média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção para o município de Mathias Lobato. Pode-se observar que a técnica de escalonamento linear realiza um ajuste onde os dados do modelo corrigido passam a apresentar os mesmos valores médio mensais dos dados observados; fato demonstrado pela linha de média mensal do modelo corrigido sobreposta à linha dos dados

observados (Figura 11). O mesmo ocorre para todas as demais estações, cujos gráficos encontram-se no Apêndice A, para consulta.

Figura 11 – Gráfico da média mensal, considerando ano civil, para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção para o município de Mathias Lobato.

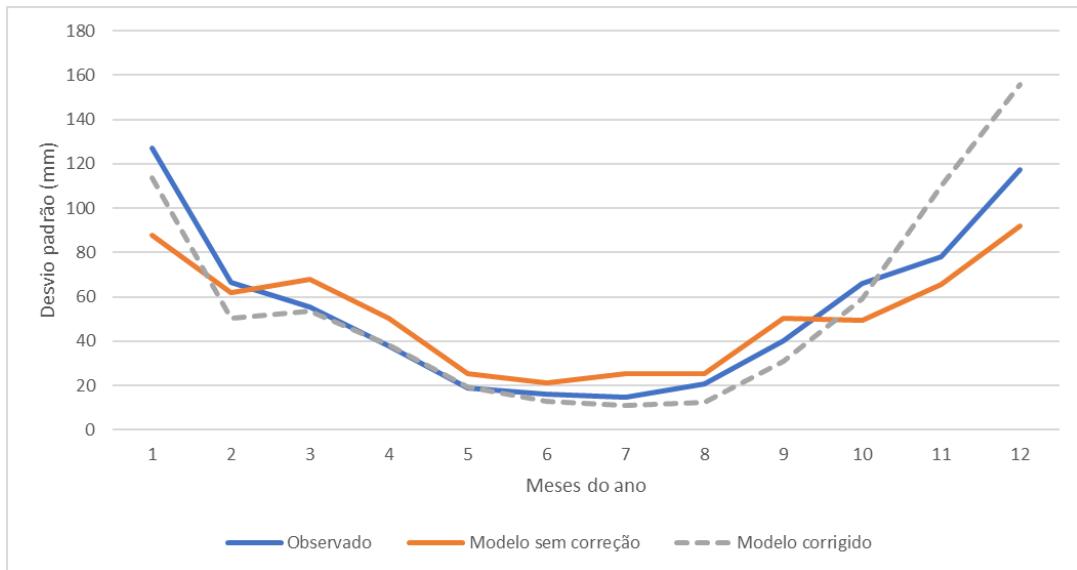


Fonte: A autora deste estudo (2022).

Já o gráfico da Figura 12 apresenta o desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção para o município de Mathias Lobato. Nos meses de inverno observa-se que o desvio padrão é menor, sendo que os dados do modelo corrigido se aproximam dos dados observados, especialmente nos meses de março a julho, quando a precipitação é menor. No entanto, quando os valores de precipitação são mais altos, como em novembro e dezembro, a diferença, entre os dados do modelo e os observados, fica maior.

Estas considerações, descritas para o gráfico de Mathias Lobato, são similares para a maioria das demais estações, sendo que os meses de novembro e, especialmente, dezembro, são aqueles aonde a performance do modelo é pior, uma vez que dezembro é o mês com maior volume de chuva na região. Isto parece indicar que, quanto mais extrema a precipitação, maior a dificuldade do modelo em simular a precipitação adequadamente na região. Os gráficos de desvio padrão para as demais estações encontram-se no Apêndice A, para consulta.

Figura 12 - Gráfico de desvio padrão, considerando ano civil, para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido, e o modelo sem correção, para o município de Mathias Lobato.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Para avaliar a performance dos dados simulados, foram calculados o erro sistemático (viés ou, no inglês, *bias*) e a raiz do erro quadrático médio (REQM ou RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*). Conforme Lehmann e Casella (1998) e Brito *et al.* (2019), quanto mais próximo de zero for o valor de REQM, mais próximo das observações será o resultado do modelo. Em relação ao viés, quando expresso em porcentagem (PBias), pode ser classificado conforme apresentado na Tabela 6, a seguir, adaptada de Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 6 – Intervalo de classificação dos resultados para o PBias.

Referência	Classificação
$ PBias < 10\%$	Muito bom
$10\% \leq PBias < 15\%$	Bom
$15\% \leq PBias < 25\%$	Satisfatório
$ PBias \geq 25\%$	Insatisfatório

Fonte: adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Assim, a Tabela 7 apresenta o valor do cálculo de REQM e de PBias para os dados simulados para os municípios das estações pluviométricas deste estudo, além de apresentar a classificação obtida, considerando os valores antes e após a correção do viés.

Tabela 7 – REQM, PBias e sua classificação antes e após a correção do viés para os dados simulados.

Estação	Sem correção de viés			Com correção de viés		
	REQM (mm/mês)	PBias (%)	Classificação para PBias	REQM (mm/mês)	PBias (%)	Classificação para PBias
Mathias Lobato	93,83	8,59	Muito bom	95,84	1,48 E-14	Muito bom
Campanário	95,13	13,02	Bom	97,72	1,03 E-15	Muito bom
São Pedro do Suaçuí	109,95	19,95	Satisfatório	98,21	1,69 E-14	Muito bom
Santa Maria do Suaçuí	112,42	19,53	Satisfatório	111,80	1,55 E-14	Muito bom
Água Boa	108,68	4,39	Muito bom	105,15	2,01 E-14	Muito bom
Malacacheta	101,01	23,84	Satisfatório	103,53	3,29 E-16	Muito bom
Rio Vermelho	106,35	1,17	Muito bom	103,87	1,14 E-14	Muito bom
São João Evangelista	115,03	12,40	Bom	106,84	0,00	Muito bom

Fonte: A autora deste estudo (2022).

Com base nos dados apresentados na tabela anterior, nota-se que, para alguns municípios, antes mesmo de corrigir o viés, este se apresentava “muito bom”, enquanto, para outros, a classificação era “bom” ou “satisfatório”. Após a correção do viés, todos os resultados passaram para a classificação “muito bom”.

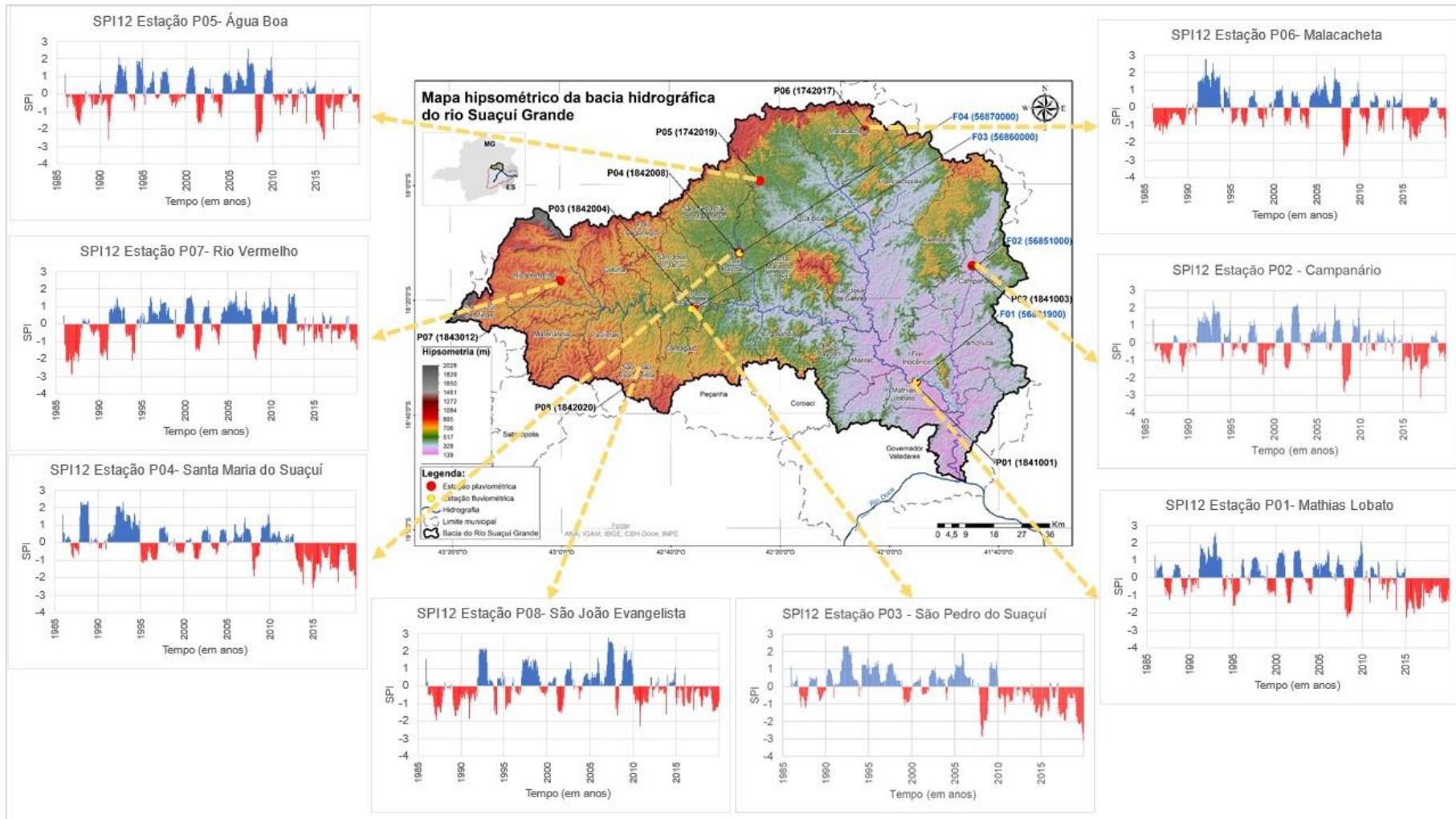
Quanto ao REQM, comparado com outros estudos, os valores também se mostraram bastante satisfatórios, tendo em vista que, para o modelo HadGEM2, em estudo de Bokke *et al.* (2017), este se apresentou acima de 150 mm/mês e outros modelos chegaram a quase 200 ou 250 mm/mês, sendo que, quanto mais próximo de zero, mais próximo das observações será o resultado do modelo.

5.2. SPI DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (DADOS OBSERVADOS)

Na Figura 13, são apresentados os gráficos de SPI-12 gerados para cada estação pluviométrica utilizada neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande. Para melhor visualização, os gráficos de SPI nas escalas 1, 3, 6 e 12 para todas as estações pluviométricas deste estudo se encontram no Apêndice C.

Para auxiliar na análise dos gráficos, a partir dos valores de SPI-12, foram calculadas as variáveis de intensidade, duração, severidade e frequência da seca para cada uma das estações, conforme apresentado na Tabela 8.

Figura 13 – Gráficos de SPI-12 gerados para os dados observados (1985 a 2019) para cada estação pluviométrica utilizada neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

Tabela 8 –Intensidade, duração, severidade e frequência de seca na escala de SPI-12 para os dados observados.

Variáveis	Estações pluviométricas							
	P01 (ML)	P02 (CP)	P03 (SPS)	P04 (SMS)	P05 (AB)	P06 (MC)	P07 (RV)	P08 (SJE)
Pico de intensidade	-2,26	-3,17	-3,12	-2,67	-2,79	-2,74	-2,87	-2,32
Data do Pico de intensidade (mês/ano)	mar-08	jan-17	dez-19	dez-19	jan-08	fev-08	nov-86	out-10
Duração mais longa (meses)	23	21	24	24	13	23	23	15
Duração mais longa (data início)	dez-14	mar-16	jan-14	jan-14	dez-14	jan-86	jan-86	set-86
Duração mais longa (data fim)	out-16	nov-17	dez-15	dez-15	dez-15	nov-87	nov-87	nov-87
Magnitude ou Severidade para a seca com duração mais longa	-34,51	-26,57	-28,22	-30,92	-23,52	-23,65	-42,16	-18,43
Intensidade média para a seca com duração mais longa	-1,50	-1,27	-1,18	-1,29	-1,81	-1,03	-1,83	-1,23
Duração do evento mais intenso (meses)	12	13	12	12	11	12	23	1
Duração do evento mais intenso (data início)	dez-07	dez-07	jan-19	jan-19	dez-07	dez-07	jan-86	nov-13
Duração do evento mais intenso (data fim)	nov-08	dez-08	dez-19	dez-19	out-08	nov-08	nov-87	nov-13
Magnitude ou Severidade para o evento mais intenso	-22,24	-26,77	-25,02	-19,06	-23,22	-24,22	-42,16	-1,61
Intensidade média do evento mais intenso	-1,85	-2,06	-2,09	-1,59	-2,11	-2,02	-1,83	-1,61
Frequência relativa %	31,30	28,12	30,32	30,07	27,38	35,94	28,61	30,32

P01 - Mathias Lobato; P02 – Campanário; P03 -São Pedro do Suaçuí; P04 - Santa Maria do Suaçuí; P05 - Água Boa; P06 – Malacacheta; P07 - Rio Vermelho; P08 - São João Evangelista.

Fonte: A autora deste estudo (2022).

É possível notar, por meio da Figura 13, que todos as estações, em algum momento dos 35 anos de análise, atingiram valores de SPI inferiores a -2, que corresponde a categoria de seca excepcional. Isto pode ser confirmado pelos picos de intensidade observados em cada estação, apresentados na Tabela 8, que variaram de -2,26 a -3,17.

Ainda com auxílio da Tabela 8, pode-se observar que, para cinco (P01, P02, P03, P04 e P05) das oito estações analisadas, o evento de duração mais longa se iniciou entre 2014 e 2016 e se encerrou entre 2015 e 2017, tendo durado 23, 21, 24, 24 e 13 meses, respectivamente, considerando cada uma das 5 estações.

Com base na Figura 13 e nos resultados obtidos para o SPI-12, pode-se verificar que na estação P01 (Mathias Lobato), a partir de 2010, ocorreu uma predominância de eventos de seca, sendo que, mesmo na ocorrência de alguns eventos úmidos, o valor de SPI-12 não superou +1, diferentemente da maioria dos eventos úmidos ocorridos antes de 2010. Portanto, vários meses apresentaram valores de SPI-12 abaixo de zero a partir de 2010 até que, em janeiro de 2015, o SPI atingiu o valor de -2,26, maior pico de intensidade nessa estação (Tabela 8), persistindo com valores negativos até o final da série histórica.

Na estação P02 (Campanário), de 2010 a 2015, houve maior predominância de eventos úmidos, contudo os valores de SPI-12 se mantiveram abaixo de +1, com exceção de 1 mês. Já, a partir de 2015, pode-se notar a predominância de eventos de seca com maiores intensidades (Figura 13), tendo o pico de intensidade chegado a -3,17, o maior nessa estação (Tabela 8).

Com relação a estação P03 (São Pedro do Suaçuí), desde 2010 até o final da série histórica, apresentou em quase sua totalidade valores abaixo de zero (Figura 13), com pico de intensidade atingindo o valor de -3,12 em dezembro de 2019, o maior nessa estação (Tabela 8).

Na estação P04 (Santa Maria do Suaçuí), a partir de 2010, pode-se notar a ocorrência de um período úmido com valores SPI-12 abaixo de +0,7, sendo que, a partir de novembro de 2012, os valores negativos predominaram até o final da série, sendo que os valores de SPI-12 atingiram -2 por 4 vezes (Figura 13), chegando a um pico de intensidade igual a -2,67 (Tabela 8).

A estação P05 (Água Boa), a partir de 2010, se comportou de forma similar a estação P02 (Campanário), sendo que, a partir de 2015, os valores negativos predominaram (Figura 13), tendo o pico de intensidade chegado a -2,59, contudo, o maior pico de intensidade nessa estação foi de -2,79 em janeiro de 2008 (Tabela 8).

Nas demais estações (P06 - Malacacheta, P07 – Rio Vermelho e P08 – São João Evangelista) a seca de duração mais longa se iniciou em 1986 e se encerrou em 1987, tendo durado, respectivamente, 23, 23 e 15 meses (Tabela 8). Contudo, nesses casos, apesar de o evento mais longo ter se encerrado em 1987, eventos de seca ou mesmo situações de normalidade (SPI entre -0,5 e 0), retornaram logo em seguida ou persistiram até meados de 1991 (Figura 13). Observa-se que essas três estações se localizam nos municípios que possuem as altitudes mais elevadas da bacia, como pode ser observado no mapa hipsométrico (Figuras 9 e 13). A partir de 2010 até o final da série histórica, pode-se verificar que P06 e P08 também apresentaram predominância de eventos de seca (Figura 13). Em P07, após a ocorrência de um evento úmido entre 2011 e 2012, os demais eventos, até o fim da série persistiram sendo de seca ou normalidade, apesar de não atingir picos de intensidade de seca tão altos como nas outras estações neste período (Figura 13).

De um modo geral, observa-se na Figura 13 que, com exceção de P07-Rio Vermelho, para as demais estações, a partir de 2010 ocorreram períodos úmidos de baixa intensidade ou próximos do normal, porém, os eventos de seca predominaram até o final da série analisada (2019). Assim, mesmo na ocorrência de períodos de chuva acima da média ou dentro da normalidade, infere-se que esses foram insuficientes para suprir a demanda de recursos hídricos, resultando em um déficit de umidade no solo e na redução do escoamento superficial, influenciando no surgimento, na intensidade e persistência dos eventos de seca hidrológica, afetando, assim, o atendimento das demandas de água na bacia do Suaçuí Grande. Isso pode justificar as declarações de situação crítica de escassez hídrica superficial publicadas em deliberações normativas do IGAM, em 2018 e 2019, mais especificamente, para a montante da estação P01-Mathias Lobato.

Interessante notar também que, as estações localizadas em municípios com altitudes mais elevadas, como a P07-Rio Vermelho e P08-São João Evangelista, apresentam valores negativos de SPI-12 menos intensos desde 2010, em comparação com as outras, o que demonstra que as características dos eventos de seca podem apresentar uma dependência em relação a altitude do local, uma vez que ela influencia na temperatura e umidade do ar, como observado em outros estudos, como de Lu *et al.* (2019) e Feng *et al.* (2020).

5.3. SPI DO MODELO ETA/HADGEM2-ES (DADOS SIMULADOS - PRESENTE E FUTURO)

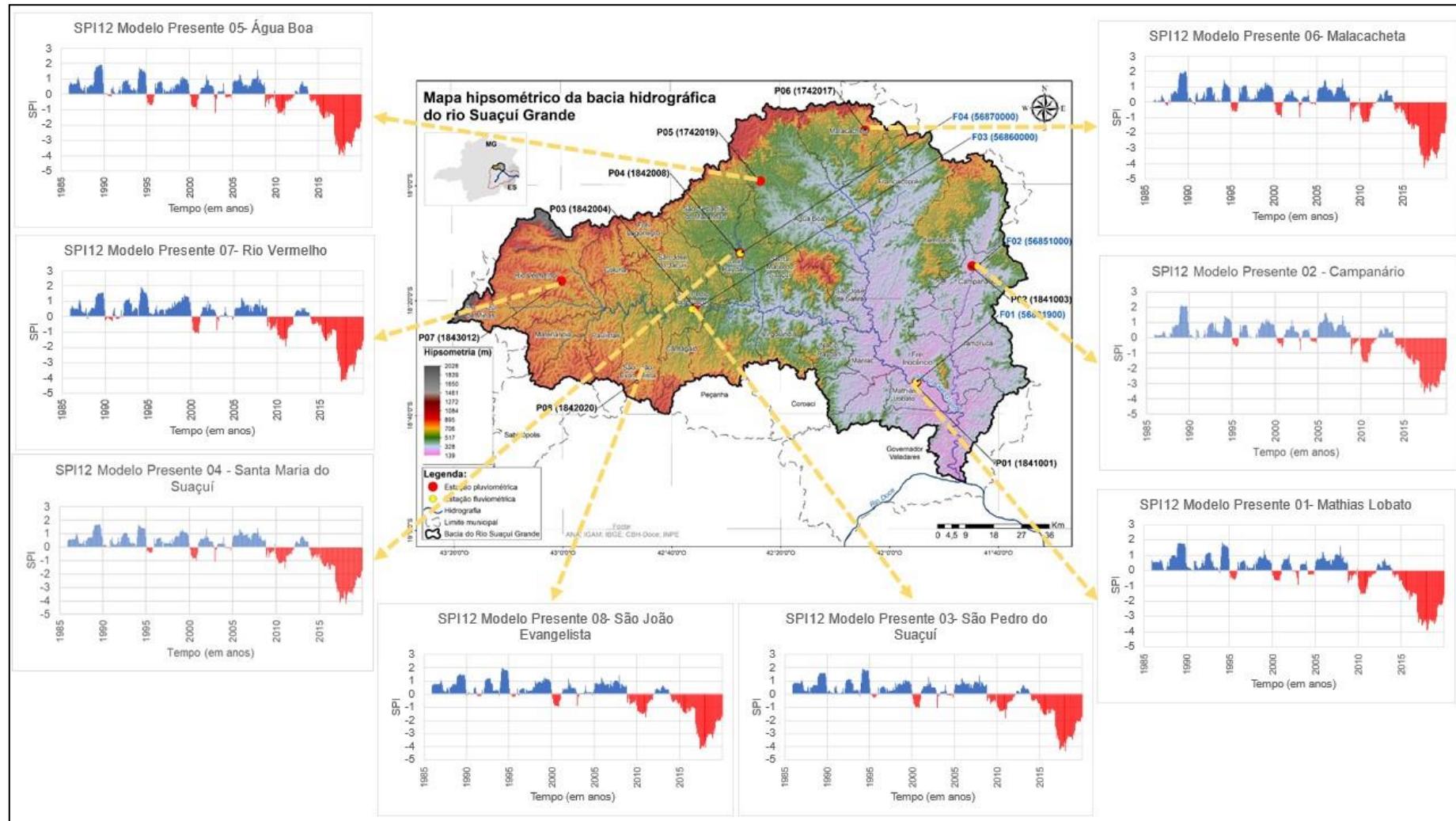
A seguir, são apresentados os gráficos de SPI-12 do modelo Eta/HADGEM2-ES, gerados para cada um dos municípios das estações pluviométricas utilizadas neste estudo, e com as localizações delas indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande, tanto para o presente (Figura 14), quanto para o futuro (Figura 15). Para melhor visualização, os gráficos de SPI-12, do presente e futuro, para todas as estações pluviométricas deste estudo se encontram no Apêndice D.

Ao analisar a Figura 14 (dados simulados do presente), é possível inferir que o modelo apresenta dificuldade em reproduzir corretamente a topografia da região, pois quase não há diferenças entre as estações representadas pelo modelo, mesmo considerando o fato de a resolução espacial do modelo ser de 5 km e ter sido realizada a correção do viés. De um modo similar em todas as estações, ele apresenta um período de seca um pouco mais intenso e duradouro em meados de 2010 (entre -1 e -2), seguido de um período úmido pouco intenso e depois um período de seca de longa duração e de maior intensidade a partir de 2015 até o final da série, 2019, e com intensidade superestimada, que por vezes ultrapassa -3, chegando a -4 ou mais em várias estações pluviométricas, diferentemente do que se pode verificar para os dados observados, como mostrado na Figura 13. O modelo não reproduz em nenhuma estação o período de seca observado em algumas estações entre 1986 e 1992, nem o pico significativo ocorrido entre 2005 e 2010, subestimando, neste caso, a intensidade da seca.

Quando se observa os dados simulados para o futuro, na Figura 15, novamente pode-se notar pouca diferença entre as estações, não diferenciando, portanto, as estações localizadas em municípios com altitudes mais elevadas, as quais apresentam características diferenciadas para o clima do presente, como apontado anteriormente. Isto indica a dificuldade do modelo na representação da topografia complexa da região.

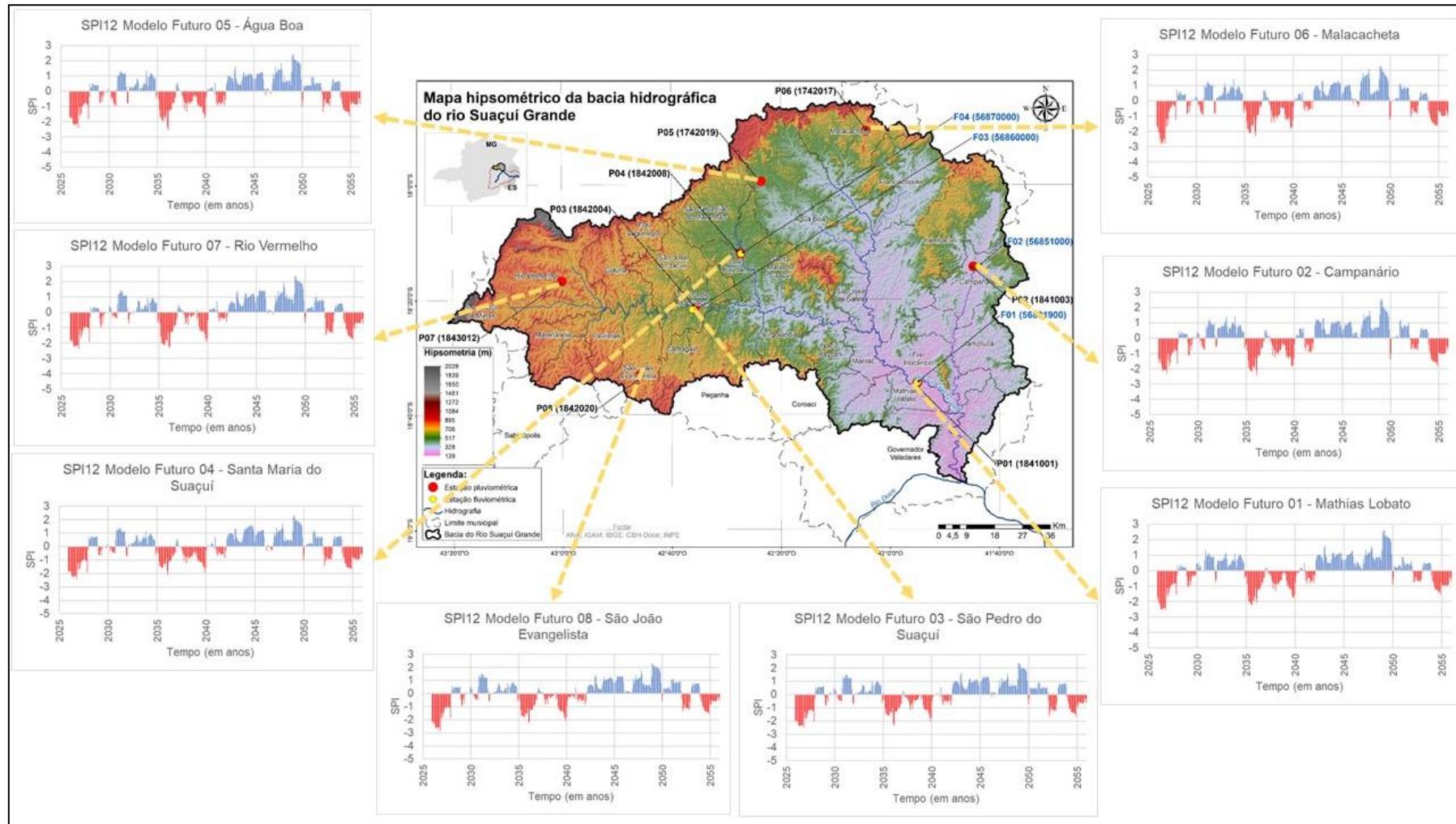
Os dados futuros apontam a permanência dos eventos de seca mais intensos, iniciados em meados de 2010, como verificado nos dados observados (Figura 13) e simulados para o presente (Figura 14), até meados de 2028 (Figura 15). Portanto, destaca-se que os resultados de SPI-12 apontam para uma recorrência de eventos de seca persistente por aproximadamente 18 anos (2010 a 2028), podendo ultrapassar o limiar de -2, mesmo no clima do futuro, o que corresponde a categoria de seca excepcional.

Figura 14 - Gráficos de SPI-12 gerados para os dados simulados do PRESENTE (1985 a 2019), do modelo Eta-HadGEM2-ES, para cada um dos municípios das estações pluviométricas utilizadas neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

Figura 15 - Gráficos de SPI-12 gerados para os dados simulados do FUTURO (2025 a 2055), do modelo Eta-HadGEM2-ES, para cada um dos municípios das estações pluviométricas utilizadas neste estudo, com as localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande.



Fonte: Autora deste estudo (2021).

Esta persistência de situações de seca na bacia pode ser evidenciada pelas declarações de situação crítica de escassez hídrica superficial publicadas recentemente em deliberações normativas do IGAM, mais especificamente para a montante da estação P01-Mathias Lobato, nos anos de 2018, 2019 (mencionados anteriormente), e 2021, sendo que este último ano não foi contemplado na análise devido ao fato de que, no momento da obtenção dos resultados, estes dados ainda não estavam disponíveis.

Pode-se observar ainda que o modelo também apresenta a ocorrência de outros eventos de seca ao longo do período futuro, com picos de intensidade que podem ultrapassar -1 ou até -2, conforme já vinha acontecendo para o clima do presente, especificamente na série de dados observados de 1985 a 2019.

Apesar das dificuldades apontadas anteriormente no tocante a performance do modelo, por outro lado, os dados simulados para o clima presente (Figura 14) evidenciam a longa duração e maior intensidade (mesmo que superestimada) da seca nos últimos anos, algo que está de acordo com os resultados do SPI-12 para os dados observados na maioria das estações analisadas (Figura 13).

Para auxiliar na análise dos dados do futuro, a partir dos valores de SPI-12 simulados, foram calculadas as variáveis de intensidade, duração, severidade e frequência da seca para cada uma das estações, conforme apresentado na Tabela 9.

A partir da comparação entre a Tabela 8 (com informações dos dados observados) e Tabela 9, pode-se verificar que a magnitude ou severidade para o evento mais intenso no clima do futuro é superior a observada no clima do presente em todas as estações, com exceção de P07-Rio Vermelho.

O número de meses para os eventos de duração mais longa também aumenta no clima do futuro para 24 em todas as estações (com exceção de São Pedro do Suaçuí – P03 e Santa Maria do Suaçuí - P04 que permanecem os mesmos observados no clima do presente).

Em 7 estações a magnitude ou severidade para a seca com duração mais longa é maior do que no presente. A intensidade média para a seca com duração mais longa também aumenta em todas as estações com exceção de Rio Vermelho (P07).

Tabela 9 - Intensidade, duração, severidade e frequência de seca na escala de SPI-12 para os dados simulados para o futuro.

Variáveis	Municípios das estações pluviométricas								
	01 (ML)	02 (CP)		03 (SPS)	04 (SMS)	05 (AB)	06 (MC)	07 (RV)	08 (SJE)
Pico de intensidade	-2,53	-2,44		-2,50	-2,40	-2,56	-2,81	-2,36	-2,89
Data do Pico de intensidade (mês/ano)	mai-26	fev-36		out-26	out-26	fev-36	mai-26	out-26	out-26
Duração mais longa (meses)	24	24	24	24	24	24	25	24	24
Duração mais longa (data início)	dez-25	dez-25	jan-54	dez-25	dez-25	dez-25	dez-53	dez-25	dez-25
Duração mais longa (data fim)	nov-27	nov-27	dez-55	nov-27	nov-27	nov-27	dez-55	nov-27	nov-27
Magnitude ou Severidade para a seca com duração mais longa	-39,94	-35,67	-27,81	-43,20	-39,66	-36,95	-27,12	-38,75	-44,94
Intensidade média para a seca com duração mais longa	-1,66	-1,49	-1,16	-1,80	-1,65	-1,54	-1,08	-1,61	-1,87
Duração do evento mais intenso (meses)	24	20		24	24	24	17	24	24
Duração do evento mais intenso (data início)	dez-25	fev-35		dez-25	dez-25	dez-25	dez-25	dez-25	dez-25
Duração do evento mais intenso (data fim)	nov-27	set-36		nov-27	nov-27	nov-27	abr-27	nov-27	nov-27
Magnitude ou Severidade para o evento mais intenso	-39,94	-30,91		-43,20	-39,66	-36,95	-33,15	-38,75	-44,94
Intensidade média do evento mais intenso	-1,66	-1,55		-1,80	-1,65	-1,54	-1,95	-1,61	-1,87
Frequência relativa %	32,13	32,69		30,19	32,41	33,80	31,02	27,98	29,36

01 - Mathias Lobato; 02 – Campanário; 03 -São Pedro do Suaçuí; 04 - Santa Maria do Suaçuí; 05 - Água Boa; 06 – Malacacheta; 07 - Rio Vermelho; 08 - São João Evangelista.

Fonte: A autora deste estudo (2022).

Pode-se notar também que há um aumento da frequência relativa dos eventos de seca para as estações de P01-Mathias Lobato, P02-Campanário, P04-Santa Maria do Suaçuí e P05-Água Boa. O mesmo pode ser observado nos mapas das Figuras 16 e 17, que apresentam a frequência relativa de ocorrência desses eventos, tanto para presente quanto para futuro, respectivamente.

A Figura 16 apresenta o mapa de frequência da seca, em qualquer categoria, na bacia do Suaçuí Grande para os dados observados. Com base nesse mapa, pode se verificar que os eventos de seca ocorreram com maior frequência na região da estação pluviométrica P06-Malacacheta, seguida da região da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.

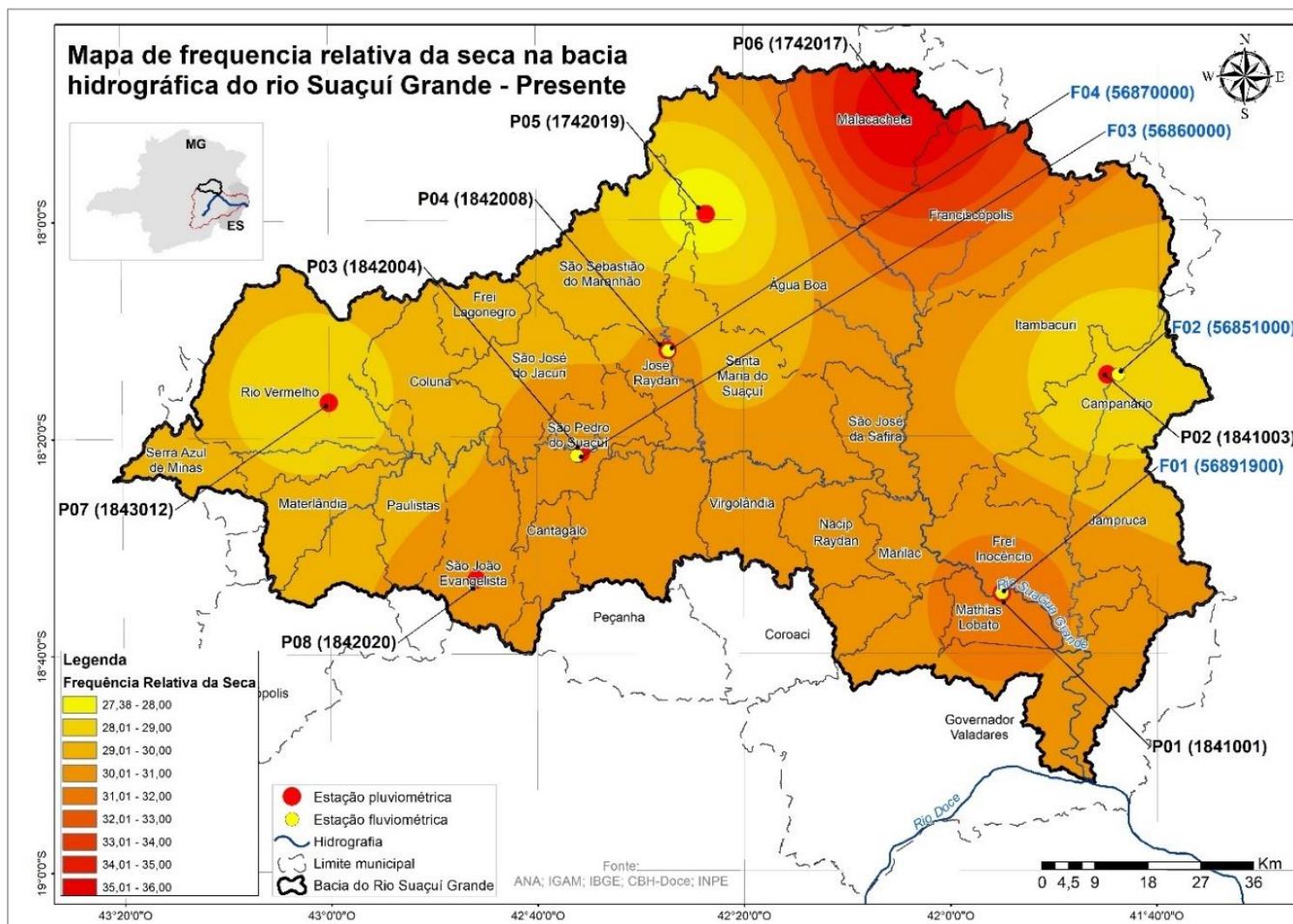
Quando se observa a Figura 17, que apresenta a frequência da seca com base nos dados simulados para o futuro, percebe-se que ocorre uma certa inversão na parte norte/nordeste da bacia, com P06-Malacacheta deixando de ser a região com maior frequência de seca, passando a ser P05-Água Boa, que antes apresentava a menor frequência desses eventos. P02-Campanário, também passa a ser uma das regiões com maior frequência de seca no futuro, diferentemente do que se verifica no clima do presente. Já a estação P01-Mathias Lobato apresenta um pequeno aumento de frequência no futuro. Com apoio dos dados apresentados na Tabela 10, pode-se notar que 50% das estações apresentaram aumento da frequência relativa de ocorrência dos eventos de seca.

Tabela 10 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca na bacia do rio Suaçuí Grande.

Estações pluviométricas ou município	Frequência relativa seca (dados observados) %	Frequência relativa seca (dados simulados futuro) %
P01 - Mathias Lobato	31,30	32,13
P02 - Campanário	28,12	32,69
P03 - São Pedro do Suaçuí	30,32	30,19
P04 - Santa Maria do Suaçuí	30,07	32,41
P05 - Água Boa	27,38	33,80
P06 - Malacacheta	35,94	31,02
P07 - Rio Vermelho	28,61	27,98
P08 - São João Evangelista	30,32	29,36

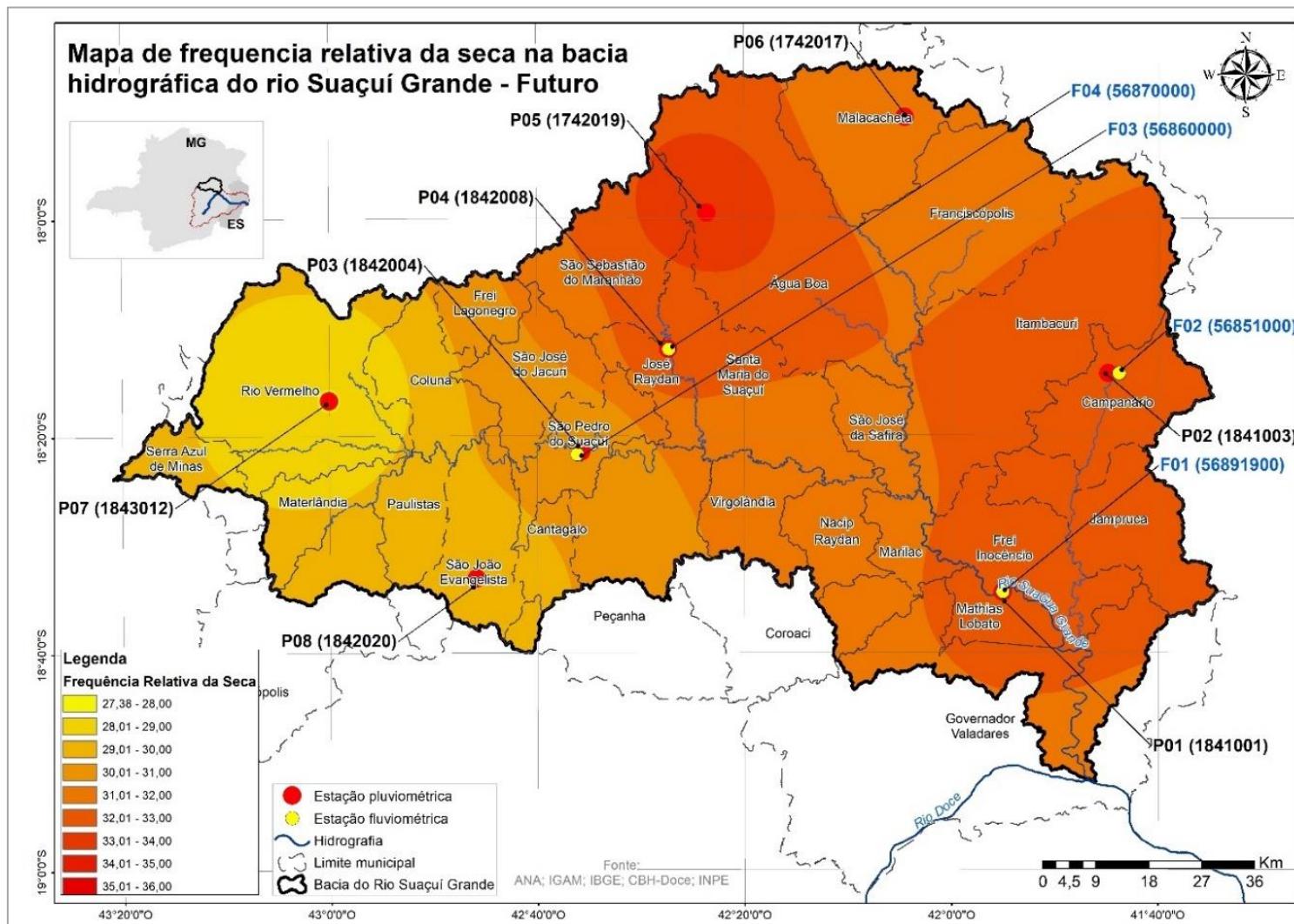
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 16 – Mapa de frequência da seca na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 17 - Mapa de frequência da seca na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Buscando aprofundar a análise, calculou-se a frequência relativa de ocorrência das duas categorias de seca mais intensas, a extrema e a excepcional. Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os mapas da frequência relativa de ocorrência da seca extrema (categoria que abrange os valores de SPI que vão de -1,6 a -1,9), tanto para os dados observados, quanto para os dados simulados para o futuro, respectivamente. É possível observar que Rio Vermelho foi a estação com maior frequência de seca extrema observada até então; contudo, os dados simulados para o futuro mostram que essa frequência se intensifica em Rio Vermelho e em outras regiões localizadas mais ao norte e nordeste da bacia.

Com auxílio da Tabela 11, é possível observar que 6 (75%) das 8 estações do estudo apresentaram aumento da frequência relativa de ocorrência dos eventos de seca extrema.

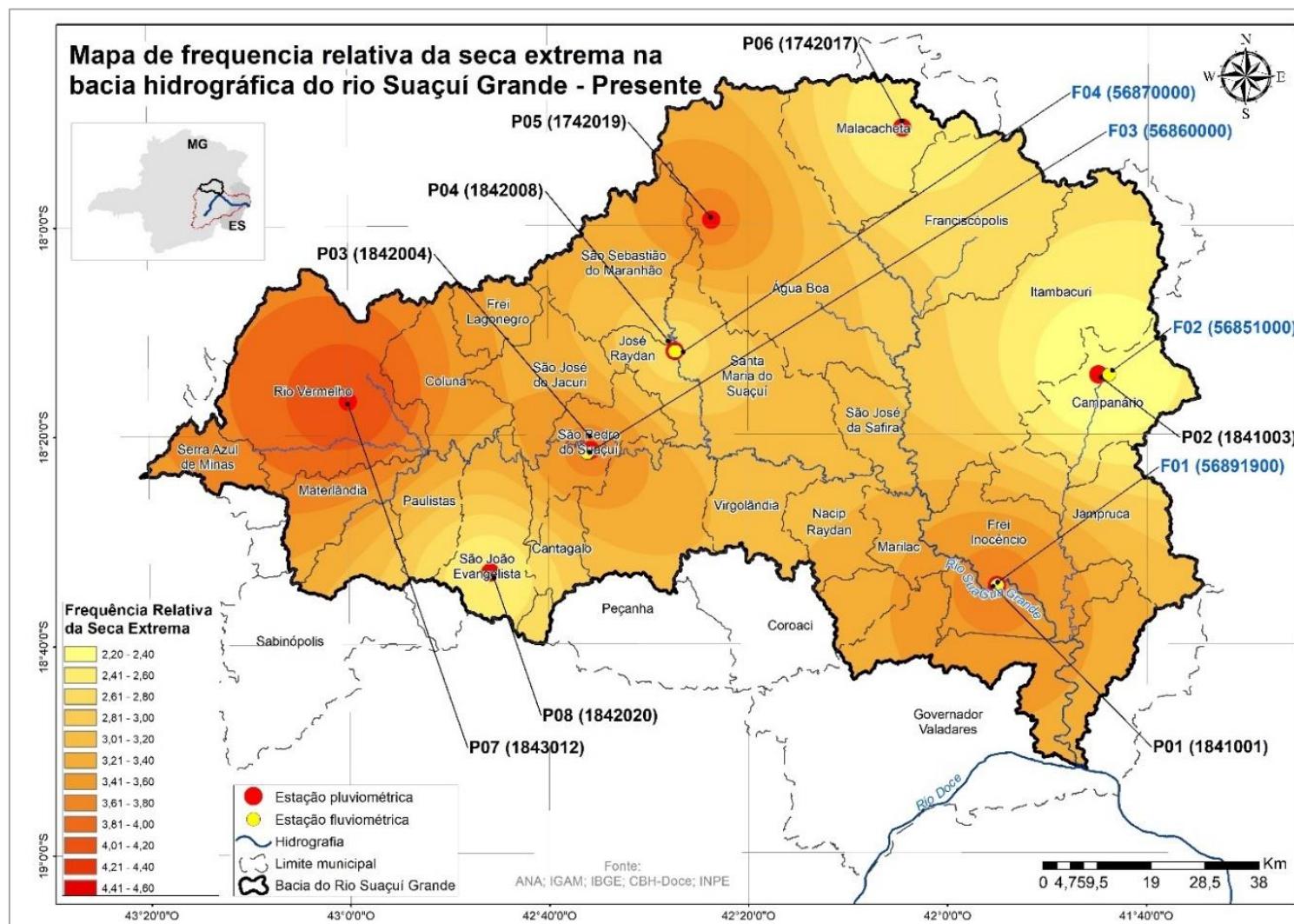
Tabela 11 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca extrema na bacia do rio Suaçuí Grande.

Estações pluviométricas ou município	Frequência relativa seca extrema (dados observados) %	Frequência relativa seca extrema (dados simulados futuro) %
P01 - Mathias Lobato	3,67	3,05
P02 - Campanário	2,20	4,16
P03 -São Pedro do Suaçuí	3,67	2,49
P04 - Santa Maria do Suaçuí	2,69	4,16
P05 - Água Boa	3,67	4,43
P06 - Malacacheta	2,44	4,16
P07 - Rio Vermelho	4,16	4,43
P08 - São João Evangelista	2,44	2,77

Fonte: A autora deste estudo (2022).

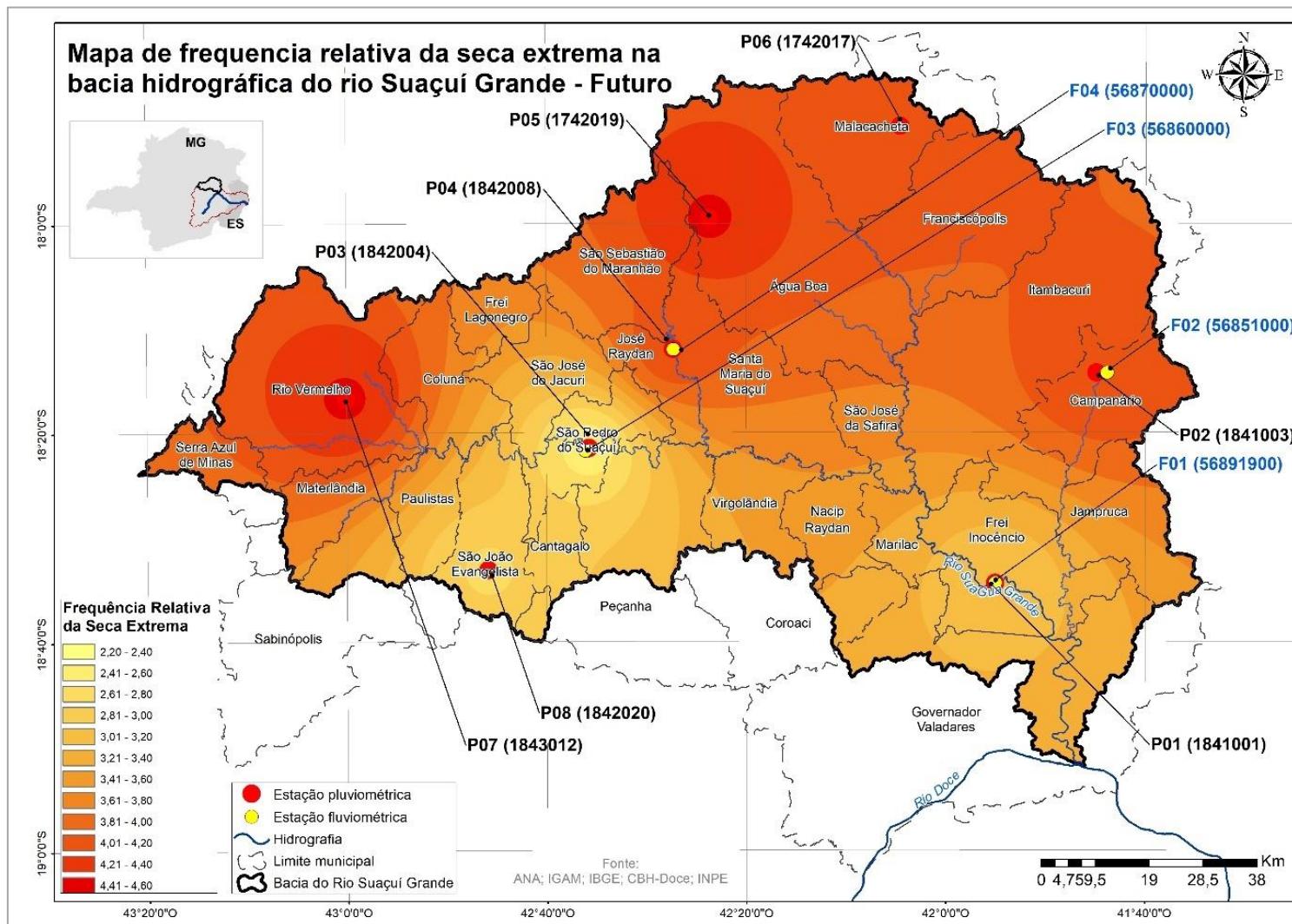
Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os mapas da frequência relativa de ocorrência da seca excepcional (categoria que abrange os valores de SPI menores ou iguais a -2), tanto para os dados observados, quanto para os dados simulados para o futuro, respectivamente. É possível observar, de forma geral, que ocorreu uma maior frequência desses eventos na bacia, com exceção de P05-Água Boa, que apesar de ter sido previsto pelo modelo que terá maior frequência de eventos de seca extrema, a frequência de eventos de seca excepcional irá diminuir.

Figura 18 - Mapa de frequência de seca extrema na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.



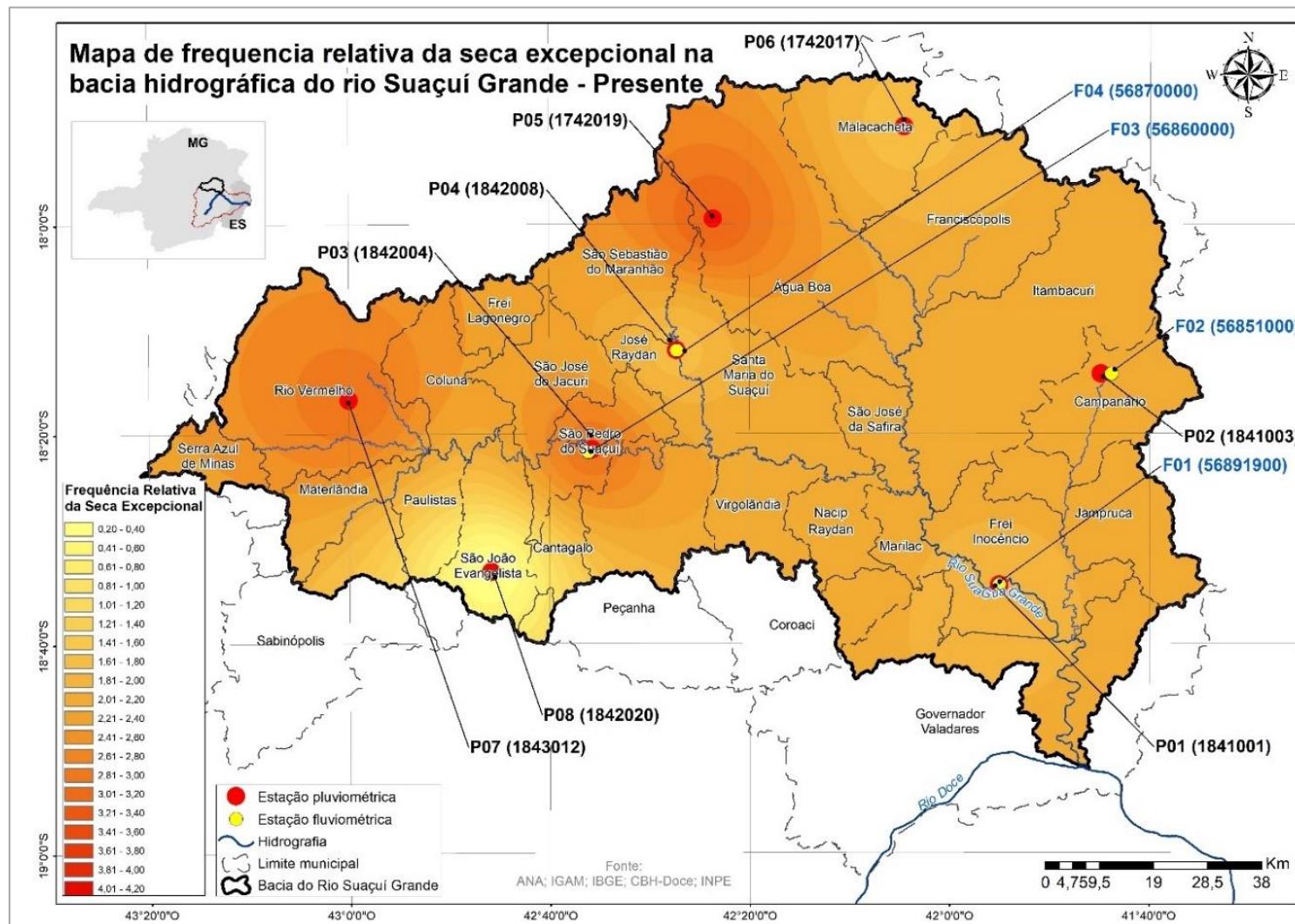
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 19 - Mapa de frequência de seca extrema na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.



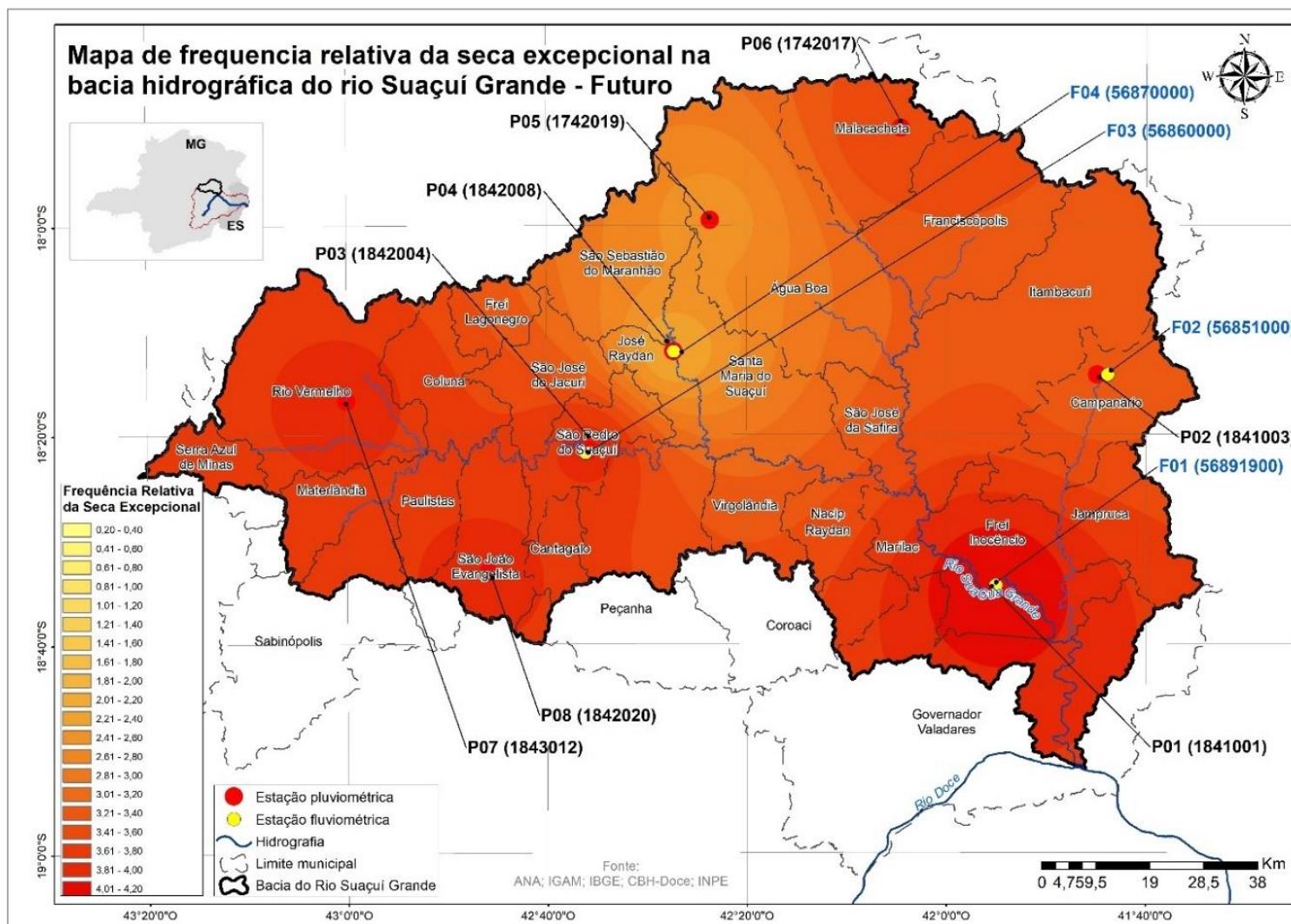
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 20 - Mapa de frequência de seca excepcional na bacia do Suaçuí Grande para o presente de acordo com os dados observados.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 21 - Mapa de frequência de seca excepcional na bacia do Suaçuí Grande para o futuro de acordo com os dados simulados.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Com auxílio da Tabela 12, é possível observar que 7 (87,5%) das 8 estações do estudo apresentaram aumento da frequência relativa de ocorrência dos eventos de seca excepcional, o que é um resultado bastante preocupante para a gestão dos recursos hídricos na bacia.

Tabela 12 – Frequência relativa da ocorrência dos eventos de seca excepcional na bacia do rio Suaçuí Grande.

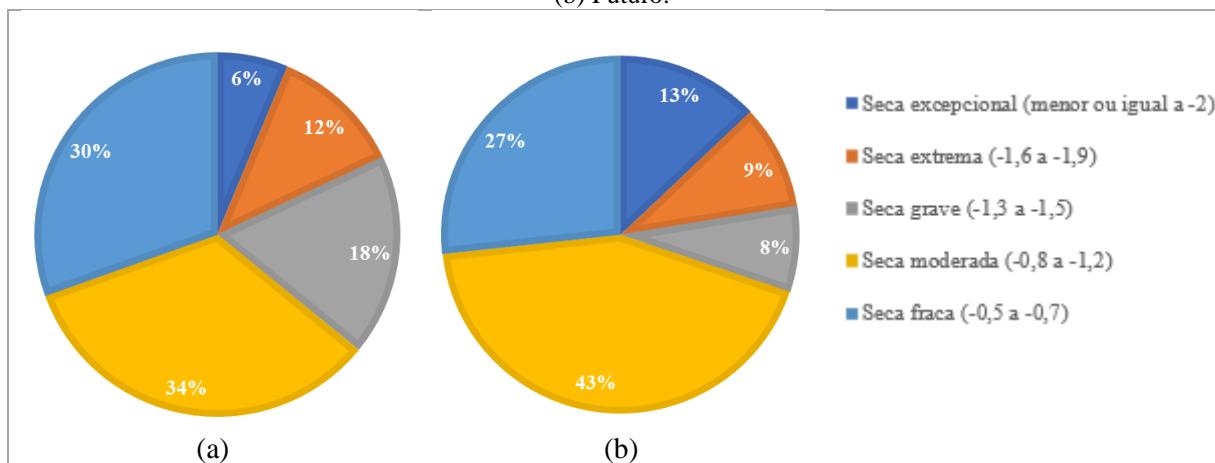
Estações pluviométricas ou município	Frequência relativa seca excepcional (dados observados) %	Frequência relativa seca excepcional (dados simulados futuro) %
P01 - Mathias Lobato	1,96	4,16
P02 - Campanário	2,20	3,32
P03 -São Pedro do Suaçuí	2,93	3,88
P04 - Santa Maria do Suaçuí	1,71	2,22
P05 - Água Boa	3,18	2,49
P06 - Malacacheta	1,71	3,60
P07 - Rio Vermelho	2,93	3,88
P08 - São João Evangelista	0,24	3,88

Fonte: A autora deste estudo (2022).

Para visualizar melhor a frequência relativa de cada categoria de seca, desde fraca até excepcional, foram preparados os gráficos de pizza apresentados a seguir.

A Figura 22 apresenta a frequência relativa das categorias de seca para a estação P01-Mathias Lobato, tanto no presente, quanto no futuro. Pode-se verificar que os eventos de seca moderada são os mais frequentes, tanto no presente, quanto no futuro, embora estes sofrerão um aumento de frequência no futuro. Observa-se também que as secas excepcionais mais do que irão dobrar a sua frequência no futuro.

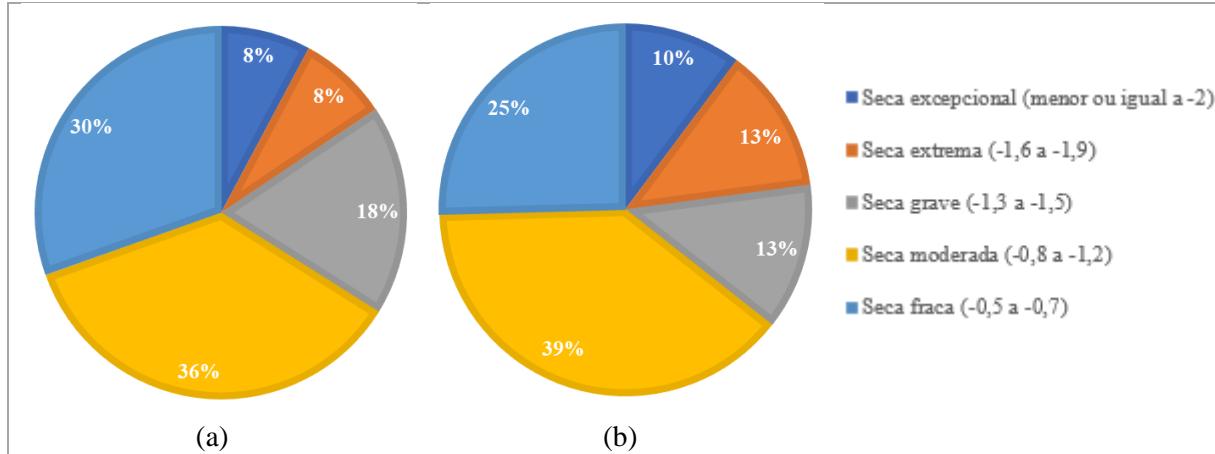
Figura 22 – Frequência relativa das categorias de seca para P01-Mathias Lobato tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Já para P02-Campanário, pode-se verificar na Figura 23 que secas extremas e excepcionais, quando contabilizadas conjuntamente, passarão de 16% para 23% no futuro. As secas moderadas também aumentarão a sua frequência no futuro.

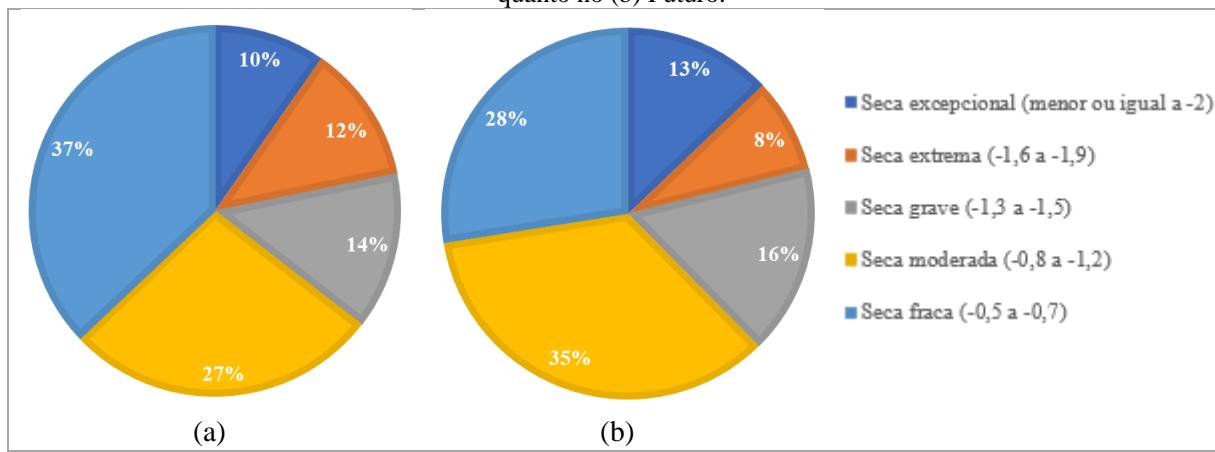
Figura 23 – Frequência relativa das categorias de seca para P02-Campanário tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Já a estação P03-São Pedro do Suaçuí apresenta um aumento na frequência das secas moderadas, graves e excepcionais, como pode ser observado na Figura 24. No entanto, A categoria de seca fraca perderá 9% de sua frequência no futuro, tendo parte dos eventos aumentado a intensidade para acima de -0,8, limiar para seca moderada.

Figura 24 – Frequência relativa das categorias de seca para P03-São Pedro do Suaçuí tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.

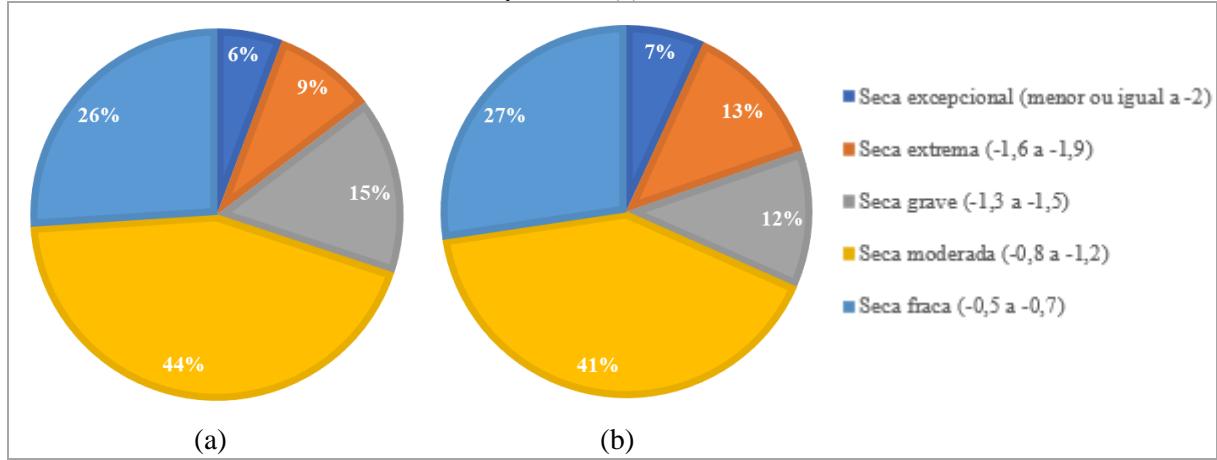


Fonte: A autora deste estudo (2022).

Na estação P04-Santa Maria do Suaçuí, a frequência das secas extremas e excepcionais, contabilizadas conjuntamente, passarão de 15% para 20% no futuro (Figura 25). Haverá

também no futuro uma diminuição na frequência das secas moderadas e graves e um pequeno aumento nas secas fracas.

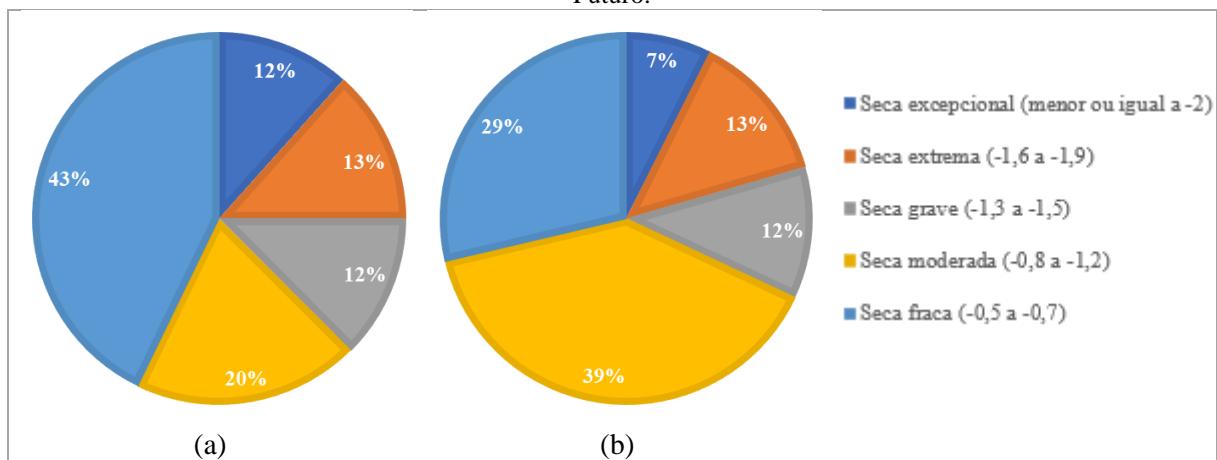
Figura 25 – Frequência relativa das categorias de seca para P04-Santa Maria do Suaçuí tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

A estação P05-Água Boa sofrerá um aumento significativo de 19% na frequência das secas moderadas, enquanto as secas fracas perderão 14% de sua frequência no futuro, como observado na Figura 26. As secas graves e extremas manterão as mesmas frequências no futuro e as secas excepcionais sofrerão uma diminuição de 5%.

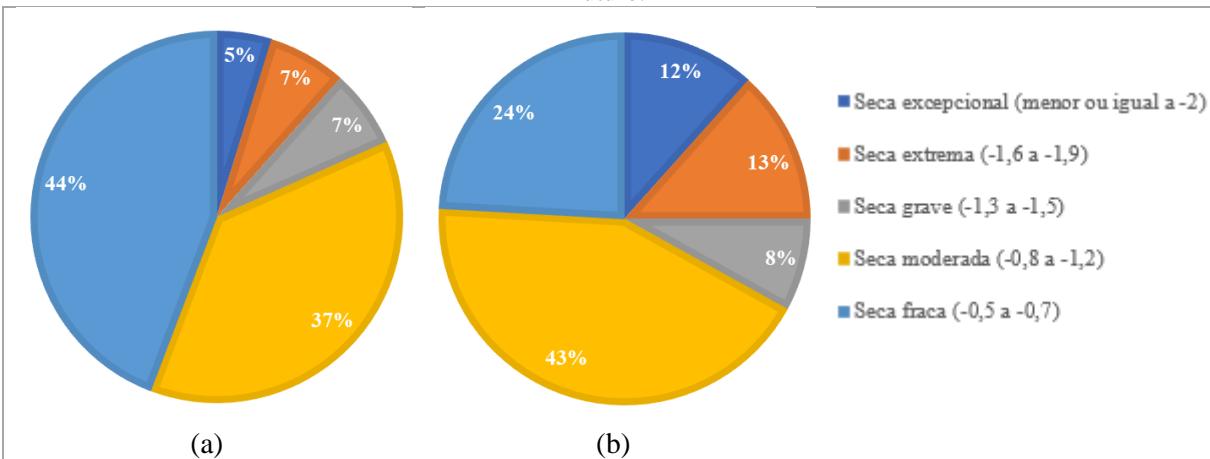
Figura 26 – Frequência relativa das categorias de seca para P05-Água Boa tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

A P06-Malacacheta, como apresentado na Figura 27, sofrerá um aumento na frequência das secas moderadas de 6%, nas extremas de 6% e nas excepcionais de 7%, com um pequeno aumento de 1% nas secas graves. Considerando as categorias de secas extremas e excepcionais, quando contabilizadas conjuntamente, estas passarão de 12% para 25%.

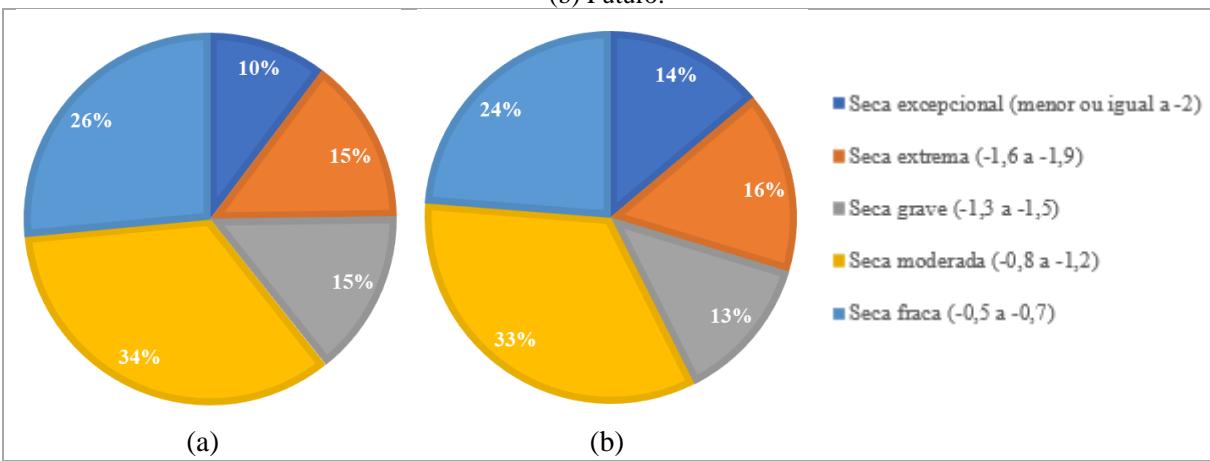
Figura 27 – Frequência relativa das categorias de seca para P06-Malacacheta tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Em P07-Rio Vermelho (Figura 28) a frequência das categorias de secas extremas e excepcionais sofrerão um aumento de 1% e 4%, respectivamente, sendo que quando contabilizadas conjuntamente, passarão de 25% para 30%. As demais categorias sofrerão redução em suas frequências.

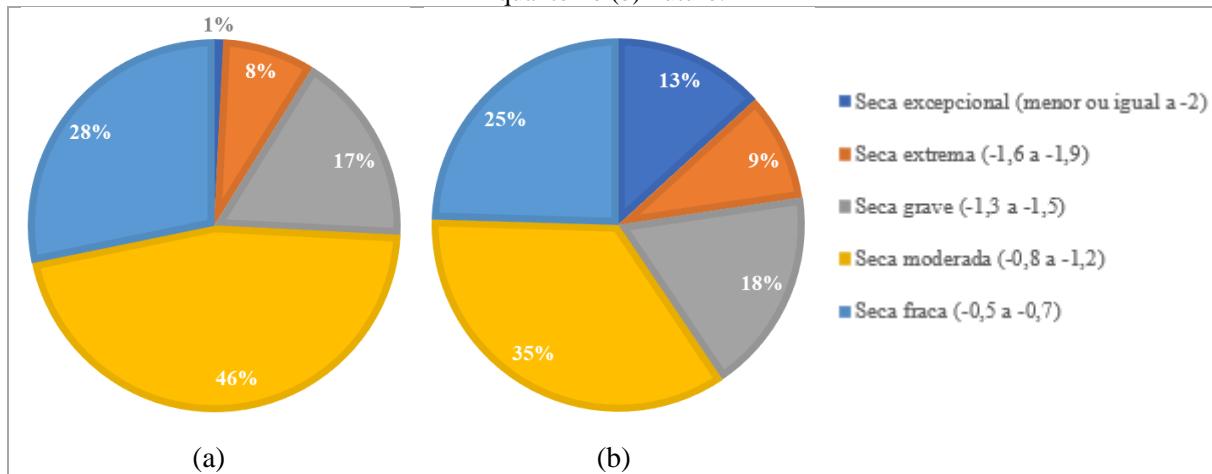
Figura 28 – Frequência relativa das categorias de seca para P07-Rio Vermelho tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Por fim, a P08-São João Evangelista (Figura 29), que apresentou frequência de seca excepcional de 1% no presente, sofrerá um aumento significativo nesta categoria de 12% no futuro. As categorias de secas extremas e excepcionais, quando contabilizadas conjuntamente, passarão de 9% para 22%. As secas graves sofrerão um aumento de 1% e as fracas e moderadas sofrerão redução.

Figura 29 – Frequência relativa das categorias de seca para P08-São João Evangelista tanto no (a) Presente quanto no (b) Futuro.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Importante destacar que, dentre todas as estações analisadas, P05-Água Boa e P07-Rio Vermelho apresentaram a maior frequência para eventos com intensidade inferior a -1,6 (ou seja, considerando secas extremas e excepcionais) para os dados observados. Contudo, para os dados simulados do futuro, P05-Água Boa diminuiu a frequência e P07-Rio Vermelho aumentou, sendo esta última a estação com maior frequência de eventos com intensidade inferior a -1,6 também no cenário futuro.

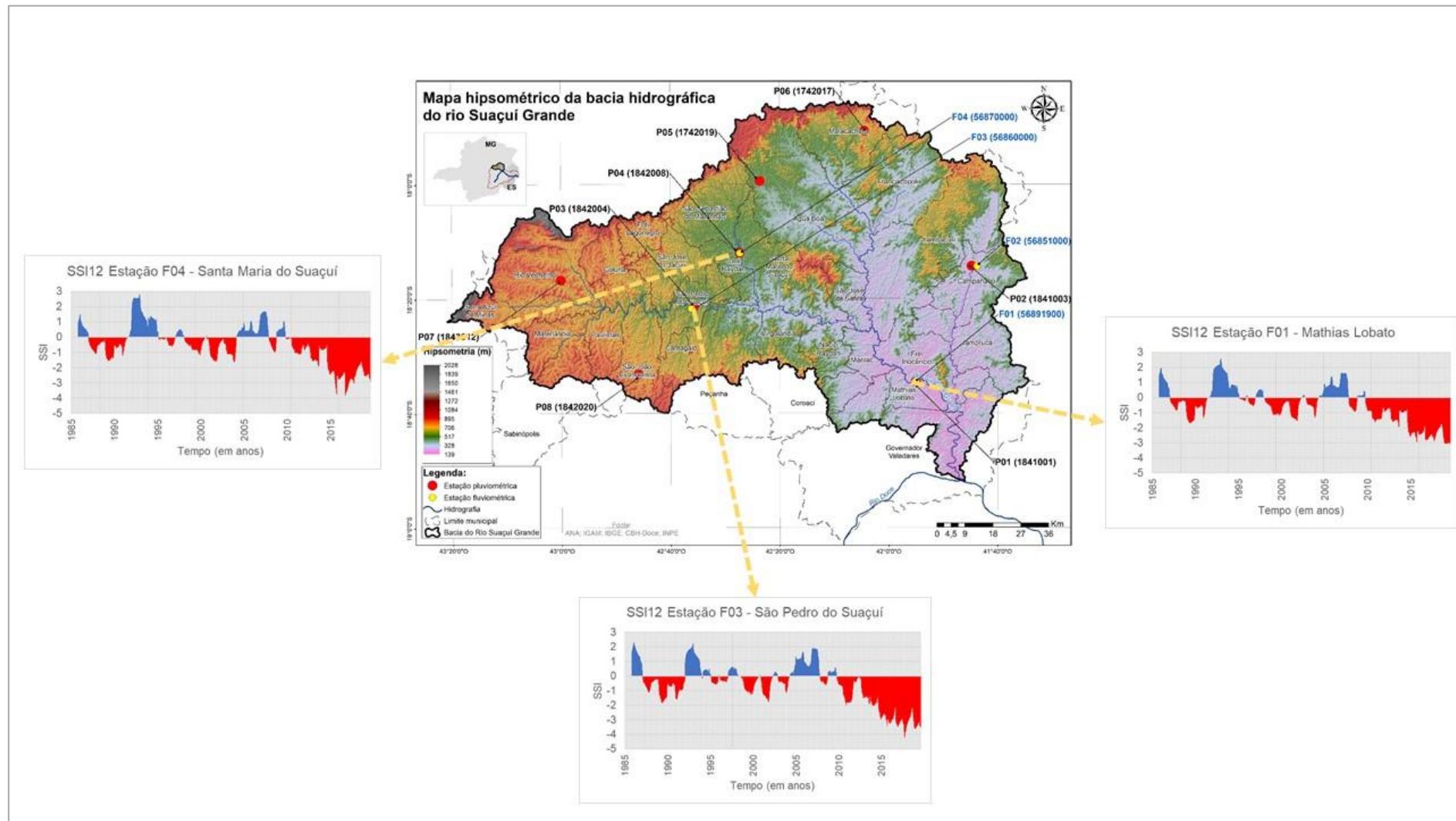
Considerando ainda o limiar de eventos de seca com intensidade inferior a -1,6, P06-Malacacheta e P08-São João Evangelista foram as estações que deram maior salto na frequência desses eventos do presente para o futuro.

É importante destacar o aumento, no futuro, da frequência das secas excepcionais, com exceção da P05-Água Boa (Figura 26), em todas as demais estações, sendo o maior aumento (de 12%) em P08-São João Evangelista (Figura 29).

5.4. SSI DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

A seguir, por meio da Figura 30, são apresentados os gráficos de SSI-12 gerados para cada uma das três estações fluviométricas analisadas, juntamente com as suas localizações indicadas no mapa hipsométrico da bacia do Suaçuí Grande. Para melhor visualização, os gráficos de SSI nas escalas 1, 3, 6 e 12 para todas as estações fluviométricas deste estudo se encontram no Apêndice E.

Figura 30 – Gráficos de SSI-12 gerados para dados de estações fluviométricas indicadas no mapa hipsométrico da bacia do rio Suaçuí Grande.



Fonte: A autora deste estudo (2021).

Assim como observado nos dados de SPI-12 para as estações pluviométricas (Figura 13), a partir de meados de 2010, nota-se a ocorrência de eventos de seca persistentes com intensidades preocupantes, alguns atingindo o limiar de -4 na estação F03-São Pedro do Suaçuí. Pode-se destacar que nos últimos 5 anos da série, a seca ultrapassou a escala de -2, correspondente a seca excepcional, de forma persistente, para as três estações fluviométricas analisadas. Com base nos resultados de SSI, podemos dizer que ocorreu uma mega-seca que, conforme o IPCC (2018b), é uma seca muito longa e generalizada, durando muito mais do que o normal, geralmente uma década ou mais.

Van Loon *et al.* (2016) chamam a atenção para que se reconheça a influência antropogênica para a seca, sendo assim, entende-se que ela pode ser influenciada pelos usos múltiplos da água e, portanto, as captações de água existentes na bacia do rio Suaçuí Grande poderiam estar causando a intensificação de seus efeitos.

Contudo, estudo realizado por Moreira (2021) na bacia do rio Suaçuí Grande, em relação ao balanço hídrico, demonstra que as captações existentes, tanto de vazões de usos outorgados, quanto de usos insignificantes, não produzem interferências sensíveis na disponibilidade hídrica, ou seja, não produzem impactos capazes de comprometer a disponibilidade hídrica a montante de “Vila Matias” (F01-Mathias Lobato), “Campanário” (F02-Campanário) e “São Pedro do Suaçuí” (F03-São Pedro do Suaçuí), considerando a disponibilidade total das mesmas.

Sendo assim, esse estudo de Moreira (2021) corrobora para se inferir que há uma relação entre os resultados obtidos por SPI-12 e SSI-12, entendendo que está ocorrendo uma intensificação e um aumento na frequência de eventos de seca associados a baixos volumes de precipitação, os quais interferem nas vazões dos recursos hídricos. Mais uma vez, infere-se que as chuvas ocorridas a partir de 2010 não foram suficientes para suprir os déficits de umidade na bacia.

5.5. ANÁLISE VAZÃO VERSUS PRECIPITAÇÃO

Para compreender melhor a relação entre os dois índices abordados neste estudo (SPI e SSI), foi realizada uma análise de correlação entre eles, de modo a verificar como a alteração nos padrões de precipitação influencia na alteração dos padrões de vazão. Para isso, uma vez que o SSI foi calculado com dados diários de vazão, foi também aqui calculado o SPI com dados diários de precipitação, utilizando-se o pacote *standaRdized* no *software RStudio*. Foram analisadas as escalas 1, 3, 6, 12 e 24.

A Tabela 13, a seguir, apresenta os valores da correlação entre os índices SSI e SPI nas escalas 1, 3, 6, 12 e 24 meses, para os três municípios com estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Suaçuí Grande.

Tabela 13 – Valores da correlação entre os índices SSI e SPI nas escalas 1, 3, 6, 12 e 24 meses, para os três municípios com estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Suaçuí Grande.

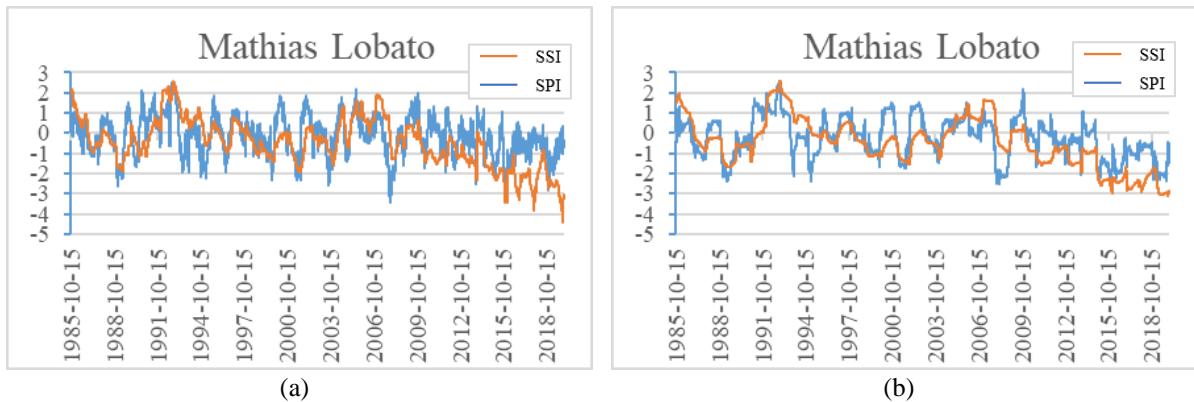
Índices correlacionados	Escala temporal (meses)	Valor da correlação		
		Municípios das estações correlacionadas		
		01-Mathias Lobato	03-São Pedro do Suaçuí	04-Santa Maria do Suaçuí
SSI e SPI	1	0,29	0,36	0,46
	3	0,36	0,37	0,52
	6	0,51	0,49	0,58
	12	0,65	0,64	0,65
	24	0,70	0,71	0,75

Fonte: A autora deste estudo (2022).

Observa-se que as correlações entre o SPI e o SSI aumentam gradativamente de acordo com a escala temporal. O SSI-12 e SPI-12 estão associados a seca hidrológica e nesta escala a correlação entre a vazão e a precipitação é um pouco melhor. Para ilustrar o comportamento dos índices SPI e SSI nas escalas de 6 e 12 meses, os gráficos apresentados na Figura 31, a seguir, apresentam a sobreposição dos índices nestas duas escalas para a estação de Mathias Lobato. Pode-se observar que, a partir de 2010, o SSI apresenta valores ainda mais baixos do que SPI nas duas escalas (6 e 12 meses). Os gráficos comparativos para as demais estações fluviométricas e pluviométricas, se encontram no Apêndice F.

Assim, pode-se inferir que as alterações no regime de precipitação impactam na disponibilidade hídrica nos cursos d’água e reservatórios, contudo, um conjunto de outros fatores podem ter contribuído para os desvios de vazão tão abaixo da normal, tão intensos e duradouros.

Figura 31 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Mathias Lobato.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

De acordo com o IPCC (2018b), além de reduções na precipitação, aumentos na evapotranspiração real afetarão mudanças de armazenamento na umidade do solo e águas subterrâneas. Um estudo de Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020) destaca que as frequências das ondas de calor não estão apenas aumentando, mas acelerando na presença de mudanças climáticas antropogênicas. Borrozino *et al.* (2013) constataram em seu estudo que as temperaturas do solo exposto (solo com menos cobertura) atingem valores extremos durante o dia, resultando em maior armazenamento de calor, que também pode estar contribuindo para a amenização das temperaturas mínimas no período noturno.

Portanto, as características de solo degradado (com menor cobertura) da bacia do Suaçuí Grande, somado ao aumento da temperatura associada aos gases de efeito estufa, podem contribuir com a maior evapotranspiração, podendo esse ser um fator que, junto ao déficit de precipitação, contribuiu para eventos de seca com SSI muito baixos e com maior duração nos últimos anos de dados observados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos índices padronizados de seca, SPI e SSI, que consideram dados pluviométricos e fluviométricos, respectivamente, permitiram identificar, na escala de 12 meses, as secas hidrológicas históricas, sendo possível verificar que, a partir de meados de 2010, passa a haver uma predominância de eventos de seca mais prolongados, frequentes e intensos na bacia do rio Suaçuí Grande. Em meados de 2015, esses eventos de seca são mais perceptíveis, apresentando os maiores picos de intensidade.

Além disso, foi possível notar que estações localizadas em municípios com altitudes mais elevadas, como a P07-Rio Vermelho e P08-São João Evangelista, apresentaram valores negativos de SPI-12 menos intensos desde 2010, em comparação com as demais, inferindo-se que as características dos eventos de seca podem sofrer influência da altitude local.

Em relação aos dados de vazão, o SSI-12 apresentou eventos de seca ainda mais intensos do que os verificados por meio do SPI-12, especialmente a partir de 2015 até o fim da série, 2019. Com base nos resultados de SSI, podemos dizer que ocorreu uma mega-seca, tendo ela iniciado em meados de 2010 e persistido até 2019.

Foi possível inferir que há uma relação entre o SPI-12 e o SSI-12, uma vez que ambos apontam para uma intensificação e aumento na frequência de eventos de seca. Observou-se que as correlações entre o SPI e o SSI aumentam gradativamente de acordo com a escala temporal, indicando, possivelmente, que as alterações no regime de precipitação impactam na disponibilidade hídrica nos cursos d'água e reservatórios da bacia do rio Suaçuí Grande, contudo, não só o déficit na precipitação, mas também a maior evapotranspiração pode estar interferindo nas vazões abaixo da normal.

Os resultados de SPI e SSI corroboram com as declarações de situação crítica de escassez hídrica superficial publicadas em deliberações normativas do IGAM, mais especificamente para a montante da estação P01-Mathias Lobato, em 2018, 2019 e 2021.

Quando se avalia a ocorrência de secas históricas por meio do SPI-12 a partir do modelo ETA-HadGEM2-ES, verifica-se que o modelo apresenta certa dificuldade em representar as especificidades de cada estação, particularmente as relativas às diferenças de altitude, mesmo com uma resolução espacial mais refinada, de 5 km.

O modelo também identificou os eventos de seca mais intensos e duradouros iniciados a partir de meados de 2010, mesmo que superestimando os mesmos. Com relação a projeção de seca

futura, o modelo identifica que a predominância de eventos de seca iniciada a partir de 2010 se estenderá até meados de 2028. Foi possível notar que o modelo identifica que ocorrerão eventos de seca recorrentes que atingirão picos de intensidade -1 e -2, assim como ocorreu nos anos de 1985 a 2019.

Comparando-se os dados gerados para o cenário observado e o futuro, foi possível identificar que, considerando a frequência para eventos com intensidade inferior a -1,6 (ou seja, considerando o conjunto de secas extremas e excepcionais), as estações de P06-Malacacheta e P08-São João Evangelista foram as que apresentaram as maiores diferenças entre o período observado e o futuro. P07-Rio Vermelho é a estação que apresenta as maiores frequências para esses eventos, tanto na série de dados observados, quanto para o clima futuro.

Em relação as secas excepcionais, aquelas mais intensas, que ocorrem a partir do limiar de intensidade -2, estas serão mais frequentes no futuro em quase toda a bacia (87,5% das estações), especialmente nas porções sudeste e sudoeste, com exceção de P05-Água Boa.

Portanto, acredita-se que os municípios de toda a bacia analisada, e em especial as porções sudeste e sudoeste, devam se atentar para a permanência dos eventos de seca hidrológica ao longo dos últimos anos e para as previsões de intensificação e recorrência dessas secas no futuro, promovendo ações de prevenção e mitigação, no curto e médio prazo, como ações de restauração de ecossistemas, visando promover a sustentabilidade dos usos de recursos hídricos e a manutenção das atividades existentes na bacia.

Como sugestão de trabalho futuro, indica-se utilizar outros índices como o SPEI para realizar um comparativo com o SPI e SSI, de modo a identificar a relação entre vazão, precipitação e evaporação.

REFERÊNCIAS

ABEL, Guy J.; BROTTRAGER, Michael; CUARESMA, Jesus Crespo; MUTTARAK, Raya. **Climate, conflict and forced migration.** Global Environmental Change 54. 2019. 239–249. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378018301596>. Acesso em: 21 abr. 2021.

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables.** New York: Dover, 1965. 1046 p.

AGÊNCIA MINAS. **Minas Gerais conquista integração de mais 81 municípios à área de abrangência da Sudene.** 2021. Disponível em:
<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/minas-gerais-conquista-integracao-de-mais-81-municipios-a-area-de-abrangencia-da-sudene>. Acesso em: 01 mai. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas.** Disponível em:
<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 05 fev. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Portaria nº 149, de 26 de março de 2015.** Aprova lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149-2015.pdf. Acesso em: 08 jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual.** Brasília: ANA, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Monitor de secas: Sobre o monitor.** Disponível em: <http://monitordesecas.ana.gov.br/o-monitor-de-secas>. Acesso em: 15 dez. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Monitor de Secas.** Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventos-criticos/monitor-de-secas>. Acesso em: 29 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Monitor de Secas.** Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/tabela-de-classificacao>. Acesso em: 20 fev. 2022.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). **Drought: An Information Statement of the American Meteorological Society.** 2013. Disponível em:
<https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/drought/>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ARGÜESO, D.; EVANS, J.P.; FITA, L. **Precipitation bias correction of very high-resolution regional climate models.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 17, n. 11, p. 4379-4388, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-17-4379-2013>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ASSAD, Eduardo Delgado; PINTO, Hilton Silveira; ZULLO JUNIOR, Jurandir; ÁVILA, Ana Maria Helminsk. **Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, nov. 2004.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS (ALMG). Decreto 44.200, de 29/12/2005. **Institui o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Suaçuí**. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/01/44.200.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2020.

BANCO MUNDIAL. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1ª Edição. Brasília. 2015.

BANCO MUNDIAL. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil**. Brasília, DF: Banco Mundial, 76 p, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1044224/revisao-rapida-e-integrada-da-gestao-de-riscos-agropecuarios-no-brasil-caminhos-para-uma-visao-integrada>. Acesso em: 5 nov. 2020.

BERLATO, Moacir Antonio; CORDEIRO, Ana Paula Assumpção. **Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão**. Agrometeoros, Passo Fundo, v.25, n.2, p.273-302, dez. 2017.

BILLERBECK, Camila; MONTEIRO DA SILVA, Ligia; MARCELLINI, Silvana Susko; MÉLLO JUNIOR, Arisvaldo. **Análise de Decisão Multi-Critério para Avaliar Modelos de Projeção Climática com Correção de Viés na Bacia do Rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Meteorologia. 36 (3). Setembro 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630068>. Acesso em: 18 nov. 2021.

BLAIN, Gabriel Constantino; BRUNINI, Orivaldo. **Quantificação da seca agrícola pelo Índice Padronizado de Evapotranspiração real (IPER) no estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v.65, n.3, p.517-525, 2006.

BLAIN, Gabriel C.; PEZZOPANE, José R. M.; PEZZOPANE, José E. M. BONOMO, Robson. **Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo**. Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.14 no.10. Campina Grande. Out. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001000007>. Acesso em: 06 jan. 2021.

BOKKE, Andualem Shigute; TAYE, Meron Teferi; WILLEMS, Patrick; SIYOUM, Shimelis Asefu. **Validation of General Climate Models (GCMs) over Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia**. Atmospheric and Climate Sciences, vol. 7, 1, 65-75. 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=73583>. Acesso em: 05 jun. 2022.

BORROZZINO, Edmirson; SANQUETTA, Carlos Roberto; CARAMORI, Paulo Henrique; CORTE, Ana Paula Dalla; MAAS, Greyce Charllyne Benedet. **Mudanças no uso do solo e impactos sobre a temperatura do ar e do solo no estado do Paraná, Brasil**. Encyclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, nº.16. 2013. Disponível em:

<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/agrarias/Mudancas%20no%20uso%20do%20sol.o.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Sumário executivo. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/natc;branc3es.pdf>. Acesso em 20 set. 2021.

BRITO, Adriane Lima; VEIGA, José Augusto Paixão; CORREIA, Francis Wagner; CAPISTRANO, Vinícius Buscioli. Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 34, n. 2, páginas 165-177, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334000>. Acesso em: 21 nov. 2021.

BROSKA, Lisa Hanna; POGANIETZ, Witold-Roger; VÖGELE, Stefan. Extreme events defined: A conceptual discussion applying a complex systems approach. Futures, [S.L.], v. 115, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2019.102490>.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Especial Sudam/Sudeco/Sudene - Conheça a história das três Superintendências. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/radio/programas/276308-especial-sudam-sudeco-sudene-conheca-a-historia-das-tres-superintendencias-6-19/>. Acesso em: 01 mai. 2022.

CAMPOS, José Nilson Beserra; STUDART, Ticiana Marinho de Carvalho. Secas no Nordeste do Brasil: Origens, Causas e Soluções. In: IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas. ABRH, Foz do Iguaçu, 2001.

CARMO, Maria Vitória Nava Silva. Análise e previsão estatística do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) para o nordeste do Brasil. Universidade de Brasília. Brasília/DF. Fev. 2018. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/32290/1/2018_MariaVit%C3%A3riaNavaSilvadoCarmo.pdf. Acesso em: 06 jan. 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). 43th reunião de avaliação e previsão de impactos de extremos de origem hidro-geo-climático em atividades estratégicas para o Brasil. 14 de junho de 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/boletim-de-impactos/boletim-de-impactos-de-extremos-de-origem-hidro-geo-climatico-em-atividades-estrategicas-para-o-brasil-2013-14-06-2022-ano-05-no-43/Reuniao_Impactos_43th_CEMADEN_Junho_2022.pdf. Acesso em: 12 jul. 2022.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Monitoramento de Secas e Impactos no Brasil – Abril/2020:

Índice Integrado de Seca (IIS). Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/monitoramento-de-secas-e-impactos-no-brasil-abril2020/>. Acesso em: 18 dez. 2020.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (CEPED-UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012.** Volume Brasil. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>. Acesso em: 02 dez. 2020.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (CEPED-UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012.** Volume Minas Gerais. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>. Acesso em: 02 dez. 2020.

CHAGAS, Vinícius Bogo Portal; BEVACQUA, Alena Gonzalez; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. **Propagação de secas meteorológicas para secas hidrológicas no sul do Brasil.** I Encontro Nacional de Desastres. Porto Alegre/RS. Jul. 2018.

CHOU, S.C; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENKO, J. 2014a. **Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models.** American Journal of Climate Change, 3, 438-454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039.
http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_lViko. Acesso em: 20 set. 2021.

CHOU, S.C; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENKO, J. 2014b. **Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios.** American Journal of Climate Change, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043.
http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_lVikp. Acesso em: 20 set. 2021.

COELHO, Caio A. S.; OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo de; AMBRIZZI, Tércio; REBOITA, Michelle Simões; CARPENEDO, Camila Bertoletti; CAMPOS, José Leandro Pereira Silveira; TOMAZIELLO, Ana Carolina Nóbile; PAMPUCH, Luana Albertani; CUSTÓDIO, Maria de Souza; DUTRA, Lívia Marcia Mosso; ROCHA, Rosmeri P.; REHBEIN, Amanda. **The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections.** Climate Dynamics, v. 46, n. 11-12, p. 3737-3752, 2015.

COLLINS, W.J.; ET AL. **Development and Evaluation of an Earth-System Model - HadGEM2.** Geoscientific Model Development, 4, 1051-1075. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>. Acesso em: 26 abr. 2021.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Suaçuí - PARH Suaçuí.** Mai. 2010.

Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PARH_Suacui.pdf. Acesso em: 30 dez. 2020.

CUNHA, Ana Paula M. A.; ZERI, Marcelo; LEAL, Karinne Deusdará; COSTA, Lidiane; CUARTAS, Luz Adriana; MARENGO, José Antônio; TOMASELLA, Javier; VIEIRA, Rita Marcia; BARBOSA, Alexandre Augusto; CUNNINGHAM, Christopher; GARCIA, João Victor Cal; BROEDEL, Elisangela; ALVALÁ, Regina; RIBEIRO-NETO, Germano. **Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019.** *Atmosphere*, 10, 642. 2019. doi:10.3390/atmos10110642. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/11/642>. Acesso em: 12 mai 2022.

DALEZIOS, R. N.; LOUKAS, A.; VASILIADES, L.; LIAKAPOULOS, E.: **Severity-Duration-Frequency analysis of droughts and wet periods in Greece.** *Hydrol. Sci. J.*, 45(5), 751–769, 2000.

DUPIGNY-GIROUX, Lesley-Ann. **Towards characterizing and planning for drought in Vermont-Part 1: A climatological perspective.** *Jornal of the American Water Resources Association*, 37(3), 505–524, 2001. Disponível em: https://www.uvm.edu/~vtstclim/Documents/publications/drought_1_JAWRA.pdf. Acesso em: 05 jun. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Convivência com a seca: perguntas e respostas.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>. Acesso em 25 mai. 2021.

FENG, Wei; LU, Hongwei; YAO, Tianci; YU, Qing. **Drought characteristics and its elevation dependence in the Qinghai–Tibet plateau during the last half-century.** *Sci Rep* 10, 14323. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-71295-1>. Acesso: 10 jun. 2022.

FERNANDES, Diego Simões; HEINEMANN, Alexandre Bryan; PAZ, Rosidalva Lopes Feitosa; AMORIM, André de Oliveira; CARDOSO, Aparecida Socorro. **Índices para a quantificação da seca.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, dez. 2009. 48 p. ISSN 1678-9644.

FERNANDES, Diego Simões; HEINEMANN, Alexandre Bryan; PAZ, Rosidalva Lopes Feitosa; AMORIM, André de Oliveira. **Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.45, n.8, p.771-779, ago. 2010.

FERNANDES, Valesca Rodriguez; CUNHA, Ana Paula Martins do Amaral; PINEDA, Luz Adriana Cuartas; LEAL, Karinne R. Deusdará; COSTA, Lidiane C.O.; BROEDEL, Elisangela; FRANÇA, Daniela de Azeredo; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; SELUCHI, Marcelo E.; MARENGO, José. **Secas e os impactos na região sul do Brasil.** *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano 17, vol. 28. 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14748/7761>. Acesso em: 12 mai. 2022.

GARDNER, Leonard Robert. **Assessing the effect of climate change on mean annual runoff.** Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 379, n. 3-4, p.351-359, dez. 2009. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.021>. Acesso em: 01 dez. de 2019.

HAYES, Michael; SVOBODA, Mark; WALL, Nicole; WIDHALM, Melissa. **The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended.** American Meteorological Society. Washington DC - USA, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM) (REALIZAÇÃO). **Sala de situação de eventos hidrometeorológicos críticos de Minas Gerais.** Manual Operativo. Belo Horizonte. Fev. 2016. Disponível em: https://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/progestao-1/acompanhamento-programa/aplicacao-dos-recursos/acompanhamento-das-metas-de-cooperacao-federativa/manuais-de-salas-de-situacao/manual-de-operacao-da-sala-de-situacao_igam_mg.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Notícias: **IGAM declara situação de escassez hídrica em porção hidrográfica da bacia do Rio Suaçuí.** Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/1-ultimas-noticias/2128-igam-declara-situacao-de-escassez-hidrica-em-porcao-hidrografica-da-bacia-do-rio-suacui>. Acesso em: 04 out. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria IGAM Nº 34, de 31 de outubro de 2018.** Declara Situação Crítica de Escassez Hídrica Superficial na porção hidrográfica localizada a montante da estação Vila Matias e a sua bacia de contribuição. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=47079>. Acesso em: 04 out. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria IGAM Nº 25, de 25 de junho de 2019.** Declara situação crítica de escassez hídrica superficial na porção hidrográfica localizada a montante da estação Vila Matias e a sua bacia de contribuição. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49138>. Acesso em: 04 out. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria IGAM Nº 39, de 22 de agosto de 2019.** Prorroga o prazo de situação crítica de escassez hídrica superficial na porção hidrográfica a montante da estação Vila Matias e sua bacia de contribuição, definida pela Portaria IGAM n.º 25, de 25 de junho de 2019. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49439>. Acesso em: 04 out. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria IGAM Nº 53, de 30 de outubro de 2019.** Prorroga o prazo de situação crítica de escassez hídrica superficial na porção hidrográfica a montante da estação Vila Matias e sua bacia de contribuição, definida pela Portaria IGAM n.º 39, de 22 de agosto de 2019. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49961>. Acesso em: 04 out. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria IGAM Nº 71, de 23 de setembro de 2021.** Declara situação crítica de escassez hídrica superficial na porção hidrográfica localizada a montante da estação Vila Matias e a sua bacia de contribuição.

Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=54293>. Acesso em: 05 jun. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Clima: monitoramento de precipitação. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/prec>. Acesso em: 18 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Índice De Precipitação Padronizado (SPI): Monitoramento de secas. Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>. Acesso em: 18 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Plataforma de coleta de dados**. Disponível em: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>. Acesso em: 15 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 10 jul. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Aquecimento Global de 1,5°C**. Original, em inglês, publicado pelo IPCC em outubro de 2018, Suíça. Versão em português publicada pelo MCTIC em julho de 2019, Brasil. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Annex I: Glossary** [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_AnnexI.pdf. Acesso em: 20 mai. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY. **Commentary on Standardized Precipitation Index (SPI)**. Disponível em: https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/climatview/spi_commentary.html. Acesso em: 16 mai. 2022.

JESUS, Elaisa Teixeira; AMORIM, Jhones da Silva; JUNQUEIRA, Rubens; VIOLA, Marcelo Ribeiro; MELLO, Carlos Rogério. **Meteorological and hydrological drought from 1987 to 2017 in Doce River Basin, Southeastern Brazil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 25, e29, 2020.

JIMENEZ, K. Q.; DOMEcq, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.16, 2008.

JULIANI, Bruno Henrique Toná; OKAWA, Cristhiane Michiko Passos. **Application of a Standardized Precipitation Index for Meteorological Drought Analysis of the Semi-Arid Climate Influence in Minas Gerais, Brazil**. Hydrology, 2017, 4, 26; doi:10.3390/hydrology4020026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/4/2/26>. Acesso em: 07 jan. 2021.

JÚLIO, W. S.; FERREIRA, W. P. M.; FIALHO, E. S.; SOUZA, C. F. **Importância do uso do índice padronizado de precipitação (SPI) para região produtora de café das matas de Minas**. 41º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. 2015. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/7216>. Acesso em: 21 mar. 2021.

LEHMANN, E.L; CASELLA, G. Theory of Point Estimation. Springer, New York, 2nd ed. 519 p., 1998. Disponível em: <https://www.dcpahvpm.org/E-Content/Stat/E%20L%20Lehman.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.

LIMA, Rafael Petruceli Coelho. **Avaliação de índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2016.

LIMA, Rafael P.C.; SILVA, Demetrius D.; MOREIRA, Michel C.; PASSOS, Jéssica B.M.C.; COELHO, Clívia D.; ELESBON, Abrahão A.A. **Development of an annual drought classification system based on drought severity indexes**. An. Acad. Bras. Ciênc. vol.91. no.1. Rio de Janeiro: 2019. DOI 10.1590/0001-3765201920180188.

LU, Mengtian; HAZENBERG, Pieter; LEI, Xiaohui; WANG, Hao. **The impact of elevation and flow dynamics on hydrological drought and wet spell characteristics in semi-arid southeast Arizona**. Hydrology and Earth System Sciences. Discuss. [preprint]. 2019. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-356/hess-2019-356.pdf>. Acesso: 10 jun. 2022.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.P.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENKO, J.; GIAROLLA, A. **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution**. Theor Appl Climatol. 2017. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 20 set. 2021.

MARQUES, Felipe de Azevedo. **Sistema de controle dinâmico para a gestão dos usos múltiplos da água**. 251 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/784>. Acesso em: 05 jan. 2021.

MCKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California. Jan. 1993.

MENDES, Adérito. **Seca em curso, curta ou longa? Seca tradicional ou efeito das alterações climáticas?** Revista APDA. Ed.7: Aquecimento Global. 4º trimestre. P 50-63, 2017. Disponível em: <https://www.apda.pt/pt/pagina/87/revista-apda/?p=pt/pagina/87/revista-apda/>. Acesso em: 19 nov. 2020.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; ET AL. **An Upgraded Version of the Eta Model**. Meteorology and Atmospheric Physics, 116, 63-79. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>. Acesso em: 26 abr. 2021.

MISHRA, Ashok K.; SINGH, Vijay P. **A review of drought concepts**. J. Hydrol. 391, 202–216. 2010.

MODARRES, Reza. **Streamflow drought time series forecasting**. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2007. DOI 10.1007/s00477-006-0058-1.

MOREIRA, Guilherme de Barros. **Diagnóstico da disponibilidade hídrica superficial da bacia hidrográfica do rio Suaçuí-MG e os impactos dos usos insignificantes de água**. 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2980/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Profagua_Guilherme_Final_P%C3%A7%C3%83s_Defesa%20-%20Guilherme%20Moreira.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 mai. 2022.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans. Am. Soc. Agric. and Biol. Eng., 50(3), 885–900. 2007.

MUSEU DO AMANHÃ. Exposição principal: Antropoceno. Disponível em: <https://museudoamanha.org.br/pt-br/antropoceno#:~:text=Antropoceno%20%C3%A9%20um%20termo%20formulado,ceno%20%80%9D%20denota%20as%20eras%20geol%C3%B3gicas.&text=Aquela%20em%20que%20o%20Homo,de%20dura%C3%A7%C3%A3o%20e%20abrange%C3%A7%C3%A3o%20geol%C3%B3gicas>. Acesso em: 27 mar. 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **2018 fourth warmest year in continued warming trend, according to NASA, NOAA**. 06 fev. 2019. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2841/2018-fourth-warmest-year-in-continued-warming-trend-according-to-nasa-noaa/>. Acesso em: 21 mar. 2021

NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER (NDMC). **U.S. Drought Monitor: What is the USDM.** Disponível em: <https://droughtmonitor.unl.edu/About/WhatistheUSDM.aspx>. Acesso em: 05 jun. 2021.

NOBRE, Carlos Afonso; YOUNG, Andrea Ferraz; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento; MARENGO ORSINI, José Antônio; NOBRE, Antonio Donato; OGURA, Agostinho Tadashi; THOMAZ, Osório; OBREGÓN PÁRRAGA, Guillermo Oswaldo; MOREIRA DA SILVA, Gustavo Costa; VALVERDE, Maria; SILVEIRA, André Carvalho; RODRIGUES, Graciela de Oliveira. **Chapter 11: Vulnerability of Brazilian Megacities to Climate Change: the São Paulo Metropolitan Region (RMSP).** Climate Change in Brazil: economic, social and regulatory aspects. Brasilia: IPEA, p. 197-219. 2011. ISBN 978-85-7811-128-1.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco; SOUSA, Gustavo; NUNES, Marlon; FERNANDES, Manoel; TOMZHINSKI, Gustavo. **Relação Entre o Standardized Precipitation Index (SPI) e os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia.** Floresta e Ambiente vol. 24, Seropédica. Epub May 08, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.003116>. Acesso em: 07 jan. 2021.

PANAGOULIA, Dionysia G.; DIMOU, George. **Definition and effects of droughts.** Conference on Mediterranean Water Policy: building on existing experience, Mediterranean Water Network. Valencia, Spain. Volume: I, General lecture, invited presentation. 1998. PANOFSKY, H. A.; BRIER, G. W. Some applications of statistics to meteorology. University Park: Pennsylvania State University, 1958. 224 p.

PEDRO-MONZONÍS, María; SOLERA, Abel; FERRER, Javier; ESTRELA, Teodoro; PAREDES-ARQUIOLA, Javier. **A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management.** Journal of Hydrology (Amsterdam), 527, 482-493. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.003>.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. **Increasing trends in regional heatwaves.** Nature Communications, vol.11, nº. 3357. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16970-7>. Acesso em: 20 jul. 2022.

PETRUNGARO, Ana Carolina Novello; MASSERA DA HORA, Mônica de Aquino Galeano. **Avaliação das Secas Meteorológica e Hidrológica na Bacia Contribuinte à Barragem de Juturnaíba, Estado do Rio de Janeiro, Brasil.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 42 – 4. 2019. p. 309-321.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. Numerical recipes in C. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 768 p.

PORTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL (PCLIMA) DO INPE/MCTI. 2019. Disponível em: <http://pclima.inpe.br/>. Acesso em: 16 abr. 2021.

R PROJECT. The R Project for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

REBOITA, Michelle Simões; MARRAFON, Vitor Hugo de Almeida; LLOPART, Marta; ROCHA, Rosmeri Porfírio. **Cenários de Mudanças Climáticas Projetados para o Estado**

de Minas Gerais. Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], nov. 2018. ISSN 2237-8642. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60524>. Acesso em: 28 oct. 2020.

REBOITA, Michelle Simões; RODRIGUES, Marcelo; SILVA, Luiz Felipe; ALVES, Maria Amélia. **Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Climatologia. Ano 11. vol.17. 2015. ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica). Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/41493/27319>. Acesso em: 20 abr. 2021.

REIS, André Luiz; SILVA, Matias Sales; REGIS, Matheus Vicente; SILVEIRA, Wilson Willian; SOUZA, Amanda Caroline; REBOITA, Michelle Simões; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto. **Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 11, p. 652-660, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234146>. Acesso em: 05 out. 2020.

RSTUDIO. RStudio Release Notes: RStudio 1.4.1103. Disponível em: <https://rstudio.com/products/rstudio/release-notes/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

SARAVI, M. Mohseni; SAFDARI, A. A.; MALEKIAN, A. **Intensity-Duration-Frequency and spatial analysis of droughts using the Standardized Precipitation Index.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 6, páginas 1347–1383, 2009. Disponível em: www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/1347/2009/. Acesso em: 25 out. 2021.

SHRESTHA, Manish; ACHARYA, Suwash Chandra; SHRESTHA, Pallav Kumar. **Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful?** Royal Meteorological Society. Meteorological Applications. Volume 24, Ed. 3, páginas 531-539. Julho 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/met.1655>. Acesso em: 17 out. 2021.

SILVA NETO, Oscar Lourenço; CUNHA, Luiza Eluina Moreira; MARQUESAN, Fabio Freitas Schilling. **As implicações socioeconómicas da seca sobre a população de um perímetro irrigado.** I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido. 2016.

SOBRAL, Bruno Serafini; OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco; GOIS, Givanildo; PEREIRA-JÚNIOR, Edson Rodrigues. **Spatial variability of SPI and RD_Ist drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil.** International Journal of Climatology. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5542>. Acesso em: 7 jan. 2021.

SPINONI, J.; ANTOFIE, T.; BARBOSA, P.; BIHARI, Z.; LAKATOS, M.; SZALAI, S.; SZENTIMREY, T.; VOGT, J. **An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010.** Advances in Science and Research, 10, 21–32, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/asr-10-21-2013>. Acesso em: 15 mai. 2022.

SUTANTO, Samuel Jonson; VAN LANEN, Henny A. J. **Catchment memory explains hydrological drought forecast performance.** Nature: Scientific Reports. Fevereiro 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-06553-5>. Acesso em: 24 mai 2022.

TELESCA, Luciano; LOVALLO, Michele; LOPEZ-MORENOC, Ignacio; VICENTE-SERRANO, Sergio. **Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain)**. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, fev. 2012. DOI: 10.1016/j.physa.2011.10.023.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 53 p.

THOMPSON, S.: **Hydrology for water management**. A. A. Balkema Publication, Rotterdam, The Netherlands, 476 pp., 1999.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (organizador). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2 ed.; 2.reimpr. – Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 2001.

UNESCO. **Water for People, Water for Life: Executive Summary**. The United Nations World Water Development Report. 2003. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr1-2003/downloads/>. Acesso em: 03 fev. 2021.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction**. Geneva, Switzerland, 2019.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). **Human Cost of Disasters 2000-2019**. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-2000-2019>. Acesso em: 06 jun. 2021.

UNITED NATIONS WATER (UN-WATER) (Coord). **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Relatório-síntese 2018 sobre Água e Saneamento**. Resumo Executivo. Unesco: Brasil. 2018.

VALADÃO, Cati E. A.; SILVA, Bruce K. N.; OLIVEIRA, Priscilla. T.; SCHMIDT, Darlan. M.; ANDRADE, Rênio L.; CORREIA FILHO, Washington L. F.; BARRETO, Naurinete J. C.; MATA, Maria V. M.; LOPO, Alexandre L. B.; SPYRIDES, Maria H. C.; LUCIO, Paulo S. **Uma Análise Comparativa de Alguns Índices de Aridez Aplicados às Capitais do Nordeste do Brasil Aplicados às Capitais do Nordeste do Brasil**. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém-PA, 2010.

VAN LOON, Anne F.; GLEESON, Tom; CLARK, Julian R. A.; et al. **Drought in the Anthropocene**. Nature Geoscience, v. 9, n. 2, p. 89–91. 2016.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; LÓPEZ-MORENO, Juan I.; BEGUERÍA, Santiago; LORENZO-LACRUZ, Jorge; AZORIN-MOLINA, Cesar; MORÁN-TEJEDA, Enrique. **Accurate computation of a streamflow drought index**. Journal of Hydrologic Engineering, 2012.

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. **Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions**. Water International, 10:3, 111-120. 1985. DOI: 10.1080/02508068508686328.

WORLD FOOD SUMMIT. Rome Declaration on World Food Security. 1996. Disponível em: <http://www.fao.org/3/w3613p/w3613p00.htm>. Acesso em: 08 jun. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) and GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. 2016.

WU, Jiefeng; CHEN, Xiaohong. Spatiotemporal trends of dryness/wetness duration and severity: The respective contribution of precipitation and temperature. Atmospheric Research 216, 176–185. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809518307257>. Acesso em: 05 mai. 2022.

ZHAO, Menglong; HUANG, Shengzhi; HUANG, Qiang; WANG, Hao; LENG, Guoyong; XIE, Yangyang. Assessing socio-economic drought evolution characteristics and their possible meteorological driving force. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 10:1, 1084-1101. 2019. ISSN: 1947-5705. DOI: 10.1080/19475705.2018.1564706.

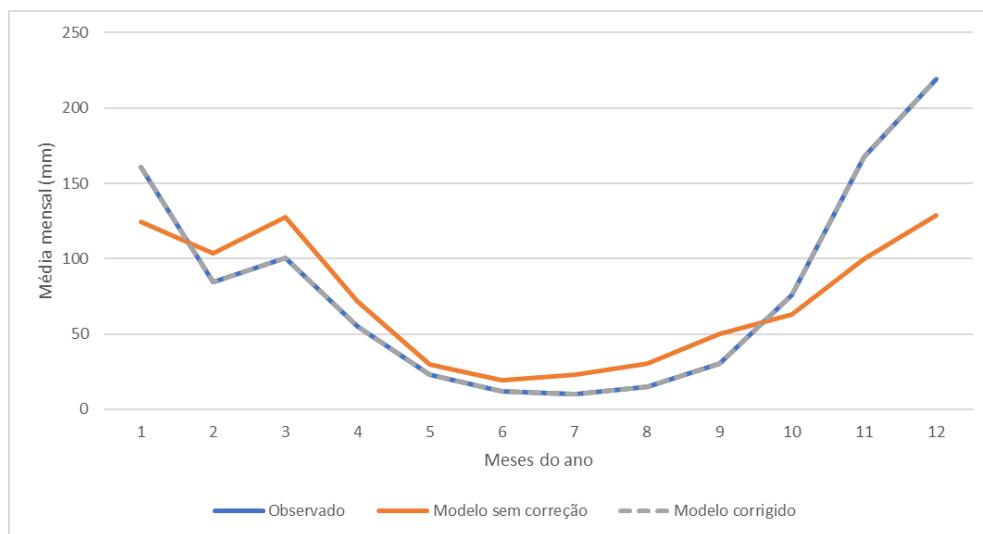
ZHENG, Fei; YUAN, Yuan; DING, Yihui; LI, Kexin; FANG, Xianghui; ZHAO, Yuheng; SUN, Yue; ZHU, Jiang; KE, Zongjian; WANG, Ji; JIA, Xiaolong. The 2020/21 Extremely Cold Winter in China Influenced by the Synergistic Effect of La Niña and Warm Arctic. Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 39, 546–552. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00376-021-1033-y.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2022.

ZSELECKY, Laura; YOSEF, Sivan. Are shocks really increasing? A selective review of the global frequency, severity, scope, and impact of five types of shocks. 2020 CONFERENCE. v. 5. International Food Policy Research Institute: Addis Ababa, Ethiopia. 2014.

ZÚÑIGA-BELLO, Patricia. Protección civil y desastres naturales. En: Seminarios de protección civil y desastres inducidos por fenómenos naturales. Memorias. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, A. C. México. pp: 25-33. 2007. Disponível em: http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/proteccion_civil.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

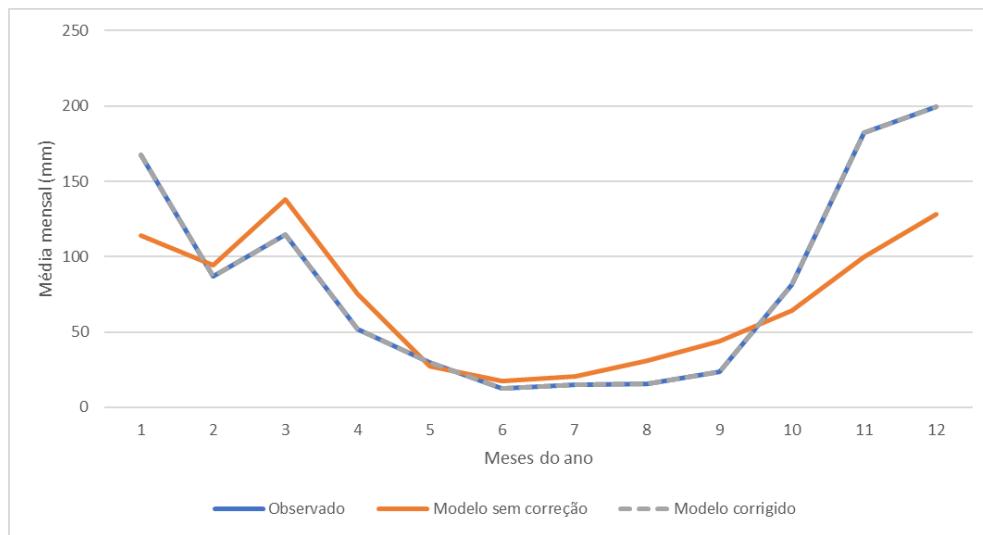
APÊNDICE A – Média mensal (mm) de dados observados, modelo sem correção e modelo corrigido

Figura 32 – Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Mathias Lobato.



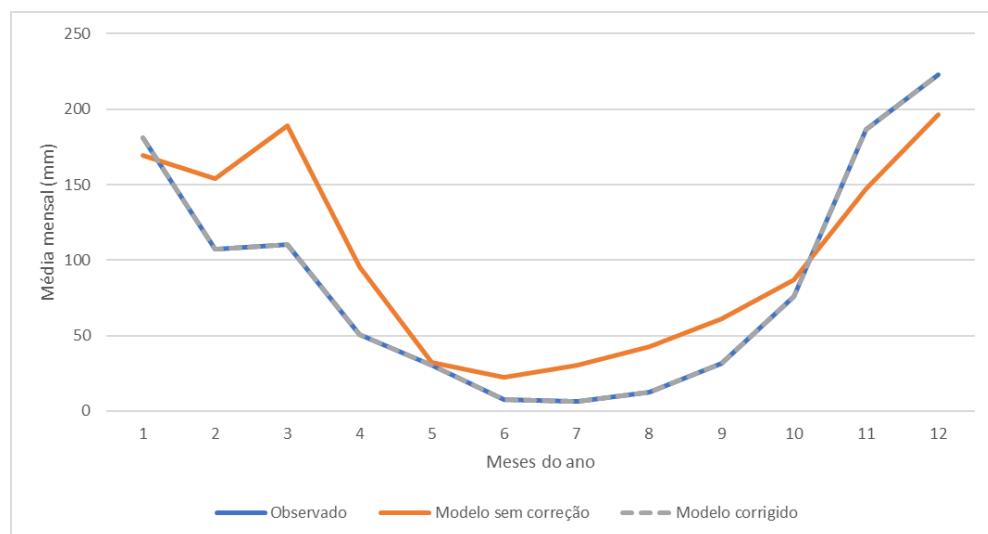
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 33 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Campanário.



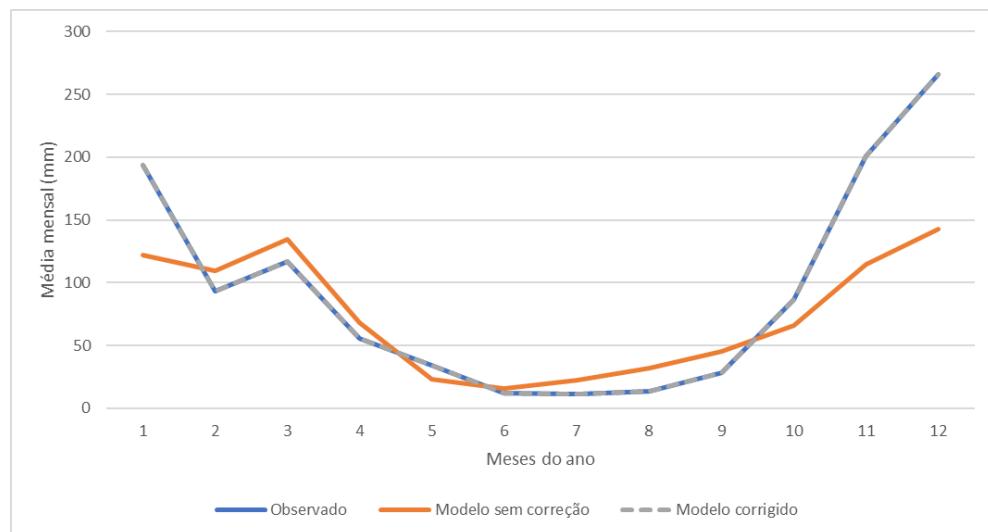
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 34 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São Pedro do Suaçuí.



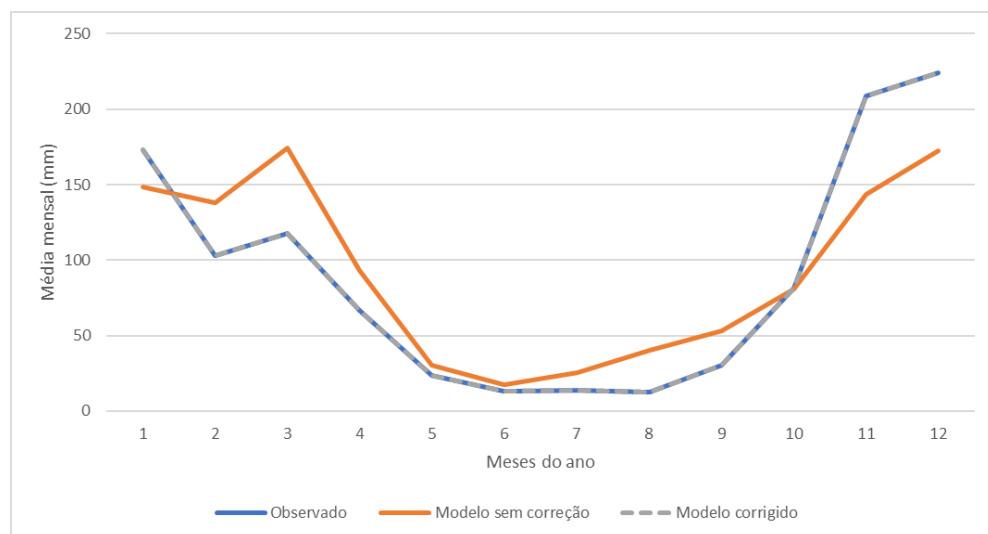
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 35 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Santa Maria do Suaçuí.



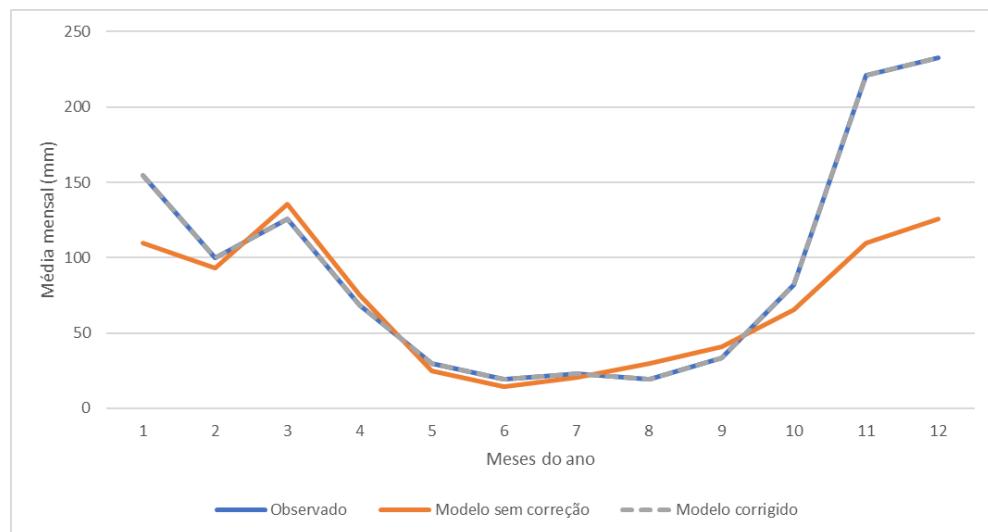
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 36 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Água Boa.



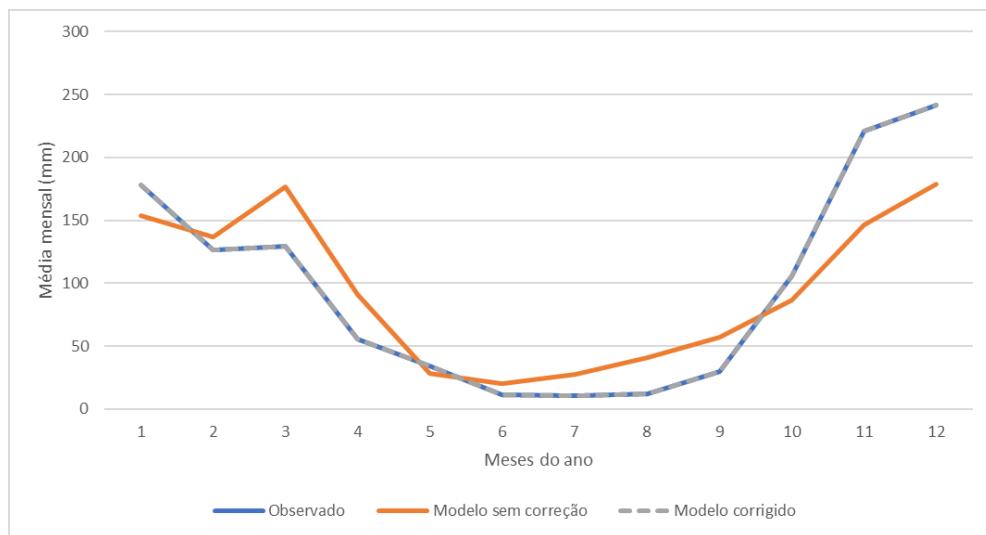
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 37 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Malacacheta.



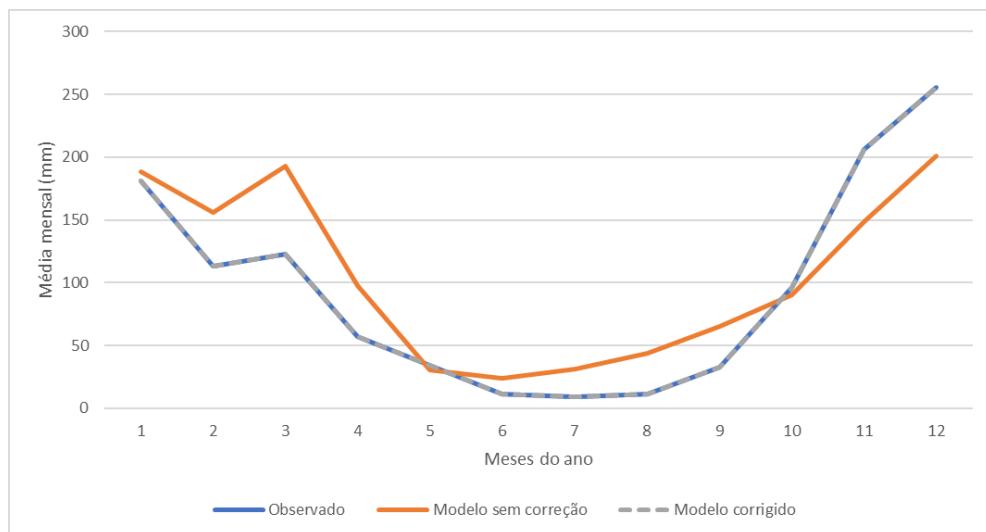
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 38 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Rio Vermelho.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

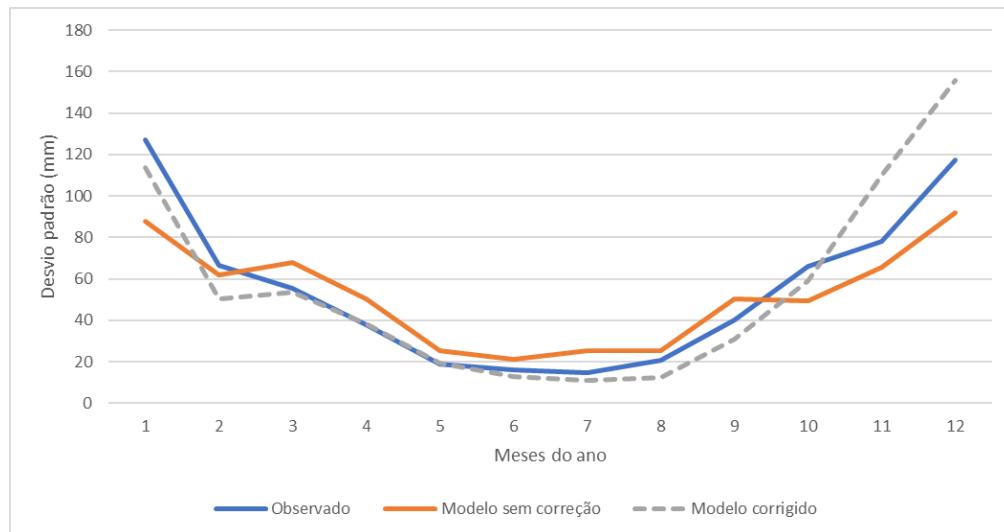
Figura 39 - Gráfico de média mensal para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

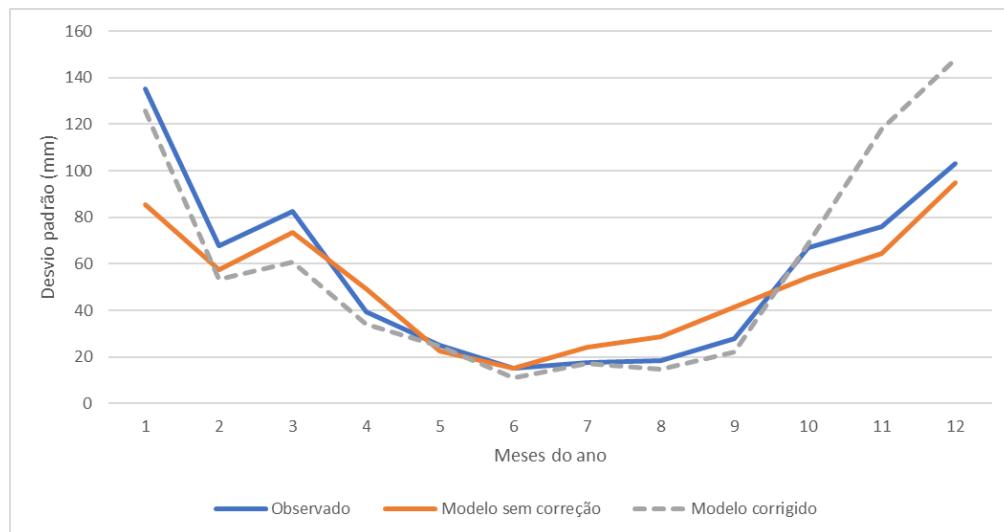
APÊNDICE B – Desvio padrão de dados observados, modelo sem correção e modelo corrigido

Figura 40 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Mathias Lobato.



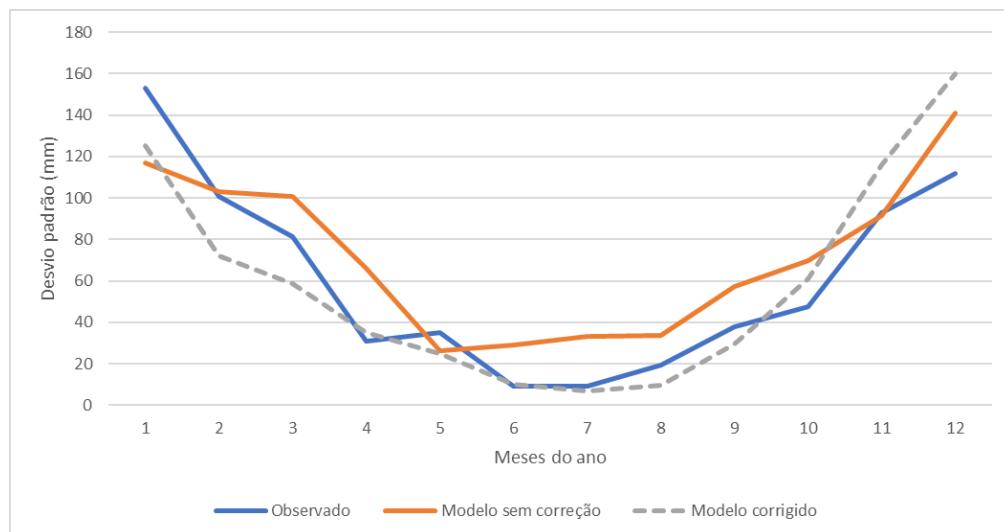
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 41 – Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Campanário.



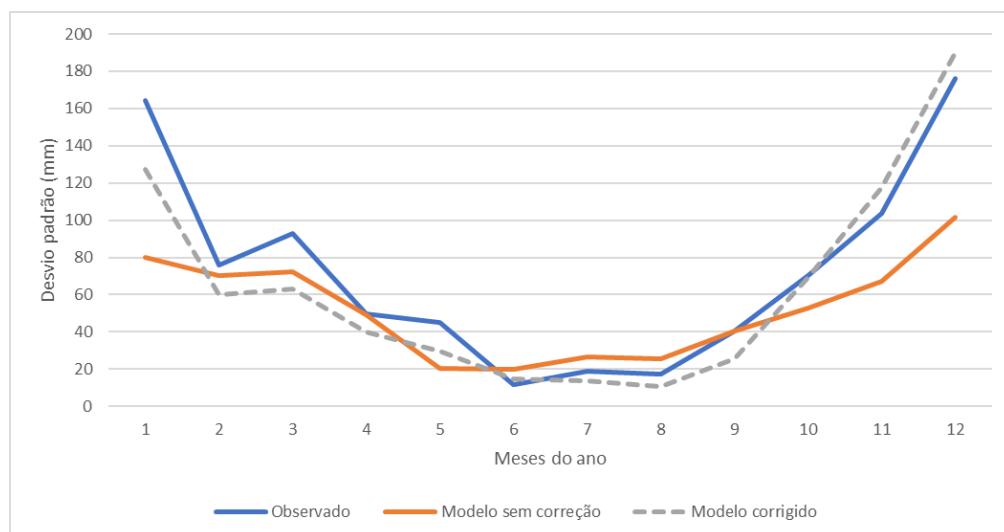
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 42 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São Pedro do Suaçuí.



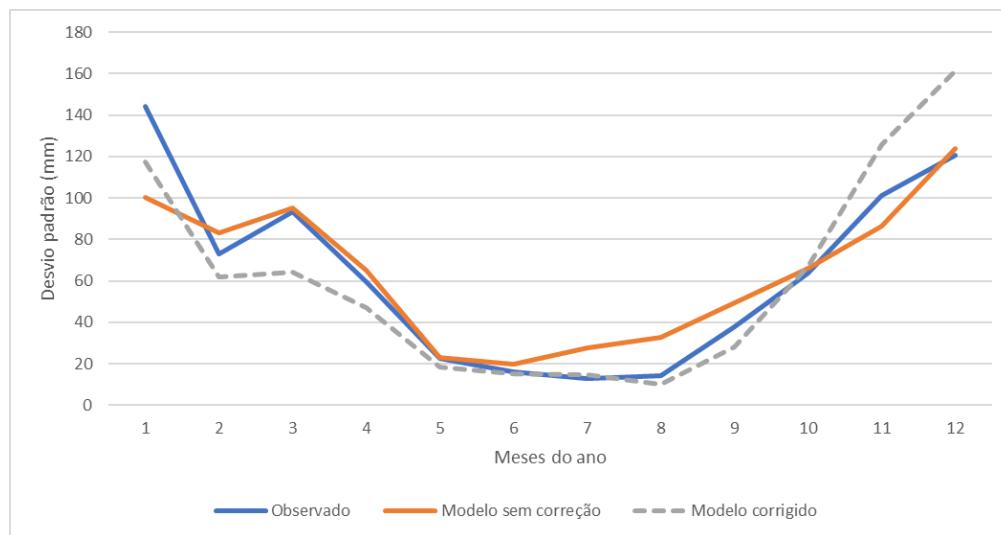
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 43 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Santa Maria do Suaçuí.



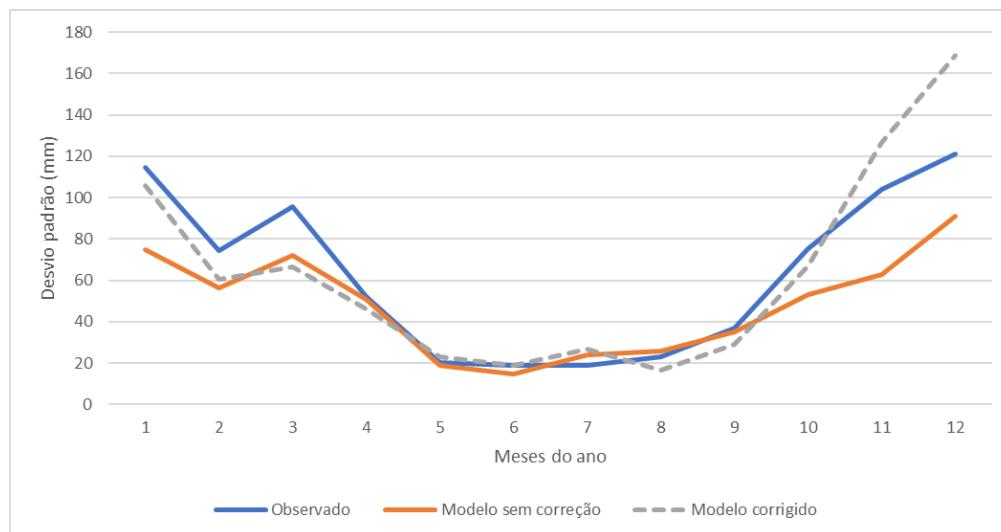
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 44 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Água Boa.



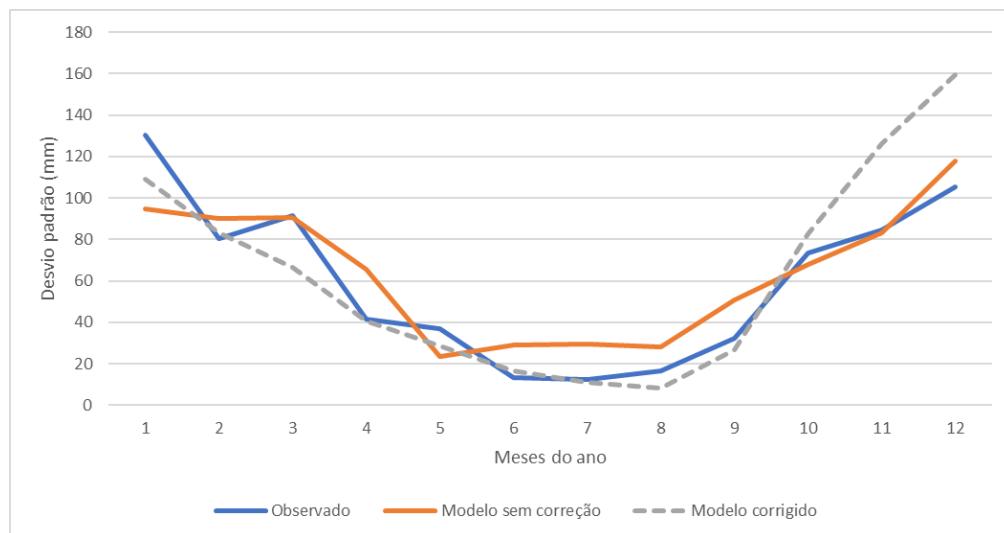
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 45 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Malacacheta.



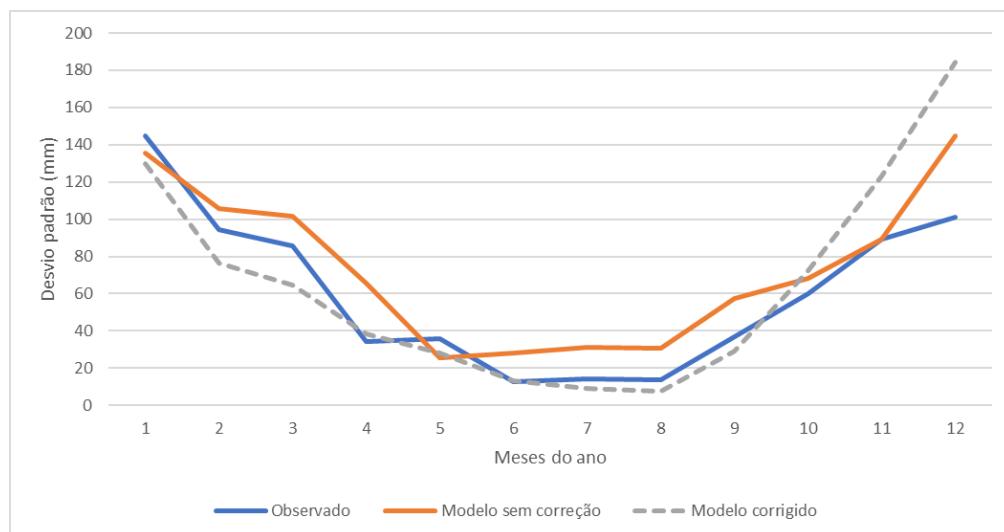
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 46 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de Rio Vermelho.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

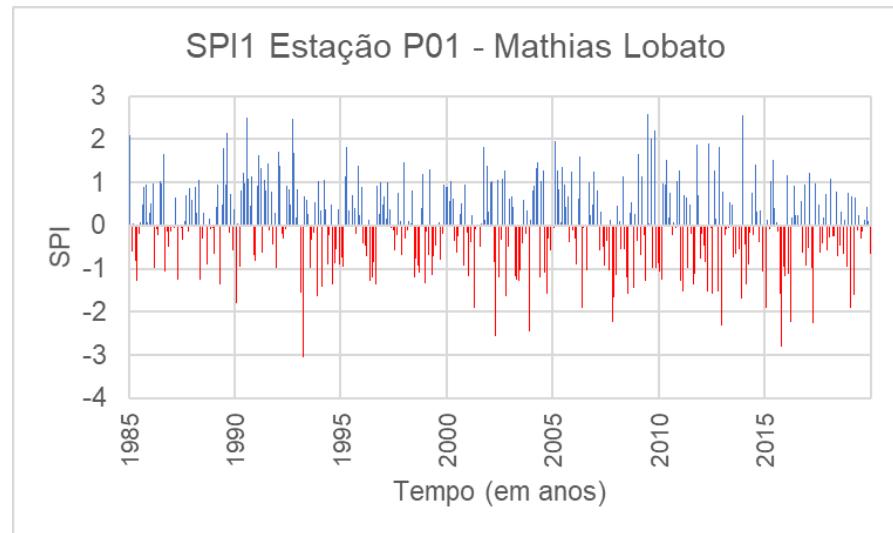
Figura 47 - Gráfico de desvio padrão para os dados observados de precipitação, para o modelo corrigido e o modelo sem correção, do município de São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

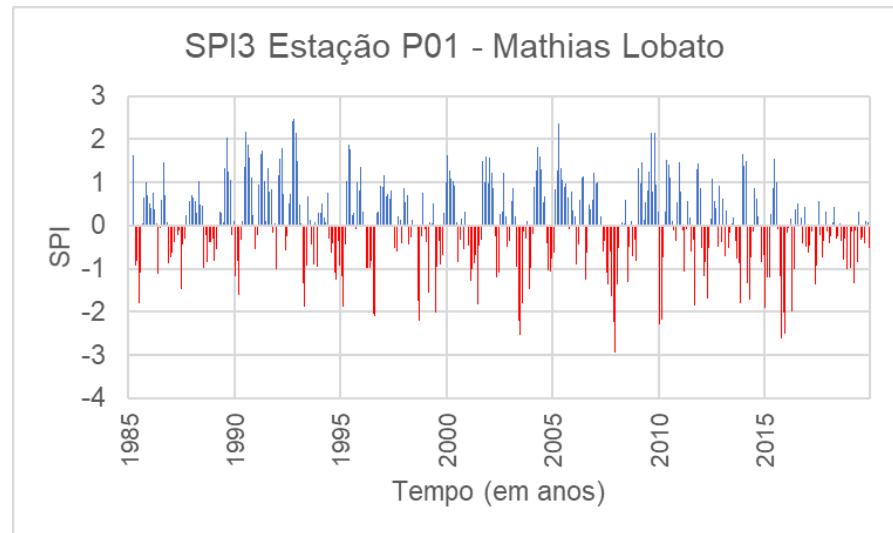
APÊNDICE C – SPI 1, 3, 6 e 12 para os dados observados das estações pluviométricas

Figura 48 – Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



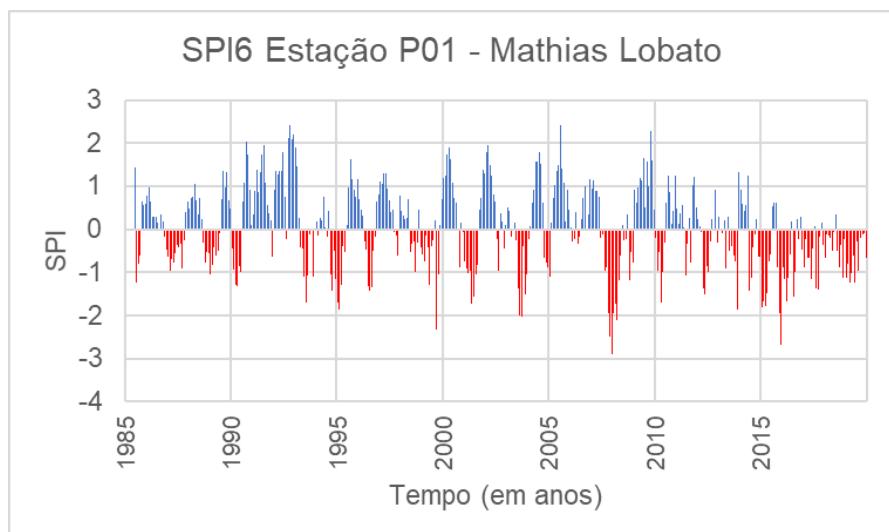
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 49 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



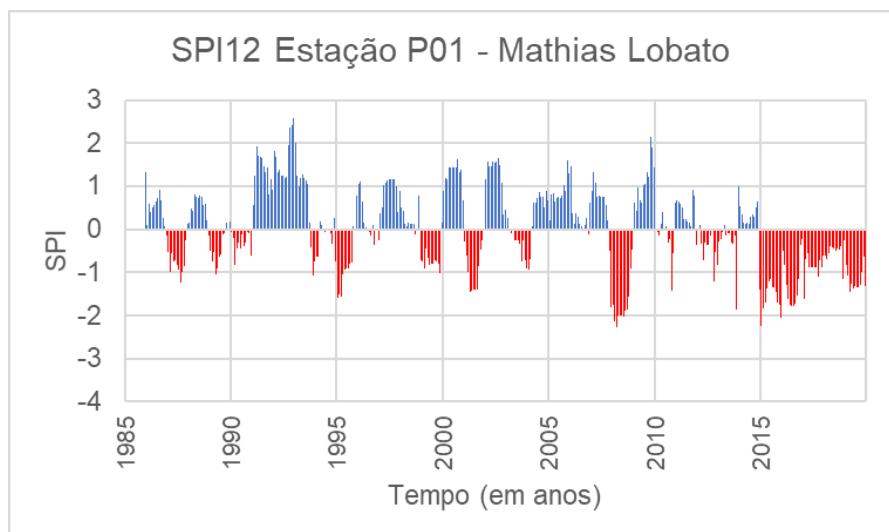
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 50 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



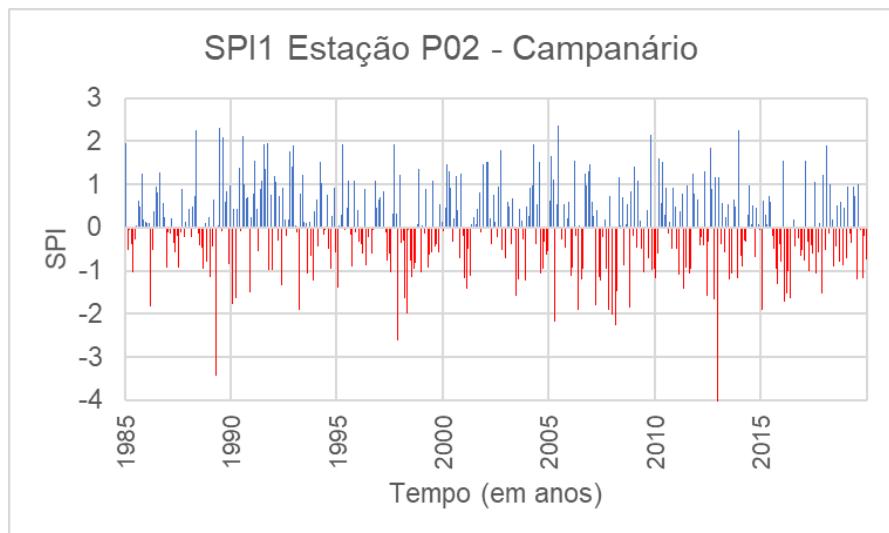
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 51 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



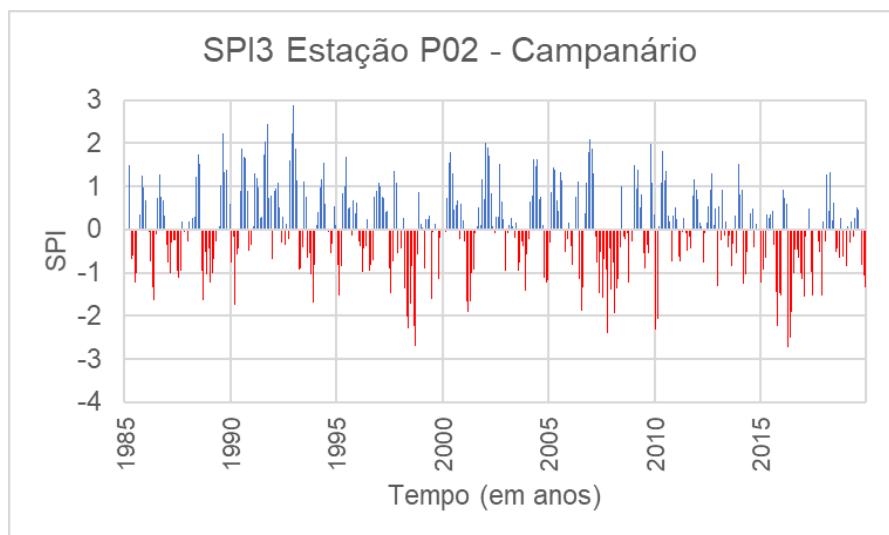
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 52 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.



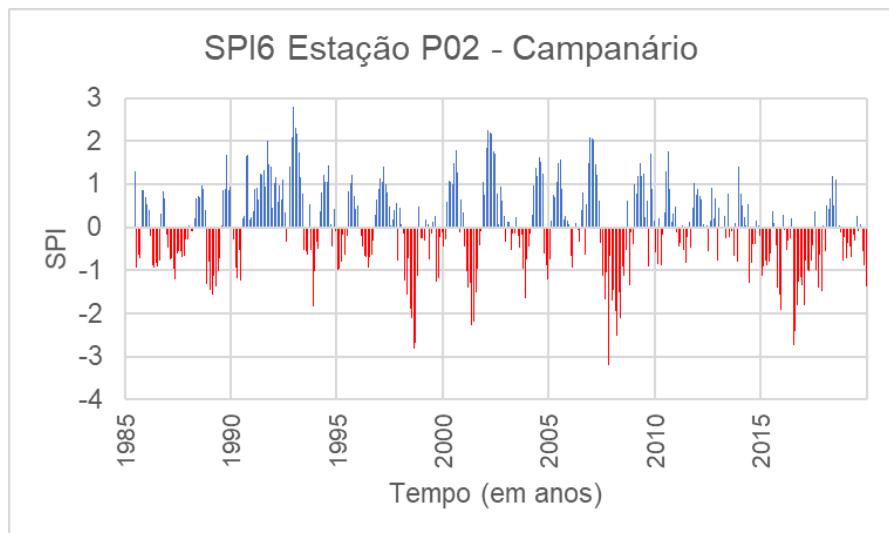
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 53 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.



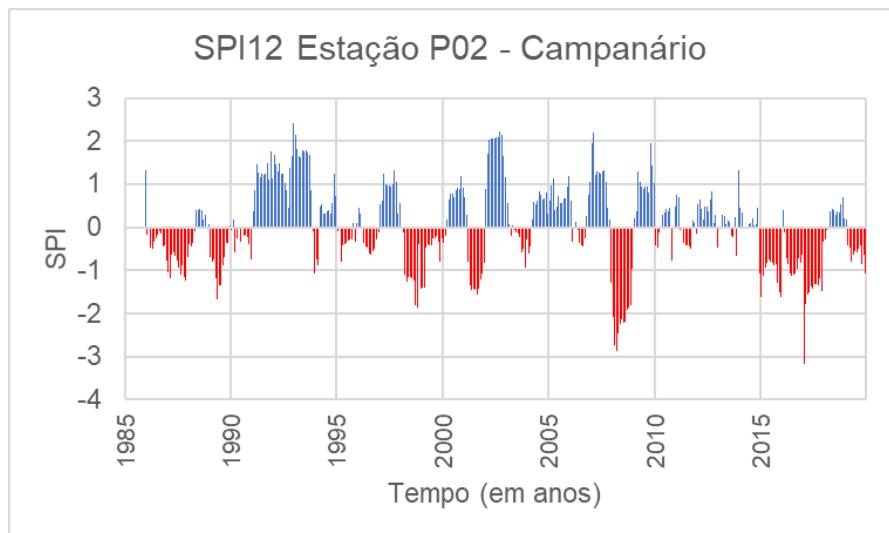
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 54 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.



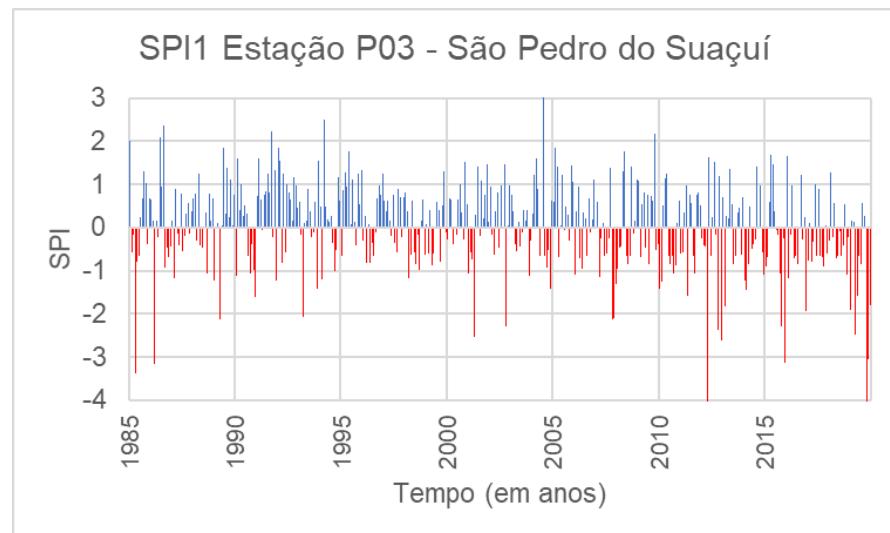
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 55 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P02-Campanário.



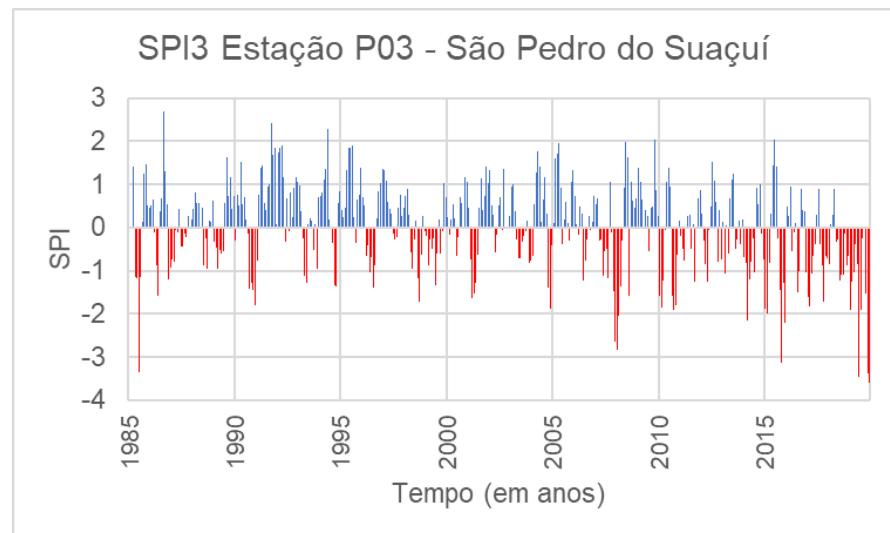
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 56 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



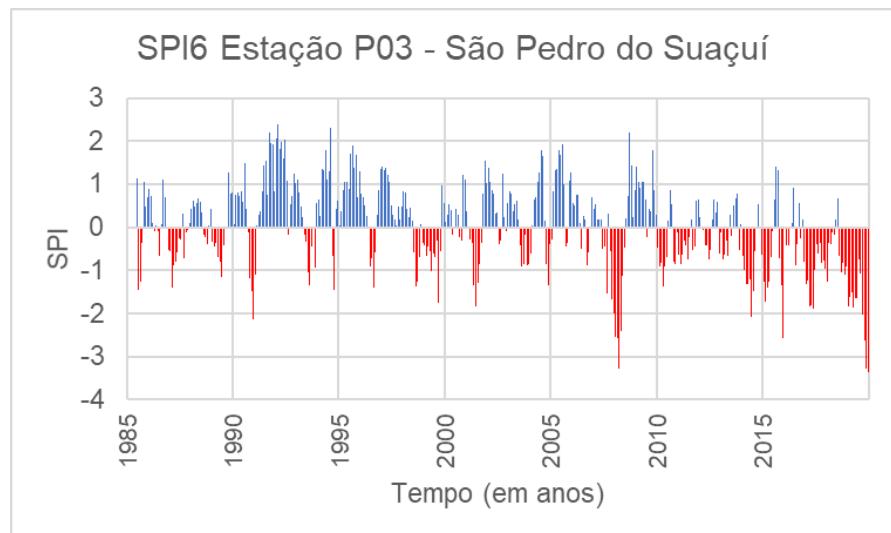
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 57 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



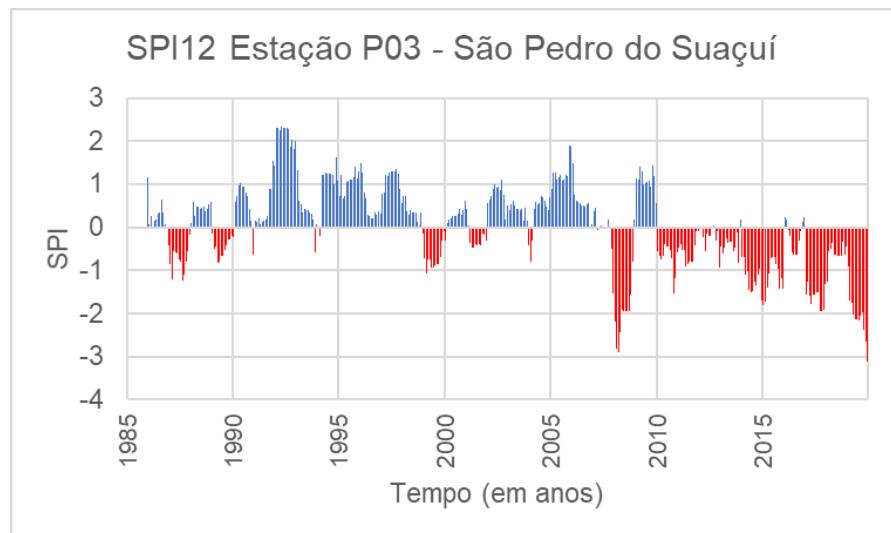
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 58 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



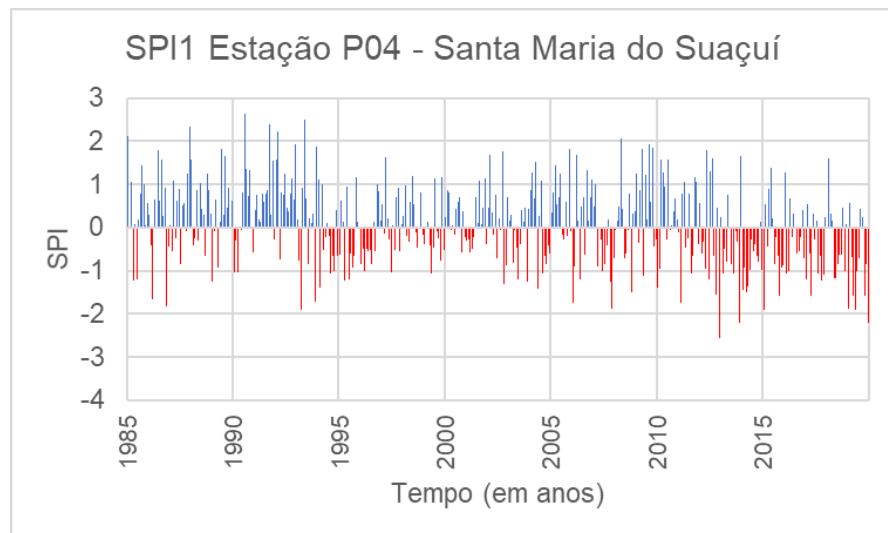
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 59 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



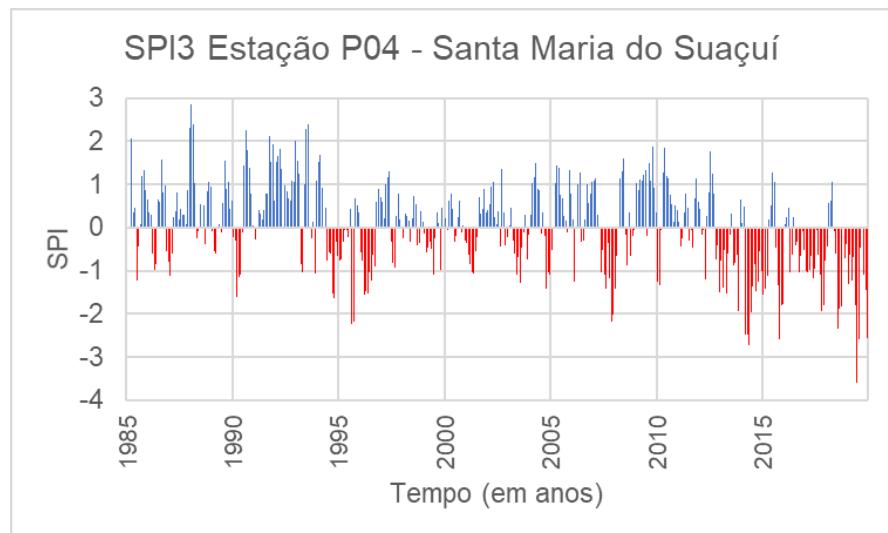
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 60 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



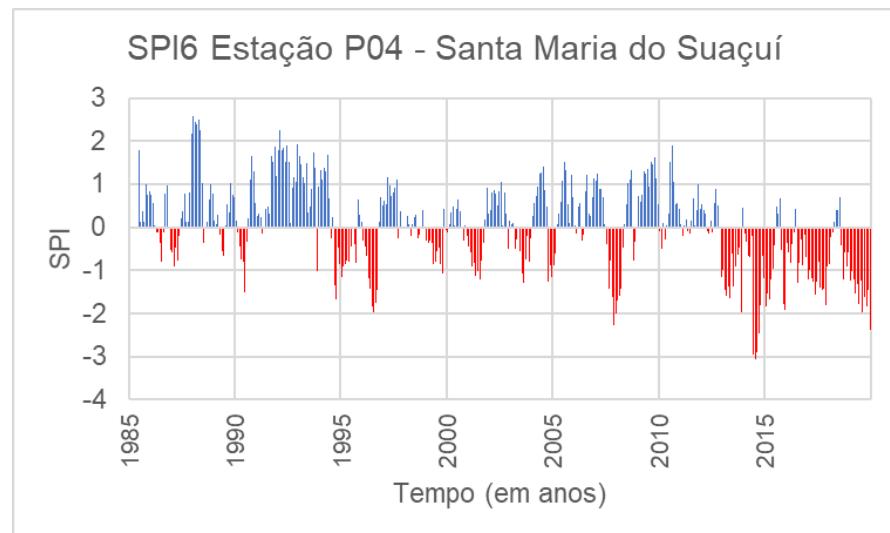
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 61 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



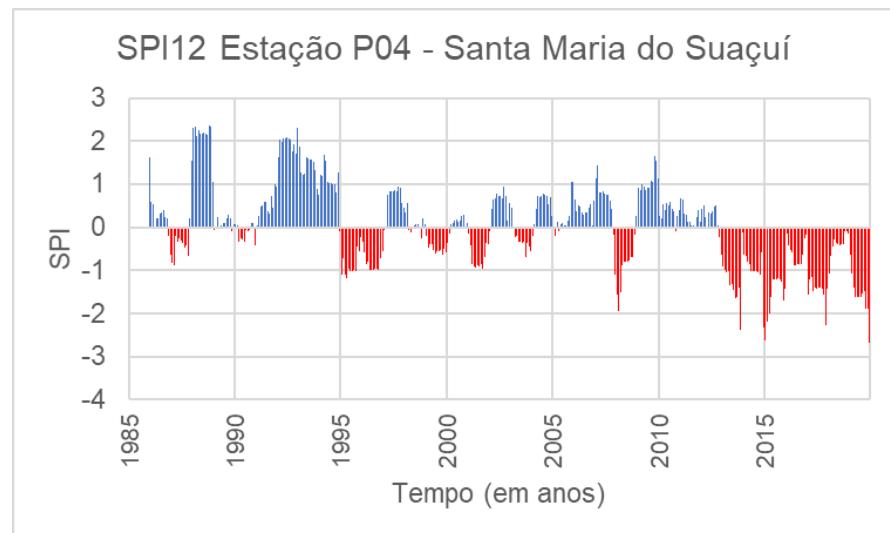
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 62 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



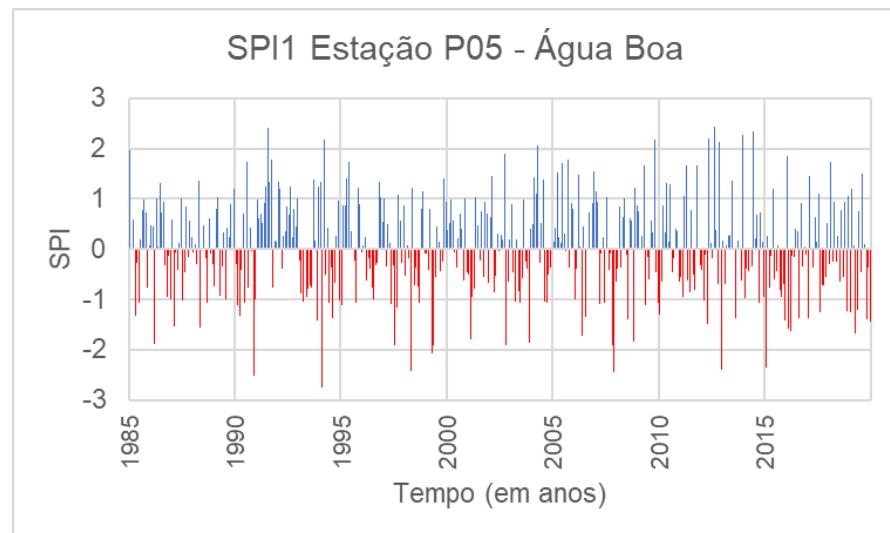
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 63 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



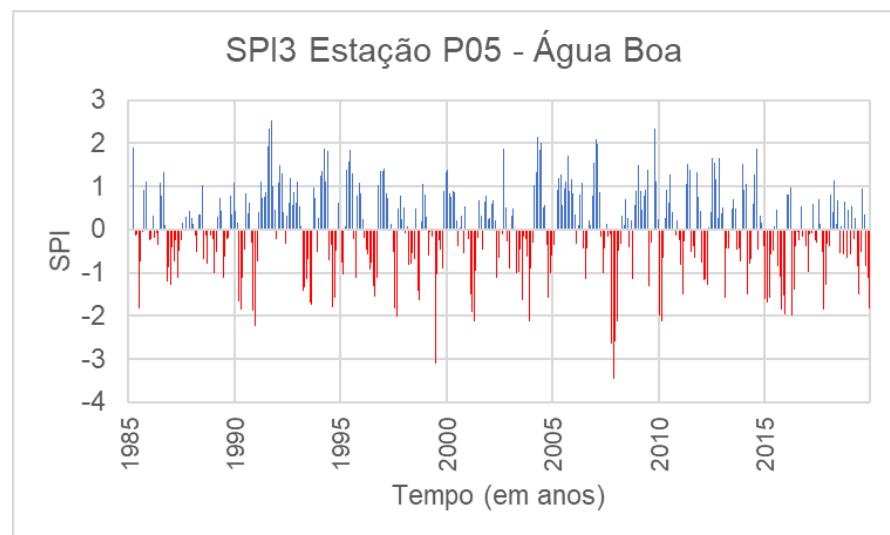
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 64 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.



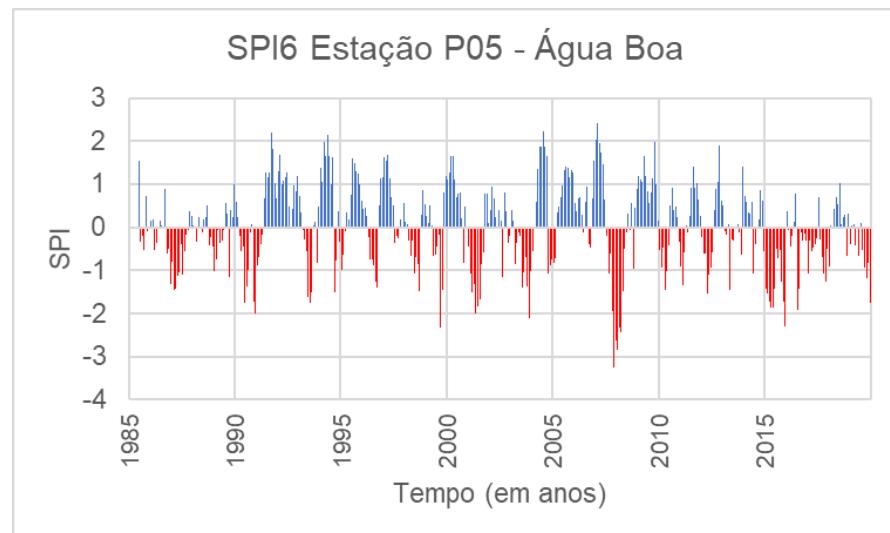
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 65 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.



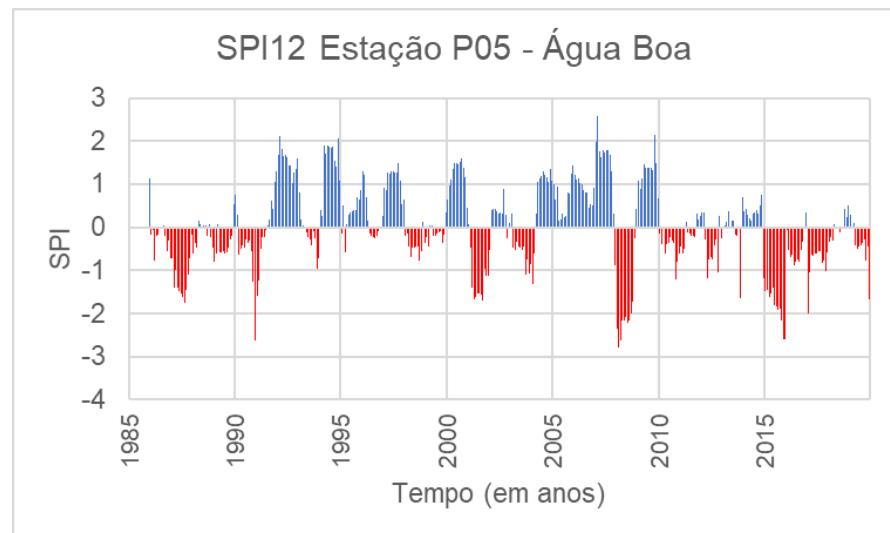
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 66 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.



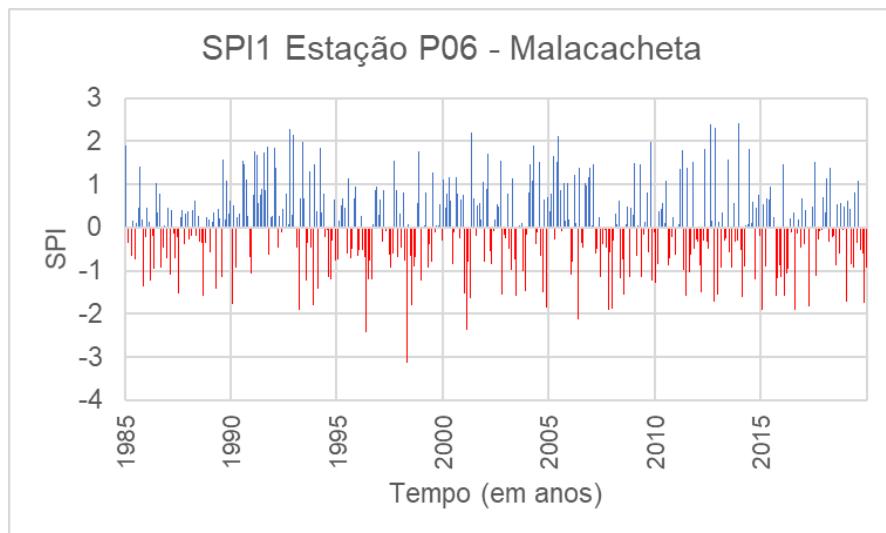
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 67 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P05-Água Boa.



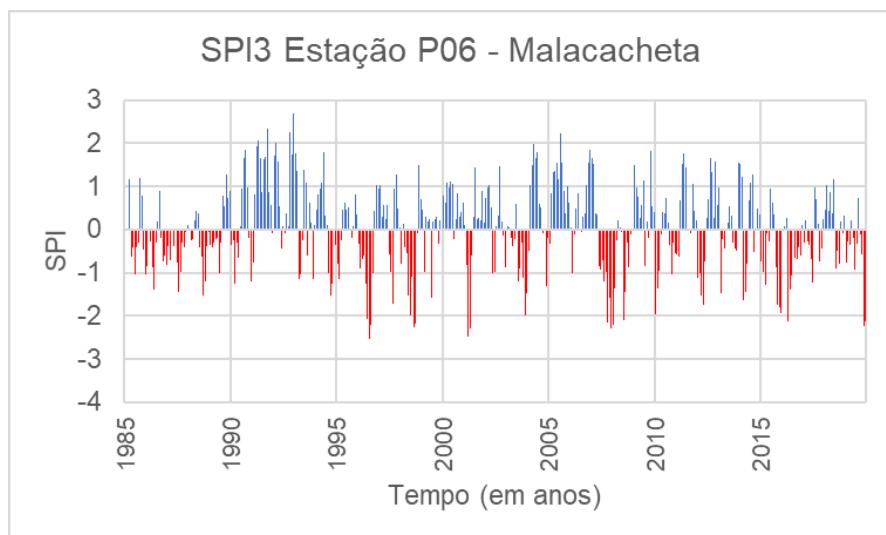
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 68 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.



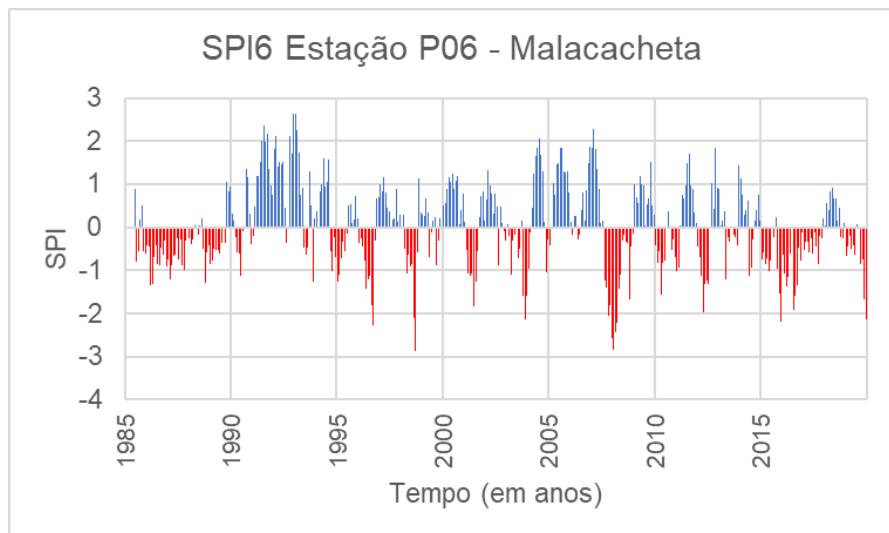
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 69 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.



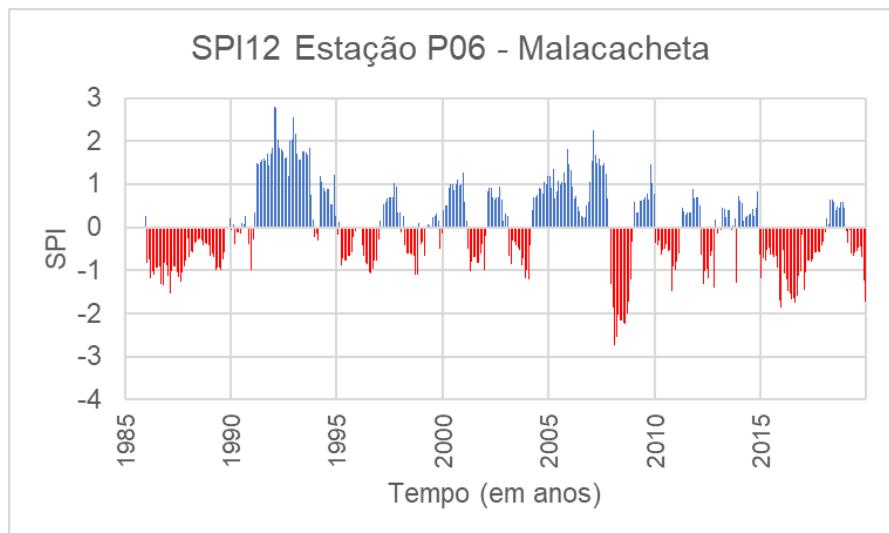
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 70 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.



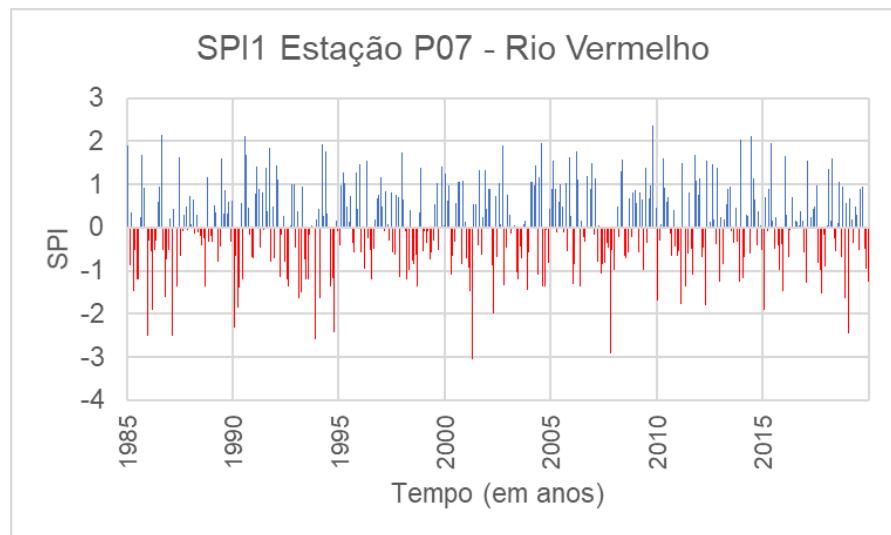
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 71 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P06-Malacacheta.



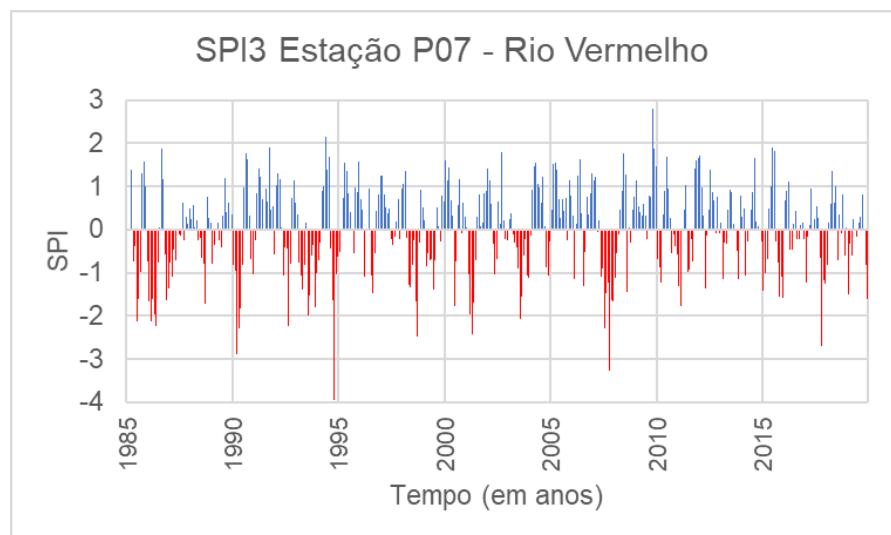
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 72 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



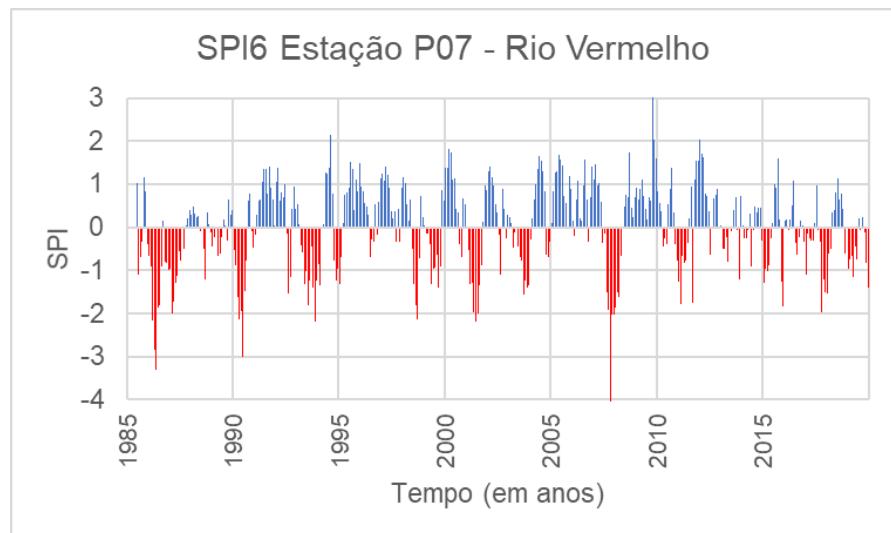
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 73 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



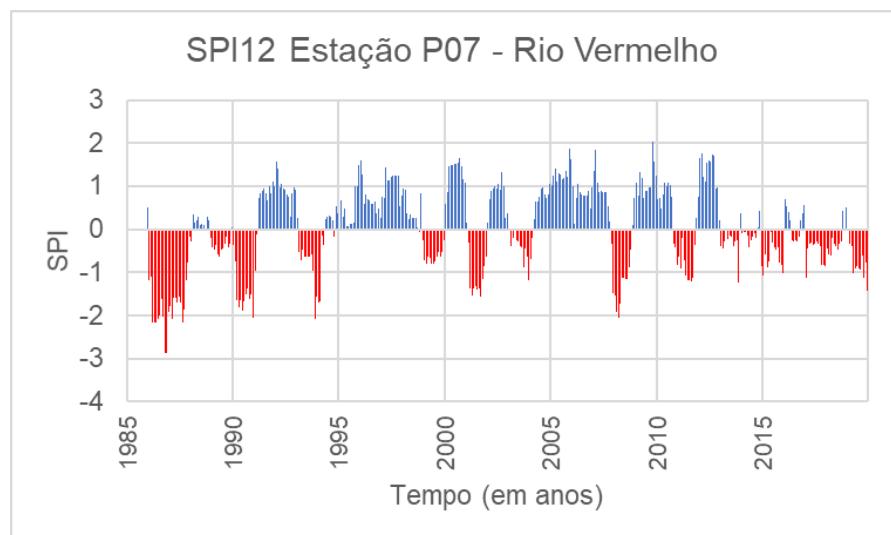
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 74 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



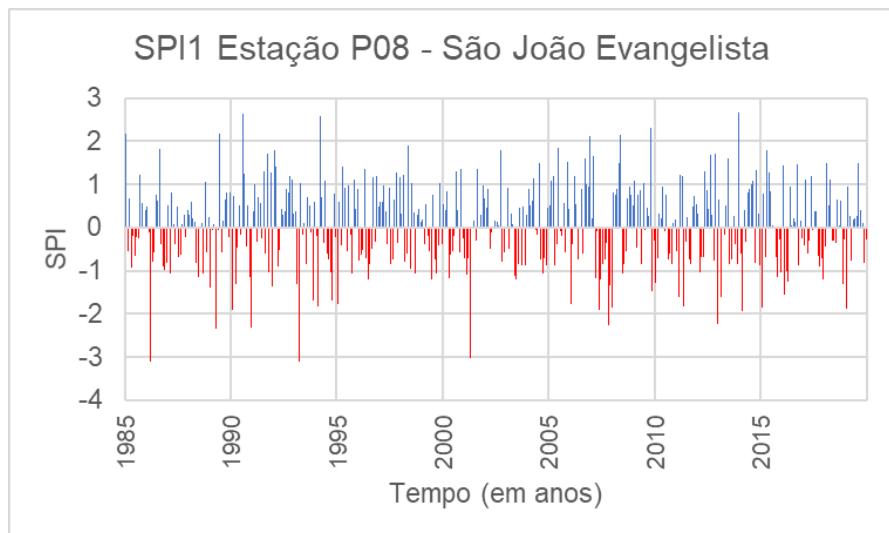
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 75 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



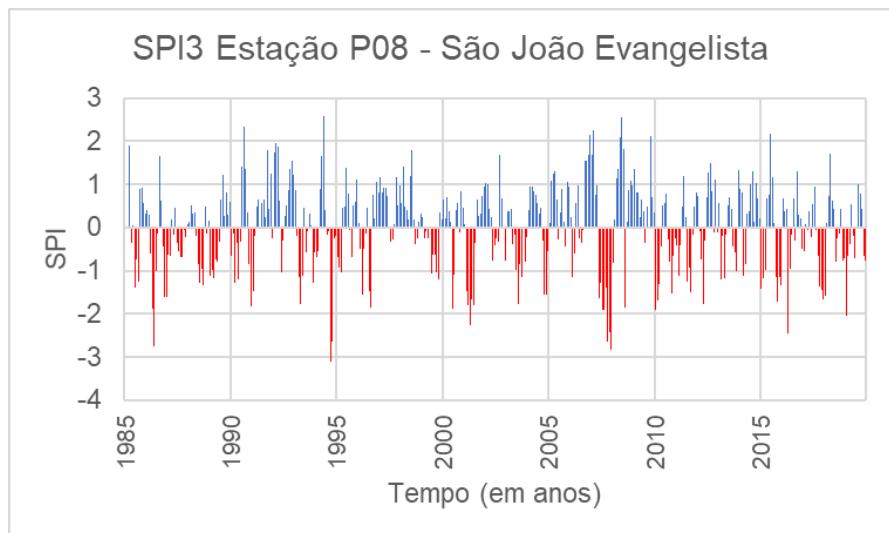
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 76 - Gráfico de SPI-1 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



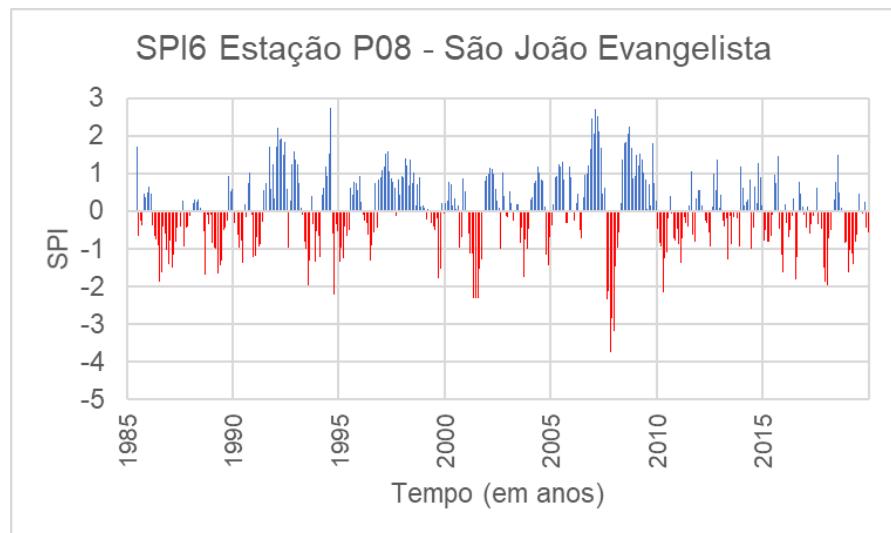
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 77 - Gráfico de SPI-3 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



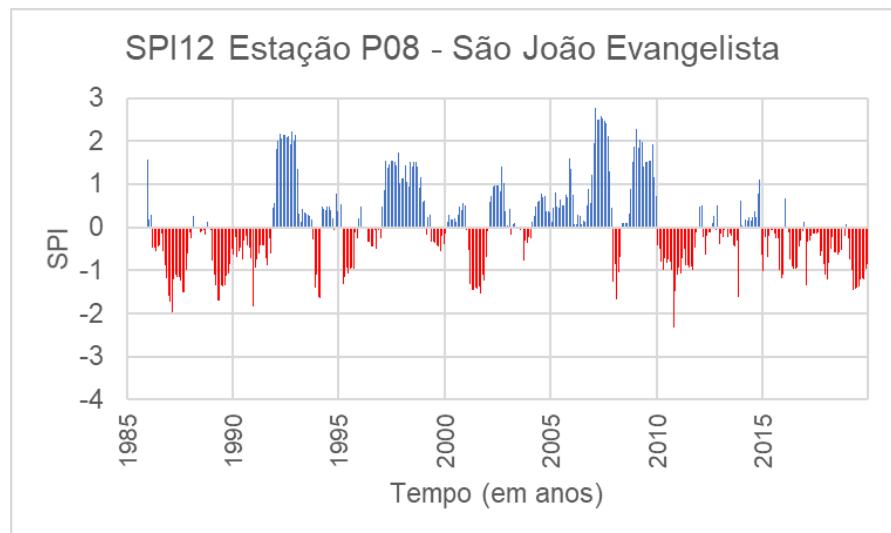
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 78 - Gráfico de SPI-6 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

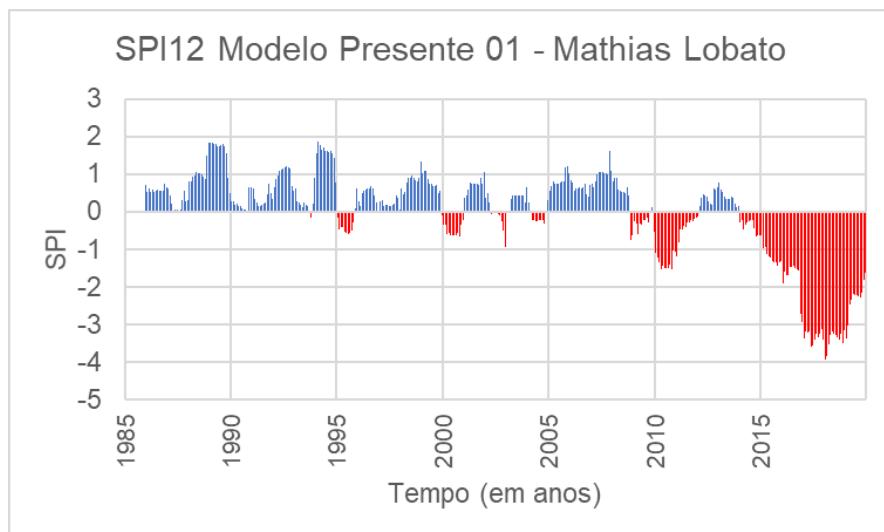
Figura 79 - Gráfico de SPI-12 para os dados observados da estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

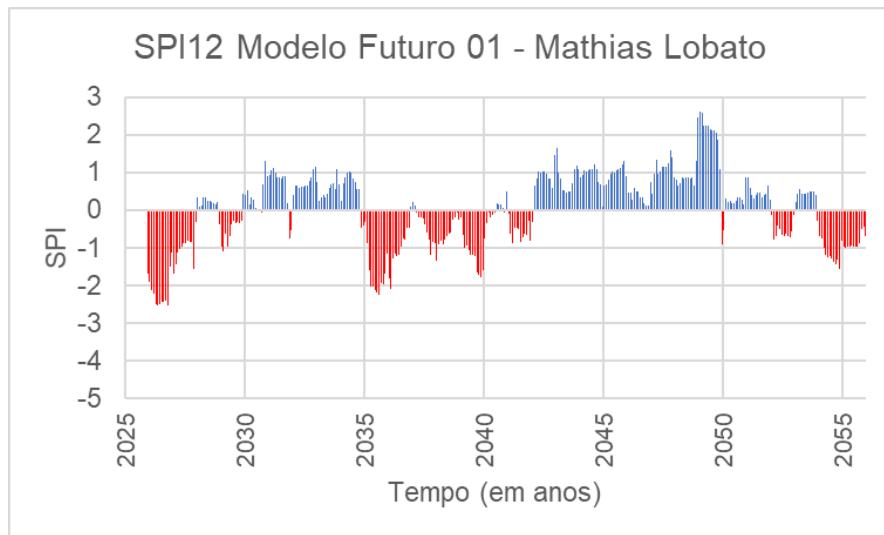
APENDICE D – SPI 12 para o modelo ETA/HADGEM2-ES (presente e futuro)

Figura 80 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



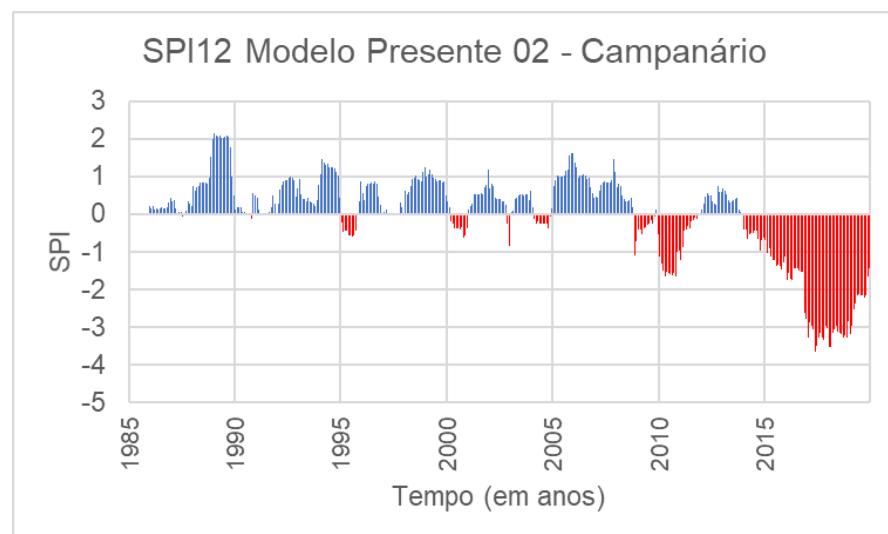
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 81 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P01-Mathias Lobato.



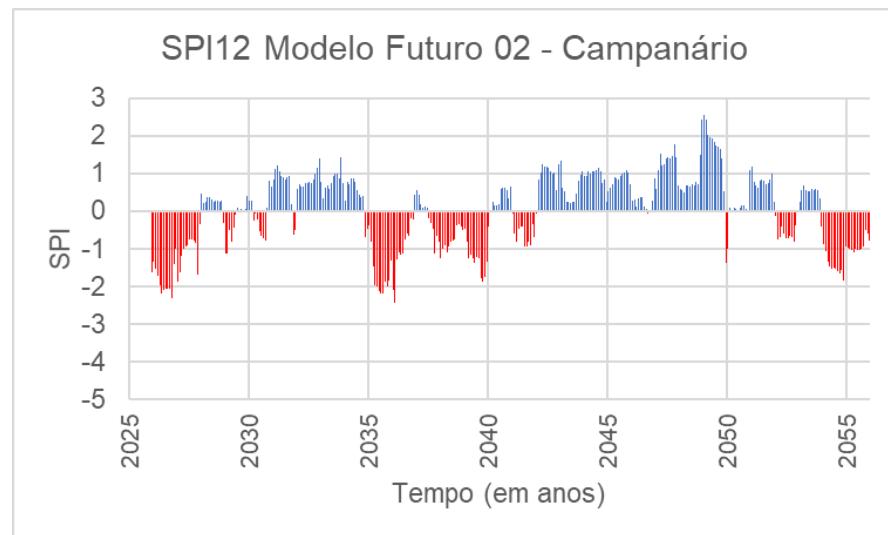
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 82 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P02-Campanário.



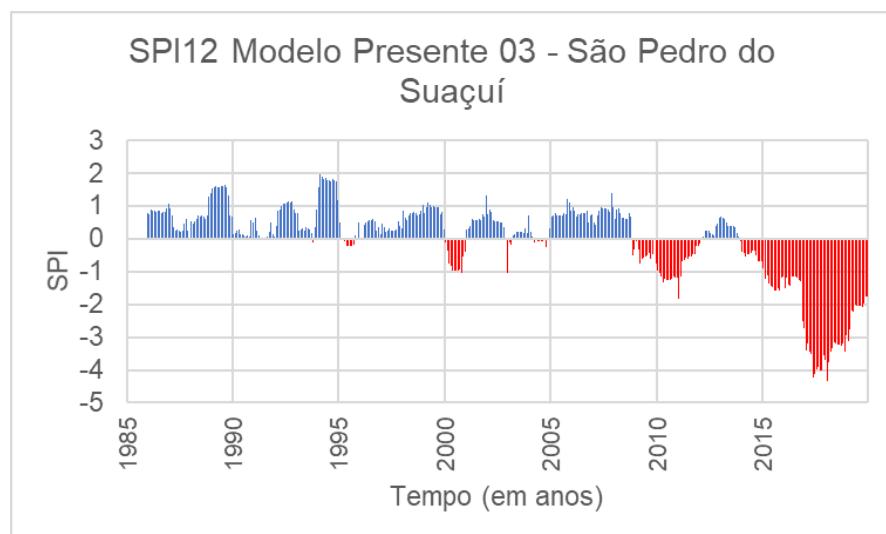
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 83 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P02-Campanário.



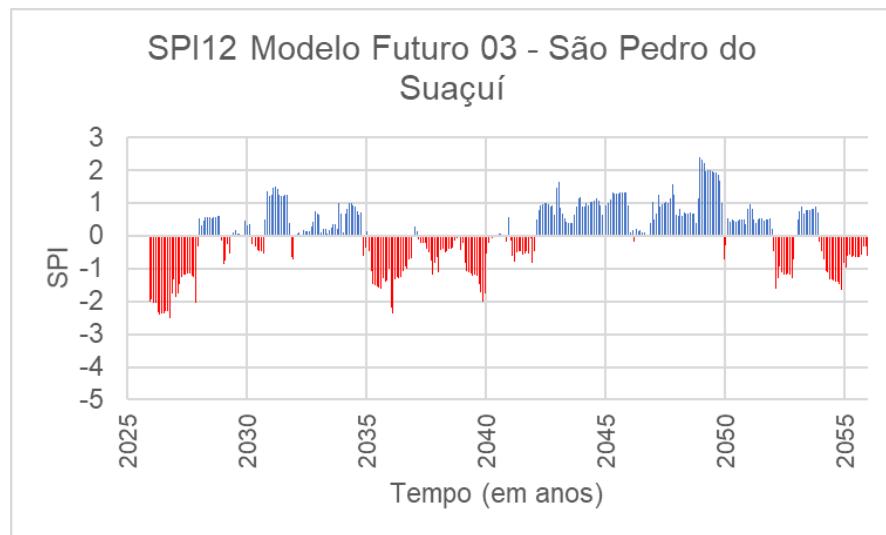
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 84 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



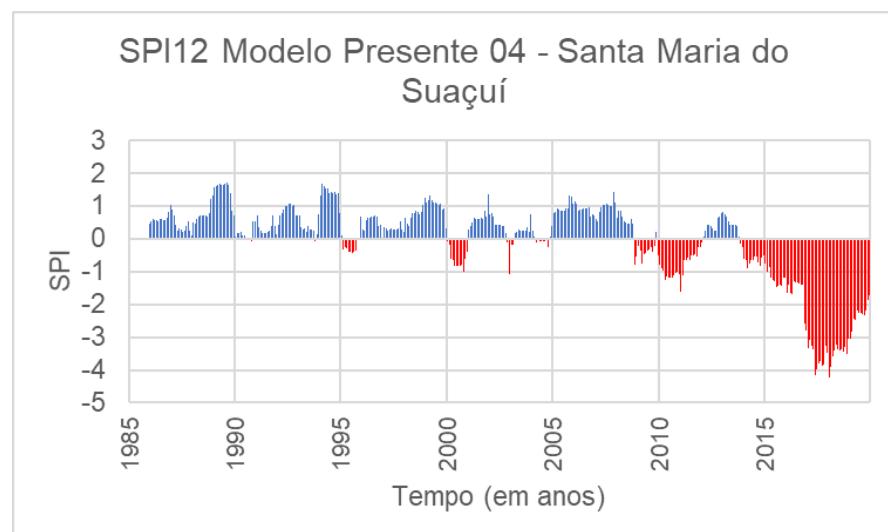
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 85 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P03-São Pedro do Suaçuí.



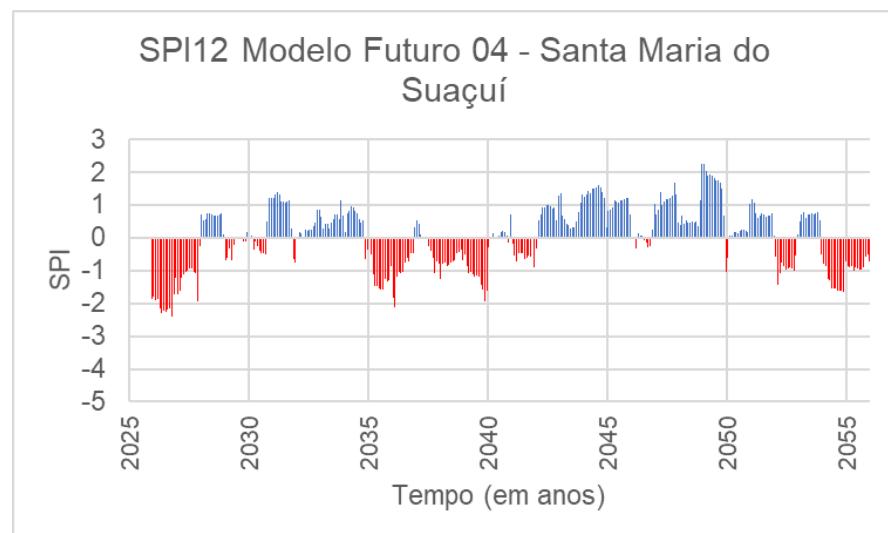
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 86 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



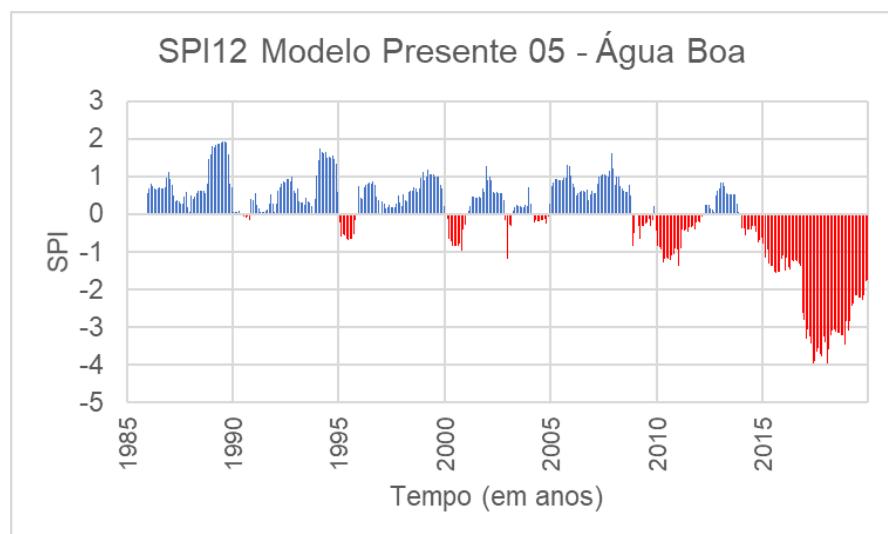
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 87 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P04-Santa Maria do Suaçuí.



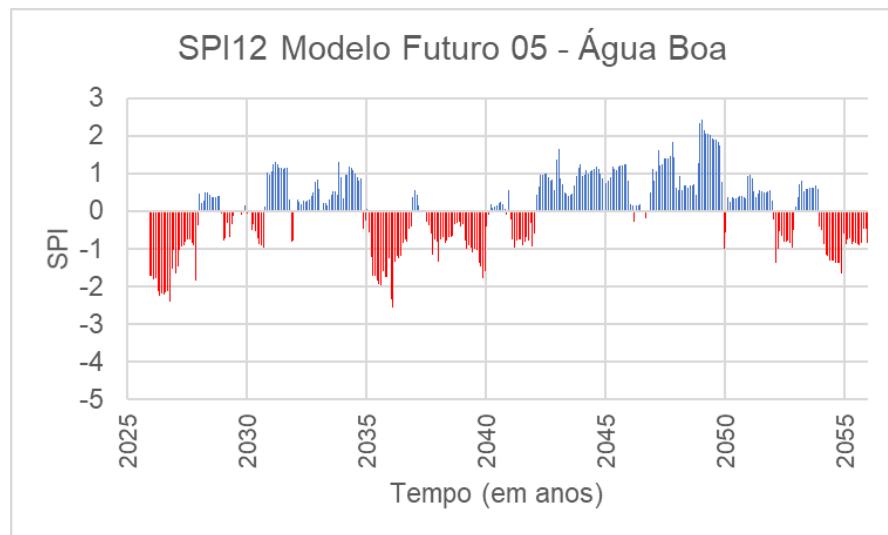
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 88 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P05-Água Boa.



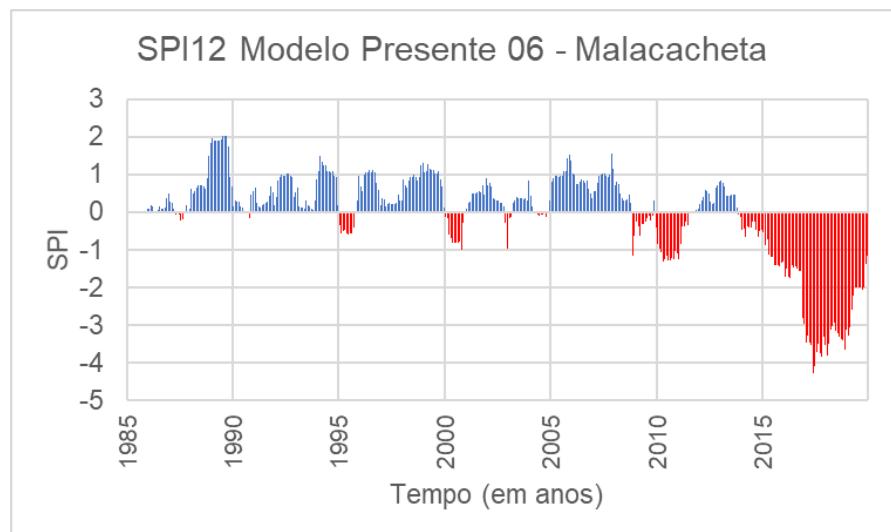
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 89 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P05-Água Boa.



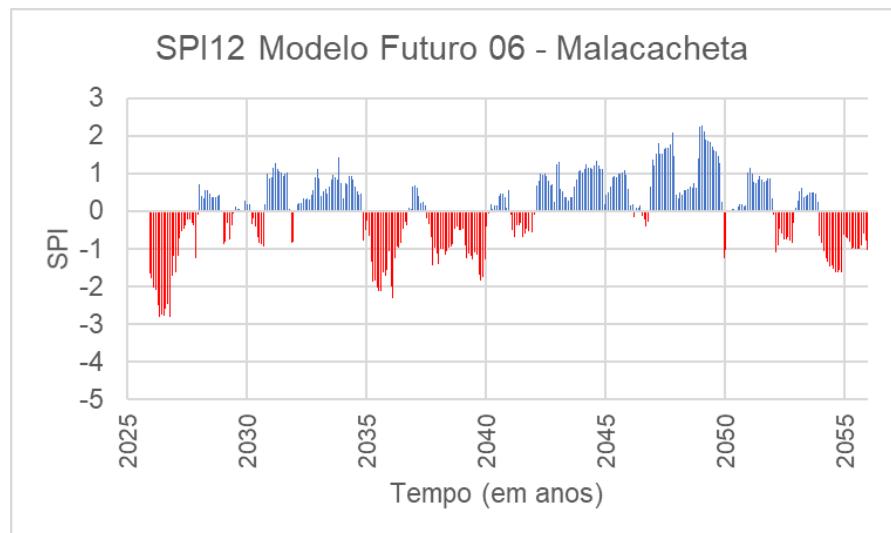
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 90 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P06-Malacacheta.



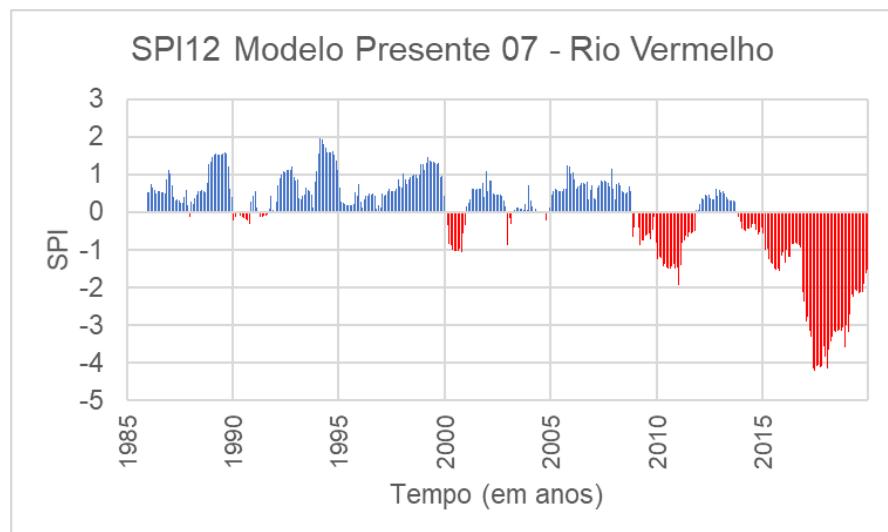
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 91 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P06-Malacacheta.



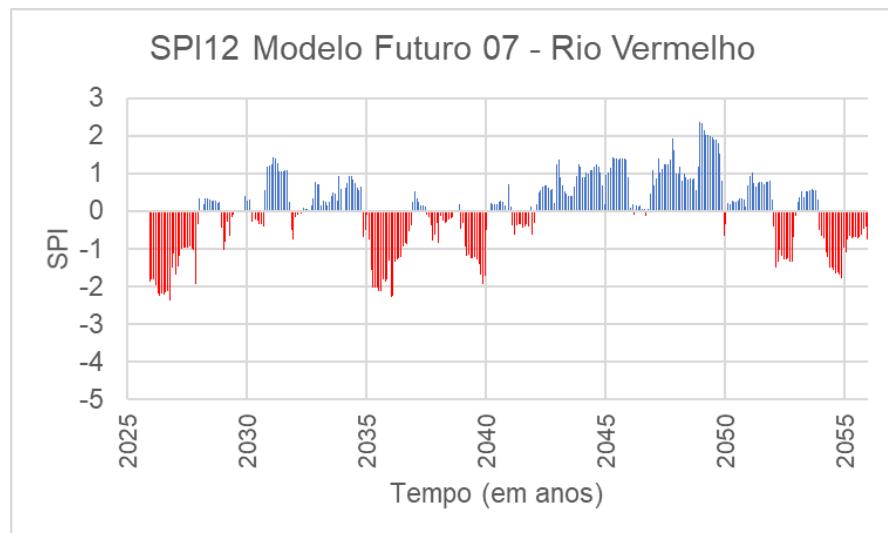
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 92 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



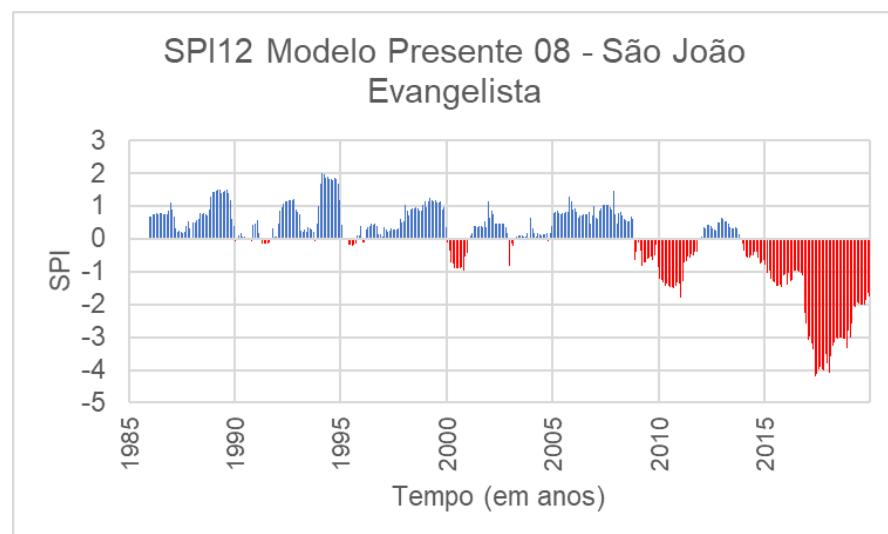
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 93 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P07-Rio Vermelho.



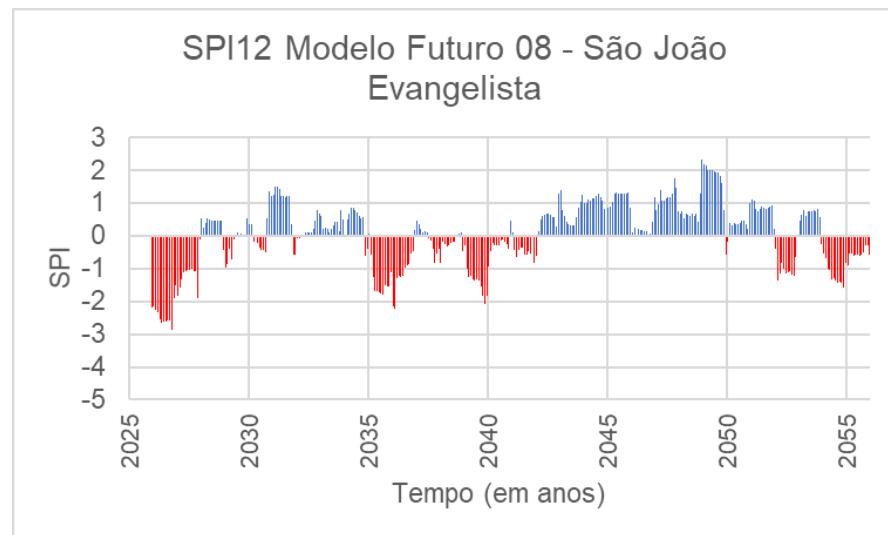
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 94 - Gráfico de SPI-12 para os dados do presente do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

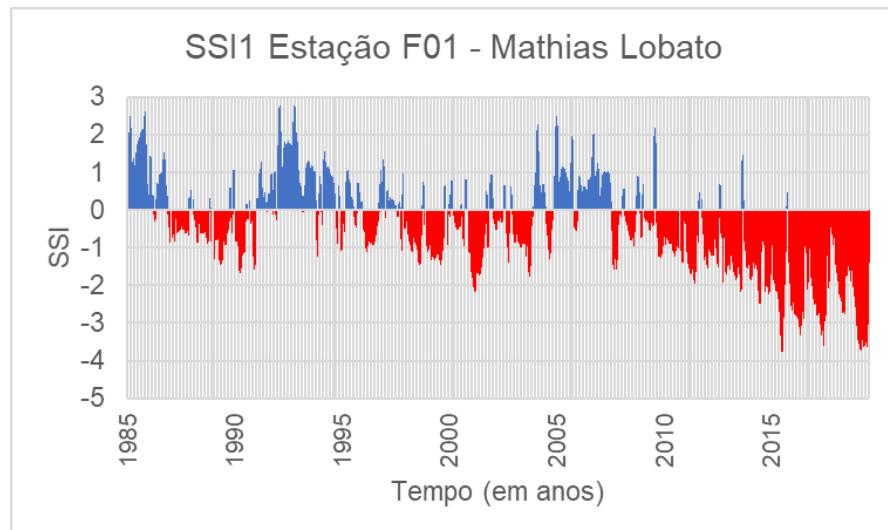
Figura 95 - Gráfico de SPI-12 para os dados do futuro do modelo ETA/HADGEM2-ES para a estação pluviométrica P08-São João Evangelista.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

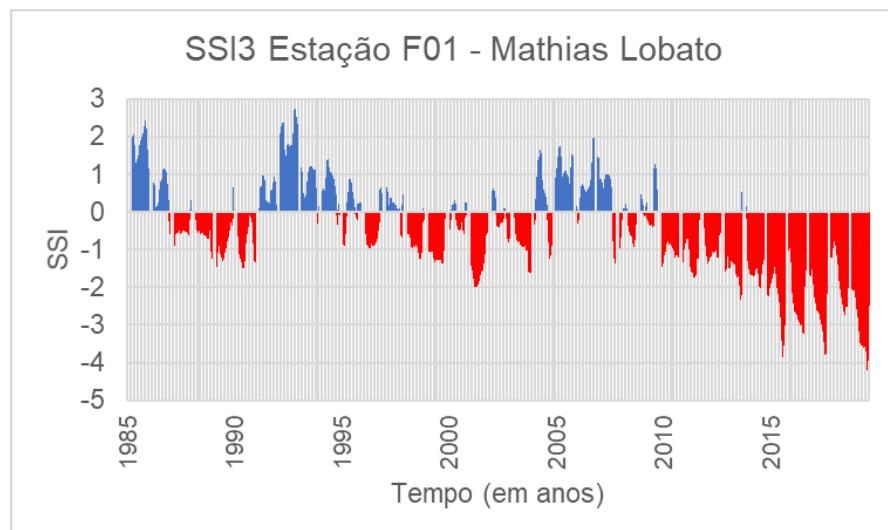
APÊNDICE E – SSI 1, 3, 6 e 12 para os dados observados das estações fluviométricas

Figura 96 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.



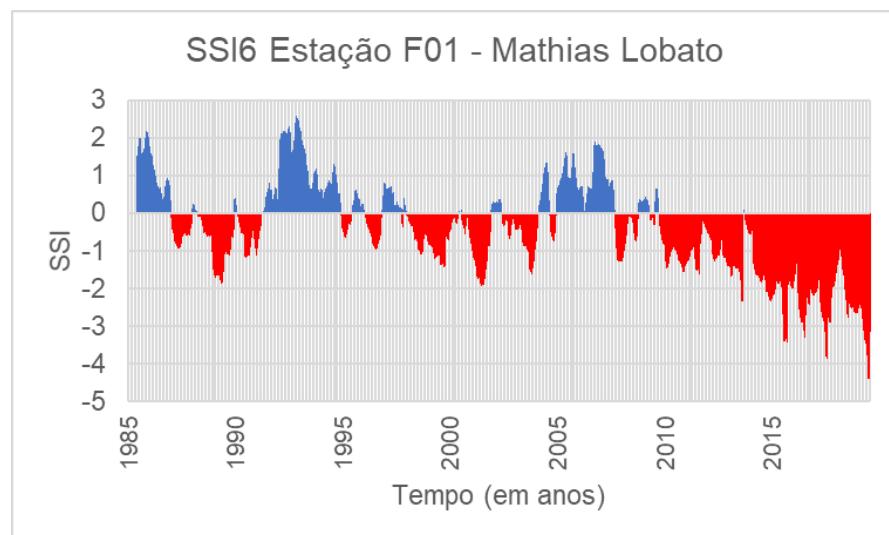
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 97 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.



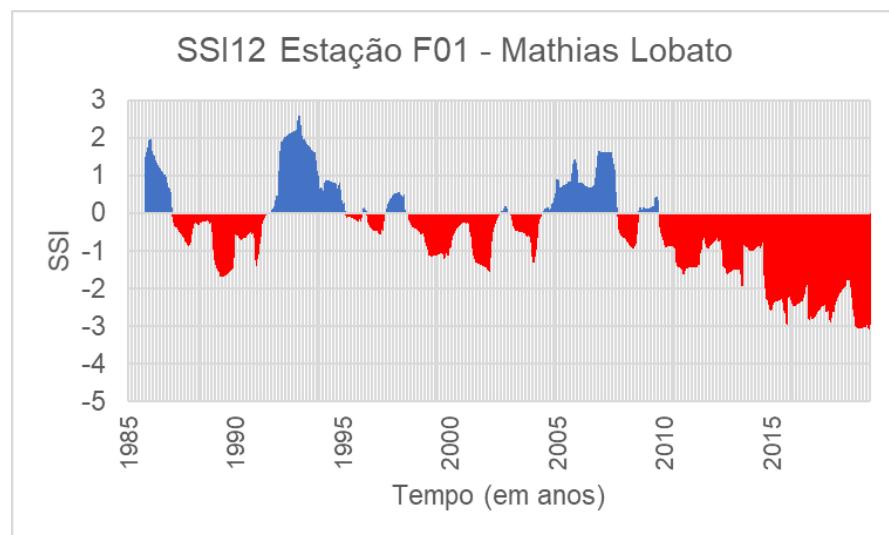
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 98 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.



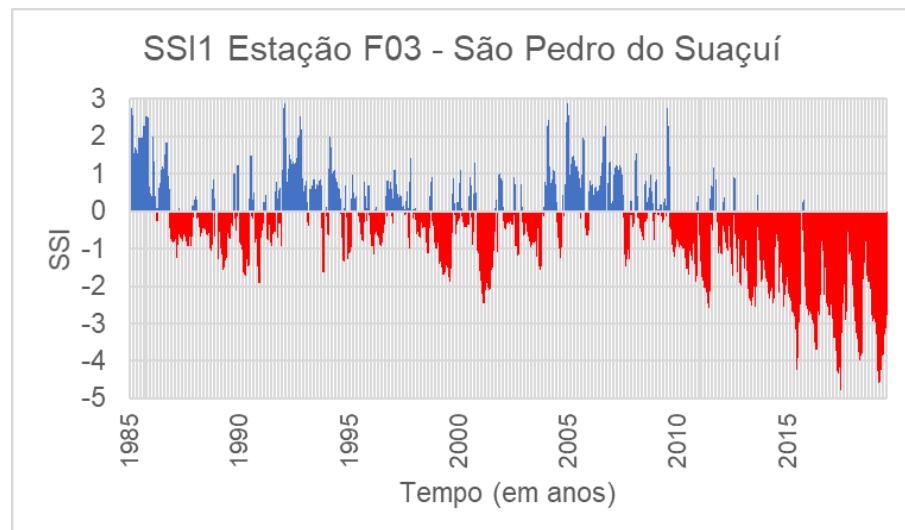
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 99 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F01-Mathias Lobato.



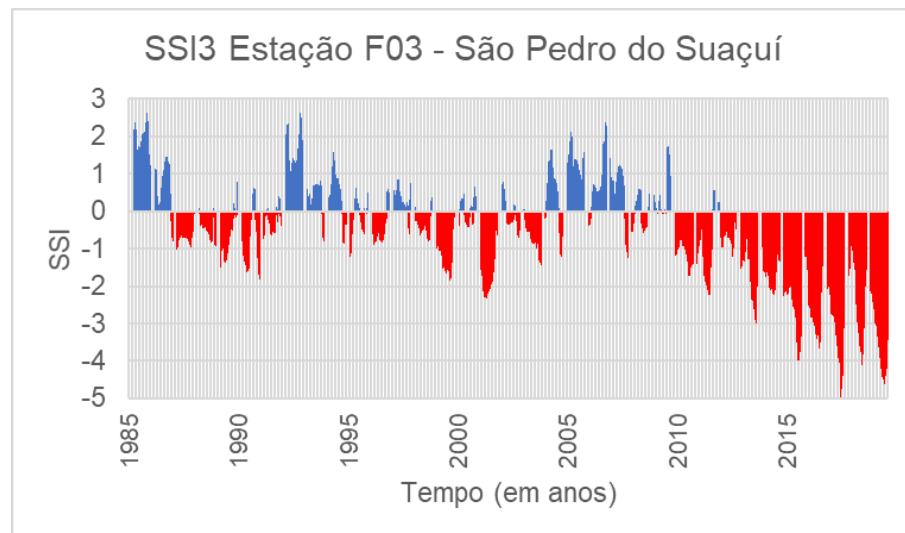
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 100 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.



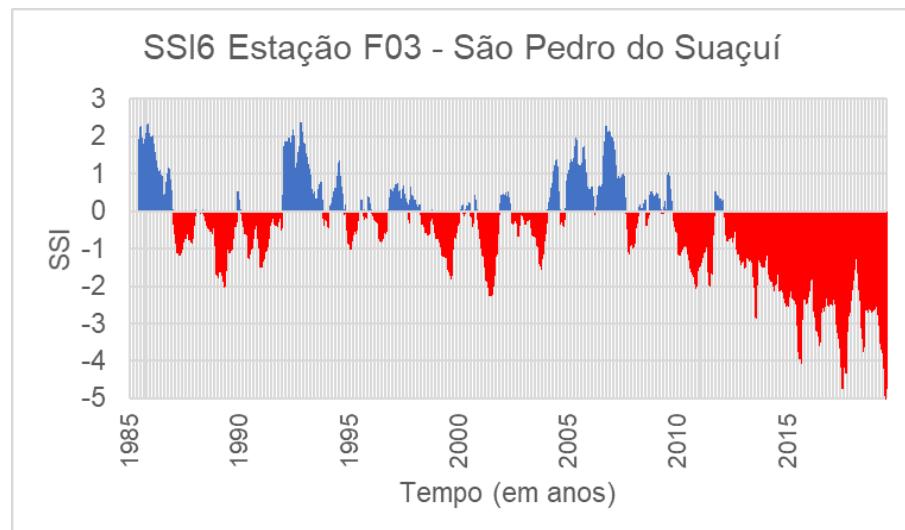
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 101 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.



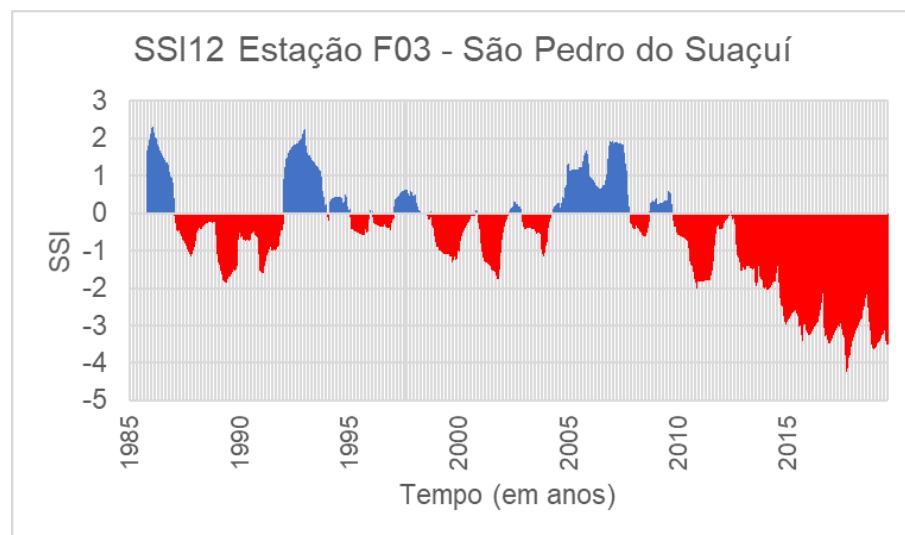
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 102 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.



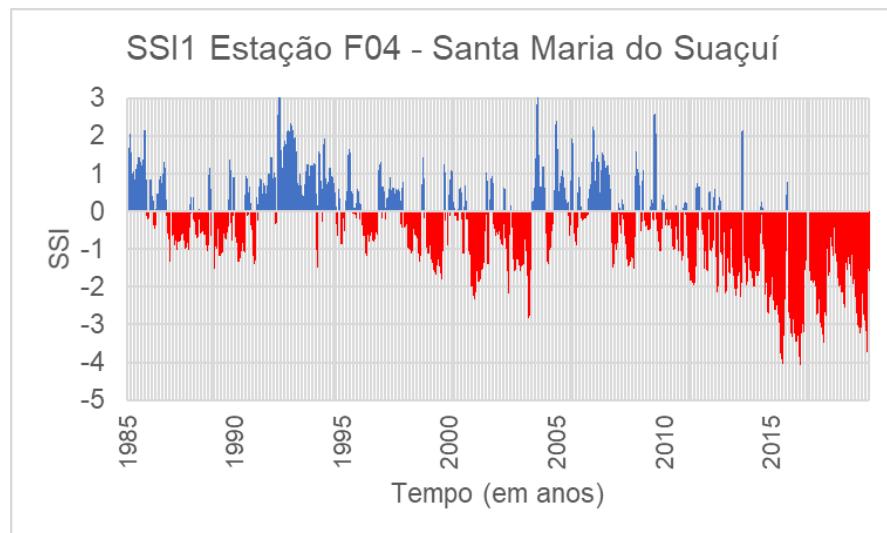
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 103 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F03-São Pedro do Suaçuí.



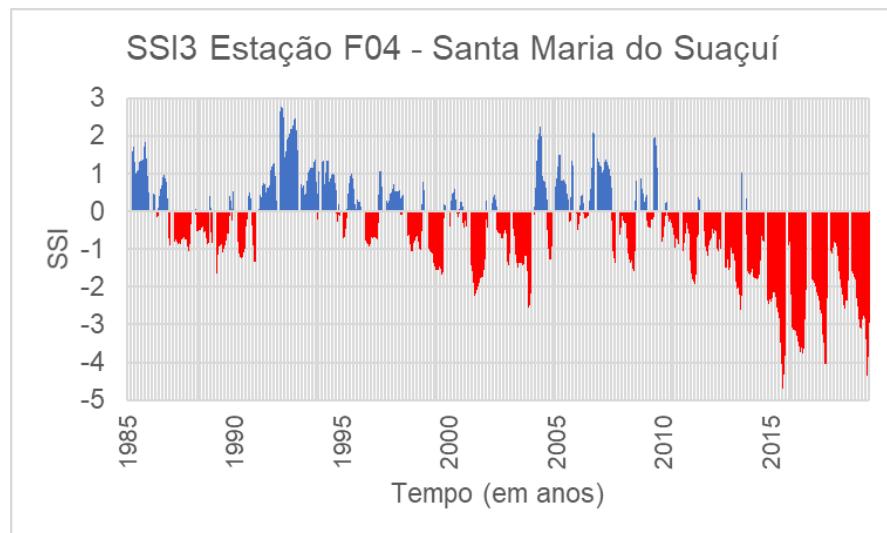
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 104 - Gráfico de SSI-1 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.



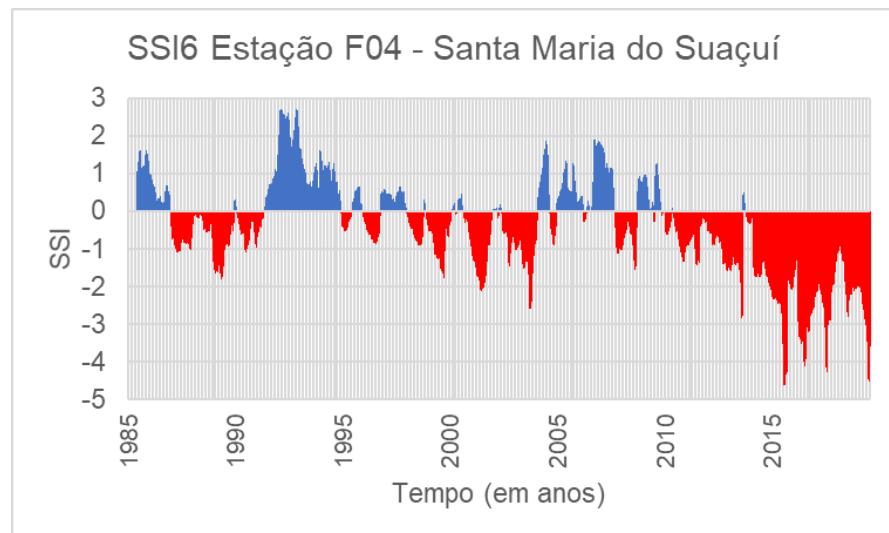
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 105 - Gráfico de SSI-3 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.



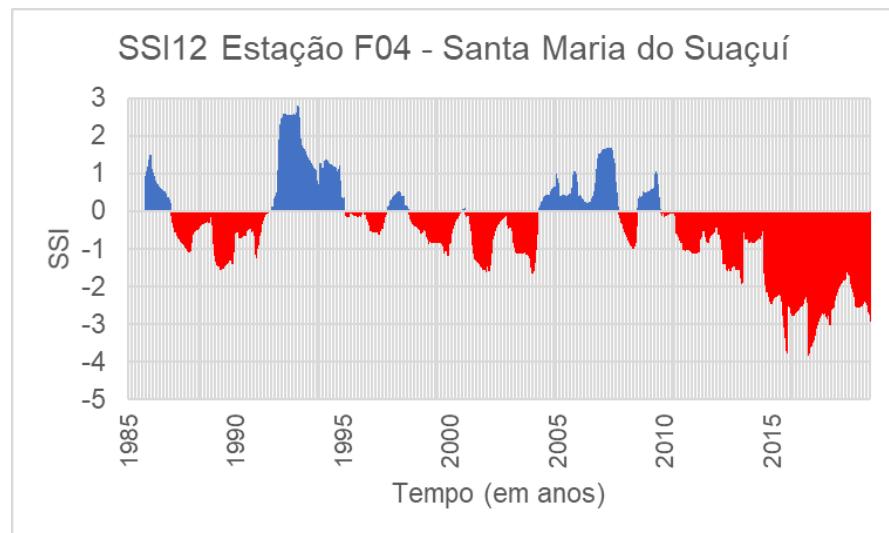
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 106 - Gráfico de SSI-6 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

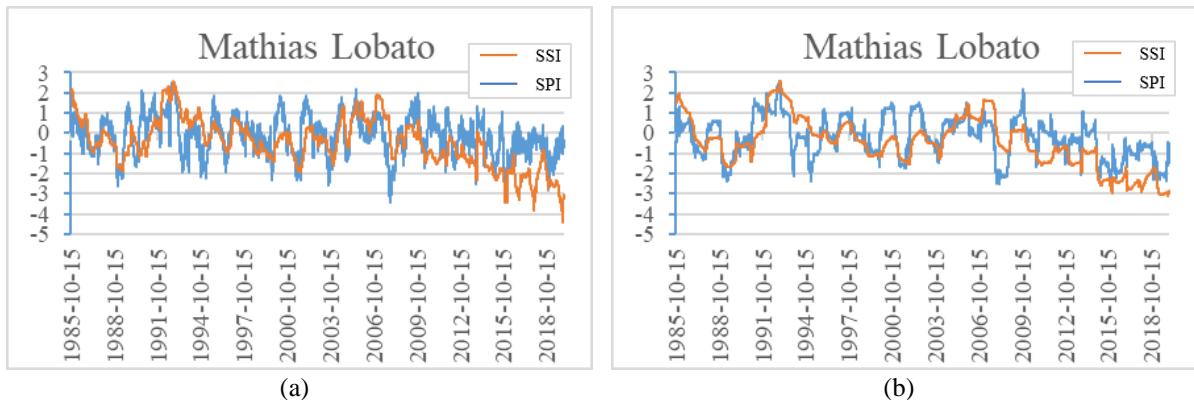
Figura 107 - Gráfico de SSI-12 para os dados observados da estação fluviométrica F04-Santa Maria do Suaçuí.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

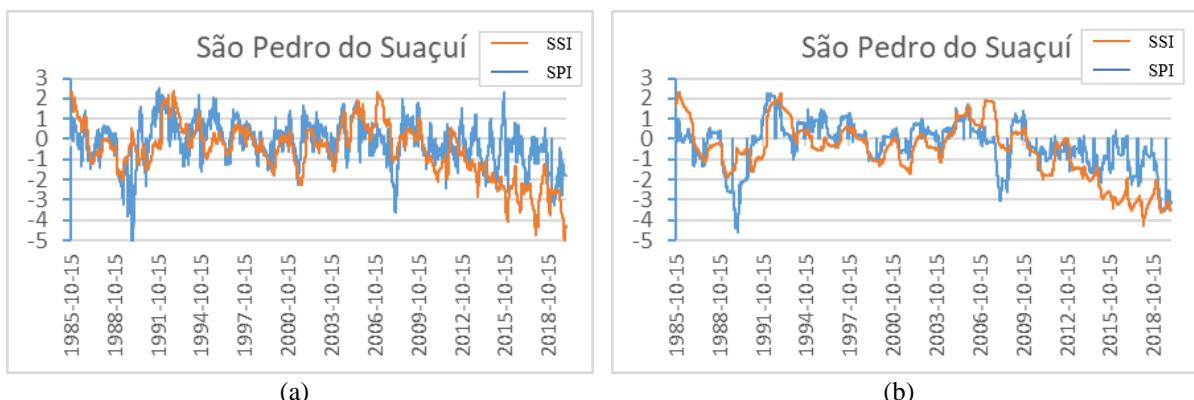
APÊNDICE F – Comportamento de SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de SSI-12 sobrepondo SPI-12 para as estações fluviométricas e pluviométricas

Figura 108 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Mathias Lobato.



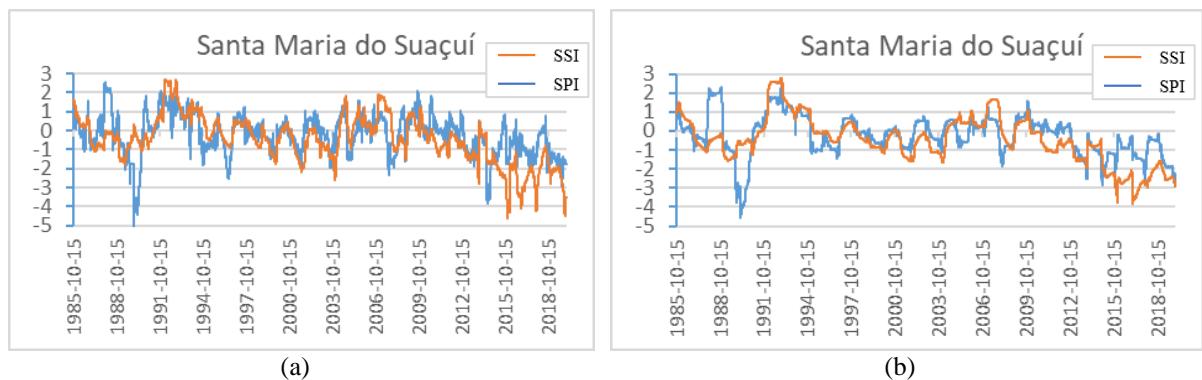
Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 109 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de São Pedro do Suaçuí.



Fonte: A autora deste estudo (2022).

Figura 110 - Comportamento de (a) SSI-6 sobrepondo SPI-6 e de (b) SSI-12 sobrepondo SPI-12, para as estações de Santa Maria do Suaçuí.



Fonte: A autora deste estudo (2022).