



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.17.12.35-TDI

**ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS SOB CENÁRIOS  
DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO  
ITAJAÍ-AÇU**

Lidiane Aparecida Borges

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 18 de janeiro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48NF4UP>>

INPE  
São José dos Campos  
2023

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.17.12.35-TDI

**ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS SOB CENÁRIOS  
DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO  
ITAJAÍ-AÇU**

Lidiane Aparecida Borges

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 18 de janeiro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48NF4UP>>

INPE  
São José dos Campos  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Borges, Lidiane Aparecida.

B644a Análise de eventos extremos sob cenários de mudanças climáticas na bacia do rio Itajaí-Açu / Lidiane Aparecida Borges. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxii + 164 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.17.12.35-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadoras : Dras. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Regina Célia dos Santos Alvalá.

1. Extremos hidrológicos. 2. Tendência. Índice padronizado de precipitação. 3. Índice padronizado de vazão. 4. Mudanças climáticas. I.Título.

CDU 504.4:551.583

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS****DEFESA FINAL DE TESE LIDIANE APARECIDA BORGES  
BANCA Nº 004/2023, REGISTRO 1421433/2017**

No dia 18 de janeiro de 2023, às 09h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Ciência do Sistema Terrestre, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

**Novo título: “ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ-AÇU”.**

**Membros da Banca:**

Dr. Lincoln Muniz Alves – Presidente – INPE  
Dra. Luz Adriana Cuartas Pineda – Orientador (a) – CEMADEN  
Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá – Orientador (a) – CEMADEN  
Dr. Leandro Casagrande – Membro Externo – CEMADEN  
Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha – Membro Externo – CEMADEN



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula Martins do Amaral Cunha, Pesquisador**, em 20/01/2023, às 11:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lincoln Muniz Alves, Pesquisador**, em 20/01/2023, às 16:04 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Célia dos Santos Alvalá, Coordenador de Relações Institucionais**, em 23/01/2023, às 09:15 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Casagrande, Tecnologista**, em 23/01/2023, às 11:04 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luz Adriana Cuartas Pineda, Pesquisador**, em 01/02/2023, às 21:39 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **10766301** e o código CRC **90A7770D**.

---

**Referência:** Processo nº 01340.000403/2023-65

SEI nº 10766301

*A minha mãe, **Aparecida Borges**, in memoriam, com  
amor, carinho e saudades.*





## AGRADECIMENTOS

A minha família, especialmente ao meu grande e fiel companheiro Wendell Fialho, que sempre esteve comigo durante a pior fase desse processo, à minha irmã e minha sobrinha que foram minha força para continuar nos momentos difíceis, e por eles sempre acreditarem em mim mais que eu mesma.

Agradeço imensamente as minhas orientadoras Dra. Adriana Cuartas e Dra. Regina Alvalá que souberam lidar com as minhas dificuldades e angústias, obrigada pelas conversas, amizade, mas principalmente pela excelente orientação, conhecimento transmitido e paciência durante todos esses anos e por ter colaborado tanto na orientação deste trabalho.

A Ana Paula Santos por todo suporte relativo aos dados estatísticos e a Ana Paula Martins do Amaral Cunha pelo suporte nos índices hidroclimáticos.

À banca examinadora, composta pela Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha, Dr. Leandro Casagrande e Dr. Lincoln Muniz Alves, pela pronta disponibilidade em analisar este trabalho, além das valiosas e pertinentes sugestões visando o enriquecimento deste trabalho.

A meus colegas de curso, que estiveram juntos durante todo este processo compartilhando experiências e soluções.

Aos meus amigos que mesmo longe sempre me incentivaram e torceram por mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos do curso de doutorado, sob o código de financiamento 001.

Por fim, a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram para minha experiência de vida e acadêmica no cumprimento dessa etapa.



## RESUMO

Mudanças climáticas afetam o ciclo hidrológico e influenciam significativamente o uso dos recursos hídricos. O grande número de eventos extremos e a extensão prolongada no espaço e no tempo destes são indicativos de que as mudanças climáticas estão se intensificando nas últimas décadas. Eventos de inundações e secas estão sendo registrados periodicamente, e eventos em que uma seca ocorre após uma inundação ou uma inundação ocorre após uma seca prolongada têm sido mais frequentes. Logo, estudos considerando abordagens distintas sobre secas e inundações podem subestimar o risco de desastres se considerados independentemente. Este estudo investiga os impactos das mudanças climáticas nos eventos extremos de inundações e secas na bacia do Itajaí, considerando o uso de projeções regionais, teste de tendência e índices padronizados. A região do Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, Brasil, é uma das regiões que se singulariza por desastres relacionados ao clima que causaram grandes perdas econômicas e sociais nos municípios que fazem parte da bacia, porém, nos últimos anos também vêm passando por períodos de estiagens que afetaram a região. Suas atividades econômicas concentram-se no setor agropecuário, o que torna a região suscetível aos impactos de desastres associados, principalmente, aos extremos hidrológicos. O método de avaliação incluiu o cálculo das tendências pelo teste de Mann-Kendall e o estimador de Sen's e os índices SPI (Índice Padronizado de Precipitação) e SSFI (Índice Padronizado de Vazão) para o período atual de 1989 a 2020 (32 anos) e para cenários futuros de mudanças climáticas. Foram utilizados dois modelos climáticos globais, HadGEM2-ES e MIROC5, com downscaling pelo Modelo Regional Eta, com 20 km de resolução, para os períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Essas projeções adotaram dois cenários de emissão, o RCP 4.5 e o RCP 8.5. No teste de tendência para os dois cenários de RCP 4,5 e 8,5 o ETA/HadGEM2-ES no geral mostrou que a bacia do Itajaí no curto prazo está propícia a eventos mais frequentes de inundações, e no médio-prazo e longo-prazo os eventos de seca poderão ser mais frequentes. O modelo ETA/MIROC5 nos cenários de RCP 4,5 e 8,5, nos três períodos, indicou aumento da precipitação e do escoamento na bacia do Itajaí, ou seja, a região estaria mais propícia a frequência de eventos de inundações. Quando analisados os índices SPI e SSFI os dois modelos ETA/HadGEM2-ES e ET/MIROC5 e nos dois cenários de RCP 4,5 e 8,5 mostraram que nos três períodos, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, a bacia do Itajaí está propícia a eventos extremos de inundações e secas, comprovado pelos valores do SPI e SSFI acima de 2 e menor que -2, os quais indicam períodos extremamente úmidos e secos, respectivamente. Portanto, as mudanças projetadas para essa região podem desencadear a ocorrência de desastres relacionados a eventos extremos, associados a inundações e secas, e que podem aumentar a vulnerabilidade das pessoas que vivem em áreas de risco. Assim, é imprescindível considerar o clima futuro para a adoção de medidas de mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas, bem como para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia do Itajaí.

Palavras-chave: Extremos hidrológicos. Tendência. Índice padronizado de precipitação. Índice padronizado de vazão. Mudanças climáticas.



# ANALYSIS OF EXTREME EVENTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE ITAJAÍ-AÇU RIVER BASIN

## ABSTRACT

Climate changes affect the hydrological cycle and influence significantly the use of water resources. The large number and prolonged extension of drought events are indicative that climate changes are intensifying in the last decades. Frequent floods and droughts have been recorded, with increasing frequency of droughts that occur after a flood or floods that occur after a prolonged drought. Therefore, studies considering different approaches on droughts and floods may underestimate the risk of disasters if considered independently. This thesis investigates the impacts of climate change on extreme floods and drought events using regional projections, trend testing and standardized indices in the Itajaí River basin. The Itajaí Vale region in the state of Santa Catarina, Brazil, stands out for being a region by natural disasters that caused considerable economic and social losses in the municipalities that are part of the basin, however, in recent years they have also been experiencing periods of drought that affected the region. Economic activities are concentrated around the agricultural sector, thus leaving the region susceptible to disaster impacts, particularly hydrological-related disasters. The method adopted was to calculate trends using the Mann-Kendall test and Sen estimator, and the SPI (Standardized Precipitation Index) and SSFI (Standardized Streamflow Index) indices for the current period from 1989 to 2020 (32 years) and for future scenarios of climate change. Two global climate models, HadGEM2-ES and MIROC5, were used by the ETA Regional Model, at 20 km resolution, for three periods (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2099). These projections adopted two emission scenarios, RCP 4.5 and RCP 8.5. The trend test for the two RCP scenarios 4.5 and 8.5 of ETA/HadGEM2-ES in general showed that the Itajaí basin in the short term is prone to more frequent flood events, and in the medium and long term -long term drought events may be more frequent. On the other hand, for the ETA/MIROC5 model in the RCP 4.5 and 8.5 scenarios, in the three periods, it indicated an increase in precipitation and runoff in the Itajaí basin, that is, the region is more prone to the frequency of flood events. When we analyzed the SPI and SSFI indices, the two models ETA/Hadgem and ETA/MIROC and in the two scenarios of RCP 4.5 and 8.5 showed that in the three periods, 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2099, the basin Itajaí is prone to extreme events of floods and droughts, as evidenced by SPI and SSFI values above 2 and smaller -2, which indicate extremely wet and dry periods, respectively. Therefore, the changes projected for this region can trigger the occurrence of natural disasters, such as floods and droughts, which can increase the vulnerability of people living in risk areas. Thus, it is essential to consider the future climate in order to take measures to mitigate the impacts of climate change, as well as for better planning and management of water resources at Itajaí River basin.

Keywords: Hydrological extremes. Trends. Standardized precipitation index. Standardized flow rate. Climate changes.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Principais impactos da seca em relação aos diferentes tipos de seca. . . . .	10
2.2 Diferenças entre inundação gradual e brusca. . . . .	13
3.1 Localização da Bacia hidrográfica do Itajaí e de suas Barragens para mitigação das inundações. . . . .	20
3.2 Localização das estações de precipitação e de vazão na Bacia do Itajaí, de acordo com a base de dados da ANA. . . . .	22
3.3 a) Localização dos pontos de grade de 20km x 20km do Modelo ETA na Bacia do Itajaí e b) Localização dos pontos do modelo ETA e das estações da ANA utilizados no estudo. . . . .	26
4.1 Mapa das estações do teste de Tendência para cada uma das séries temporais dos dados de precipitação das 22 estações, os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores associadas com as estações pluviométricas da Bacia do Vale do Itajaí, identificados com numeração (de 1 a 22) para localizar as estações na área de estudo. . . . .	38
4.2 Teste de tendência de Mann-Kendall para os dados de Precipitação das 22 estações da ANA. . . . .	41
4.3 Mapa das estações do teste de tendência para cada uma das séries temporais dos dados de vazão das 17 estações, os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores associados com as estações fluviométricas da Bacia do Vale do Itajaí, identificados com numeração (de 1 a 17) para localizar as estações na área de estudo. . . . .	43
4.4 Teste de tendência de Mann Kendall para Vazão. . . . .	46
4.5 a) Tendência de chuva e b) vazão sobre a Bacia do Itajaí. . . . .	48
4.6 Série temporal do SPI-6, SPI-12, SPI-18 e SPI-24, para as 22 estações de precipitação da Bacia do Itajaí. Série calculada para o período de 1989 a 2020. . . . .	50
4.6 Conclusão. . . . .	51
4.7 Série temporal do SSFI-6, SSFI-12, SSFI-18 e SSFI-24, para as 17 estações de vazão da Bacia do Itajaí. Série calculada para o período de vazão de 1989 a 2018. . . . .	54
4.8 Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	69

4.9	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5. . . . .	70
4.10	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC 4,5. . . . .	71
4.11	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC 8,5. . . . .	72
4.12	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	74
4.13	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA /HadgemES RCP 8,5. . . . .	75
4.14	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5. . . . .	77
4.15	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5. . . . .	78
4.16	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	80
4.17	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5. . . . .	81
4.18	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5. . . . .	82
4.19	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5. . . . .	83
4.20	Mapa de interpolação da tendência de precipitação na Bacia do Itajaí para os cenários ETA/HadGEM2-ES a) 4,5, b) 8,5 e ETA/MIROC5 c) 4,5, d) 8,5. . . . .	86
4.21	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	94
4.22	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5. . . . .	95
4.23	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5. . . . .	96
4.24	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5 . . . . .	97
4.25	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	99
4.26	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5. . . . .	100



4.27	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5. . . . .	101
4.28	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5 . . . . .	102
4.29	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5. . . . .	104
4.30	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5. . . . .	105
4.31	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5. . . . .	106
4.32	Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5 . . . . .	107
4.33	Mapa de interpolação da tendência de escoamento superficial na Bacia do Itajaí para os cenários ETA/HadGEM2-ES a) 4,5, b) 8,5 e ETA/MIROC5 c) 4,5 , d) 8,5. . . . .	109
4.34	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	112
4.35	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA /HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070. . . . .	114
4.36	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099. . . . .	115
4.37	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	117
4.38	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070. . . . .	118
4.39	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2090. . . . .	119
4.40	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	121
4.41	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	122
4.42	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	123
4.43	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 8,5, no período de 2011-2040. . . . .	125
4.44	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 8,5, no período de 2041-2070. . . . .	126

4.45	Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 8,5, no período de 2071-2099. . . . .	127
4.46	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	129
4.47	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070. . . . .	130
4.48	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099. . . . .	131
4.49	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2011-2040. . . . .	133
4.50	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2041-2070. . . . .	134
4.51	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2071-2099. . . . .	135
4.52	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	137
4.53	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070. . . . .	138
4.54	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099. . . . .	139
4.55	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. . . . .	141
4.56	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070. . . . .	142
4.57	Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099. . . . .	143

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Principais impactos da seca em relação aos diferentes tipos de seca. . . . .	10
3.1 Localizações e respectivas altitudes das 22 estações pluviométricas utilizadas neste estudo, e a porcentagem de dados faltantes para cada estação. . . . .	23
3.2 Informações das 17 estações fluviométricas utilizados no presente trabalho, e a porcentagem de dados faltantes de cada estação. . . . .	24
3.3 Localização da grade de pontos do ETA na bacia Itajaí. . . . .	27
3.4 Correlação dos dados observados e dos dados dos pontos da grade do ETA para a precipitação no período de 2006-2020. . . . .	29
3.5 Classificação do SPI, SSFI e SRI. . . . .	34
4.1 Resultados do teste de Mann-Kendall para as séries de precipitação acumulada. . . . .	39
4.2 Resultados do teste de Mann-Kendall para as séries de vazão máxima anual. . . . .	44
4.3 Severidade máxima dos eventos de precipitação de acordo com o SPI nas escalas de 12 e 24 meses, para os eventos secos e úmidos. . . . .	59
4.4 Severidade máxima dos eventos de vazão de acordo com o SSFI nas escalas de 12 e 24 meses, para os eventos secos e úmidos. . . . .	60
4.5 Valores do teste de tendência de MK para os dados de precipitação, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 4.5. . . . .	62
4.6 Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 8.5. . . . .	64
4.7 Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/MIROC 4.5. . . . .	66
4.8 Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/MIROC 8.5. . . . .	67
4.9 Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 4.5. . . . .	88
4.10 Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 8.5. . . . .	90
4.11 Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/MIROC 4.5. . . . .	91
4.12 Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/MIROC 8.5. . . . .	92



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMO	– Atlantic Multidecadal Oscillation
ANA	– Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AVADAN	– Avaliação de Danos
AR5	– Five Assessment Report
AR6	– Sixth Assessment Report
CCSR	– Center for Climate System Research
CEPED	– Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres
CMIP5	– Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CPTEC	– Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DNOS	– Departamento Nacional de Obras de Saneamento
ENOS	– El Niño–Oscilação Sul
ENSO	– El Niño Southern Oscillation
EPAGRI	– Empresa de Pesquisa e Extensão Rural do Estado de Santa Catarina
GEE	– Gases do Efeito Estufa
HidroWeb	– Sistema de Informações Hidrológicas
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	– Ponderação do Inverso da Distância
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	– Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
JAMSTEC	– Agência Japonesa de Ciência e Tecnologia da Terra e dos Mares
MCR	– Modelo Climático Regional
MCG	– Modelo Climático Global
MCT	– Ministério da Ciência e Tecnologia
MCTI	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MGB–IPH	– Modelo hidrológico de grande escala – Instituto de Pesquisa Hidráulica
MK	– Mann Kendall
NIES	– Instituto Nacional de Pesquisas Ambientais
NOAA/CPC	– NOAA Climate Prediction Center
OMM	– Organização Meteorológica Mundial
PCD	– Plataforma de Coleta de Dado
PDO	– Oscilação Decadal do Pacífico
PIB	– Produto Interno Bruto
PSDI	– Índice de Severidade da Seca de Palmer
PWT	– Pre-Whitening Trend
RCP	– Caminhos de Concentração Representativa
SIG	– Índice Padronizado do nível de Águas Subterrâneas
SPI	– Índice Padronizado de Precipitação
SSFI	– Índice Padronizado de Vazão
SRI	– Índice Padronizado de Escoamento
SWAT	– Soil Water Assessment Tool
WMO	– World Meteorological Organization



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	7
1.2 Objetivos . . . . .	7
1.2.1 Objetivos específicos . . . . .	7
1.3 Organização do trabalho . . . . .	8
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Seca . . . . .	9
2.2 Inundação . . . . .	12
2.3 Mudanças climáticas . . . . .	14
2.4 Modelos e cenários . . . . .	15
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>19</b>
3.1 Dados . . . . .	19
3.1.1 Área de estudo . . . . .	19
3.1.2 Dados observados . . . . .	21
3.2 Projeções climáticas . . . . .	25
3.2.1 Modelo climático regional ETA . . . . .	25
3.2.2 Modelos climáticos HADGEM2-ES e MIROC5 . . . . .	27
3.3 Metodologia . . . . .	30
3.3.1 Teste de tendência . . . . .	30
3.3.2 Estimador de declive de Sen . . . . .	32
3.3.3 Standardized Precipitation Index – SPI . . . . .	33
3.3.4 Standardized Streamflow Index – SSFI e Standardized Runoff Index – SRI . . . . .	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>37</b>
4.1 Cenário observado . . . . .	37
4.1.1 Teste de tendência . . . . .	37
4.1.2 Índices hidroclimáticos . . . . .	48
4.1.2.1 Análise da severidade . . . . .	58
4.1.3 Cenários de mudanças climáticas . . . . .	60
4.1.3.1 Tendência . . . . .	60

4.1.3.2	Índices hidroclimáticos . . . . .	111
4.1.3.3	Análise da severidade . . . . .	145
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>149</b>
5.1	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	151
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>153</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas AR6 (IPCC, 2021), destaca que as mudanças no clima já estão afetando todo o planeta e, que a ação humana vem contribuindo para o aquecimento do sistema climático e para as alterações já observadas nos eventos extremos. Vários estudos corroboram com o relatório, como, por exemplo, os desenvolvidos por Wu et al. (2017) e por Marengo et al. (2020), os quais têm mostrado que, principalmente depois dos anos 2000, os eventos climáticos extremos, ou seja, todos aqueles fenômenos meteorológicos e climatológicos em grande proporção que afetam a sociedade, como altas temperaturas, geadas, longos períodos de secas e de chuvas intensas, têm se tornado mais frequentes, culminando em secas, inundações, tornados, ondas de calor, entre outros. Portanto, com os eventos extremos acontecendo com maior frequência, as consequentes chuvas extremas e secas mais prolongadas (TAYE et al., 2020; IPCC, 2021; NOBRE, 2020) têm gerado impactos sociais (incluindo perdas de vidas), ambientais e econômicos, com consideráveis desafios para a sociedade. Algumas regiões ao redor do planeta vêm sendo impactadas por eventos extremos, por exemplo, na região dos Andes Central da Argentina (RIVERA et al., 2017), na África Tropical (JIANG et al., 2019), na Austrália (FREUND et al., 2017; KING et al., 2020) e aquelas afetadas pelas secas no Sudeste Asiático (TAUFIK et al., 2020). Especificamente, as inundações causaram grandes perdas na China durante os anos de 2000 a 2010 (WU et al., 2017), na Alemanha em 2016 (BRONSTERT et al., 2018), na Ásia no período de 1985 a 2018 (CHEN et al., 2020), na Bélgica em 2021 (KOKS et al., 2021), e na América do Sul nos últimos 20 anos (PINOS; QUESADA-ROMÁN, 2022).

O Brasil também tem sido impactado por eventos extremos nas várias regiões, como, por exemplo, na Amazônia (MARENGO; SOUZA JUNIOR, 2018; MARENGO et al., 2020; BRITO et al., 2021) e na região Nordeste (MARENGO; SOUZA JUNIOR,

2018; CUNHA et al., 2019), que sofreram com as secas prolongadas, enquanto as inundações severas causaram grandes perdas nas últimas 3 décadas nas regiões Sudeste e Sul culminando em várias mortes e um número significativo de pessoas desabrigadas e desalojadas (CEPED, 2013; ÁVILA et al., 2016; DUNN et al., 2020; MARENGO et al., 2020; MARENGO et al., 2020), além de ciclone no estado de Santa Catarina. Entre 2014 e 2015, uma seca severa atingiu a região Sudeste do Brasil, causando grande impacto e levando ao racionamento do abastecimento de água para milhões de habitantes da Região Metropolitana de São Paulo (COELHO et al., 2016; SANTOS et al., 2017; MARENGO et al., 2020). No final de 2011 a 2018, o Nordeste brasileiro sofreu com o maior e mais intenso período de secas, nos últimos 30 anos (MARTINS; MAGALHÃES, 2015; MARENGO et al., 2017; CUNHA et al., 2019; BRITO et al., 2021), enquanto nos anos de 2019 e 2020 eventos de secas aconteceram de maneira concomitante em diversas regiões do Brasil (CUNHA et al., 2019; FERNANDES et al., 2021; MARENGO et al., 2021; CUARTAS et al., 2022). No outro extremo, no ano de 2020, vários municípios do estado do Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo sofreram com inundações e deslizamentos provocados por chuvas intensas, que acarretaram em mortes e milhares de pessoas desalojadas (CORTEZ, 2020). Nos anos de 2019 e 2020 a seca impactou consideravelmente a região Sul (FERNANDES et al., 2021); no estado catarinense, mais de 65 municípios decretaram situação de emergência, sendo que estiagens iguais a essa só ocorreram em 1978 e 2006, de acordo com a Empresa de Pesquisa e Extensão Rural do Estado de Santa Catarina (EPAGRI, 2020). Em novembro de 2008, as inundações e deslizamentos deixaram 69.000 pessoas desabrigadas em Santa Catarina e 120 vítimas fatais (MARENGO; SOUZA JUNIOR, 2018; SILVA et al., 2019). De acordo com um estudo do Banco Mundial, os custos totais das inundações de 2008 foram estimados em R\$ 4,75 bilhões - valor que equivalente a 2,67% do PIB do estado de Santa Catarina (CEPED, 2013). A Bacia do Itajaí foi uma das mais afetadas com 27 dos 48 municípios pertencentes à bacia decretando situação de emergência

e 12 municípios decretando estado de calamidade pública (CEPED, 2013; ALVES, 2013). Após as inundações de 2008, o estado Catarinense passou por um período de estiagens, o que provocou situação de emergência em 45 municípios (ALVES, 2013), sendo a cidade de Blumenau, que está localizada na Bacia do Itajaí, e que foi uma das mais afetadas pelas chuvas de novembro de 2008, a que não registrou eventos de chuvas significativos durante os 5 meses subsequentes ao evento de chuva intensa (CEPED, 2013). Nos anos de 2019 e 2020, a região do Vale do Itajaí também sofreu com as estiagens que atingiram o estado de Santa Catarina, enquanto os níveis dos principais rios que abastecem a região ficaram abaixo do normal e em alguns municípios a população foi afetada pela falta d' água (EPAGRI, 2020). Durante as últimas décadas, secas e inundações tornaram-se mais intensas e frequentes devido aos possíveis efeitos das alterações climáticas e o cenário climático brasileiro acompanha esta mesma tendência (MARENGO et al., 2012; ASSIS et al., 2012; SILVA et al., 2016). As ocorrências crescentes de extremos climáticos, com consequentes inundações e secas, podem causar grandes perdas econômicas e sociais para a Bacia do Itajaí, bem como a relação das mudanças climáticas e os eventos extremos precisam ser estudados de modo que se possa analisar seus impactos nos recursos hídricos no futuro.

A fim de estudar os impactos das mudanças climáticas, os modelos climáticos são utilizados para detectar a ocorrência de eventos de seca e inundações para cenários futuros. Para simular as variáveis climáticas futuras, são utilizados os Modelos Climáticos Globais (MCGs); no entanto, por possuírem uma baixa resolução espacial (100–500 km) eles não são recomendados para inferir projeções confiáveis em escalas locais (WILBY R. L. DAWSONB; BARROWC, 2002; IPCC, 2014; DEB et al., 2014). Neste contexto, técnicas de downscaling dinâmicas foram desenvolvidas para obter Modelos Climáticos Regionais (MCRs), que aumentam a resolução do MCG para escalas de até 5–50 km e fornecem dados espaciais mais detalhados do que os MCGs, tornando-os uma ferramenta essencial para melhorar as análises do clima em

estudos de impacto regional, capturando e representando melhor as condições locais (RAJIB; RAHMAN, 2012; CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b).

Os impactos dos processos influenciados pelas mudanças climáticas têm sido estudados sob vários cenários do IPCC (RIBEIRO NETO et al., 2016). O 5º Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) baseia-se em quatro diferentes vias de emissões de gases do efeito estufa (GEE), emissões de poluentes atmosféricos e uso da terra, isto é, as Representative Concentration Pathways (Vias de Concentração Representativa) (RCPs) ou cenários de forçamento radiativo RCPs 8,5; 6; 4,5 e 2,6  $W.m^{-2}$ , que correspondem aos intervalos de cenários de emissões pessimistas aos otimistas (IPCC, 2014; MOSS R. H. EDMONDS et al., 2010). Tais cenários têm sido considerados em diversos estudos focando a mitigação de emissões e análise dos impactos das mudanças climáticas (CHOU et al., 2014a; OLIVEIRA et al., 2017; SHIFERAW et al., 2018; SANTOS et al., 2017; SANTOS et al., 2018; SOUSA et al., 2019; MARIN et al., 2020).

Diante disso, cenários de mudanças climáticas futuras com alta resolução, desenvolvidos a partir de resultados de modelos climáticos regionais forçados com condições de contorno de vários modelos climáticos globais têm sido produzidos por diversos autores (CHOU et al., 2014a; RIBEIRO NETO et al., 2016; PLOSZAI et al., 2022). Estudos têm mostrado que os processos hidrológicos das bacias são sensíveis às mudanças no clima padrão devido ao aquecimento global (ALVARENGA et al., 2016; ZHANG et al., 2016; TAN et al., 2017). O aumento da frequência e magnitude dos extremos climáticos, como longos períodos de secas e chuvas extremas, são sinais das mudanças climáticas (TAYE et al., 2020).

Os eventos de inundações e secas estão estreitamente associados às tendências de aumento e decréscimo do escoamento dos rios e da precipitação; logo identificar as tendências possibilita avaliar os eventos extremos no contexto das mudanças climáticas (MURARA et al., 2018). Uma das principais ferramentas utilizadas para

a análise de tendência é o teste estatístico de Mann-Kendall (MK) (MANN, 1945; KENDALL, 1975) modificado e o estimador de Sen para calcular a inclinação da tendência. No Brasil, vários estudos têm sido desenvolvidos utilizando este método. Especificamente na região sul do Brasil, eles têm mostrado tendência de aumento na precipitação total anual (ÁVILA et al., 2016; LIRA; CARDOSO, 2018). Cortez (2020) avaliou a ocorrência de precipitações extremas em condições não estacionárias no Brasil e suas projeções para cenários de mudanças climáticas, considerando RCP 4,5 e 8,5 e, para determinar a presença de tendências, aplicou o teste de Mann-Kendall às séries de precipitação máxima, tendo verificado aumento nos volumes de precipitação extrema devido as projeções climáticas em pelo menos 90% do território brasileiro, concluindo que tal aumento poderá causar impactos mais intensos e frequentes de inundações e o aumento dos riscos sociais, ambientais e econômicos.

Para analisar períodos de secas e inundações têm sido utilizados o Índice Padronizado de Precipitação (SPI, *Standardized Precipitation Index*), comumente utilizado em estudos com foco em monitoramento de secas e excesso hídrico (MCKEE et al., 1993), e o Índice Padronizado de Vazão (SSFI, *Standardized Streamflow Index*), desenvolvido por Modarres (2007), cujo objetivo consiste em determinar a seca hidrológica e os períodos de excesso de umidade de forma simples e objetiva, similar ao SPI. Rodrigues et al. (2019) estudaram os impactos das mudanças climáticas no fluxo de riachos e secas de bacias no Bioma cerrado brasileiro. Para o estudo consideraram o uso do modelo hidrológico SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) conduzido pela redução dos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MIROC5 associados aos cenários RCP4,5 e RCP8,5, para os períodos 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2099. O SPI e o SSFI foram usados para caracterizar secas; tendo concluído que a duração, intensidade e frequência das secas meteorológicas e hidrológicas devem aumentar durante os períodos futuros. Andrade et al. (2021) avaliaram o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos em cenários RCPs na Bacia do Rio Mundaú, no Nordeste do Brasil, usando o modelo hidrológico SWAT e Modelos

Climáticos (MCRs) ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES, para três períodos de tempo nos cenários de RCPs 4,5 e 8,5. Em geral, os modelos climáticos preveem que a precipitação anual diminuirá, as temperaturas máxima e mínima aumentarão, a evapotranspiração real diminuirá e o escoamento superficial reduzirá significativamente. Ploszai et al. (2022) avaliaram cenários de mudanças climáticas no estado do Paraná a partir de uma análise não estacionária através de índices de seca, cujos resultados mostraram uma intensificação de secas para o futuro, independentemente do cenário climático adotado (RCP 4,5 e RCP 8,5) e apontaram que as secas podem se intensificar até 2100 em severidade, magnitude e duração. Os modelos climáticos permitem avaliar SPI e SSFI também para cenários futuros e detectar a ocorrência de eventos de secas e úmidos, sua frequência, intensidade e duração (STAGGE et al., 2015), comparando-os com os dados históricos.

No escopo acima, com a ocorrência crescente de riscos climáticos, como inundações e secas na Bacia do Itajaí, torna-se necessário estudar a relação das mudanças climáticas e os riscos de extremos climáticos na região do Vale do Itajaí, devido ao seu histórico recente de extremos de inundações e de secas; portanto, o objetivo deste estudo é avaliar a ocorrência de eventos extremos e suas projeções para cenários de mudanças climáticas. Para isso, foram calculados os índices hidroclimáticos (SPI, SSFI e SRI, *Standardized Runoff Index*) e a tendência dos dados de precipitação, vazão e escoamento superficial aplicando o teste de Mann-Kendall e o estimador de declividade de Sen's para verificar as ocorrências de secas e inundações para a Bacia do Itajaí. Foi utilizado dados observados de precipitação e vazão de 1989 a 2020 e dados projetados de 2011 a 2099, oriundos dos modelos ETA/HADEGM2-ES e ETA/MIROC5 considerando os cenários RCP 4,5 e 8,5. A inovação deste estudo consiste no acoplamento de índices hidroclimáticos e projeções futuras de dados climáticos para obter uma estimativa dos eventos extremos não somente de secas, mas também de inundações, além de analisar as tendências das variáveis climáticas para cenários observados e projetados. Espera-se que a avaliação e as informações forne-

cidas nesta pesquisa baseiem estudos para avaliação de impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em diferentes setores socioeconômicos para o desenvolvimento de planos e gestão dos recursos hídricos.

## **1.1 Motivação**

Ao longo de sua história, o estado de Santa Catarina sempre foi afetado pelos desastres naturais, especialmente os relacionados a eventos pluviométricos extremos (HERRMANN, 2014). Neste contexto, Severo et al. (2019) apontou que a região do Vale do Itajaí é afetada por sistemas de tempo adverso que produzem chuvas intensas, causando inundações; porém, com as mudanças climáticas e o aquecimento do planeta, essa região também pode ser afetada por eventos de secas. Assim, torna-se necessário uma investigação das ocorrências de inundações e secas, visando avaliar como os eventos extremos irão impactar a bacia do Itajaí, devido as mudanças climáticas que já estão em curso, e quais as implicações que isto pode trazer para a bacia, uma vez que é uma região que depende consideravelmente do setor agropecuário, e também contribuir para planos de gestão e planejamento dos desastres relacionados ao clima.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo deste estudo é avaliar as tendências da precipitação, do escoamento superficial e da vazão, assim como a variabilidade de eventos de secas e inundações na Bacia do Itajaí, localizada na região sul do Brasil, devido ao seu histórico recente de extremos de inundações e secas, a fim de analisar como estes processos ocorrem e se os mesmos estão se tornando mais frequentes e como serão no futuro devido às mudanças climáticas que já estão ocorrendo.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Avaliar as tendências da vazão e das precipitações em cenários observados;

- Avaliar possíveis tendências no escoamento e precipitação, considerando cenários de mudanças climáticas;
- Avaliar o SPI e o SSFI associados às secas e inundações no período observado, e o SPI e o Índice Padronizado de Escoamento (SRI) nos cenários projetados;
- Analisar se os índices SPI, SSFI e SRI são capazes de detectar as secas e inundações em cenários atuais e projetados.

### **1.3 Organização do trabalho**

A tese divide-se em 5 capítulos. O Capítulo 1 refere-se à introdução, no Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre Secas e Inundações, Mudanças Climáticas, Modelos e Cenários, com foco especial em suas definições e aplicações. Os dados utilizados e a metodologia aplicada para se obter os resultados pretendidos são descritos no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentadas e discutidas as análises das tendências e dos índices Hidroclimáticos, SPI, SSFI e SRI, para cenários atuais e projetados. As conclusões do trabalho encontram-se no Capítulo 5.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda inicialmente as características gerais dos eventos extremos de inundação e seca e também sobre como as mudanças climáticas podem contribuir para aumentar as frequências dos eventos extremos.

### 2.1 Seca

A seca tem início com a ausência ou deficiência de precipitação (seca meteorológica), combinado com altas temperaturas e, conseqüentemente, maiores evapotranspirações, o que irá causar déficit de umidade do solo, reduzindo a oferta de água para as plantas (seca agrícola). A próxima etapa da seca, classificada como seca hidrológica, ocorre quando os níveis de água subterrânea, rios e lagos estão abaixo do normal. Segundo [Loon \(2015\)](#), a seca hidrológica caracteriza-se pela falta de água no sistema hidrológico e se desenvolve de maneira lenta sobre grandes áreas, gerando impactos nas atividades que mais dependem da água, como abastecimento público, irrigação, geração de energia, agricultura, turismo e indústria, afetando milhares de pessoas. Na Tabela 2.1, elencam-se os principais setores impactados pelos tipos de secas.

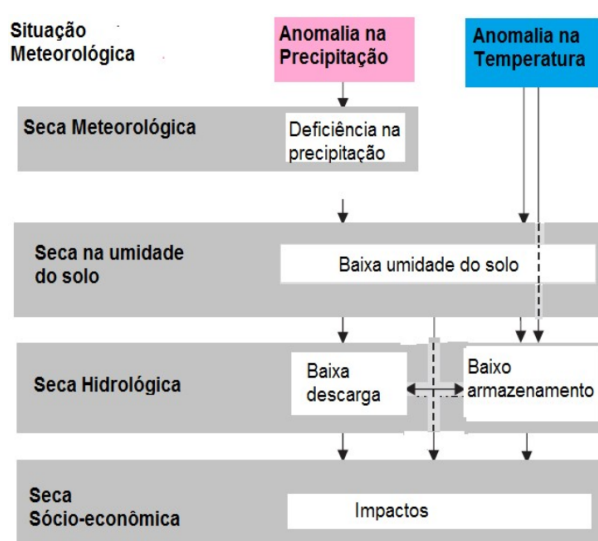
Tabela 2.1 - Principais impactos da seca em relação aos diferentes tipos de seca.

Categoria de Impacto		Categoria de Seca		
		Seca Meteorológica	Seca Agrícola	Seca Hidrológica
Agricultura	Sequeiro	X	X	
	Irigada		X	X
Ecosistema	Terrestre	X	X	
	Aquático			X
Energia	Hidroelétrico			X
Indústria	Resfriamento de Água			X
Navegação				X
Água Potável				X
Recreação				X

Fonte: Adaptada de Loon (2015).

Por fim, a seca socioeconômica (Figura 2.1) que é o impacto gerado pelos três tipos de seca conforme mencionada na Tabela 2.1.

Figura 2.1 - Principais impactos da seca em relação aos diferentes tipos de seca.



Fonte: Adaptada de Loon (2015).

Para que ocorra uma gestão adequada das causas e impactos da seca, a sua quantificação é essencial; logo, faz-se necessário avaliar sua severidade, duração e extensão, o que pode ser feito através do uso de índices hidroclimáticos. São muito os tipos de índices disponíveis para caracterizar uma seca, e a escolha de qual usar vai depender da finalidade, da disponibilidade de dados observados e da área de estudo. Entre os índices mais utilizados estão o SPI, que se baseia em um longo registro de precipitação e é ajustado a uma distribuição de probabilidade, e o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PSDI sigla em inglês para *Palmer Severity Drought Index*), que usa um modelo simples de equilíbrio de água no solo para quantificar a seca. Há também alguns índices que são específicos para a caracterização da seca hidrológica, como o Índice de Escoamento SRI e o SSFI, os quais ajustam uma distribuição de probabilidade aos dados de escoamento e vazão, respectivamente.

Estudos sobre o tempo de recuperação de uma seca ainda são poucos. Entre eles inclui-se o desenvolvido por [Andreadis et al. \(2005\)](#), que utilizaram modelos hidrológicos para analisar a extensão das secas nos Estados Unidos, e chegaram à conclusão que o escoamento tende a se recuperar em resposta à precipitação mais rapidamente do que a umidade do solo. Já [Parry et al. \(2018\)](#), propuseram uma abordagem quantitativa, especificamente para caracterizar a seca hidrológica no Reino Unido, e chegaram à conclusão que é preciso uma compreensão melhor sobre os processos de duração da seca. As pesquisas realizadas neste contexto mostram que ainda há uma lacuna a ser preenchida quanto à estimativa da duração da seca, uma vez que são vários os fatores que interferem no armazenamento de água de uma bacia, como, a geologia, a rede de drenagem, a topografia, os usos do solo, o clima, o que torna complexo definir a duração de uma seca.

Outros fatores também podem contribuir para o aumento na frequência da seca, como o crescimento populacional, que conseqüentemente aumentará a demanda de água para abastecimento público, geração de energia e produção de alimentos. As

mudanças nos usos do solo também podem contribuir para a escassez hídrica, pois são capazes de tornar os fluxos dos escoamentos superficiais e subterrâneos mais rápidos, e, assim, contribuir para a diminuição dos níveis de água dos rios, lagos e reservatórios.

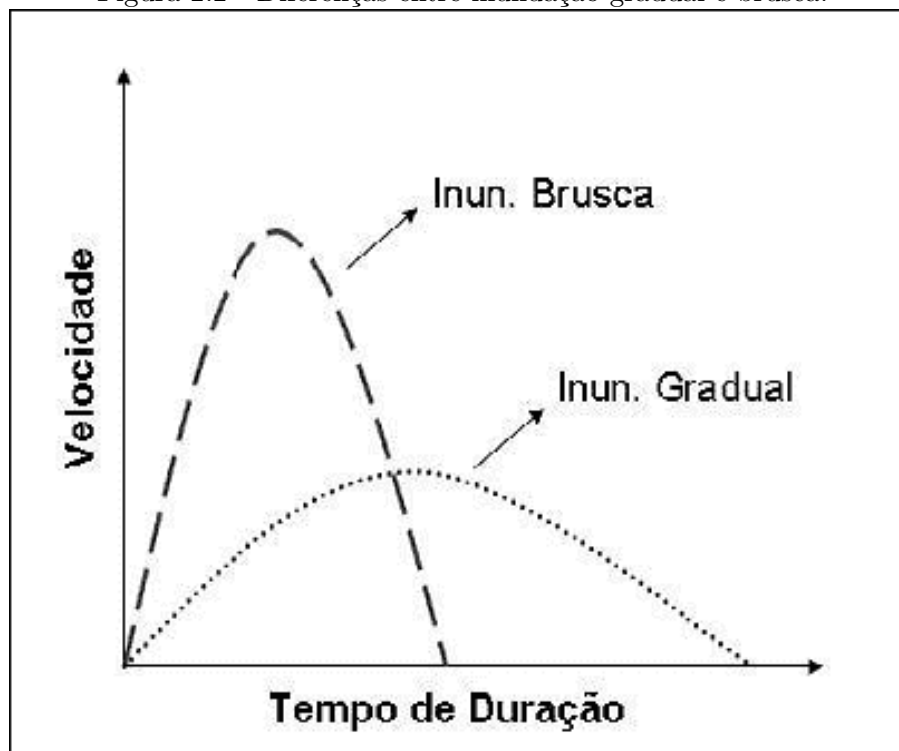
## 2.2 Inundação

As inundações inserem-se entre os principais tipos de desastres relacionados ao clima, comumente deflagrados por chuvas intensas e de longa duração (TACHINI, 2010). As alterações ambientais e as inúmeras intervenções antrópicas, principalmente nas áreas urbanas, têm potencializado as consequências das inundações. A enchente ocorre quando a água do rio atinge sua cota máxima de altura, porém não há transbordamento, e pode ser considerada como a variação dos níveis de água e respectivas vazões junto a uma determinada seção, em consequência dos escoamentos gerados por chuvas (COSTA; TEUBER, 2001).

A respeito das inundações fluviais, se diferencia as inundações graduais das bruscas. “Nas inundações graduais, as águas elevam-se de forma paulatina e previsível; mantêm-se em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam-se gradualmente”. (p. 48). “Já as inundações bruscas são provocadas por chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por produzirem súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam-se de forma rápida e intensa.” (p. 50) (CASTRO, 2003).

A Figura 2.2 ilustra a diferença entre as inundações brusca e gradual, quanto à velocidade e o tempo de duração.

Figura 2.2 - Diferenças entre inundação gradual e brusca.



Fonte: Adaptada de Kobiyama et al. (2006).

A distinção entre as inundações bruscas e graduais é de suma importância, uma vez que a Defesa Civil Nacional estabeleceu a diferenciação no sistema de registro para cada tipo de inundação associado, ao ato de decretar situação de emergência ou estado de calamidade pública. O sistema, denominado Avaliação de danos (AVADAN), e adota as definições propostas por (CASTRO, 2003), que as separa em bruscas e graduais. Ainda que as inundações sejam ameaças naturais, que acontecem periodicamente por ocasião das chuvas excepcionais, para entendê-las é preciso uma análise no âmbito de bacias hidrográficas, de modo que possam ser considerados diversos fatores, como os climáticos, as características físicas e as modificações causadas pelo homem no sistema de drenagem da bacia, os quais podem agravar os impactos ambientais a jusante (HERRMANN, 1999).

### 2.3 Mudanças climáticas

O último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas AR6 (IPCC, 2021) ressaltou que as mudanças no clima já estão afetando todo o mundo, e que a ação humana vem contribuindo para o aquecimento do sistema climático e para as alterações já observadas nos eventos extremos. Mudanças, tais como o aumento ou a diminuição da precipitação total anual, da temperatura, de geadas, das marés, e os eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes, causando secas, inundações, deslizamentos de terra, tornados, onda de calor entre outras (WU et al., 2017; MARENGO et al., 2020). Com a intensificação dos eventos extremos, as mudanças na frequência e intensidade das secas e inundações têm afetado o abastecimento de água e a produção de alimentos e, conseqüentemente, o acesso a água e alimentos.

Ainda de acordo com o IPCC (2021), o aumento da temperatura sobre os continentes entre 2011-2020 é de 1,59°C e 0,88°C sobre os oceanos. Muitas regiões terão aumento na probabilidade de vários eventos extremos simultâneos ou sequenciais com 2°C ou mais de aquecimento, afetando, por exemplo, regiões produtoras de alimentos. No Brasil, vários estudos que analisaram os efeitos das mudanças climáticas sobre as bacias brasileiras, no geral, apontaram que as regiões Norte e Nordeste são as mais susceptíveis à ocorrência de secas; as regiões Sudeste e Centro-Oeste são consideradas regiões mistas, podendo ocorrer secas e inundações; e a região Sul, associada à ocorrência de inundações (MARENGO et al., 2012; SILVA JUNIOR, 2015; RIBEIRO NETO et al., 2016; ANA; BACK, 2019; CORTEZ, 2020). Os eventos extremos estão cada vez mais frequentes, e, no Brasil, isso vem sendo evidenciado pelos eventos ocorridos nos últimos tempos, como as inundações na Bacia do Itajaí em 2008 (CEPED, 2013), deslizamentos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 (MARENGO et al., 2012), seca na região metropolitana de São Paulo (SANTOS et al., 2017; MARENGO et al., 2020; NOBRE, 2020), seca no Nordeste em 2016

(BRITO et al., 2021), assim como os eventos de 2020, quando vários municípios do estado do Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Bahia sofreram com inundações e deslizamentos provocados por chuvas intensas, que acarretaram em mortes e milhares de pessoas desalojadas (CORTEZ, 2020) e também em 2022, com consequentes inundações na região Sudeste do Brasil (MARENGO et al., 2022) e deslizamentos de terra em Petrópolis, RJ (ALCANTARA et al., 2023) e em Recife (MARENGO et al., 2023).

## 2.4 Modelos e cenários

Os MCGs são a principal ferramenta para analisar possíveis mudanças climáticas em diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa; no entanto, as dimensões das grades desses modelos são de cerca de 200 a 100 km, logo são consideradas grosseiras e podem não ser precisas o suficiente para inferir projeções confiáveis para estudos de impacto regional em escalas locais (WILBY R. L. DAWSONB; BARROWC, 2002; IPCC, 2014; DEB et al., 2014). Neste contexto, técnicas de downscaling dinâmicas foram desenvolvidas para obter Modelos Climáticos Regionais (MCRs), que aumentam a resolução do MCG para até 5–50 km (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b) e fornecem dados espaciais mais detalhados do que MCGs, portanto são uma ferramenta essencial para melhorar as análises do clima.

Os MCRs representam melhor as características locais, como topografia, bacias hidrográficas, heterogeneidade da superfície terrestre, linhas costeiras. Além disso, podem captar melhor a variabilidade climática regional interanual. Uma forma de analisar os impactos das mudanças climáticas é por meio da avaliação dos cenários de forçamento radiativo RCP.

Os RCPs são a representação dos GEE na atmosfera, adotados em 2014 no quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (2014), realizado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os cenários futuros representam os valores de forçamento

radiativo ( $\text{W.m}^2$ ) possíveis de ocorrer até 2100. No RCP 4,5, há um pico nas emissões globais de GEE em torno de 2080, e depois diminuirá até 2100. O RCP 8,5 considera que as emissões de GEE continuarão aumentando no século XXI. Em geral, estudos de mudanças climáticas consideram principalmente o RCP 4,5 e RCP 8,5 em suas projeções (NAM et al., 2015; CHATTOPADHYAY et al., 2017; LUCENA et al., 2018).

Adaptações no modelo ETA para gerar cenários de mudanças climáticas sobre o Brasil foram realizadas, inicialmente, por Pesquero et al. (2010), Chou et al. (2012) e Marengo et al. (2012). Em seguida, Chou et al. (2014a), Chou et al. (2014b) realizaram simulações multidecenais, na grade regular horizontal de 20 km x 20 km, a partir do aninhamento do ETA em três modelos climáticos globais do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Os dados dos modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 foram gerados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e disponibilizados na Plataforma PROJETA (20km x 20 km) para os cenários RCP 4,5 e RCP 8,5 (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b; LYRA et al., 2016). Os modelos climáticos mais recentes são caracterizados como modelos do sistema terrestre, por considerar todas as componentes do sistema climático (atmosfera, superfície, oceano e em alguns deles a criosfera, bem como incluem processos físicos, químicos e biológicos) que governam o clima global. Assim, a evolução dos modelos globais e do acoplamento das componentes do sistema climático, através da inclusão de novos processos, vem sendo incorporados nos modelos regionais. Esta abordagem tem sido utilizada em alguns estudos de impacto hidrológico, como o de Ribeiro Neto et al. (2016), Andrade et al. (2021) e Ploszai et al. (2022), entre outros. Ribeiro Neto et al. (2016) avaliaram processos hidrológicos e mudanças climáticas em regiões hidrográficas do Brasil utilizando dados de dois modelos climáticos globais, HadGEM2-ES e MIROC5, através do Modelo Regional ETA, com 20 km de resolução como entrada para o modelo hidrológico de grande escala MHD-INPE, em dois cenários RCP 4,5



e 8,5 e três períodos de tempo (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Eles verificaram que a disponibilidade de água diminuiu em quase todas as regiões do Brasil, com exceção para a região Sul. [Rodrigues et al. \(2019\)](#) analisaram os impactos das mudanças climáticas na vazão das bacias no Bioma cerrado brasileiro sob dois cenários, RCP 4,5 e 8,5, e os modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MIROC5 com downscaling pelo Modelo Regional ETA como entrada para o modelo hidrológico SWAT. Mostraram que as vazões diminuíram em todos os períodos futuros analisados (2011-2040, 2041-2099 e 2071-2099) e em ambos os RCPs, principalmente na estação seca. [Andrade et al. \(2021\)](#) avaliaram impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da Bacia do Rio Mundaú, no Brasil, usando o SWAT e os Modelos Climáticos (MCRs) ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2, para três períodos de tempo e nos dois cenários de RCPs 4,5 e 8,5. Encontraram como resultado que a precipitação e o escoamento superficial irão diminuir. [Ploszai et al. \(2022\)](#) analisaram os cenários de mudanças climáticas no Paraná, através de ndice de seca, e verificaram que as secas podem se tornar mais intensas no futuro, sendo que o cenário RCP 4,5 pode ser o pior cenário futuro, quando comparado ao cenário RCP 8,5.



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

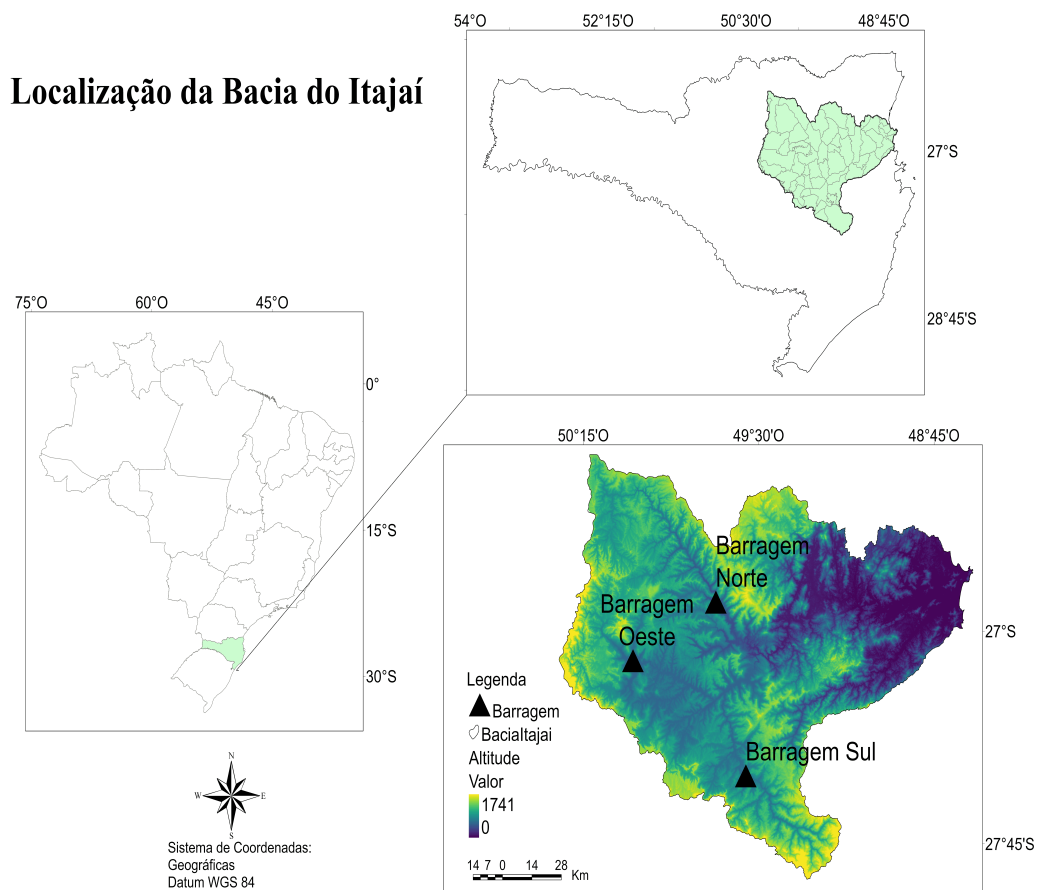
Neste Capítulo apresenta-se a área de estudo, a descrição dos dados utilizados, e a metodologia aplicada para análise dos dados observados e dos cenários futuros.

#### **3.1 Dados**

##### **3.1.1 Área de estudo**

A Bacia hidrográfica do rio Itajaí ocupa uma área de cerca de 15.000 km<sup>2</sup>, e está localizada entre as coordenadas geográficas 26°41'54" e 27°41'02" de latitude Sul e 48°39'39" e 50°07'07" de longitude Oeste (Figura 3.1). Atualmente, vivem na região da bacia pouco mais de um milhão de habitantes, distribuídos em 49 municípios (47 com sede dentro da bacia), onde aproximadamente 70% destes municípios têm áreas construídas nas proximidades do curso principal do rio Itajaí-Açu e nos seus afluentes.

Figura 3.1 - Localização da Bacia hidrográfica do Itajaí e de suas Barragens para mitigação das inundações.



O relevo da Bacia do Itajaí indica uma grande diversidade e complexidade geomorfológica suscetível à dinâmica dos processos erosivos e da fragilidade ambiental, apresentando uma grande depressão (em azul escuro na Figura 3.1) em sua porção nordeste. Esse fator geomorfológico é determinante para a ocorrência de inundações nessa região, uma vez que água se acumula nessa grande “piscina natural”, não tendo para onde a água escoar nem infiltrar devido ou à saturação do solo ou à impermeabilização do solo ou ao mal-uso proveniente das atividades agropecuárias nessa região (MARCUSO et al., 2011). O clima na Bacia do Itajaí é caracterizado por uma temperatura média anual entre 19 e 21°C, por um verão quente e úmido

e um inverno ameno. As precipitações são bem distribuídas ao longo do ano, com uma média de 120 a 180 dias com eventos de chuvas, bem como apresenta uma condição favorável à ocorrência de intensas precipitações, concentradas principalmente na primavera e no verão, por estar subordinado à condição climática quente e úmida, sendo que as menores precipitações ocorrem nos meses de maio, junho e julho (AUMOND et al., 2009; COMITÊ DO ITAJAÍ, 2010). O regime hidrológico do rio Itajaí-Açu é altamente variável, com registros históricos de vazão, no posto de Blumenau, variando de  $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  até mais de  $5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , e vazão média diária de  $282 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (SCHETTINI, 2002).

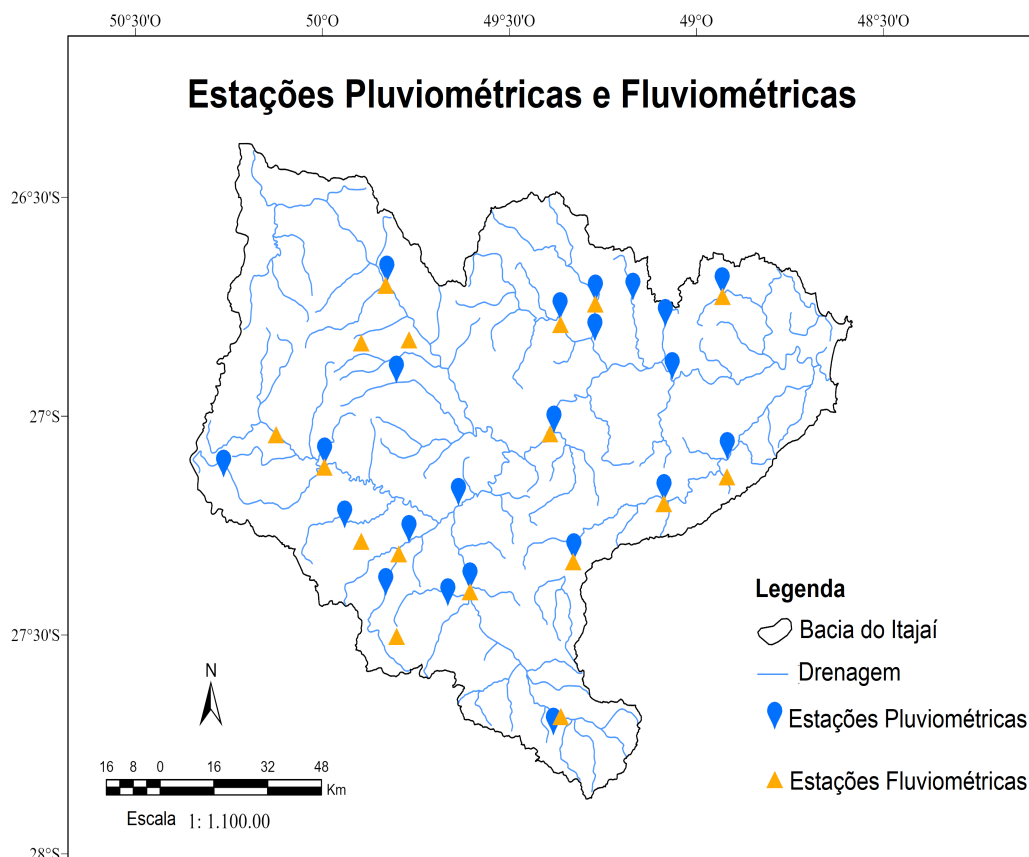
Visando solucionar os efeitos das inundações, considerou-se que obras de engenharia (barragens em diversos afluentes do rio) seriam a solução para o problema, uma vez que a água seria retida em reservatórios, evitando a inundação dos locais com cotas mais baixas ou das suas margens. Ao todo foram construídas três barragens (Figura 3.1); em 1973 foi concluída a Barragem de Taió (Barragem Oeste), com capacidade de armazenamento de  $83 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; em 1975 foi finalizada a Barragem de Ituporanga (Barragem Sul), com capacidade de  $93,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; e em 1992 foi concluída a Barragem de José Boiteux (Barragem Norte), com capacidade de  $357 \times 10^6 \text{ m}^3$ , sob a responsabilidade do Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS). As barragens de Ituporanga e Taió tiveram ampliação, concluída em 2016, com aumento de 20% no volume total e também na capacidade de escoamento pelos vertedouros.

### 3.1.2 Dados observados

Os conjuntos de dados diários de precipitação e de vazão usados neste estudo abrangem o período de 1989 a 2020, os quais correspondem a 32 anos em 22 estações de monitoramento de precipitação (Figura 3.2 e Tabela 3.1) e 17 estações de vazão (Figura 3.2 e Tabela 3.2) na Bacia do Itajaí-Açu. Os dados foram obtidos junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas e

Saneamento Básico (ANA).

Figura 3.2 - Localização das estações de precipitação e de vazão na Bacia do Itajaí, de acordo com a base de dados da ANA.



As séries foram extraídas e avaliadas quanto às falhas e, como se pode observar nas Tabelas 3.1 e 3.2, elas foram inferiores a 10% em todas as estações, sendo a estação pluviométrica Luiz Alves a que apresentou maiores falhas, 9,9%, enquanto a estação fluviométrica com maior percentual de falha foi a estação Salseiro (9,9%). O preenchimento das falhas foi realizado considerando-se o método de regressão linear, tendo sido adotado, como critério mínimo, a obtenção de coeficiente de determinação superior a 0,7, conforme sugerido por Pruski et al. (2004) e Barbosa et al. (2005).

Tabela 3.1 - Localizações e respectivas altitudes das 22 estações pluviométricas utilizadas neste estudo, e a porcentagem de dados faltantes para cada estação.

Nome	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Código ANA	Dados Faltantes (%)
Agrolândia	49,831	-27,411	850	2749041	0,78
Apiúna Régua Nova	-50,148	-27,038	93	2749000	Completo
Arrozeira	-49,271	-26,741	80	2649008	Completo
Barra do Prata	-49,828	-26,697	450	2649058	5,21
Benedito Novo	-49,365	-26,781	90	2649003	7,29
Blumenau PCD	-49,065	-26,918	12	2649007	4,17
Botuvera Montante	-49,0872	-27,196	-	2749045	Completo
Brusque PCD	-50,148	-27,101	21	2748000	Completo
Cabeceira Ribeirão Caetano	-50,264	-27,141	8	2548000	Completo
Itoupava Central	-49,084	-26,797	65	2649010	Completo
Ituporanga	-49,606	-27,399	370	2749002	4,95
Lomba alta	-49,383	-27,730	550	2749007	3,91
Luiz Alves	-48,932	-26,724	90	2648002	9,90
Neisse Central	-49,381	-27,040	200	2749016	1,30
Pomerode	-49,170	-26,737	46	2649002	0,83
Pouso Redondo	-49,941	-27,257	353	2749006	1,04
Rio do Sul Novo	-49,638	-27,206	350	2749039	3,43
Salseiro	-49,328	-27,332	-	2749046	4,17
Taió	-49,994	-27,113	360	2749003	1,30
Timbó Novo	-49,272	-26,823	70	2649004	Completo
Trombudo Central	-49,769	-27,290	350	2749013	0,83
Witmarsum	-49,802	-26,926	410	2649053	5,21

Tabela 3.2 - Informações das 17 estações fluviométricas utilizados no presente trabalho, e a porcentagem de dados faltantes de casa estação.

Código ANA	Nome	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Dados Faltantes (%)
83500000	Apiúna Régua Nova	-50,701	-27,934	93	9070	8,90
83675000	Arrozeira	-49,271	-26,741	74	536	Completo
83029900	Barragem Taió Montante	-50,569	-27,415	398	648	4,17
83345000	Barra do Prata	-49,831	-26,698	450	1430	5,21
83660000	Benedito Novo	-49,364	-26,788	90	717	3,43
83800002	Blumenau PCD	-49,272	-26,83	12	1600	3,43
83892998	Botuvera Montante	-49,351	-28,015	79	827	5,21
83900000	Brusque PCD	-48,919	-27,136	21	1240	1,30
83840000	Gaspar (Montante Eta)	-49,802	-27,501	12	12141	3,43
83440000	Ibirama	-49,519	-27,284	151	3330	Completo
83250000	Ituporanga	-49,948	-28,299	370	1650	4,95
83880000	Luiz Alves	-48,931	-26,724	90	104	3,91
83892990	Salseiro	-49,835	-28,653	286	-	9,90
83105000	Saltinho	-50,136	-27,717	454	434	1,30
83050000	Taió	-50,701	-27,934	360	1570	0,83
83680000	Timbó Novo	-49,769	-26,823	70	1560	1,04
83069900	Vila Nova	-49,796	-27,312	-	397	Completo



## 3.2 Projeções climáticas

### 3.2.1 Modelo climático regional ETA

O modelo ETA é um modelo atmosférico de área limitada que foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994) e utilizado operacionalmente no NCEP (BLACK, 1994). Desde 1997 é utilizado no CPTEC para previsão de tempo (CHOU, 1996). Tal modelo vem sendo utilizado desde 2002 para simulações climáticas sazonais, apresentando bons resultados (CHOU et al., 2005). Uma versão do modelo foi desenvolvida para estudos de mudanças climáticas (PESQUERO et al., 2010; CHOU et al., 2012; MARENGO et al., 2012) e, em 2010 seus resultados fizeram parte da segunda comunicação nacional do Brasil (MCT, 2010). Projeções climáticas regionais obtidas com esta versão fazem parte dos estudos incorporados nas Segunda e Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCT, 2010; MCTI, 2016). Neste trabalho, foi utilizada a versão desenvolvida para a terceira comunicação nacional (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b), cujos dados estão disponíveis no CPTEC na página do PROJETA.

Na Figura 3.3a é apresentada a grade de pontos utilizada pelo modelo ETA, de modo a cobrir toda a Bacia do Itajaí e considerando os pontos mais próximos das estações dos dados observacionais (Figura 3.3b). Na Tabela 3.3 são mostrados os 19 pontos e a localização de cada um deles dentro da Bacia do Itajaí que foram utilizados nas projeções futuras. Em cada ponto foram utilizados dados de precipitação e de escoamento superficial.

Figura 3.3 - a) Localização dos pontos de grade de 20km x 20km do Modelo ETA na Bacia do Itajaí e b) Localização dos pontos do modelo ETA e das estações da ANA utilizados no estudo.

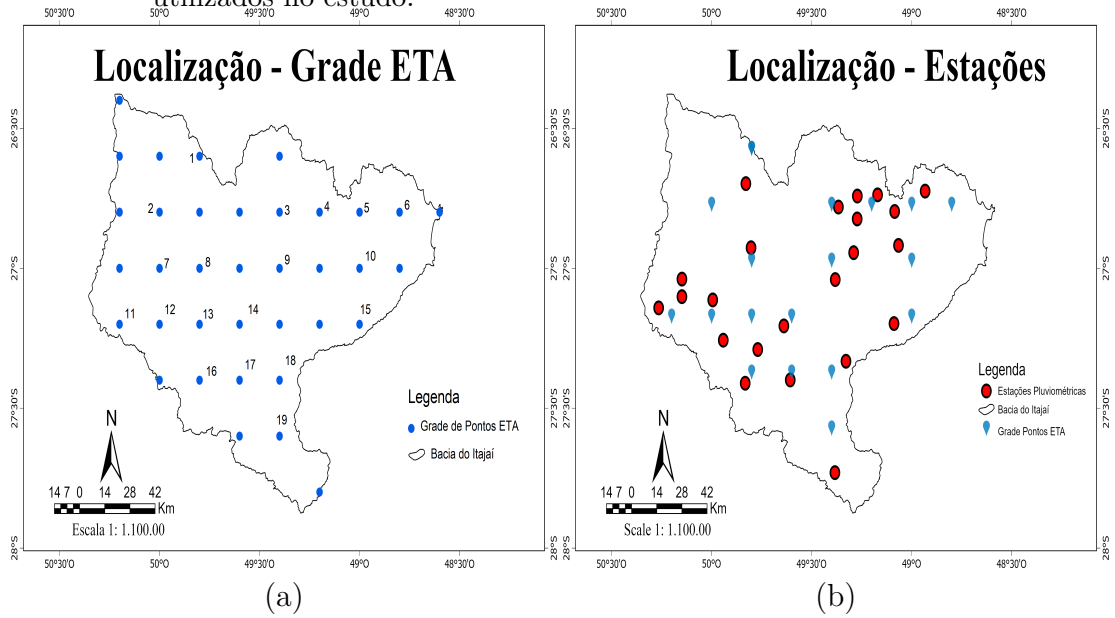


Tabela 3.3 - Localização da grade de pontos do ETA na bacia Itajaí.

Ponto	Longitude (°)	Latitude (°)
1	-49,9996	-26,5995223
2	-49,9996	-26,7995218
3	-49,5996	-26,7995206
4	-49,3996	-26,79952
5	-49,1996	-26,7995194
6	-48,7996	-26,7995182
7	-49,9996	-26,9995214
8	-49,5996	-26,9995202
9	-49,3996	-26,9995195
10	-49,1996	-26,9995189
11	-48,7996	-26,9995177
12	-50,1996	-27,1995216
13	-49,9996	-27,199521
14	-49,7996	-27,1995203
15	-49,3996	-27,1995191
16	-49,1996	-27,1995185
17	-49,9996	-27,3995205
18	-49,7996	-27,3995199
19	-49,5996	-27,3995193

### 3.2.2 Modelos climáticos HADGEM2-ES e MIROC5

O modelo global HadGEM2-ES foi utilizado pelo *Met Office Hadley Centre* nas simulações do CMIP5 (STOCKER, 2014), que utiliza dados históricos de 1960 a 2005 e projeções através dos chamados RCPs (MOSS R. H. EDMONDS et al., 2010).

O MIROC5 (WATANABE et al., 2010), por sua vez, foi desenvolvido em conjunto pelo *National Institute of Environmental Studies (NIES)*, *Center for Climate System Research (CCSR)* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)*, sendo essa versão utilizada no AR5 do IPCC (STOCKER, 2014).

Como os modelos MIROC5 e HadGE2-ES são GCMs, ou seja, abrangem escala

global, o INPE passou a acoplar estes ao modelo climático regional ou regional climate model (RCM) ETA em seus estudos, uma vez que, para o estudo de projeções climáticas e mudanças climáticas, os modelos regionais são a melhor opção na avaliação de áreas menores (CHOU et al., 2014a), sendo então designados por ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5.

As projeções obtidas do ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 possuem resolução de 20 km na direção horizontal e 38 camadas na direção vertical, para América do Sul e Central (SANTOS et al., 2018). A escolha do modelo ETA, utilizando os modelos MIROC5 e HadGEM2-ES como condição de contorno, deve-se ao fato de que esse modelo regional foi calibrado para a realidade brasileira pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), visando contribuir com as integrações de longo prazo na América Central e do Sul, e os resultados têm sido amplamente aplicados para os impactos das mudanças climáticas e estudos de vulnerabilidade (PESQUERO et al., 2010; CHOU et al., 2012; MARENGO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2017) e (SANTOS et al., 2018). Estudos de Chou et al. (2014a) e Lyra et al. (2016) avaliaram os resultados de regionalizações do modelo ETA-INPE utilizando dados do modelo HadGEM2-ES como condições de contorno na América Latina e no Sudeste Brasileiro, concluindo que, no geral, os padrões espaciais, ciclos anuais e a distribuição de frequências de temperatura e de precipitação foram bem representados.

Para verificar a qualidade dos dados utilizados foi realizado a correlação dos dados observados e dos dados simulados de precipitação, no período de 2006 - 2020, do ETA/HadGEM2-ES e do ETA/MIROC5, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.4. Nota-se que o ETA/HadGEM2-ES apresentou uma melhor correlação com os dados observados, com valores de  $r^2$  acima de 0,60, sendo que em alguns pontos esses valores foram superiores a 0,7, o que é considerado uma boa correlação conforme sugerido por Pruski et al. (2004) e Barbosa et al. (2005).

Apesar de uma melhor correlação apresentada pelo ETA/HadGEM2-ES, optou-se também por utilizar o ETA/MIROC5, para verificar os erros e a diferença observada com a modelagem dos dois modelos utilizados para a região.

Tabela 3.4 - Correlação dos dados observados e dos dados dos pontos da grade do ETA para a precipitação no período de 2006-2020.

Nome	Longitude (°)	Latitude (°)	Correlação		Localização Grade ETA
			Hadgem	Miroc	
Agrolândia	-49,8310	-27,4114	0,6028	0,319	19
Apiúna Régua Nova	-49,3919	-27,0375	0,6251	0,3059	21
Arroeira	-49,2706	-26,7408	0,1985	0,4809	3
Barra do Prata	-49,8281	-26,6975	0,7258	0,3358	1
Benedito Novo	-49,3650	-26,7811	0,6376	0,1451	2
Blumenau PCD	-49,0653	-26,9181	0,6362	0,228	9
Botuvera Montante	-49,0872	-27,1967	0,6946	0,3704	15
Brusque PCD	-48,9181	-27,1008	0,5226	0,2045	11
Cabeceira Ribeirão Caetano	-50,2644	-27,1411	0,5541	0,5137	13
Itoupava Central	-49,0836	-26,7967	0,5817	0,1661	5
Ituporanga	-49,6058	-27,3986	0,4315	0,349	20
Lomba Alta	-49,3828	-27,7306	0,532	0,245	22
Luiz Alves	-48,9317	-26,7242	0,6102	0,372	6
Neisse Central	-49,3814	-27,0403	0,635	0,27	10
Pomerode	-49,1703	-26,7367	0,4563	0,3901	4
Pouso Redondo	-49,9408	-27,2572	0,7173	0,143	16
Rio do Sul Novo	-49,6367	-27,2056	0,652	0,3892	14
Salseiro	-49,3282	-27,3319	0,431	0,243	18
Taió	-49,9944	-27,1131	0,29	0,456	12
Timbó Novo	-49,2719	-26,8297	0,5178	0,345	7
Trombudo Central	-49,7689	-27,2903	0,489	0,2891	17
Witmarsum	-49,8025	-26,9261	0,1252	0,6365	8

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Teste de tendência

As análises de tendências através de testes estatísticos não paramétricos vêm sendo realizadas em diversos estudos visando identificar eventuais tendências monotônicas em séries hidrometeorológicas. Nestes estudos, o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) é o mais amplamente utilizado para verificação da existência ou não de tendências nas séries históricas (GUEDES et al., 2019). Este teste, que considera a hipótese de estabilidade de uma série temporal cuja sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples), foi sugerido pela OMM para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais (SANTOS et al., 2017). Consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial, sendo contado o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado.

A estatística de teste Mann-Kendall  $S$  é calculada usando a equação:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3.1)$$

onde  $x_j$  são os dados estimados da sequência de valores,  $n$  é o comprimento da série temporal e o sinal  $(x_j - x_k)$  é igual a -1 para  $(x_j - x_k) < 0$ , 0 para  $(x_j - x_k) = 0$ , e 1 para  $(x_j - x_k) > 0$ .

Kendall e Stuart (1967) e Mann (1945) afirmaram que quando  $N \geq 8$ , a distribuição de  $S$  se aproxima da forma gaussiana, com média  $E(S) = 0$  e variância  $V(S)$  dada por:

$$V(S) = \frac{N(N-1)(2N+5) - \sum_{m=1}^{SS} t_i(m-1)(2m+5)m}{18} \quad (3.2)$$

A estatística  $S$  é então padronizada (MK), e sua significância é estimada a partir da função de distribuição cumulativa normal.

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} \quad \text{se } S > 0 \quad (3.3)$$

$$Z = 0 \quad \text{se } S = 0 \quad (3.4)$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} \quad \text{se } S < 0 \quad (3.5)$$

Conforme ressaltado por Ahmad et al. (2015), um valor positivo de  $S$  na Equação 3.1 indica tendência positiva, na qual os dados crescem com o tempo; um valor negativo de  $S$  indica uma tendência negativa. Sabendo-se que  $S$  normalmente distribuído tem média zero e variância dada pela Equação 3.2, pode-se verificar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero. Se  $S$  é significativamente diferente de zero, a hipótese nula ( $H_o$ ) pode ser rejeitada para certo nível de significância, apontando para a existência de tendência (hipótese alternativa  $H_1$  é aceita).

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada através do valor de  $Z_{calc}$  das Equações 3.3, 3.4 e 3.5; esta estatística é usada para testar a hipótese nula de que nenhuma tendência existe. O valor positivo de  $Z_{calc}$  indica tendência crescente. Para testar qualquer tendência constante, crescente ou decrescente para um determinado nível de significância  $p < 0,05$ , a hipótese nula é rejeitada se o valor absoluto de  $Z_{calc}$  é maior que  $Z_{tab}$ , obtido na Tabela de distribuição normal (SANTOS et al., 2010). A planilha Trend Statistics da MAKESENS usando o Microsoft Excel 97 foi utilizada para o cálculo da tendência e mostra os resultados para os quatro níveis de significância testados, os seguintes símbolos são usados no modelo:

\*\*\* se tendência em  $\alpha = 0,001$  nível de significância

\*\* se tendência em  $\alpha = 0,01$  nível de significância

\* se tendência em  $\alpha = 0,05$  nível de significância

+ se tendência em  $\alpha = 0,1$  nível de significância

Depois de calculados os valores de  $Z$ , os mesmos foram espacializados sobre a área da bacia, utilizando-se o método de Interpolação de Pontos pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW) do software ArcgisPro, para melhor subsidiar as análises dos resultados sobre a bacia.

### 3.3.2 Estimador de declive de Sen

Apesar da eficiência do teste de Mann-Kendall, ele não fornece a magnitude das tendências detectadas, podendo ser complementado pelo estimador de declive proposto por Sen (1968), o qual, tal como descrito por Portela et al. (2011) e Tao et al. (2014), é estimado através da estatística  $Q$ , dada pela Equação 3.6:



$$Q_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad \text{com } i < j \quad (3.6)$$

onde  $X_i$  e  $X_j$  representam os valores da variável em estudo nos anos  $i$  e  $j$ . Valor positivo ou negativo para  $Q$  indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente. Os valores na série analisada são representados por  $n$ , então o número de pares estimados de  $Q$  é dado por  $N = \frac{n(n-1)}{2}$ . O estimador de declive de Sen é a mediana dos  $N$  valores de  $Q_{ij}$ .

### 3.3.3 Standardized Precipitation Index – SPI

O SPI é amplamente utilizado em estudos com foco em monitoramento de secas e excesso hídrico (MCKEE et al., 1993). Trata-se de um dos índices mais utilizados, sendo recomendado pela OMM (WMO, *World Meteorological Organization*) para o monitoramento de secas meteorológicas (SANTOS et al., 2017), o qual caracteriza-se por incluir apenas dados de precipitação em seu cálculo (MISHRA; SINGH, 2010). O SPI foi introduzido por Mckee et al. (1993), que definiram precipitação padronizada como a diferença entre o valor de precipitação e a média histórica, dividida pelo desvio padrão. Para sua estimativa utiliza-se, para o período e local de interesse, uma série temporal mensal longa de precipitação, preferencialmente de, pelo menos, 30 anos de dados (MCKEE et al., 1993) e que foi ajustada utilizando-se a distribuição Gamma.

Conceitualmente, o SPI é simplesmente a variável reduzida  $Z_i$  da distribuição normal da precipitação:

$$SPI = Z_i \left( \sigma_i \frac{Q_i - Q}{P} \right) \quad (3.7)$$

onde  $i$  é a escala de tempo (3, 6, 12 meses e assim sucessivamente);  $Q_i$  a precipitação observada;  $Q$  e  $\sigma_i$ , são respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada.

Após o cálculo dos índices de seca, foi utilizada uma classificação geral padronizada baseada na classificação de Mckee et al. (1993). Porém, essa classificação contempla apenas a seca; logo, a (OMM, 2012) complementou essa classificação abordando também os períodos úmidos, o que pode ser útil em alguns estudos específicos, conforme as categorias apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classificação do SPI, SSFI e SRI.

Classificação	Valores de SPI, SSFI e SRI
Extremamente Úmido	$I \geq 2,0$
Severamente Úmido	$1,5 \leq I < 2,0$
Moderadamente Úmido	$1,0 \leq I < 1,5$
Quase Normal	$-1,0 < I < 1,0$
Moderadamente Seco	$-1,5 < I \leq -1,0$
Severamente Seco	$-2,0 < I \leq -1,5$
Extremamente Seco	$I \leq -2,0$

Fonte: Adaptada de Mckee et al. (1993).

A versatilidade deste índice está na simplicidade do seu cálculo; além disso, ele identifica eventos secos e chuvosos em diferentes escalas de tempo (3, 6, 12 meses, etc.), o que permite monitorar a dinâmica temporal desses eventos, isto é, o desenvolvimento e declínio. Por se tratar de um índice padronizado, a classificação das categorias associadas às secas/chuvas pode ser utilizada em qualquer região do planeta (SANTOS et al., 2017).

### 3.3.4 Standardized Streamflow Index – SSFI e Standardized Runoff Index – SRI

O SSFI (MODARRES, 2007) e o SRI (SHUKLA; WOOD, 2008) foram desenvolvidos com o objetivo de determinar a seca hidrológica de forma simples e prática. A determinação do SSFI e SRI são feitos considerando-se o mesmo procedimento de cálculo do SPI, com os dados de vazão e escoamento superficial, respectivamente, utilizados no lugar dos dados de precipitação. O SSFI foi utilizado para os dados observados e o SRI para as projeções climáticas.

Detalhes sobre o cálculo de SPI utilizado como base para o cálculo do SSFI e SRI, considerando-se apenas a substituição da variável precipitação pela vazão e escoamento superficial, respectivamente, pode ser encontrado em vários trabalhos, incluindo-se entre eles os de Hosseini-Moghari e Araghinejad (2015) e Santos et al. (2018). A classificação dos valores do SSFI e SRI é a mesma adotada para o SPI (Tabela 3.5). Neste estudo foi estimado o índice nas escalas de tempo 6, 12, 18 e 24 meses para os dados observados e 6, 12 e 24 para os dados projetados. A escala de tempo 6 meses mostra as variações sazonais, 12 meses é relevante para o monitoramento do ano hidrológico, enquanto, as escalas de 18 e 24 meses refletem os padrões hidrológicos de longo prazo, sendo utilizados para monitorar a variabilidade interanual.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

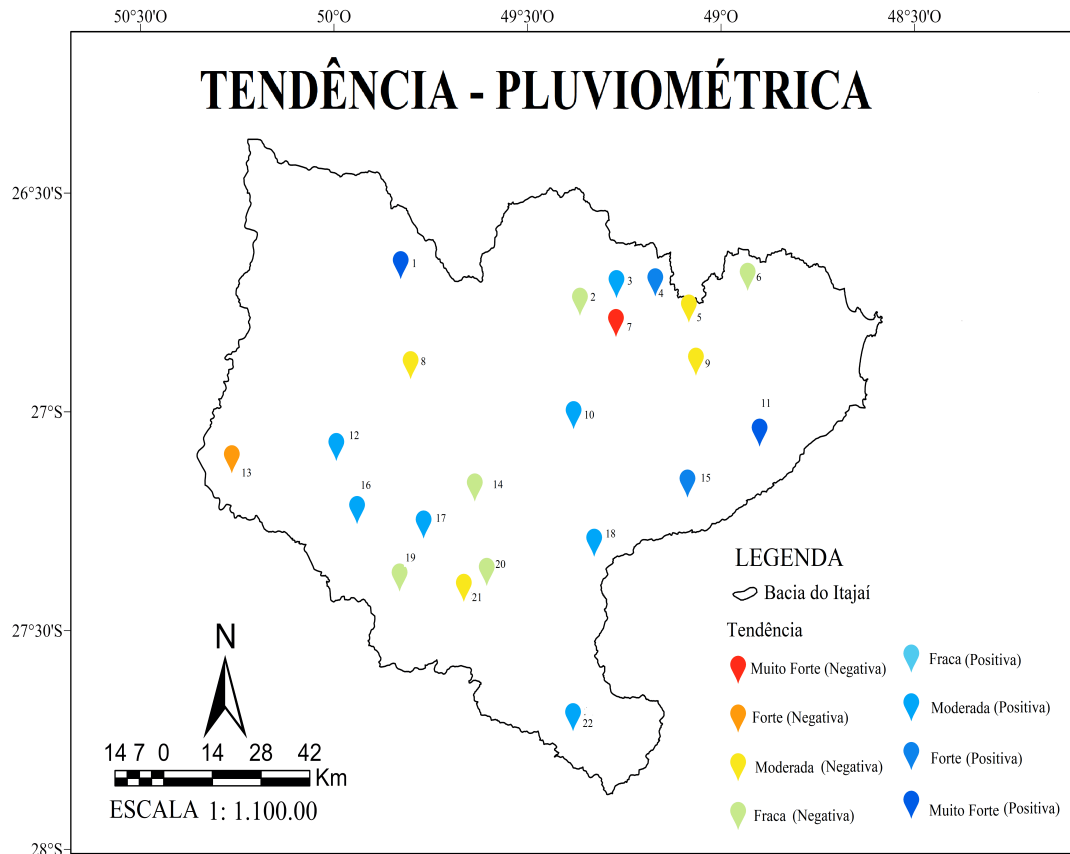
### 4.1 Cenário observado

#### 4.1.1 Teste de tendência

Neste estudo o teste de Mann Kendall foi aplicado para cada uma das séries temporais dos dados de precipitação das 22 estações. A Figura 4.1 apresenta o mapa das estações, onde os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores, das quais aproximadamente 50% apresentaram tendência significativa crescente, ou seja, de aumento na precipitação, enquanto 50% apontaram para tendência significativa decrescente (diminuição da precipitação), ou seja, o valor de  $p < 0,05$  (Tabela 4.1).

Das estações que apresentaram tendência de aumento da precipitação, uma apresentou tendência positiva muito forte (valor de  $Z$  acima de 2) ao nível de significância  $p < 0,001$  três apresentaram tendência crescente moderada (valores de  $Z$  entre 1 e 1,5) ao nível de significância de  $p < 0,05$  e as outras cinco estações a tendência de aumento das chuvas foram fracas (valores de  $Z$  entre 0 e 1) ao nível de significância de 0,05. Analisando as estações que mostraram diminuição da precipitação, uma estação apresentou tendência negativa muito forte (Valor de  $Z$  menor que -2) ao nível de significância de 0,01, uma com tendência forte (valor de  $Z$  entre -1,5 e -2) ao nível de significância de 0,01, em quatro estações a tendência de diminuição das chuvas foi moderada (valores de  $Z$  entre -1 e -1,5), e cinco estações apresentaram tendência fraca (valores de  $Z$  entre -1 e 0) ao nível de significância de  $p < 0,05$ .

Figura 4.1 - Mapa das estações do teste de Tendência para cada uma das séries temporais dos dados de precipitação das 22 estações, os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores associadas com as estações pluviométricas da Bacia do Vale do Itajaí, identificados com numeração (de 1 a 22) para localizar as estações na área de estudo.



Nota-se que, embora todas as estações apresentaram tendência significativa, os sinais delas não apontaram para uma tendência positiva ou negativa. No total, 50% mostram um sinal de tendência negativa e 50% tendência positiva, ou seja, não houve um sinal que indicasse evidência de aumento ou diminuição da precipitação na Bacia do Itajaí; e não foi possível determinar se existe uma localização dentro da bacia onde os valores de tendência indicassem um aumento ou diminuição significativa da precipitação, pois os valores calculados de  $Z$  e a significância do teste de tendência

apresentam-se bastante dispersos e heterogêneos pela bacia.

Tabela 4.1 - Resultados do teste de Mann-Kendall para as séries de precipitação acumulada.

Nome	Ponto	Teste $Z$	Tendência	Significância
Agrolândia	19	-0.76	Fraca	*
Apiúna Régua Nova	21	-1.25	Moderada	*
Arrozeira	3	0.28	Fraca	*
Barra do Prata	1	1.64	Moderada	*
Benedito Novo	2	-0.6	Fraca	*
Blumenau PCD	9	-1.15	Moderada	*
Botuvera Montante	15	1.12	Moderada	*
Brusque PCD	11	3.88	Muito Forte	***
Cabeceira Ribeirão Caetano	13	-1.8	Forte	**
Itoupava Central	5	-1.17	Moderada	*
Ituporanga	20	-0.16	Fraca	*
Lomba Alta	22	0.66	Fraca	*
Luiz Alves	6	-0.96	Fraca	*
Neisse Central	10	0.18	Fraca	*
Pomerode	4	1.23	Moderada	*
Pouso Redondo	16	0.5	Fraca	*
Rio do Sul Novo	14	-0.99	Fraca	*
Salseiro	18	0.02	Fraca	*
Taió	12	0.63	Fraca	*
Timbó Novo	7	-2.09	Muito Forte	**
Trombudo Central	17	0.21	Fraca	*
Witmarsum	8	-1.07	Moderada	*

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

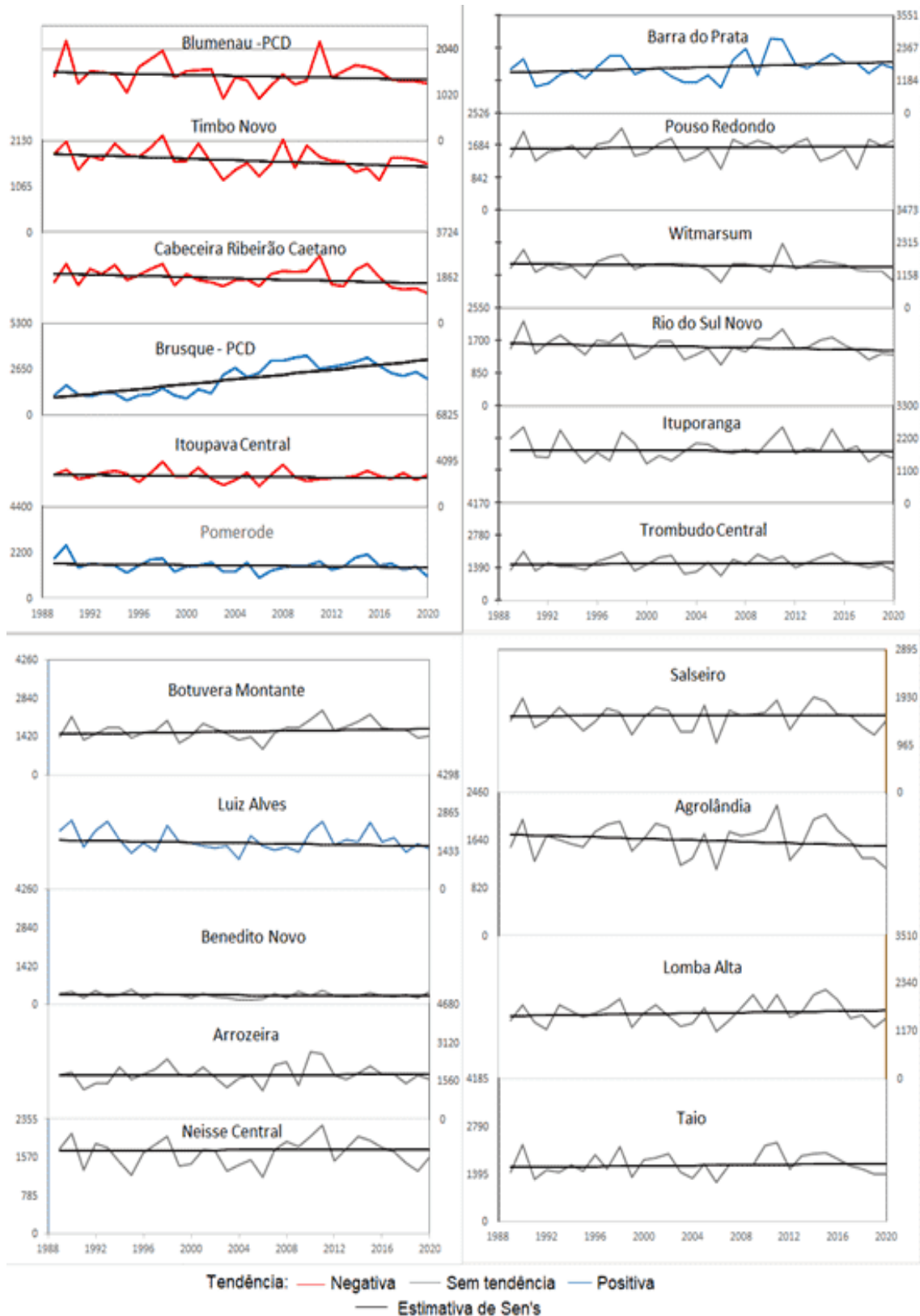
\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Observa-se que os resultados encontrados não indicaram tendência positiva ou negativa de precipitação na Bacia do Itajaí, o que pode ser comprovado pelas retas de

inclinação do teste de Sen's mostrados na Figura 4.2, com a maioria das estações não apresentando inclinação positiva ou negativa das retas estimadas. Verifica-se que nas 3 estações que mostraram valores de tendência muito forte, as retas também mostraram essa inclinação, como na estação de Brusque – PCD, mostrando uma inclinação crescente (positiva) bem acentuada da reta de Sen's, e nas estações de Cabeceira Ribeirão Caetano e Timbó-Novo, que mostram uma inclinação decrescente (negativa). Apesar, das estações apontarem para uma estabilidade de eventos secos e úmidos na Bacia do Itajaí, isso aponta para uma alternância dos eventos extremos na Bacia, houve períodos de umidade extremas, mas também nos últimos anos veem ocorrendo as secas, o que pode ter contribuído para que as chuvas no período estudado apontassem para uma estabilidade na região. O que demonstra que eventos de inundações e secas estão se alternado na bacia.



Figura 4.2 - Teste de tendência de Mann-Kendall para os dados de Precipitação das 22 estações da ANA.



Com relação aos dados de vazão, observa-se na Figura 4.3, o teste de Mann Kendall foi aplicado para cada uma das séries temporais das 17 estações de vazão, e a Figura 4.3 apresenta o mapa das estações, onde os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores, 70% das estações apresentaram tendência significativa de diminuição das vazões e 30% apresentaram tendência crescente significativa de aumento das vazões. Das estações que apresentaram tendência decrescente, nove apontaram para uma tendência fraca de diminuição das chuvas (valores de  $Z$  de 0 a 1) ao nível de significância de  $p < 0,05$ , três estações apresentaram tendência moderada (valores de  $Z$  de 1 a 1,5) ao nível de significância de  $p < 0,05$ . Já, as estações que mostraram tendência crescente de aumento das vazões, 1 apontou para uma tendência fraca ao nível de significância de  $p < 0,05$ , duas estações mostraram tendência moderada ao nível de significância de  $p < 0,05$  e duas estações apresentaram tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,001$ .

Figura 4.3 - Mapa das estações do teste de tendência para cada uma das séries temporais dos dados de vazão das 17 estações, os resultados dos testes estão dispostos por uma graduação de cores associadas com as estações fluviométricas da Bacia do Vale do Itajaí, identificados com numeração (de 1 a 17) para localizar as estações na área de estudo.

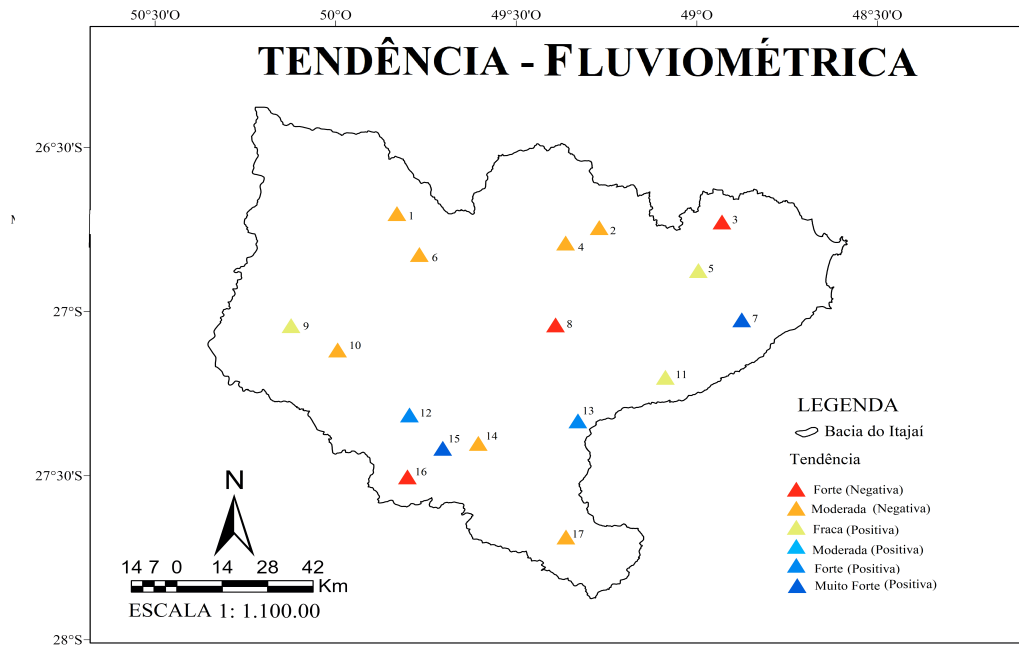


Tabela 4.2 - Resultados do teste de Mann-Kendall para as séries de vazão máxima anual.

Estação	Ponto	Teste Z	Tendência	Significância
Apiuna	16	3.08	Muito Forte	***
Arrozeira	2	-0.92	Fraca	*
Baragem Taio Montante	9	-0.06	Fraca	*
Barra do Prata	1	-0.37	Fraca	*
Benedito Novo	4	-0.21	Fraca	*
Blumenau-PCD	5	-0.1	Fraca	*
Botuvera Montante	11	0.03	Fraca	*
Brusque_PCD	7	2.84	Muito Forte	***
Gaspar	15	-1.09	Moderada	*
Ibirama	8	-1.07	Moderada	*
Ituporanga	14	-0.28	Fraca	*
Luiz Alves	3	-1.14	Moderada	*
Salseiro	13	1.15	Moderada	*
Saltinho	17	-0.81	Fraca	*
Táio	10	-0.44	Fraca	*
Timbo Novo	6	-0.71	Fraca	*
Vila Nova	12	1.01	Moderada	*

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

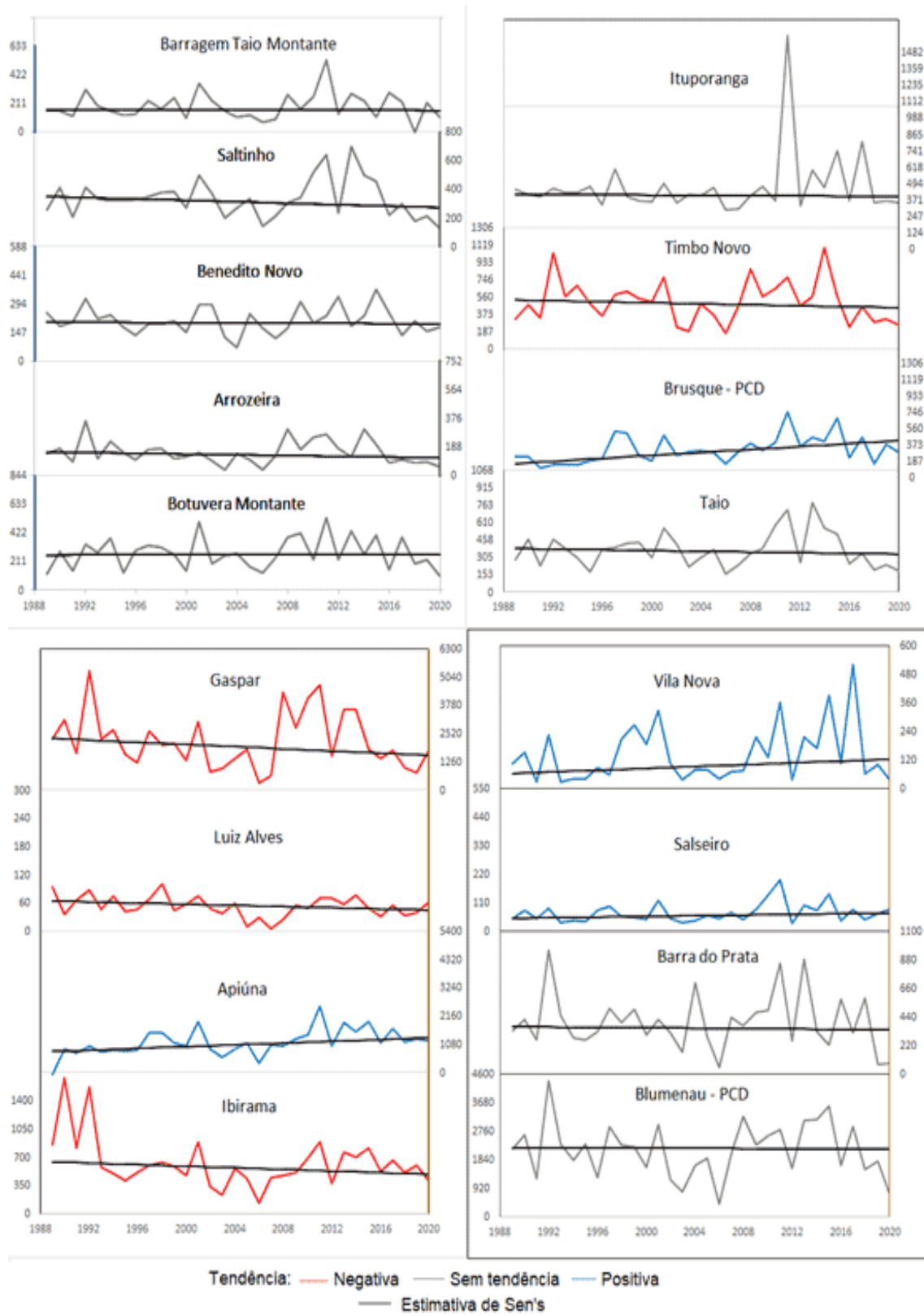
\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Constatou-se que o teste de MK indicou um aumento muito forte para a vazão em algumas estações como, Apiúna, Brusque-PCD e Salseiro, com as retas mostrando inclinações crescentes muito acentuadas (Figura 4.4). Observa-se ainda que os dados mostram picos de vazão com valores bem altos, como, por exemplo, nas estações de Apiúna e Blumenau no ano de 2008, quando houve pico de vazão e ocorreram inundações por toda a Bacia do Itajaí, assim como em Ituporanga no ano de 2011, quando ocorreu uma inundação na bacia e vários municípios decretaram situação de emergência (CEPED, 2013). Apesar do teste de tendência para a precipitação não ter mostrado um aumento ou diminuição das chuvas, nas vazões algumas estações apresentaram tendência muito forte de aumento e isto, pode ser devido aos períodos de inundação que causaram vários prejuízos na região, portanto, apesar da bacia

significância não indicar um aumento ou diminuição das chuvas no período analisado, as inundações foram mais recorrentes e impactaram mais a região. Podendo ser explicado por suas características físicas e geológicas, como a topografia acidentada, e ocupação desordenada, tornando-a suscetível a desastres naturais, principalmente inundações, em conformidade com o destacado em [Siebert \(2009\)](#).

Assim como os dados de precipitação, os dados de vazão também apontaram para uma diminuição da vazão a partir do ano de 2019 (Figura 4.4), quando o déficit de chuvas ocasionou a redução dos níveis dos rios que abastecem a região do vale do Itajaí, gerando escassez hídrica e prejudicando o abastecimento de água dos municípios da região ([EPAGRI, 2020](#)), levando os valores do teste de tendência para baixo e indicando diminuição das vazões neste período.

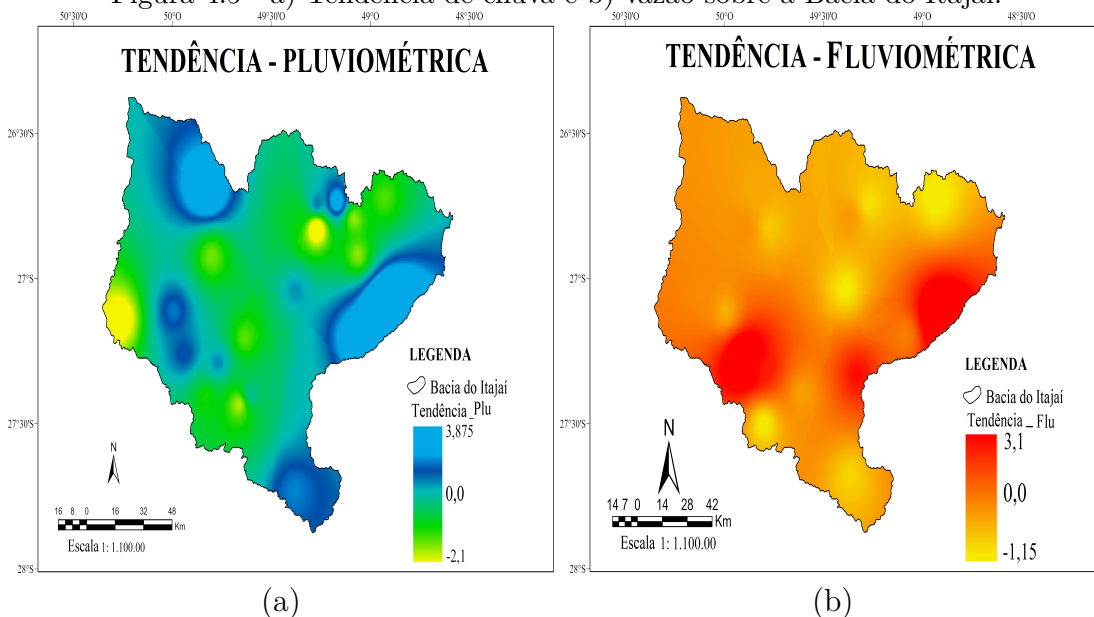
Figura 4.4 - Teste de tendência de Mann Kendall para Vazão.



Nas Figuras 4.5a e 4.5b são apresentados os dados considerando-se a interpolação do teste de tendência de MK na Bacia do Itajaí, para a precipitação e a vazão, respectivamente. Nota-se que a maior parte da bacia apresenta uma tendência moderada tanto da precipitação quanto para a vazão. Observa-se que na parte leste da bacia houve uma forte tendência da precipitação e isto se refletiu no aumento da vazão, assim como numa pequena parte a oeste da bacia. Já nas partes sul e norte da Bacia do Itajaí, a precipitação apresenta uma tendência forte e muito forte, respectivamente, o que não é mostrado na vazão.

A bacia do Vale do Itajaí tem um histórico de inundações extremas (CEPED, 2013), como corroborado na Figura 4.4 na qual observam-se picos de vazão que extrapolaram os valores considerados normais. Vários estudos vêm indicando que as vazões dos rios devem aumentar na região Sul do Brasil (RIBEIRO NETO et al., 2016; LIRA; CARDOSO, 2018), o que pode levar a maior frequência de inundações. Os resultados mostraram que esse cenário não foi tão claro no presente, pois, nos anos de 2019 e 2020, quando a região sofreu com uma estiagem muito extrema, houve uma mudança na tendência de aumento na precipitação, e está ficou mais constante. Quanto à vazão, nota-se que os valores de tendência, quando considerados significantes, foram de tendência muito forte, enquanto os valores de tendência de diminuição da vazão foram moderados, apontando para o aumento na frequência dos extremos de vazão e conseqüentemente de inundações, o que têm sido recorrentes no Vale do Itajaí nos últimos anos, conforme destacado por Forster (2019) e Saito et al. (2019). Porém, houve muitos valores de tendência indicando para uma diminuição da vazão, que pode ser um indicativo da ocorrência cada vez mais de extremos contrastantes: inundações e secas. A mudança no sinal de tendência da precipitação e da vazão pode estar relacionada às mudanças climáticas locais, que, de acordo com AR6 (IPCC, 2021), pode levar ao aumento dos extremos, com alternância de inundações e secas mais prolongadas em várias regiões do planeta.

Figura 4.5 - a) Tendência de chuva e b) vazão sobre a Bacia do Itajaí.



#### 4.1.2 Índices hidroclimáticos

Para verificar como a bacia se comportou em termos dos eventos extremos no período de 1989 a 2020, foram estimados os índices SPI e SSFI, para subsidiar a análise da variabilidade climática da região.

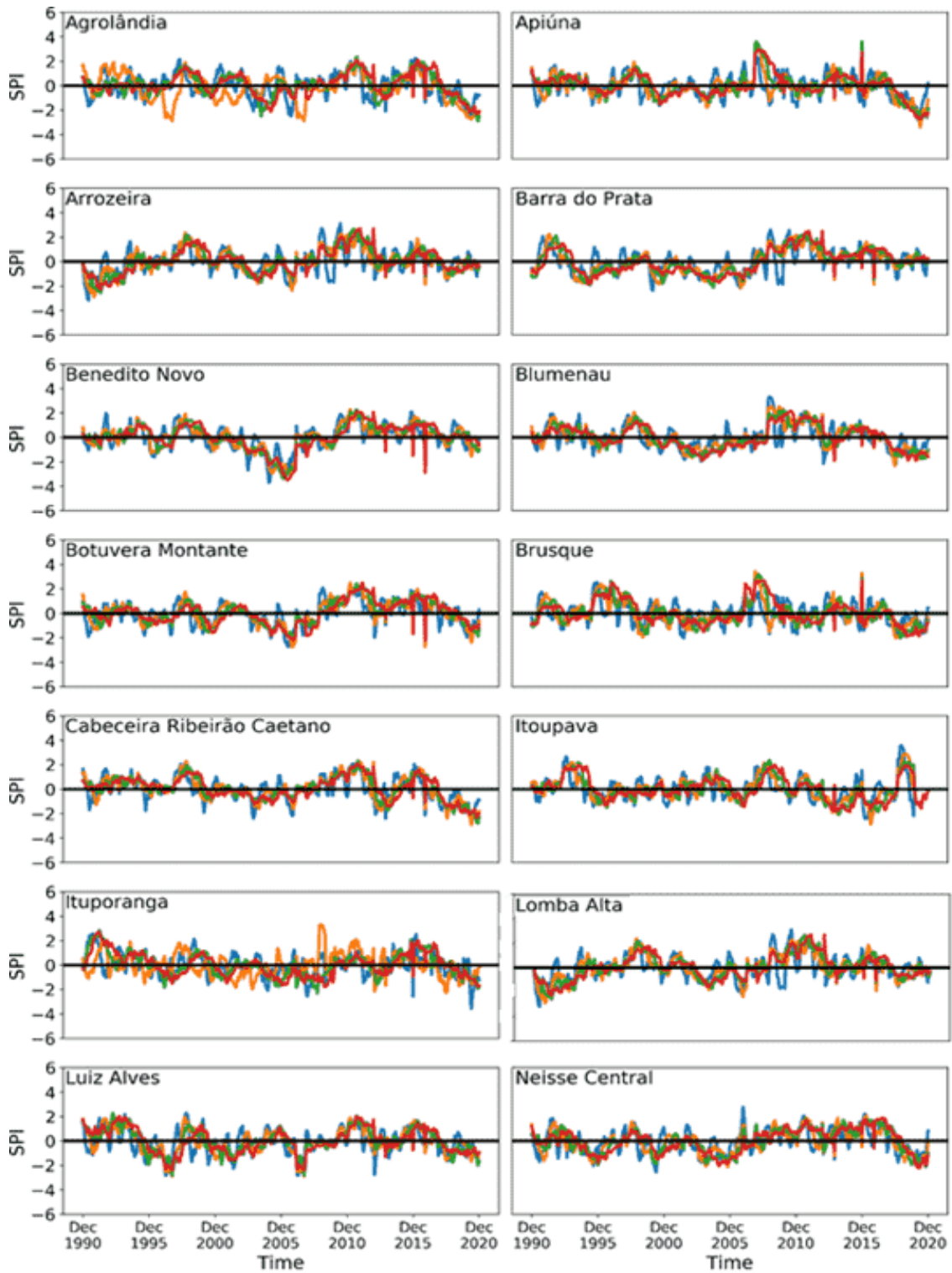
Na Figura 4.6 apresentam-se as séries temporais de SPI, nas escalas de 6, 12, 18 e 24 meses para as 22 estações de precipitação analisadas neste trabalho. Observa-se que a Bacia do Itajaí apresenta oscilações climáticas, alternando períodos secos com a ocorrência de eventos de precipitação intensa, que culminaram em inundações, em conformidade com o destacado por [Gotado et al. \(2018\)](#). Verifica-se que o SPI mostra um déficit de chuva nos anos de 2005 e 2006, com a maioria das estações apontando para seca nestes anos, como por exemplo em Benedito Novo, com valores de SPI inferiores a -2, assim como em Botuvera-Montante, Cabeceira Ribeirão Caetano, entre outras. Os anos de 2005 e 2006 apresentaram um dos maiores registros de



calamidade pública e/ou de emergência decorrentes da estiagem no estado de Santa Catarina, registrando 294 e 189 decretos, respectivamente (HERRMANN, 2014). Esses períodos de estiagem provocaram danos socioeconômicos, principalmente para a população rural, devido à perda de produtividade agropecuária, como a produção de grãos de milho, soja e feijão, além de provocar redução na distribuição de água para a zona urbana e consumo de água imprópria, o que causa problemas na saúde pública (SPINELLI et al., 2018).

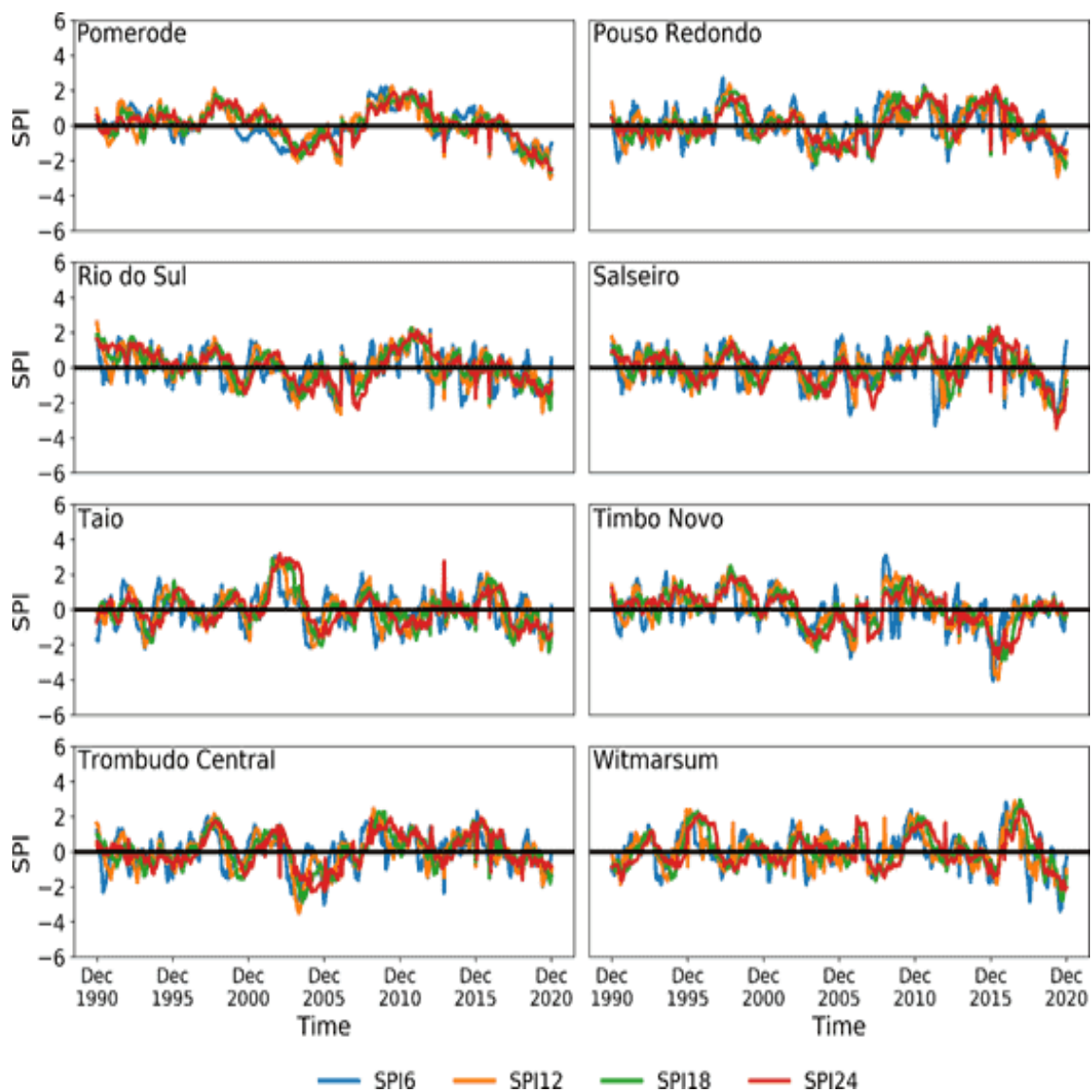
Nota-se que com o SPI, nas escalas de tempo avaliadas (3, 12, 18 e 24 meses), foi possível identificar os eventos de seca, sendo que à medida que a escala de tempo do SPI aumenta, a frequência de eventos secos diminui. A escala de tempo de 6 meses subsidia uma análise de curto prazo, cujos efeitos estão relacionados com a umidade do solo e tem representatividade na seca agrícola, e o período de transição da estação seca para a chuvosa. Já os valores de SPI nas escalas de 12, 18 e 24 meses subsidiam a análise da seca de longo prazo, e permite monitorar a variabilidade anual e interanual, podendo ser relacionada com os efeitos na disponibilidade de água superficial e subterrânea (GUTTMAN, 1999; SANTOS et al., 2017).

Figura 4.6 - Série temporal do SPI-6, SPI-12, SPI-18 e SPI-24, para as 22 estações de precipitação da Bacia do Itajaí. Série calculada para o período de 1989 a 2020.



(Continua)

Figura 4.6 - Conclusão.



Analisou-se também a seca hidrológica por meio do SSFI nas escalas de tempo de 6, 12, 18 e 24 meses (Figura 4.7). A seca hidrológica não está ligada somente aos processos climáticos, mas principalmente aos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, por exemplo, à capacidade de armazenamento de água dos aquíferos, escoamentos para os rios, vazão e tempo de resposta da bacia, e a falta de água dos rios ou reservatórios, que visam o abastecimento urbano e a irrigação, entre outros, podendo causar colapso nestes sistemas caso venha a ocorrer (LOON, 2015). Na Figura 4.7, nota-se que o SSFI seguiu um padrão similar ao SPI, ou seja, nos anos de 2005 e 2006 observa-se que ocorreu uma seca extrema na Bacia do Itajaí, como mostra as estações de Benedito Novo, Botuvera Montante, Ituporanga, cujos valores de SSFI foram inferiores a -3, nas escalas de tempo de 12 e 18, mostrando uma condição de seca hidrológica extrema. De acordo com Loon e Laaha (2015), a resposta da bacia à falta de precipitação, muitas vezes é atrasada ou suavizada devido à resposta do lençol freático, através da descarga das águas subterrâneas (escoamento base) liberando água para os rios e lagos. Sendo assim, à medida que a escala aumenta o nível do lençol freático começará a diminuir abaixo do normal, e assim, a seca hidrológica começará a se estabelecer, à medida que a chuva volta a ocorrer a seca hidrológica desaparece.

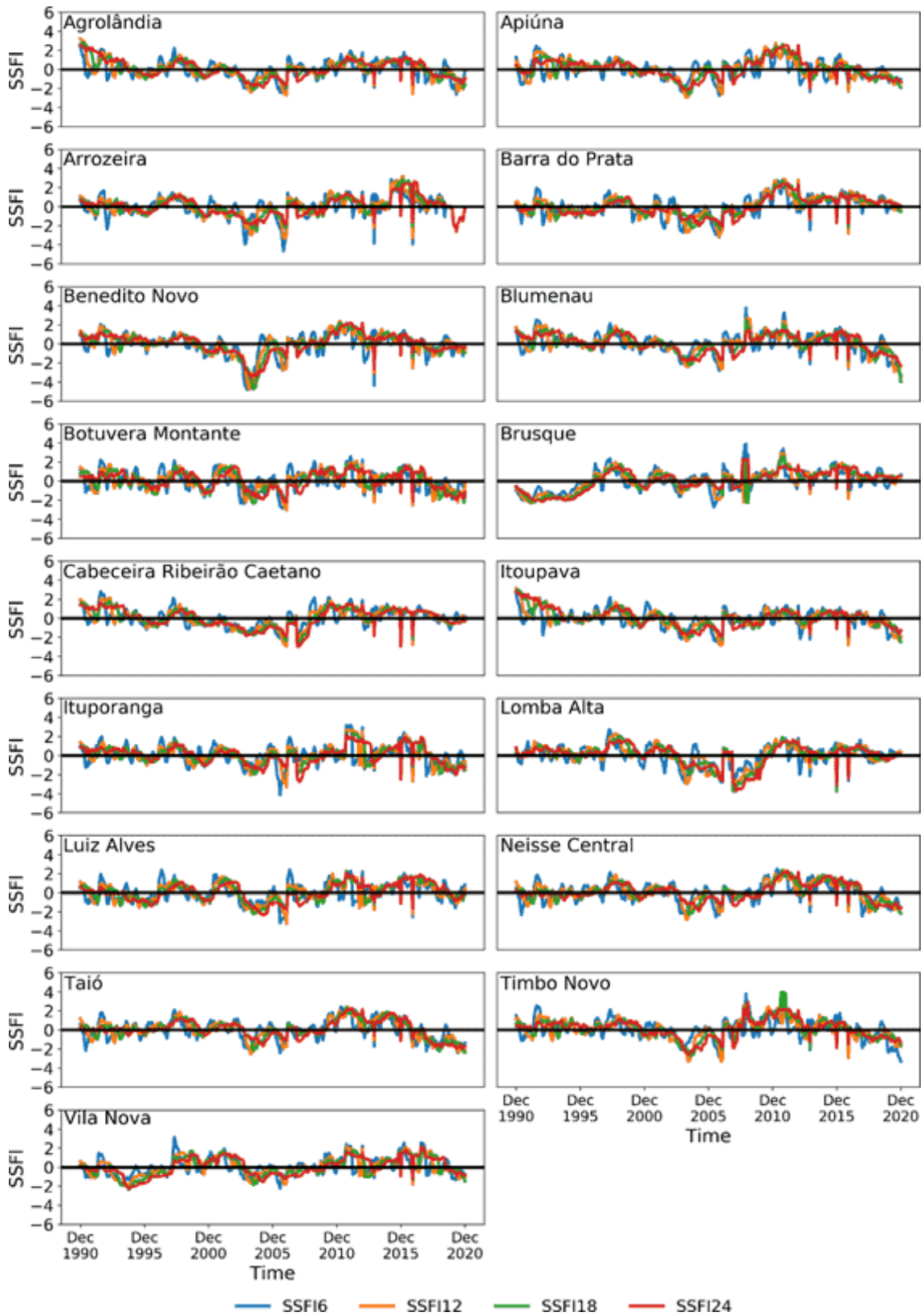
Nota-se que a partir do ano de 2019, a seca atingiu a região com uma queda bem acentuada nos valores do SSFI, como se nota nas estações de Blumenau – PCD, Ibirama, Saltinho, Taió, cujos valores foram inferiores a -2, assim como foi mostrado pelo SPI, quando algumas estações chegaram a valores de SPI inferiores a -3, como Ituporanga, Apiúna, Agrolândia, Timbó-Novo, ou seja, registrou-se uma seca extrema, que se estendeu de 2019 a 2020. De acordo com relatório técnico da EPAGRI (2020), de junho de 2019 a abril de 2020 a chuva acumulada em Santa Catarina ficou em torno de 500 mm, valor este abaixo ao da média histórica, e na Bacia do Vale do Itajaí, os níveis dos principais rios que abastecem a região ficaram abaixo do normal, bem como em alguns municípios a população foi afetada pela falta d'água

(EPAGRI, 2020; MIRANDA JUNIOR et al., 2020).

Constatou-se que os valores de SPI e do SSFI em todas as escalas (6, 12, 18, 24 meses) seguiram um mesmo padrão, quando a bacia foi impactada por déficit de chuva, isto se refletiu na vazão, a qual apresentou valores de SSFI menores que -2. Neste caso houve uma resposta direta da chuva na vazão, representando o que acontece no processo do ciclo hidrológico, ou seja, quando a chuva inicia tem-se como resposta a vazão dos rios, o que se observa na Bacia do Itajaí. A seca hidrológica está diretamente relacionada ao escoamento superficial e subterrâneo, e as escalas de tempo de longo prazo (12, 18 e 24 meses) conseguem refletir melhor tais efeitos, tendo mostrado a persistência da seca para essas escalas de tempo.

Assim como a seca, tanto os dados de SPI quanto de SSFI também permitem subsidiar a análise dos períodos úmidos e, com isso, as épocas em que se registraram inundações na bacia. O SSFI permite avaliar se os períodos com chuvas acima da média se refletiram em vazões acima do normal, capazes de causar inundações. No período analisado de 1989 a 2020 podem-se destacar dois eventos de inundações mais marcantes para a região, isto é, em 2008 e em 2011, as quais causaram perdas materiais e humanas significativas em toda a bacia. No município de Blumenau, no mês de novembro de 2008 a chuva acumulada foi de 1002 mm, superando o recorde anterior obtido pela estação de monitoramento que até então era de 578,8 mm em novembro de 1989. Em Indaial choveu 598,1 mm, também quebrando o recorde que era de 313,1 mm em novembro de 1997. Em Blumenau, o nível do rio chegou a um pico máximo de 11,29 m entre o final da noite do dia 23 e a madrugada do dia 24 de novembro. Em Brusque, o pico máximo foi de 8,88 m na madrugada do dia 24, e em Timbó o nível chegou a 8,44 m também na madrugada do dia 24 de novembro (ANA, 2020), classificados como estado de emergência, ou seja, com consequentes inundações.

Figura 4.7 - Série temporal do SSFI-6, SSFI-12, SSFI-18 e SSFI-24, para as 17 estações de vazão da Bacia do Itajaí. Série calculada para o período de vazão de 1989 a 2018.



O SPI indicou aumento da precipitação a partir do mês de outubro de 2008, com picos de excesso de chuva em novembro e valores acima de 2, como se observa, principalmente, nas estações de Brusque e Blumenau (Figura 4.6). Esse excesso de chuva refletiu no aumento dos níveis dos rios como mostra o SSFI, cujos valores foram superiores a 3 nas estações de Brusque, Timbó, e principalmente em Blumenau (Figura 4.7), que foi uma das cidades mais afetadas pela inundação. A inundação de 2008 foi uma das maiores da história do estado de Santa Catarina, especialmente na Bacia do Vale do Itajaí, culminando em 116 mortes e mais de 500 mil pessoas afetadas. As perdas econômicas e sociais foram de aproximadamente R\$ 1,5 bilhão e R\$ 72 milhões, respectivamente, no estado de Santa Catarina e na região do Vale do Itajaí (ALVES, 2013).

Outro evento de inundação ocorreu no ano de 2011, associado a um período de muito excesso de precipitação, conforme mostrado pelos valores do SPI de 1,8 e o pico de vazão ocorreu no mês de setembro, demonstrado pelos altos valores do SSFI, superiores a 2, na maioria das estações da Bacia do Itajaí. Nota-se que a partir do mês de agosto os valores de SPI (Figura 4.6) aumentam, com pico em setembro, o que também pode ser visto pelo SSFI (Figura 4.7), como nas estações de Blumenau, Brusque, Timbó, Taió entre outras, sendo que a chuva foi uniforme em toda a região da Bacia e com média de 250 mm (ALVES, 2013). Em relação aos níveis dos rios, em Blumenau chegou ao pico de 12,48 m, em Brusque em 9,97 m e em Taió chegou a 11,23 m, todos considerados em estado de emergência, o que corrobora que ocorreram inundações. As inundações foram registradas em vários municípios do Vale do Itajaí e também culminaram em prejuízos materiais e humanos, com mais de 200 mil pessoas desalojadas e 10 mil desabrigados, e 5 mortes. As perdas materiais (residências danificadas e destruídas) chegaram a mais R\$ 200 milhões (ALVES, 2013). O elevado número de ocorrências de inundações no Vale do Itajaí pode ser explicado por suas características físicas e geológicas, como a topografia acidentada, precipitações intensas e duradouras e ocupação desordenada, tornando-a suscetível

a desastres naturais, conforme destacado por Siebert (2009).

Como destacado o Vale do Itajaí é uma região de grande importância para o estado de Santa Catarina devido ao seu PIB (SEVERO et al., 2019). Até o último censo oficial (IBGE, 2010), o contingente populacional do Vale do Itajaí era de 1.407.279 habitantes, com um aumento populacional em relação ao Censo de 2000 da ordem de 27%, sendo que o crescimento médio do Estado foi de 17% entre 2000 e 2010 (IBGE, 2021). Ainda de acordo com IBGE (2021), a população estimada na região do Vale em 2021 era de 1.530.110 habitantes, ou seja, a população continua em crescimento e esse aumento implica em maior demanda de água para consumo urbano, para a indústria (que terá que produzir mais, para atender a uma maior demanda) e, também, para a irrigação (produção de grãos e alimentos); portanto, toda a cadeia produtiva e de abastecimento urbano demandará mais água. Dentro deste contexto, a ocorrência de extremos de inundações e secas, impacta em todo o processo de produção e abastecimento, uma vez que em decorrência das secas há falta d'água, o que compromete todo o sistema, como observado nas secas de 2005 e 2006, e na seca de 2020 (CEPED, 2013; EPAGRI, 2020; MIRANDA JUNIOR et al., 2020). Em complemento, quando ocorrem as inundações esse sistema também é prejudicado, pois as águas ficam impróprias para o consumo, além das perdas na infraestrutura, mortes, desabrigados e desalojados.

A variabilidade climática da região Sul do Brasil, onde está inserida a Bacia do Itajaí, e a alternância de períodos úmidos e secos podem ser explicadas, segundo (GRIMM et al., 1998), pelas fases extremas do El Niño – Oscilação Sul (ENOS), El Niño e La Niña, os quais provocam significativas alterações nos totais de precipitação mensais e sazonais no Sul do Brasil. O El Niño traz precipitações mais abundantes, principalmente na primavera, enquanto La Niña ocasiona períodos mais secos, prolongados, com destaque para a primavera também. Apesar dessa relação, os anos em que foram verificadas secas mais extremas, como nos anos de 2005 a 2006, e em



2019, foram caracterizados pelo NOAA Climate Prediction Center (NOAA/CPC) como de ocorrências de evento El Niño, porém, de El Niño fraco (KAYANO; ANDREOLI, 2006) e (GRIMM et al., 2020). Já o ano de 2020 foi considerado ano de La Niña <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>.

Além disso, os eventos de inundações de 2008 e de 2011 que ocorreram na Bacia do Vale do Itajaí aconteceram numa configuração de La Niña fraca (NOAA/CPC), e não de El Niño como era o esperado. Embora haja impacto consistente com episódio de El Niño sobre eventos extremos de inundação no sul do Brasil, nem toda ocorrência desses fenômenos apresentam os mesmos padrões atmosféricos e, portanto, não tem o mesmo resultado sobre a frequência de inundações, o que pode estar relacionado a outros modos de variabilidade climática (PSCHEIDT; GRIMM, 2009). Porém, como esses eventos ocorreram em anos de La Niña, que no sul do Brasil estão associados a eventos extremos de seca, outros fenômenos atmosféricos ocorreram e contribuíram para que acontecessem as inundações, sendo que, em 2008 a circulação marítima e um vórtice ciclônico em médios níveis da atmosfera foram os responsáveis pela inundação, e, já em 2011, os sistemas que atuaram foram uma frente fria estacionária no litoral e um sistema de baixa pressão à superfície (ALVES, 2013).

Portanto, considerando que na Bacia do Itajaí os eventos extremos que causaram secas e inundações e impactaram a região não estão associados aos episódios do ENOS, para uma melhor gestão dos recursos hídricos, os gestores devem considerar que os eventos extremos que ocorrem na Bacia do Itajaí não têm um mecanismo climático que indique que esses eventos irão ocorrer, pois isso depende do estudo dos possíveis efeitos das combinações de oscilações climáticas (GRIMM et al., 2020).

Uma das explicações para a ocorrência dos extremos são as mudanças climáticas que já estão ocorrendo (IPCC, 2021), as quais, devido às ações antropogênicas, estão tornando esses eventos extremos cada vez mais frequentes e intensos. Por exemplo, o desmatamento da floresta Amazônica pode alterar o clima regional e a consequente

quantidade de umidade que vem da Amazônia para o Sul do Brasil, intensificando os eventos de seca nesta região, conforme destacado por [Grimm et al. \(2020\)](#).

#### 4.1.2.1 Análise da severidade

O SPI apresentou uma maior de recorrência de de seca extrema (valores menores que -2) do que o SSFI, que também é corroborado pela análise de severidade e intensidade. A maioria das secas severas e/ou extremas ocorreram a partir do ano de 2010. Nas estações (Agrolândia, Apiúna, Blumenau, Brusque, Cabeceira Ribeirão Caetano, Itoupava, Ituporanga, Pomerode, Pouso redondo, Salseiro e Timbó Novo) as intensidades máximas dos eventos de seca severa ocorreram entre os anos de 2016 a 2020, de acordo com o índice SPI. Esses resultados são corroborados por [Cunha et al. \(2019\)](#) que relataram secas meteorológicas que ocorreram em todas as regiões brasileiras nas últimas décadas (até 2019), com intensidades variadas e ([FERNANDES et al., 2021](#)) que mostraram secas nos anos de 2018 e 2020 na região Sul do Brasil. Para todos os índices, as escalas de 48 meses apresentaram maior severidade da seca em todas as estações. Esse padrão é esperado, uma vez que escalas de tempo mais longas acumulam o efeito do déficit hídrico ao longo do tempo ([CUARTAS et al., 2022](#)), e os picos de severidade variaram entre as bacias. Nota – se, de acordo com o SPI na Tabela 4.3, que as bacias de Benedito Novo e Trombudo Central enfrentaram os índices mais severos na escala de 12. Na escala de 24 meses, as bacias Barra do Prata -63,8 e Benedito Novo -81,37 foram as que enfrentaram as secas mais severas. Para o SFFI (Tabela 4.4), as bacias de Benedito Novo e Brusque -74,3 e -75,67, respectivamente, enfrentaram as secas mais severas, nas escalas de 12 meses. Na escala de 24 meses, a bacia que enfrentou a seca mais severa foi Brusque -85,5.

Tabela 4.3 - Severidade máxima dos eventos de precipitação de acordo com o SPI nas escalas de 12 e 24 meses, para os eventos secos e úmidos.

Nome	Escala		Escala	
	12	24	12	24
Agrolândia	-40.1	-61.3	50.1	55.3
Apiúna - Régua Nova	-32.9	-62.4	37.9	60.2
Arrozeira	-45.6	-57.1	48.8	48.9
Barra do Prata	-47.2	-63.8	30.2	49.2
Benedito Novo	-60.3	-81.37	51.2	59.2
Blumenau - PCD	-37.2	-59.1	39.8	63.6
Botuvera-Montante	-34.9	-51.1	39.2	54.7
Brusque - PCD	-43.8	-60.9	50.5	61.9
Cabeceira Ribeirão Caetano	-32.4	-55.2	41.4	44.6
Itoupava Central	-42.12	-49.7	48.6	49.2
Ituporanga	-38.4	-53.9	50.2	72.7
Lomba Alta	-39.1	-62.8	47.9	62.4
Luiz Alves	-44.7	-56.2	53.8	56.1
Neisse Central	-39.5	-59.9	42.4	49.9
Pomerode	-33.9	-58.1	39.7	55.6
Pouso Redondo	-34.2	-61.4	43.2	61.3
Rio do Sul - Novo	-46.2	-50.4	33.8	54.3
Salseiro	-35.1	-44.3	42.4	58.2
Taió	-45.6	-47.9	41.1	56.4
Timbó Novo	-34.6	-51.3	34.5	62.4
Trombudo Central	-48.4	-50.2	48.7	59.4
Witmarsum	-42.5	-54.9	30.5	57.5

Para eventos úmidos o SSFI detectou as intensidades de eventos severos maiores em comparação com o SPI. As estações (Brusque, Blumenau, Pouso Redondo, Pomerode, Vila Nova) foram as que apresentaram as maiores intensidades máximas dos eventos extremamente úmidos, e ocorreram nos anos de 2008 e 2011. Os picos de severidade, assim como para os índices de seca, variaram entre as bacias. De acordo com o SPI (Tabela 4.3), as bacias de Brusque e Ituporanga enfrentaram os índices mais severos na escala de 12. Na escala de 24 meses, as bacias Blumenau 63,6 e Luis Alves foram as que enfrentaram as secas mais severas. Para o SFFI (Tabela 4.4), as bacias de Ituporanga e Timbó Novo, enfrentaram as secas mais severas, nas escalas

de 12 meses. Na escala de 24 meses, a bacia que enfrentaram as secas mais severa foram nas estações de Brusque, Vila Nova 63, 8 e Blumenau 61,34.

Tabela 4.4 - Severidade máxima dos eventos de vazão de acordo com o SSFI nas escalas de 12 e 24 meses, para os eventos secos e úmidos.

Nome	Escala		Escala	
	12	24	12	24
Apiuna	-69.3	-77.3	58.4	59.4
Arrozeira	-74.2	-83.4	56.2	60.1
Baragem Taio Montante	-57.9	-66.4	57.4	59.9
Barra do Prata	-45.9	83.4	49.8	61.1
Benedito Novo	-74.3	-75.3	35.6	60.4
Blumenau-PCD	-33.9	-82.9	39.5	61.34
Botuvera Montante	-61.7	-64.8	46.7	54.8
Brusque_PCD	-75.37	-85.5	57.8	72.4
Gaspar	-65.9	-67.3	56.2	56.3
Ibirama	-70.3	-75.8	45.1	57.6
Ituporanga	-59.3	-64.3	64.1	59.3
Luiz Alves	-56.1	-59.9	56.9	60.3
Salseiro	-67.8	-83.6	45.8	61.2
Saltinho	49.2	-80.7	62.4	49.9
Táio	70.5	72.2	60.7	61.3
Timbo Novo	58.5	78.7	65.3	56.5
Vila Nova	38.6	-84.3	54.2	63.8

### 4.1.3 Cenários de mudanças climáticas

#### 4.1.3.1 Tendência

Na Tabela 4.5 são mostrados os valores do teste de tendência de precipitação de MK, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 4.5 para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Observa-se que, no período de 2011 – 2040, 18 dos 19 pontos analisados apresentaram tendência crescente significativa e apenas 1 ponto tendência decrescente significativa. Dos pontos que mostraram tendência crescente, 6 apresentaram tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,05$ , 4 apresentaram

tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,001$  e 8 mostraram tendência muito forte de aumento da precipitação ao nível de significância de  $p < 0,001$ . E, o ponto que mostrou tendência decrescente, esta foi fraca ao nível de significância de  $p < 0,05$ . Isso mostra que até período fim do período estudado, ou seja, até o ano de 2040, o modelo Eta/HadGEM2-ES 4.5, indica um aumento da precipitação na Bacia do Vale do Itajaí, e isto pode ser indicativo que ocorra muitas inundações na região até o ano de 2040.

Analisando o período de 2041-2070, todos os pontos indicam uma tendência muito forte de diminuição da precipitação na Bacia do Itajaí, com todos os valores de  $Z$  abaixo de - 2,00. Nota-se que 11 dos pontos mostraram tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,01$  e 8 pontos a significância foi ao nível de  $p < 0,001$ . Sendo assim, este período indica a possibilidade desta região sofrer com déficit de chuvas, o que conseqüentemente, pode levar a ocorrência de secas.

Nota-se ainda, que no fim do século, 2071-2099, o sinal da tendência se mantém o mesmo do período de 2041-2079, porém, um pouco mais fraco, com valores de  $Z$  entre -1,5 a -2,0, apontando para uma tendência forte de diminuição das chuvas, sendo que 5 pontos mostram uma tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,05$  e 3 pontos indicam uma tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,01$ . Verifica-se que 11 pontos mostram uma tendência moderada de diminuição da precipitação na região ao nível de significância de  $p < 0,05$  a qual poderá propiciar a ocorrência de períodos de secas na bacia.

Tabela 4.5 - Valores do teste de tendência de MK para os dados de precipitação, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 4.5.

HadGEM2-ES 4.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	2.14**	Muito Forte	-2.96***	Muito Forte	-1,63*	Forte
2	2.07**	Muito Forte	-3.07***	Muito Forte	-1,59*	Forte
3	1.82**	Forte	-2.71***	Muito Forte	-1.82**	Forte
4	1.82**	Forte	-2.78***	Muito Forte	-1.82**	Forte
5	2.07**	Muito Forte	-2.78***	Muito Forte	-1,22*	Moderada
6	2.00**	Muito Forte	-2.75***	Muito Forte	-1,52*	Forte
7	1.96**	Forte	-2.39**	Muito Forte	-1,86**	Forte
8	2.18**	Muito Forte	-2.03**	Muito Forte	-1,63*	Forte
9	1.75*	Forte	-2.50***	Muito Forte	-1,43*	Moderada
10	2.50***	Muito Forte	-2.50***	Muito Forte	-1,41*	Moderada
11	1.86**	Forte	-2.00**	Muito Forte	-1,44*	Moderada
12	2.14**	Muito Forte	-2.11**	Muito Forte	-1,37*	Moderada
13	1.71*	Forte	-2.60**	Muito Forte	-1,26*	Moderada
14	2.03**	Muito Forte	-2.43**	Muito Forte	-1,36*	Moderada
15	1.93**	Forte	-2.50**	Muito Forte	-1,37*	Moderada
16	1.61*	Forte	-2.43**	Muito Forte	-1,52*	Forte
17	-0.25*	Fraca	-2.53**	Muito Forte	-1,22*	Moderada
18	1.75**	Forte	-2.36**	Muito Forte	-1,26*	Moderada
19	1.93**	Forte	-2.39**	Muito Forte	-1,24*	Moderada

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Analisando o cenário do ETA/HadGEM2-ES 8.5 (Tabela 4.6), que é um cenário de aumento mais acentuado de concentrações de gases do efeito estufa, nota-se que no período de 2011-2040, todos os pontos mostraram uma tendência crescente, ou seja, de aumento das precipitações neste período. Verifica-se que 8 dos pontos mostram uma tendência significativa forte de aumento das precipitações, enquanto que 8 indicaram uma tendência moderada e 13 pontos indicaram uma tendência fraca de aumento das chuvas.

Já para o período de 2041-2070, há uma inversão nos sinais da precipitação, com todos os pontos indicando uma tendência significativa decrescente, ou seja, de diminuição das chuvas. Desses, 8 pontos indicam uma tendência muito forte de diminuição da precipitação e 11 pontos mostram uma forte tendência de diminuição das chuvas, sendo assim, com essa tendência de diminuição da precipitação na região do Vale do Itajaí pode levar a ocorrência de secas nesta região.

Observa-se que para o fim do século, 2071-2099, o sinal da tendência se mantém o mesmo do período de 2041-2079, e todos os pontos também mostram uma tendência significativa decrescente das chuvas. Com 12 pontos indicando uma tendência forte, 6 pontos mostrando uma tendência moderada e 1 ponto indicando uma tendência fraca de diminuição das chuvas na região.

Tabela 4.6 - Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 8.5.

HadGEM2-ES 8.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	2.14**	Fraca	-2.21**	Muito Forte	-0.73*	Fraca
2	2.07**	Forte	-2.11**	Muito Forte	-1.71**	Forte
3	1.82**	Moderada	-2.25**	Muito Forte	-1.48**	Moderada
4	1.82**	Moderada	-2.32**	Muito Forte	-1.48**	Moderada
5	2.07**	Moderada	-2.11**	Muito Forte	-1.89**	Forte
6	2.00**	Moderada	-2.14**	Muito Forte	-1.82**	Forte
7	1.96**	Moderada	-1.86**	Forte	-1.67*	Forte
8	2.18**	Forte	-1.86**	Forte	-1.86**	Forte
9	1.75*	Forte	-2.43***	Muito Forte	-1.71*	Forte
10	2.50***	Forte	-2.11**	Muito Forte	-1.78*	Forte
11	1.86**	Forte	-1.82**	Forte	-1.44*	Moderada
12	2.14**	Forte	-1.93**	Forte	-1.11*	Moderada
13	1.71*	Forte	-1.86**	Forte	-1.59*	Forte
14	2.03**	Fraca	-1.96**	Forte	-1.52*	Forte
15	1.93**	Fraca	-1.78**	Forte	-1.56*	Forte
16	1.61*	Forte	-1.82**	Forte	-1.63*	Forte
17	-0.25*	Moderada	-1.96**	Forte	-1.52*	Forte
18	1.75**	Moderada	-2.36**	Muito Forte	-1,26*	Moderada
19	1.39*	Moderada	-1.78*	Forte	-1.41*	Moderada

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Observa-se que os cenários ETA/HadGEM2-ES 4.5 e 8,5 todos os três períodos de estudo (2011-2040, 2041-2070, 2071-2099) foram semelhantes quanto ao sinal da tendência, sendo que no período de 2011-2040, os dois cenários indicaram aumento significativo da precipitação na Bacia do Itajaí, enquanto, que nos dois últimos períodos 2041-2070 e 2071-2099, a tendência indicou diminuição da precipitação, isso mostra que pode ocorrer uma alternância de eventos extremos na Bacia do Vale do Itajaí, com o primeiro período mais propício à ocorrência de inundações e os dois outros períodos mais propícios à ocorrência de secas.

Na Tabela 4.7, são apresentados os valores do teste da tendência para o cenário



ETA/MIROC5 4.5, observa-se que no período de 2011-2040, 18 (94,7%) dos 19 pontos indicam uma fraca tendência significativa de diminuição ou aumento da precipitação e um ponto sem tendência. Nota-se que em 13 pontos a tendência foi decrescente ao nível de significância  $p < 0,05$  e 5 estações apresentaram tendência fraca de aumento da precipitação ao nível de significância de  $p < 0,05$ , ou seja, a maior parte bacia neste período sofrerá maior déficit na precipitação.

Nota-se que no período de 2041-2070, os valores de  $Z$  são todos maiores que 0, indicando uma tendência significativa crescente das chuvas. Observa-se que 9 pontos mostram um aumento moderado das chuvas ao nível de significância de  $p < 0,05$  e 10 pontos indicam um aumento fraco das precipitações ao nível de significância de  $p < 0,05$ .

E, no período de 2071-2099, 12 pontos indicam uma tendência significativa de aumento das chuvas, sendo que, 4 pontos apresentam uma tendência forte e 8 pontos uma tendência moderada de aumento das precipitações ao nível de significância de  $p < 0,05$ . E, os outros 7 pontos indicam uma tendência significativa decrescente das chuvas, ou seja, uma diminuição das chuvas com tendência fraca ao nível de  $p < 0,05$ .

Tabela 4.7 - Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/MIROC 4.5.

MIROC5 4.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	-0.11*	Fraca	0.82*	Fraca	0.81*	Fraca
2	-0.14*	Fraca	1.00*	Moderada	0.69*	Fraca
3	-0.14*	Fraca	0.68*	Fraca	1.07*	Moderada
4	-0.04*	Fraca	0.93*	Fraca	0.77*	Fraca
5	-0.25*	Fraca	1.00*	Moderada	-0.02*	Fraca
6	-0.14*	Fraca	0.71*	Fraca	-0.39*	Fraca
7	-0.54*	Fraca	0.89*	Fraca	-0.88*	Fraca
8	-0.32*	Fraca	0.96*	Fraca	0.99*	Moderada
9	0.00	Sem tendência	1.25*	Moderada	0.77*	Moderada
10	-0.39*	Fraca	1.03*	Moderada	-0.54*	Fraca
11	-0.21*	Fraca	0.82*	Fraca	-0.47*	Fraca
12	-0.21*	Fraca	1.07*	Moderada	1.03*	Moderada
13	0.14*	Fraca	0.89*	Fraca	0.99*	Fraca
14	0.11*	Fraca	1.25*	Moderada	0.84*	Fraca
15	-0.36*	Fraca	0.86*	Fraca	-0.77*	Fraca
16	-0.04*	Fraca	1.11*	Moderada	1.07*	Moderada
17	0.21*	Fraca	1.00*	Moderada	0.77*	Fraca
18	0.21*	Fraca	0.89*	Fraca	0.13*	Fraca
19	0.07*	Fraca	1.00*	Moderada	0.28*	Fraca

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Na Tabela 4.8, observa-se que para o cenário ETA/MIROC5 8.5, no período de 2011-2040, 10 pontos mostram uma tendência significativa crescente e 9 pontos mostraram uma tendência significativa decrescente das chuvas. Todos os pontos os sinais da tendência foram fracos ao nível de significância de  $p < 0,05$ . Nota-se, que houve um equilíbrio dos períodos de excesso e déficit de chuvas na região.

No período de 2041-2070, todos os valores de  $Z$  foram acima de 0, o que mostra uma tendência significativa de aumento da precipitação ao nível de significância de  $p < 0,05$ , sendo que, 2 pontos apresentaram uma tendência forte, 12 pontos indicaram uma tendência moderada e 5 pontos mostraram uma tendência fraca de

aumento das precipitações. E, no período de 2071-2099, todos os pontos mostraram uma tendência significativa de aumento das precipitações ao nível de significância de  $p < 0,05$ , e todos o sinal da tendência foi fraco.

Tabela 4.8 - Valores do teste de tendência de MK, para o cenário climático do ETA/MIROC 8.5.

MIROC5 8.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	0.14*	Fraca	1,00*	Moderada	0.99*	Fraca
2	-0.36*	Fraca	0.57*	Fraca	0.58*	Fraca
3	0,43*	Fraca	1.11*	Moderada	0.58*	Fraca
4	-0.5*	Fraca	1.43*	Moderada	0.47*	Fraca
5	-0.68*	Fraca	1.43*	Moderada	0.84*	Fraca
6	-0.21*	Fraca	1.43*	Moderada	0.84*	Fraca
7	-0.89*	Fraca	0.5*	Fraca	0.58*	Fraca
8	-0.61*	Fraca	1.71*	Moderada	0.58*	Fraca
9	0.25*	Fraca	1.11*	Moderada	0.62*	Fraca
10	0.07*	Fraca	1.39*	Moderada	0.58*	Fraca
11	-0.18*	Fraca	1.57*	Forte	0.88*	Fraca
12	-0.36*	Fraca	1.68*	Forte	0.73*	Fraca
13	0.29*	Fraca	0.71*	Fraca	0.73*	Fraca
14	0.39*	Fraca	0.71*	Fraca	0.36*	Fraca
15	-0.21*	Fraca	0.71*	Fraca	0.36*	Fraca
16	-0.46*	Fraca	1.21*	Moderada	0.69*	Fraca
17	0.32*	Fraca	1.21*	Moderada	0.77*	Fraca
18	0.14*	Fraca	1.03*	Moderada	0.39*	Fraca
19	0.13*	Fraca	1,00*	Moderada	0.24*	Fraca

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

São apresentados os gráficos da inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para os cenários do ETA/HadGEM2-ES 4.5 (Figura 4.8) e 8.5 (Figura 4.9), ETA/MIROC5 4.5 (Figura 4.10) e 8.5 (Figura 4.11), respectivamente, e nota-se pela inclinação da reta da estimativa de Sen's, que dois cenários do ETA/HadGEM2-ES 4,5 e 8,5 mostram uma inclinação positiva, ou seja, apontam para o aumento da precipitação no período estudado. O cenário do ETA/HadGEM2-ES 4.5 (Figura 4.8), é o cenário onde as retas estão com maior inclinação, indicando um aumento mais significativo da precipitação para este cenário, o que é corroborado pelos valores de  $Z$  mostrados na Tabela 4.3. Os dois cenários do ETA/HadGEM2-ES RCP 4,5 e 8,5 indicam um aumento significativo das chuvas neste período, o que pode causar muitas chuvas e conseqüentemente muitas inundações na Bacia do Vale do Itajaí. Os cenários do ETA/MIROC5 4.5 (Figura 4.10) e 8.5 (Figura 4.11), observa-se uma diminuição da precipitação na maioria dos pontos, porém, a inclinação da reta é muito pequena quase paralela, indicando que os valores da reta são próximos de zero e apresentam uma estabilidade, com isso não é possível prever se haverá uma diminuição ou aumento significativo da precipitação capaz de causar um déficit de chuvas extremas e conseqüentemente secas ou inundações na região neste período, ao contrário do cenário do ETA/HadGEM2-ES.

Figura 4.8 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

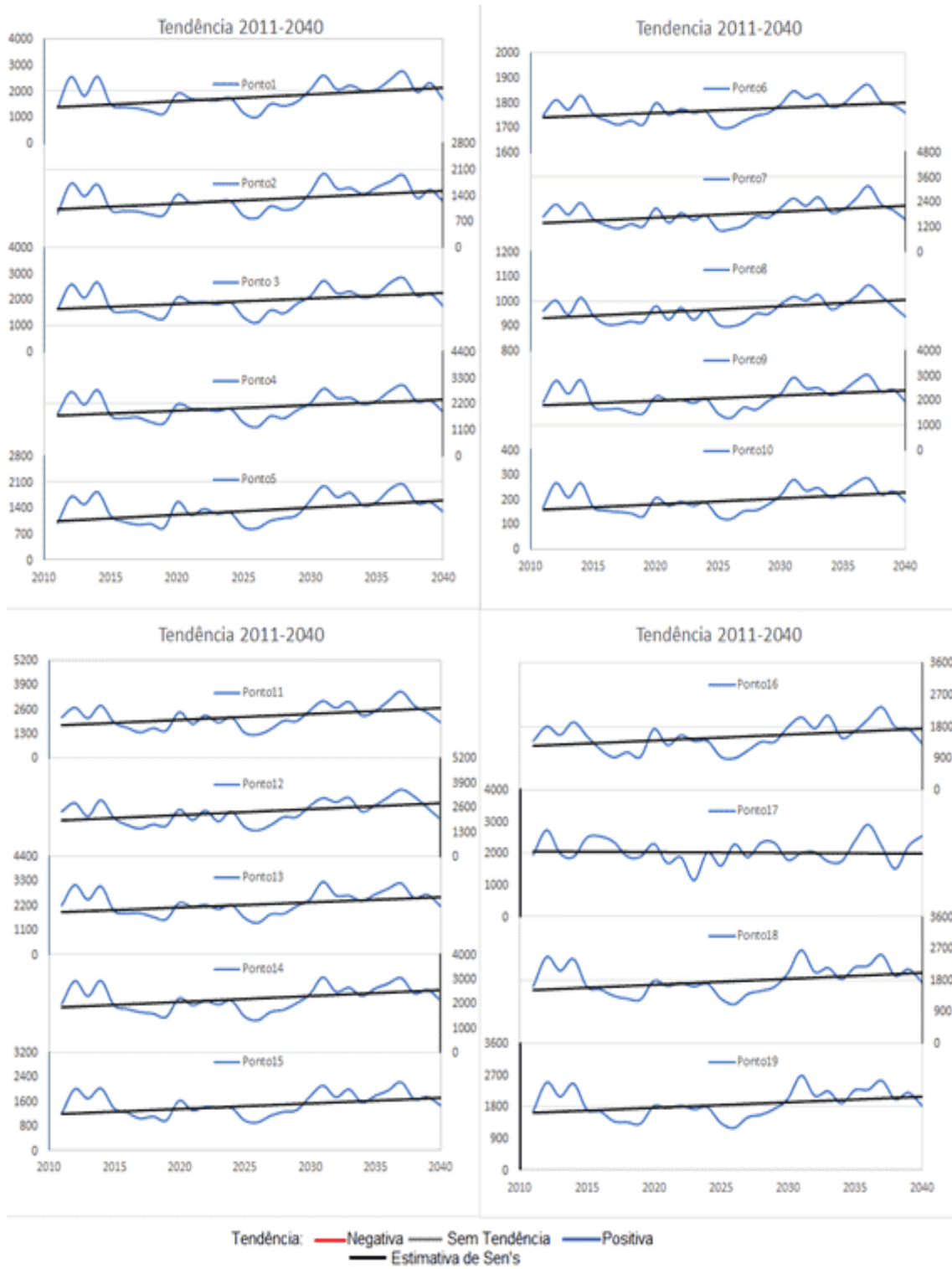


Figura 4.9 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5.

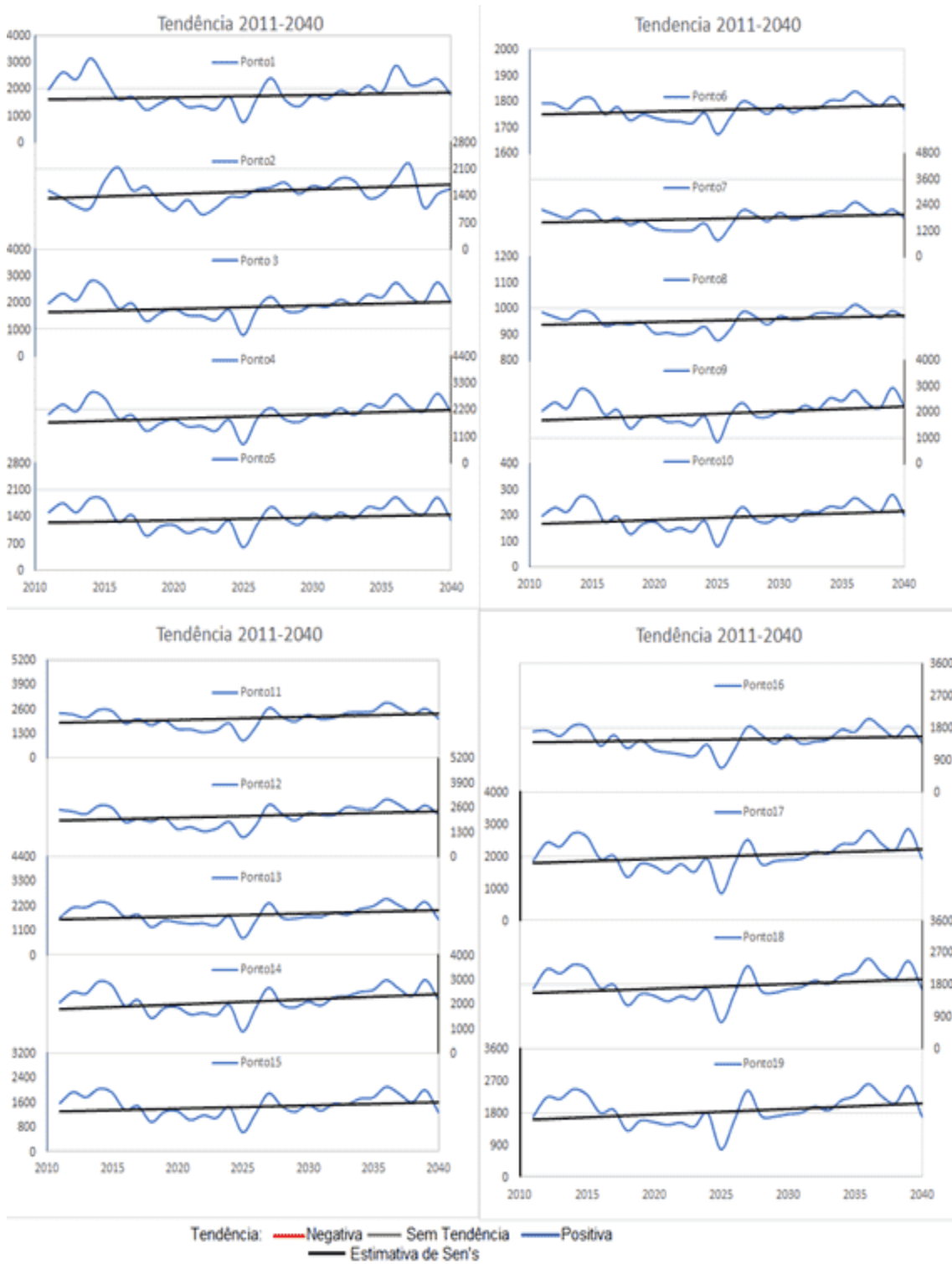


Figura 4.10 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC 4,5.

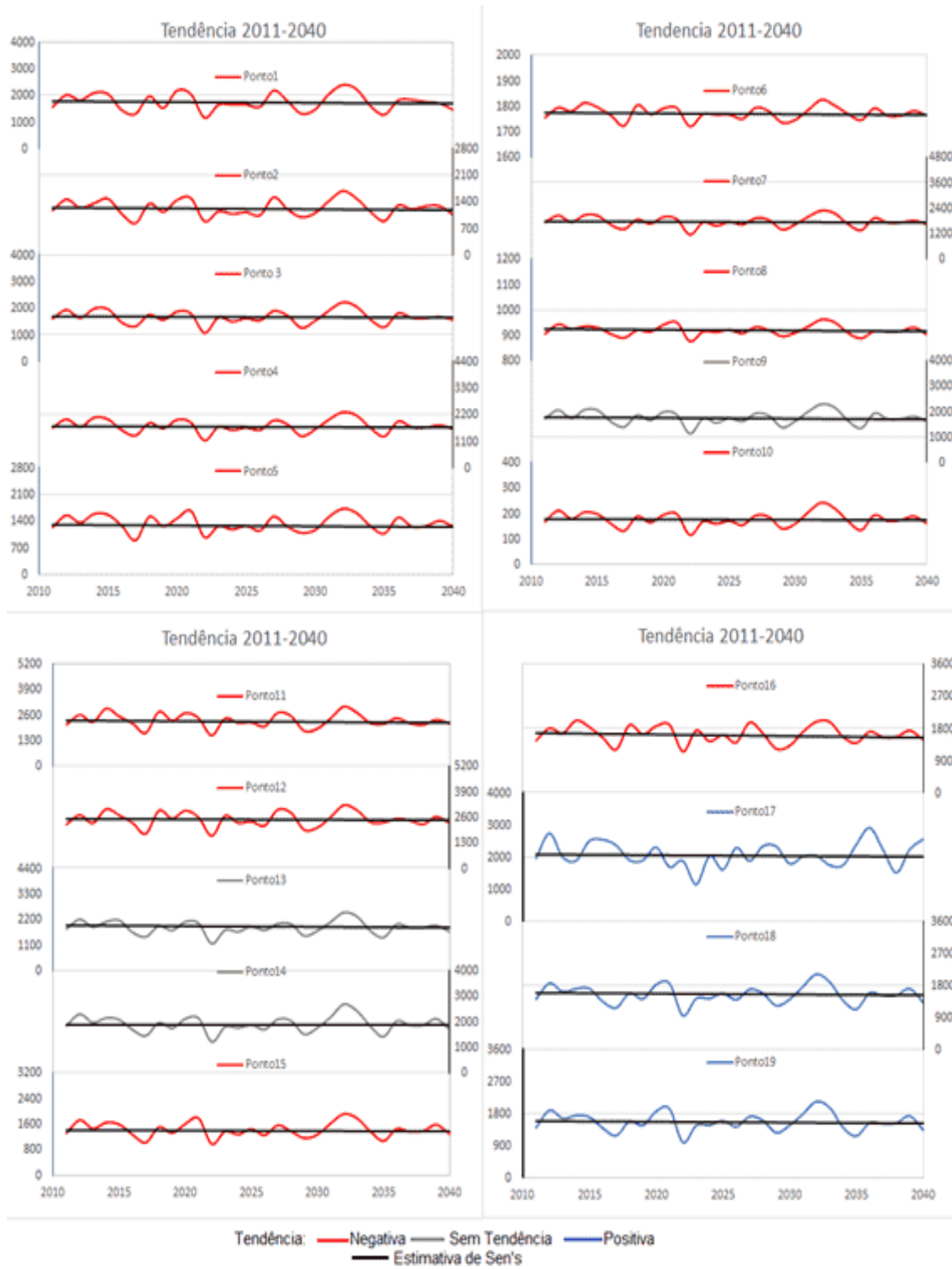
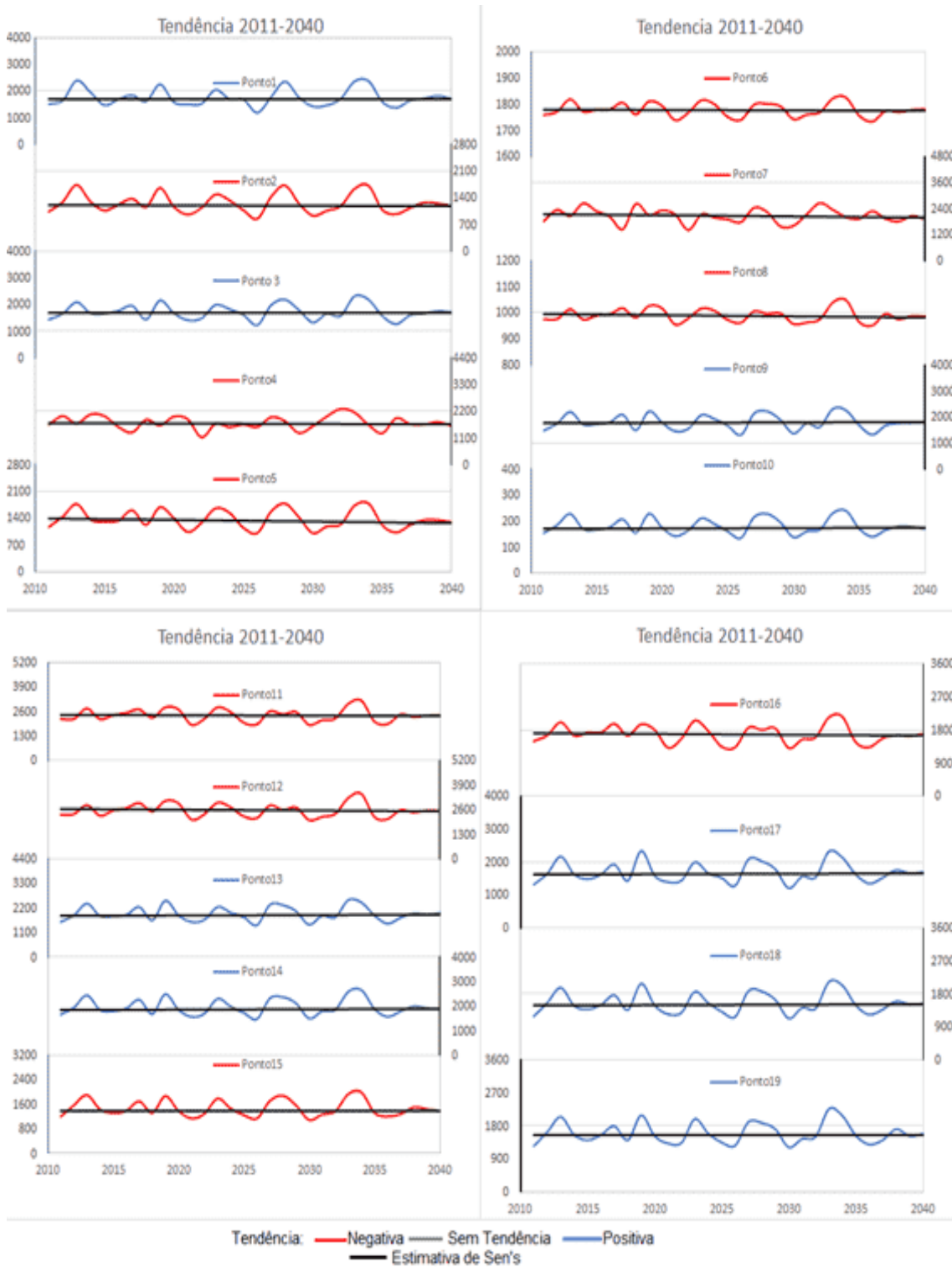


Figura 4.11 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC 8,5.





São apresentados os gráficos de tendência para o período de 2041-2070, nos cenários ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.12) e 8,5 (Figura 4.13), ETA/MIROC5 4,5 (Figura 4.14) e 8,5 (Figura 4.15, respectivamente, e verifica-se que os cenários do ETA/HadGEM2-ES 4,5 e 8,5 (Figuras 4.12, 4.13) mostram a estimativa de Sen's bem inclinada negativamente, indicando diminuição da precipitação neste período, o cenário RCP 4,5 é o que apresenta maior inclinação da reta, apontando uma redução bem acentuada na precipitação, enquanto que o cenário RCP 8,5 a inclinação da reta é menos acentuada, porém, sua inclinação também indica redução na precipitação. Os dois cenários indicam que haverá uma diminuição significativa na precipitação neste período, o que pode levar ao déficit de precipitação e conseqüentemente a ocorrência de eventos de secas extremas na região do Itajaí durante o período estudado.

Figura 4.12 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

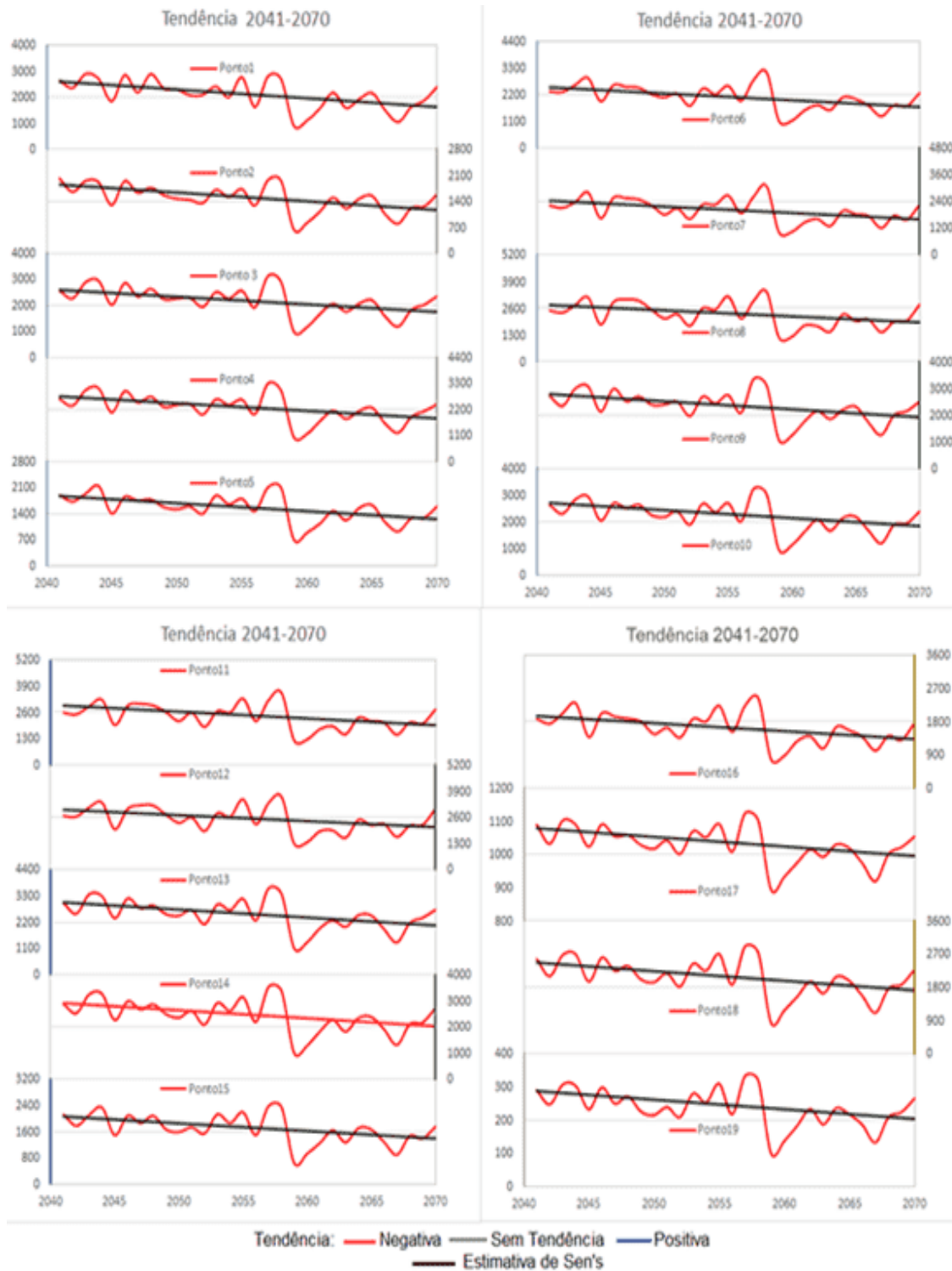
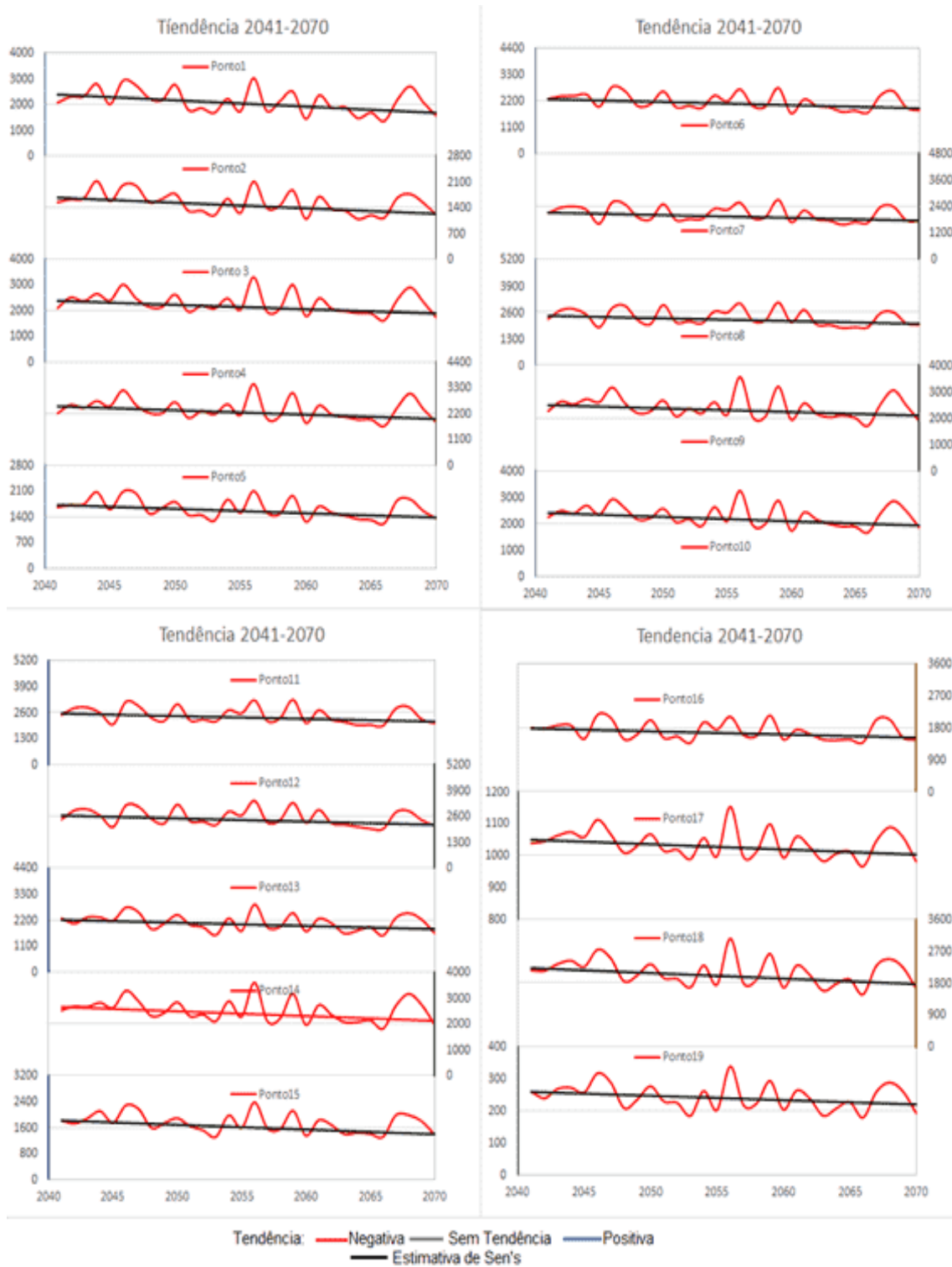


Figura 4.13 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA /HadgemES RCP 8,5.



Analisando o cenário do ETA/MIROC5 RCP 4,5 e 8,5 (Figuras 4.14 e 4.15) observa-se que a inclinação da linha de tendência indica um aumento da precipitação, isso é o contrário do que mostra os dois cenários do ETA/HadGEM2-ES, porém, essa inclinação é pouco acentuada e na maioria dos pontos ela está quase que paralela a linha de tendência e isso mostra que apesar da inclinação positiva indicar aumento da precipitação, isto pode não ser o suficiente para saber se este aumento será capaz de causar eventos extremos de precipitação na região e conseqüentemente inundações.

Figura 4.14 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5.

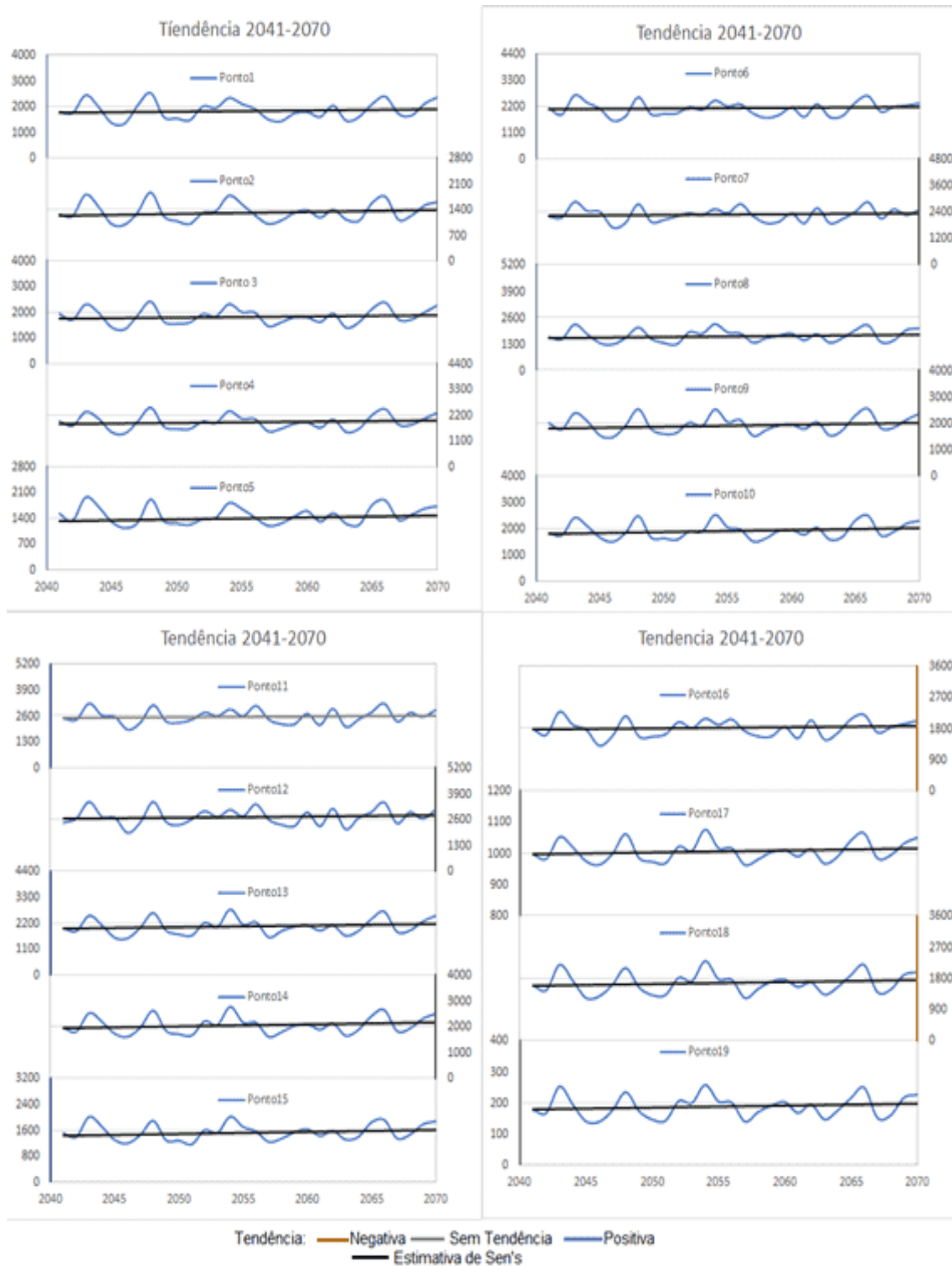
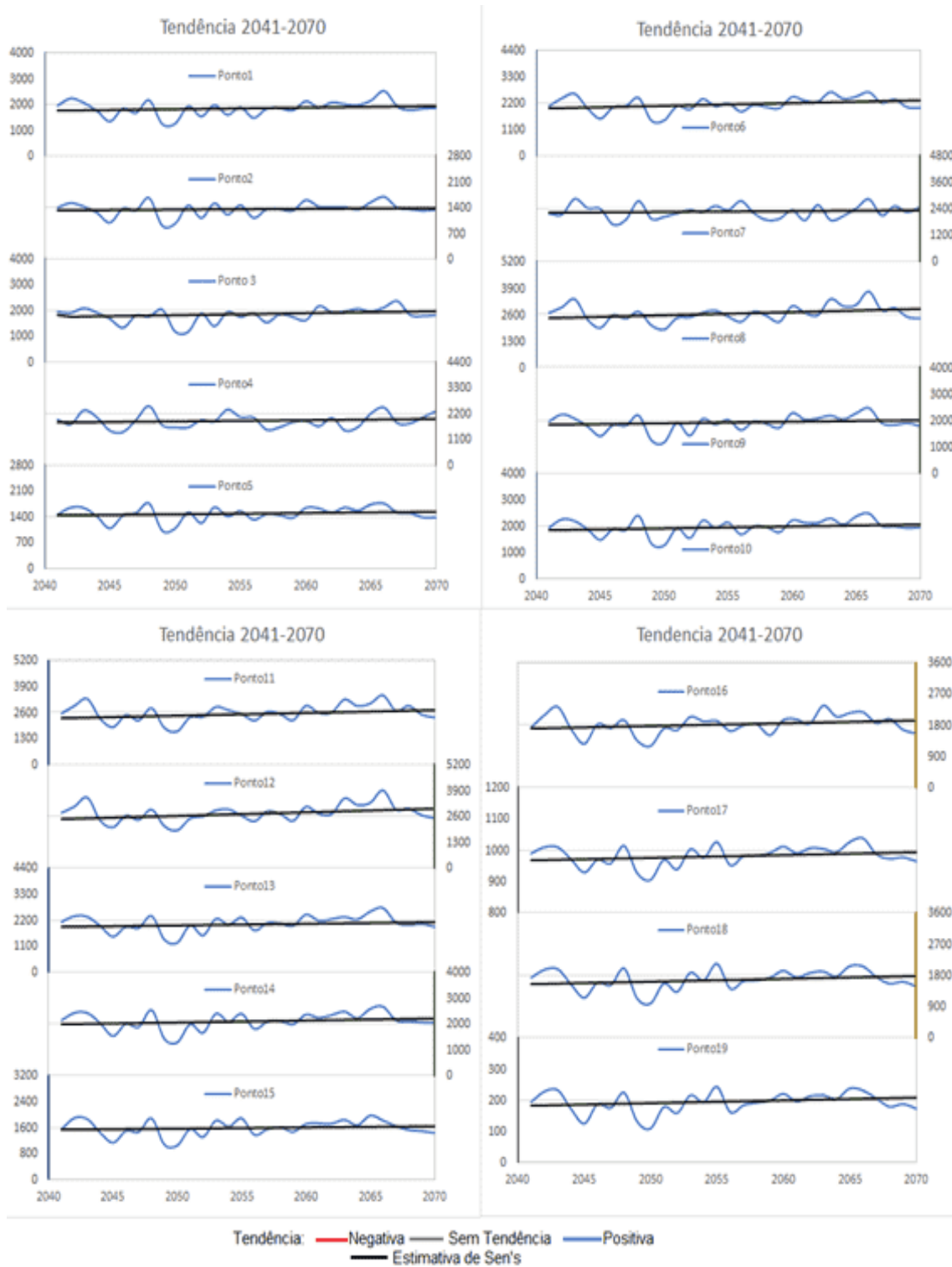


Figura 4.15 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5.



São apresentados os gráficos de tendência para o período de 2071-2099, para os cenários do ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.16) e 8,5 (Figura 4.17), e os cenários do ETA/MIROC5 4,5 (Figura 4.18) e 8,5 (Figura 4.19). Nota-se que o cenário do ETA/HadGEM2-ES 4,5 e 8,5 as inclinações da reta de tendência estão bem acentuadas mostrando uma diminuição da precipitação na região. Nos dois cenários observa-se que as inclinações da reta são significativas, o que mostram que eventos extremos de precipitação podem ocorrer neste período, indicando a ocorrência de secas na bacia do Itajaí. Já nos cenários do ETA/MIROC5 4,5 e 8,5, as inclinações da reta de tendência mostram um aumento da precipitação, porém, estas inclinações são bem menos acentuadas, o que significa que apesar do aumento da precipitação não há confiança suficiente para saber se estes serão capazes de causar eventos de inundações na Bacia do Itajaí.

Figura 4.16 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

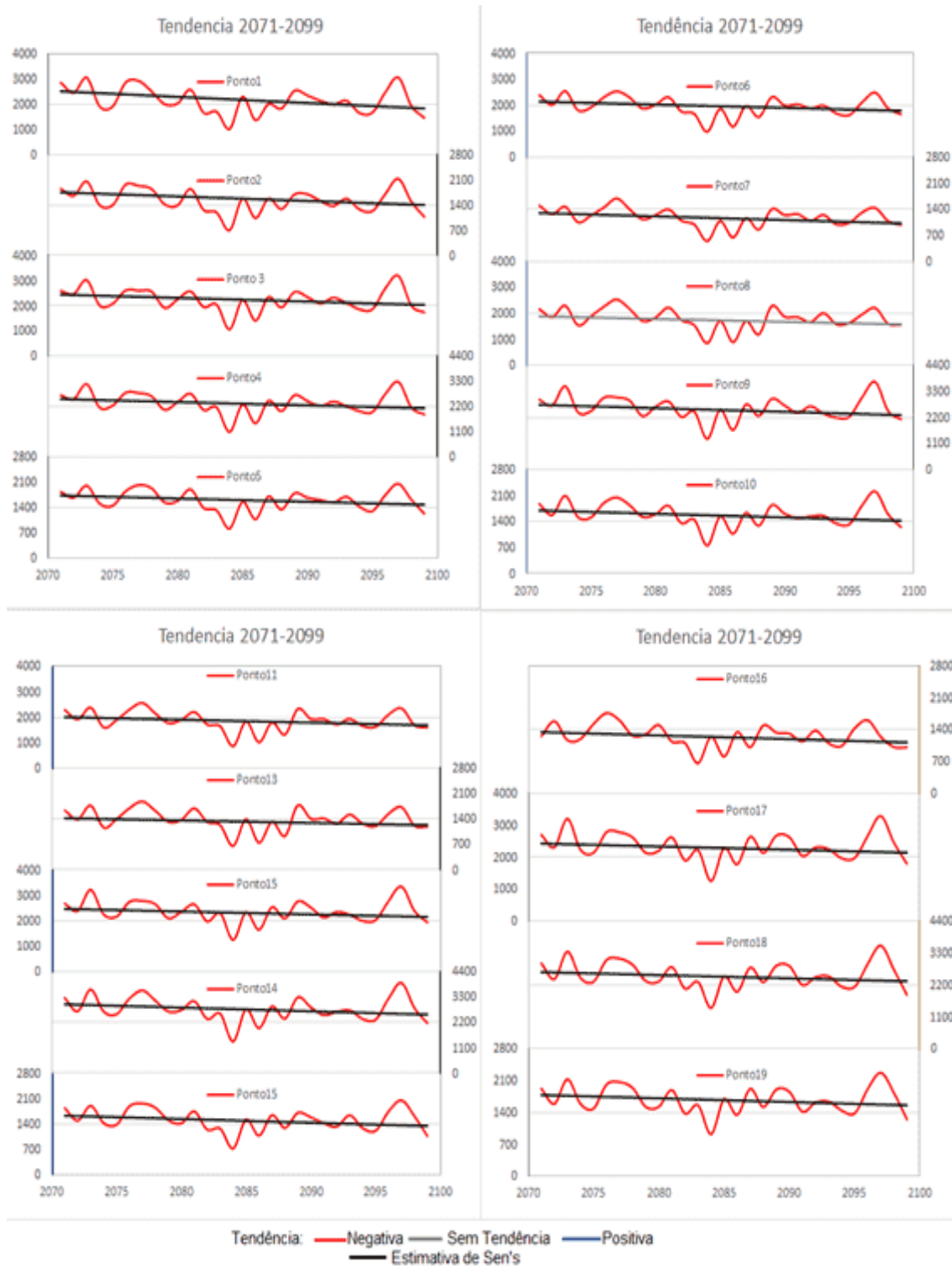




Figura 4.17 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5.

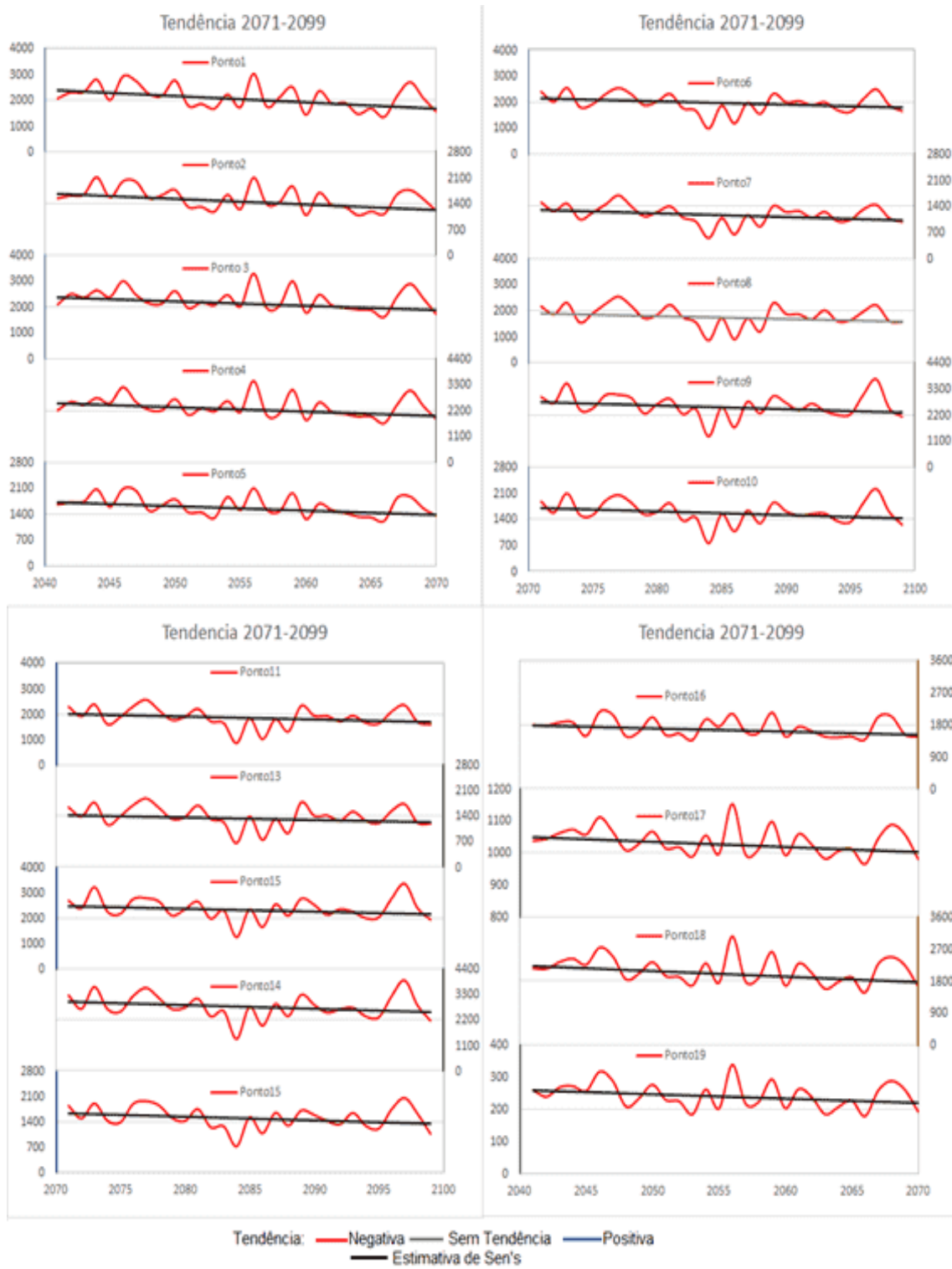


Figura 4.18 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5.

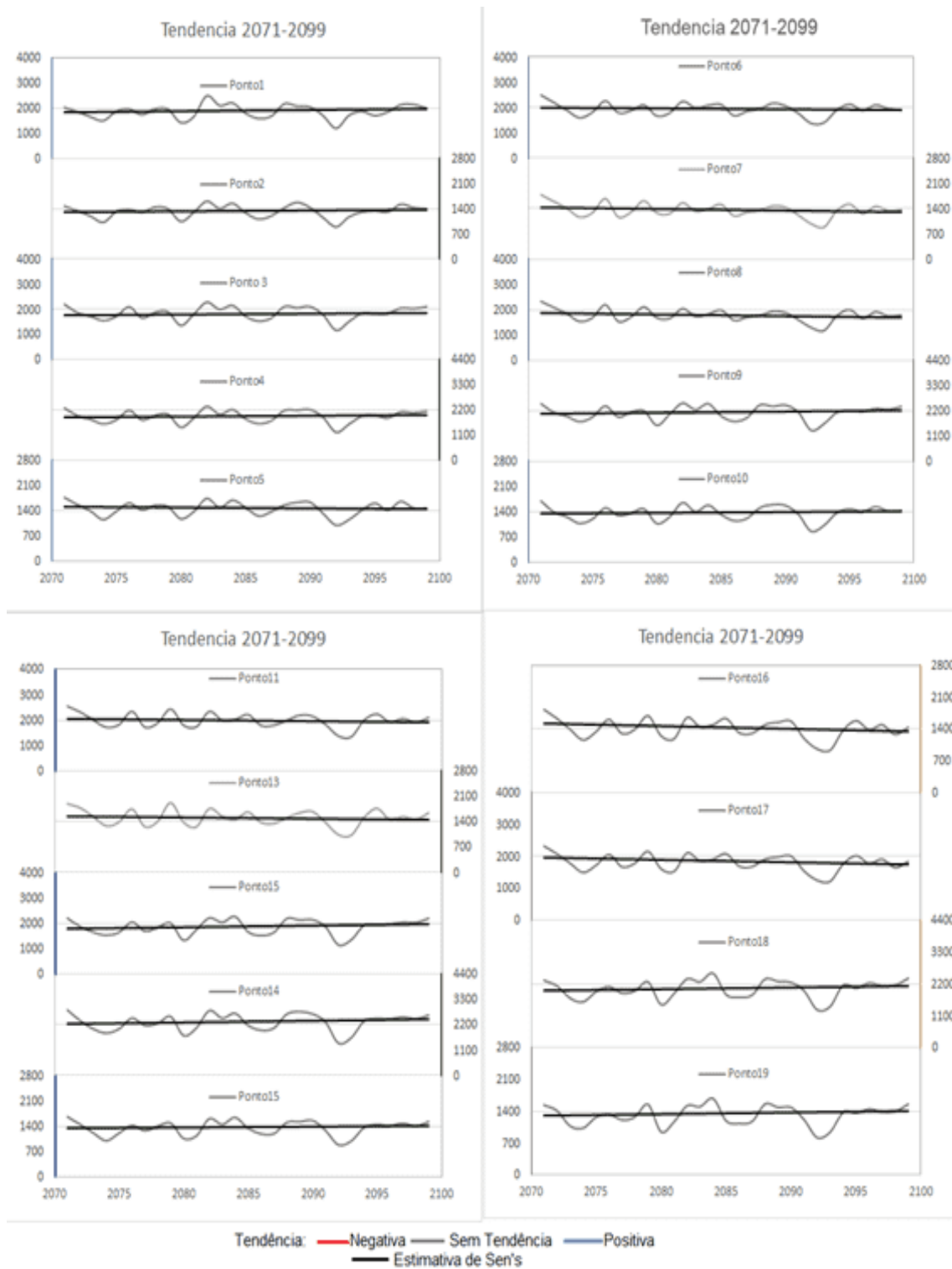
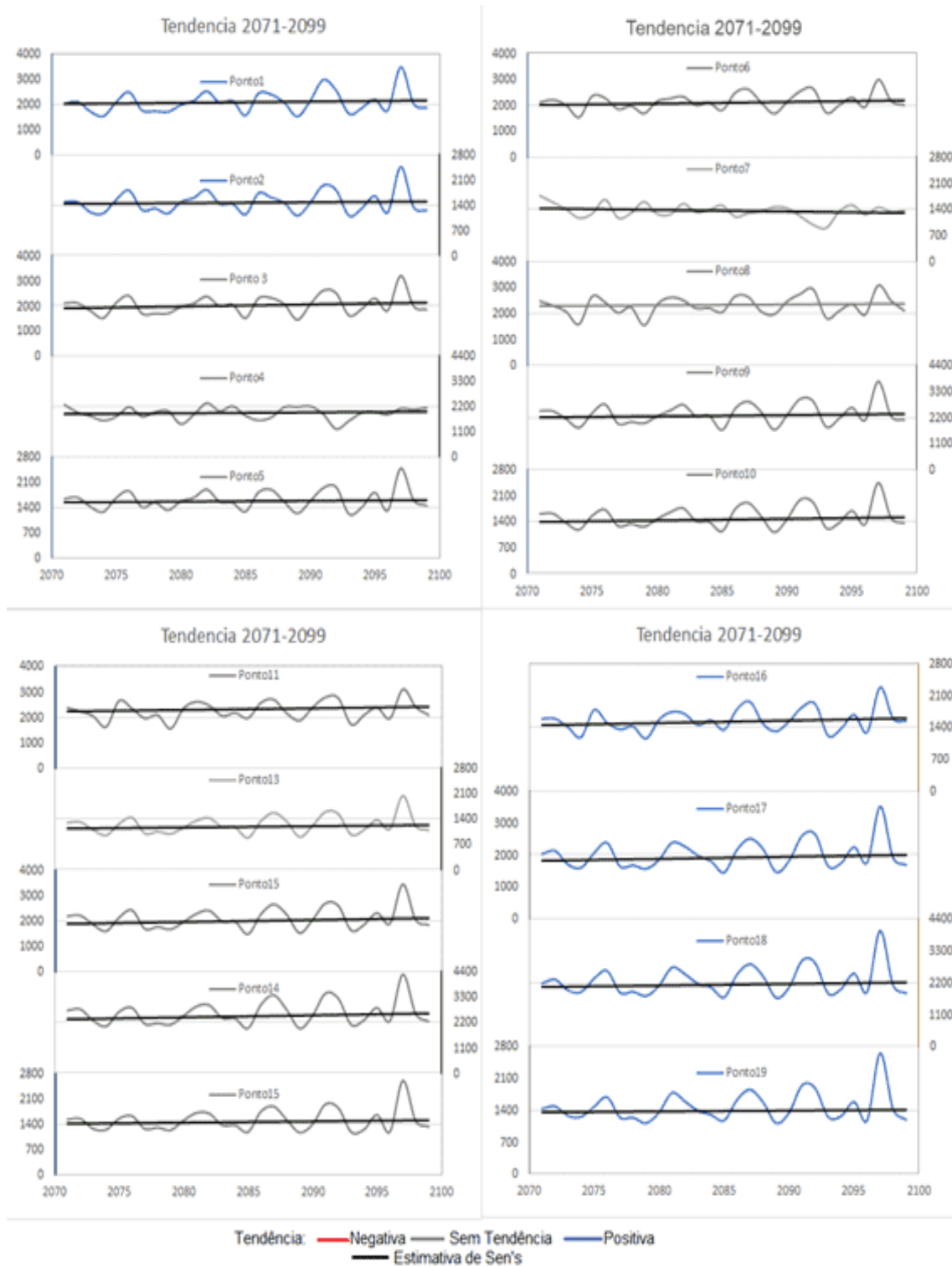


Figura 4.19 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5.



São apresentados os mapas da interpolação dos valores de  $Z$  da tendência em toda área da Bacia do Itajaí, para todos os períodos analisados e os cenários ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.20a) e 8,5 (Figura 4.20b), ETA/MIROC5 4,5 (Figura 4.20c) e 8,5 (Figura 4.20d). Nota-se que para o cenário ETA/HadGEM2-ES 4,5 no período de 2011-2040, como foi mostrado na Tabela 4.3 e na Figura 4.11a, a maior parte da Bacia do Itajaí os valores de  $Z$  foram acima de 0, indicando aumento da precipitação, observa-se que somente uma porção central da bacia há uma área com valor negativo, bem próximo de zero, valor mostrado pelo ponto onde o valor de  $Z$  foi de -0,25. Mas, claramente observa-se que a bacia como um todo aponta para um aumento significativo das chuvas na região. Já nos outros períodos 2041-2070 e 2071-2099, toda a bacia indica uma diminuição significativa na precipitação. No cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5, ele segue a mesma do cenário do 4,5, com uma pequena porção ao leste da bacia com uma área indicando diminuição da precipitação sendo este valor bem próximo de zero e, portanto, todo o restante da bacia indicando a possibilidade de aumento significativo da precipitação. E nos dois outros períodos, diminuição significativa da precipitação na bacia toda.

Quando analisamos os cenários do ETA/MIROC5 4,5 e 8,5 observa-se que eles não seguem um padrão entre eles, no ETA/MIROC5 4,5, nos três períodos estudados eles não mostram uma tendência clara de aumento ou diminuição da precipitação na bacia, somente no período de 2071-2099, ele apresenta uma tendência moderada de aumento da precipitação em uma parte da bacia, que vai do norte, oeste e noroeste da bacia, e todo resto da bacia sem nenhuma definição clara de aumento ou diminuição da precipitação.

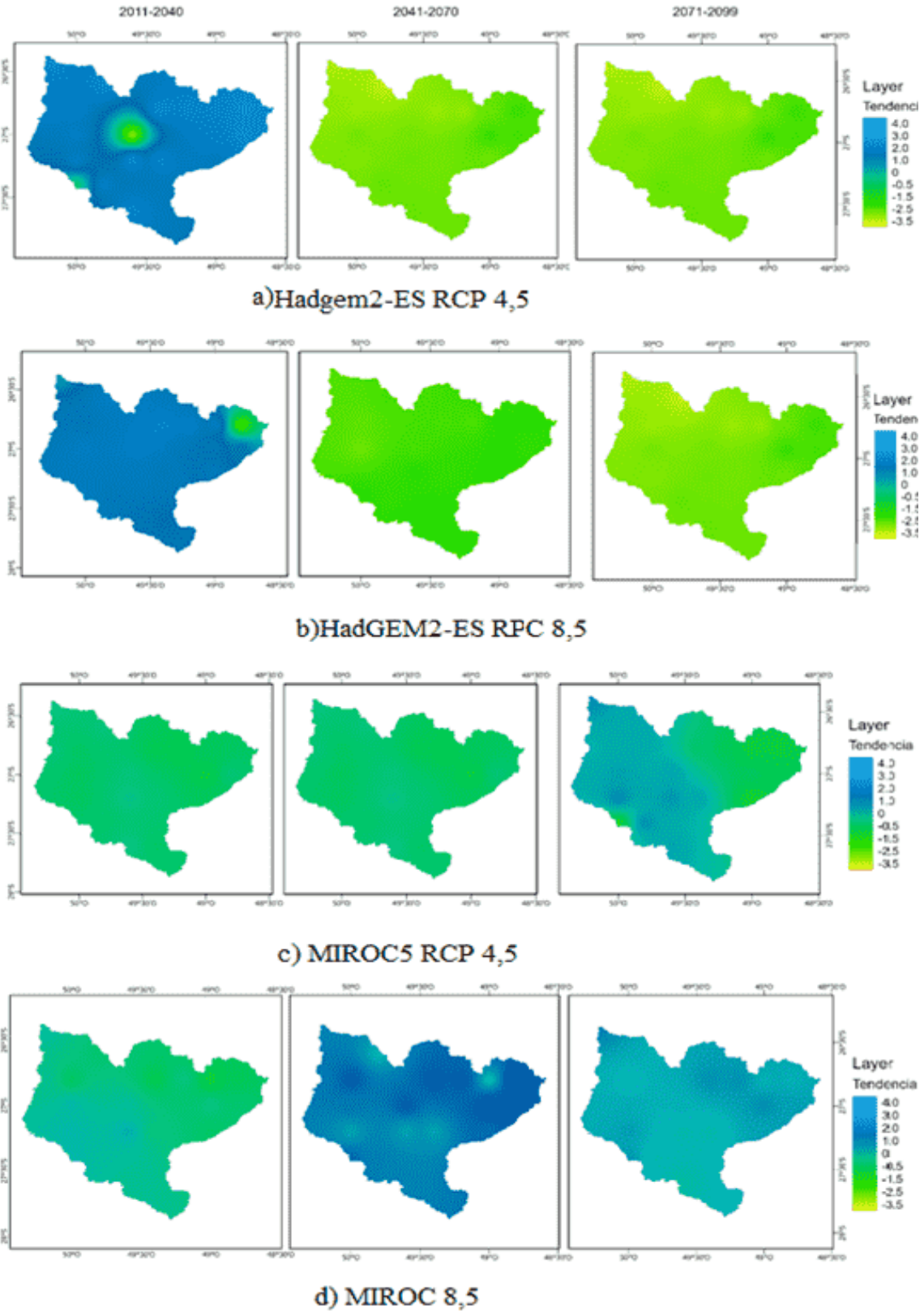
No cenário ETA/MIROC5 8,5, os três períodos são bem distintos, sendo que, no período de 2011-2040, não há uma definição de aumento ou diminuição da precipitação, no período de 2041-2070, já é possível perceber uma tendência moderada de aumento das chuvas e em 2071-2099, esse aumento continua, e observa-se que os

modelos a partir do período de 2040 até o ano de 2100 divergem.

Andrade et al. (2021) estudaram o comportamento das precipitações para os cenários de mudanças climáticas RCP 4,5 e RCP 8,5 e notaram que a precipitação irá diminuir nos três períodos (2011-2040, 2041-2070, 2071-2099) para o ETA/MIROC5 e ETA/HadGEM2-ES irá diminuir no curto e longo prazo, e aumentar em médio-prazo.

Observa-se que o cenário ETA/HadGEM2-ES 4,5, mostrou que o período que apresentou tendência muito forte em todos os pontos da grade do modelo, de diminuição das precipitações foi o médio prazo (2041-2070), depois a curto prazo (2011-2040) que também indicou tendência de forte a muito forte de aumento das chuvas e por fim, a longo-prazo (2071-2099), quando a tendência apontou para uma tendência de moderada a forte de diminuição da precipitação. E, para o cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5, a tendência mostra um sinal mais fraco no curto-prazo, no médio prazo o sinal da tendência foi de forte a muito forte na maioria dos pontos de grade, e no, longo prazo o sinal mostrou uma tendência de moderada a muito forte. Já para o cenário ETA/MIROC5 4,5, a curto prazo o sinal da tendência foi fraco, no médio prazo foi de moderado a forte e no longo-prazo foi de fraco a moderado. E, no cenário ETA /MIROC5 8,5, o sinal da tendência se mostrou fraco no curto prazo, de moderado a forte no médio prazo e de fraco a moderado a longo-prazo. Nota-se que nos dois modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5, nos dois cenários de emissões 4,5 e 8,5, o sinal da tendência foi mais significativo no curto-prazo. A diferença entre os modelos é devida as incertezas inerentes da modelagem climáticas e dos modelos climáticos e a necessidade de avaliar os dados de diferentes previsões climáticas (ANDRADE et al., 2021; PLOSZAI et al., 2022).

Figura 4.20 - Mapa de interpolação da tendência de precipitação na Bacia do Itajaí para os cenários ETA/HadGEM2-ES a) 4,5, b) 8,5 e ETA/MIROC5 c) 4,5, d) 8,5.



Na Tabela 4.9 são apresentados os valores de  $Z$  calculados pelo teste de MK para o teste de tendência do escoamento superficial na Bacia do Itajaí para o cenário ETA/HadGEM2-ES 4,5. Observa-se que no período de 2011-2040, todos os pontos apontam para uma tendência crescente do escoamento, desses 13 pontos indicaram um aumento forte do escoamento, sendo 3 pontos ao nível de significância de  $p < 0,05$  e 10 pontos ao nível de significância de  $p < 0,01$ . E 6 pontos mostraram um aumento de muito forte do escoamento ao nível de significância de  $p < 0,01$ . Isso, confirma o que a tendência da precipitação já apontava, que durante este período à Bacia do Itajaí poderá sofrer com grandes inundações, o que já aconteceu em alguns anos neste período como as inundações de 2011, e ainda pode acontecer outras até o fim do período no ano de 2040. Já no período de 2041-2070, nota-se uma inversão nos valores na tendência com todos os pontos apontando para uma tendência significativa de diminuição muito forte e forte do escoamento, com 13 pontos com tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,001$  e 5 pontos tendência muito forte com nível de significância de  $p < 0,05$  e 1 ponto tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,05$  de diminuição do escoamento, assim como mostrou a tendência das chuvas neste período, portanto, a bacia sofrerá com déficit de água o que poderá causar eventos de secas durante este período. E, no período de 2071-2099, 17 os pontos também indicaram uma tendência significativa decrescente do escoamento e 2 pontos mostraram uma tendência significativa de aumento do escoamento. Observa-se que dos pontos que indicaram aumento do escoamento, 1 apresentou tendência forte ao nível de significância de  $p < 0,01$  e 1 mostrou tendência moderada ao nível de significância de  $p < 0,05$ . Enquanto, os pontos que indicaram diminuição do escoamento, 12 apresentaram tendência moderada ao nível de significância de  $p < 0,05$ , 3 tendência forte e 1 tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,01$  e 1 ponto mostrou tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,001$ . Nota-se, que a tendência do escoamento seguiu o mesmo sinal da precipitação no cenário do ETA/HadGEM2-ES 4,5, mostrando que a Bacia

do Itajaí, passará por períodos de alternância de inundações e secas, e isso, está relacionado com as mudanças climáticas. Isso já vem ocorrendo na bacia como nos anos de 2008 e 2011 quando a bacia passou por fortes inundações e já nos anos de 2019 e 2020 passou por uma estiagem que atingiu vários municípios da região

Tabela 4.9 - Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 4.5.

HadGEM2-ES 4.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	2.18**	Muito Forte	-2.82***	Muito Forte	-2.01**	Muito Forte
2	1.96**	Forte	-3.21***	Muito Forte	-1.52*	Forte
3	1.82**	Forte	-2.78***	Muito Forte	-3.17***	Muito Forte
4	1.89**	Forte	-2.71***	Muito Forte	-1.48*	Moderada
5	1.82**	Forte	-2.28**	Muito Forte	-1.82**	Forte
6	2.18**	Muito Forte	-2.03**	Muito Forte	-1.56*	Forte
7	1.86**	Forte	-2.53***	Muito Forte	1.86**	Forte
8	2.11**	Muito Forte	-2.46***	Muito Forte	-1.22*	Moderada
9	1.86**	Forte	-2.14**	Muito Forte	1.44*	Moderada
10	1.82**	Forte	-2.11**	Muito Forte	-1.37*	Moderada
11	2.28**	Muito Forte	-2.50***	Muito Forte	-1.07*	Moderada
12	1.82**	Forte	-2.43***	Muito Forte	-1.07*	Moderada
13	2.07**	Muito Forte	-2.57***	Muito Forte	-1.11*	Moderada
14	1.75*	Forte	-2.57***	Muito Forte	-0.77*	Moderada
15	1.75*	Forte	-2.43***	Muito Forte	-0.73*	Moderada
16	1.64*	Forte	-2.57***	Muito Forte	-0.73*	Moderada
17	2.00**	Muito Forte	-2.50***	Muito Forte	-1.03*	Moderada
18	1.96**	Forte	-2.10**	Muito Forte	-0.92*	Moderada
19	1.87**	Forte	-1.98**	Forte	-1.01*	Moderada

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Já na Tabela 4.10 estão representados os valores do teste  $Z$  da tendência para o cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5 do escoamento. No período de 2011-2040, todos os pontos tendência crescente significativa ao nível de significância de  $p < 0,05$ , 3 pontos mostraram tendência fraca, 2 pontos indicaram tendência forte e 14 pontos



apresentaram tendência moderada de diminuição do escoamento. Nos outros dois períodos analisados, 2041-2070 e 2071-2099, o sinal da tendência do escoamento se inverte indicando uma tendência significativa de diminuição do escoamento. No período de 2041–2070, 1 ponto mostrou tendência moderada e 2 pontos indicaram tendência forte com significância de  $p < 0,05$ , 5 pontos mostraram tendência forte e 11 pontos apresentaram tendência muito forte com nível de significância de  $p < 0,01$ , de diminuição do escoamento. E, no período de 2071-2099, 1 ponto indicou tendência fraca, 1 ponto mostrou tendência moderada e 9 pontos apresentaram tendência muito forte ao nível de significância de  $p < 0,05$ , 5 pontos indicaram tendência forte e 3 pontos mostraram tendência ao nível de significância de  $p < 0,01$  de diminuição de escoamento. Observa-se que o cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5 corroborou o que foi mostrado pelo ETA/HadGEM2-ES 4,5, com o período de 2011-2040 mostrando tendência crescente do escoamento e os períodos de 2041-2070 e 2071-2099 indicando uma tendência de diminuição do escoamento, e também foi o que mostrou estes cenários para a precipitação, indicando para a possibilidade inundações até o ano de 2040 e depois um a diminuição do déficit de água trazendo as secas para a bacia.

Tabela 4.10 - Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/HadGEM2-ES 8.5.

HadGEM2-ES 8.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	0.50*	Fraca	-2.25**	Muito Forte	-0.66*	Fraca
2	0.86*	Fraca	-1.86**	Forte	-1.67*	Forte
3	0.86*	Fraca	-2.18**	Muito Forte	-1.67*	Forte
4	1.07*	Moderada	-2.03**	Muito Forte	-1.56*	Forte
5	1.03*	Moderada	-2.03**	Muito Forte	-2.01**	Muito Forte
6	1.36*	Moderada	-2.00**	Muito Forte	-2.12**	Muito Forte
7	1.43*	Moderada	-1.78*	Forte	-1.93**	Forte
8	1.53*	Forte	-1.64*	Forte	-1.63*	Forte
9	1.39*	Moderada	-2.36**	Muito Forte	-1.78*	Forte
10	1.36*	Moderada	-1.93**	Muito Forte	-1.89**	Forte
11	1.39*	Moderada	-1.39*	Moderada	-1.41*	Moderada
12	1.43*	Moderada	-2.39**	Muito Forte	-2.16**	Muito Forte
13	1.53*	Forte	-1.93**	Forte	-1.71*	Forte
14	1.14*	Moderada	-1.86**	Forte	-1.86**	Forte
15	1.00*	Moderada	-1.32*	Moderado	-1.97**	Forte
16	1.21*	Moderada	-2.18**	Muito Forte	-1.93**	Forte
17	1.25*	Moderada	-2.03**	Muito Forte	-1.78*	Forte
18	1.46*	Moderada	-1.89**	Forte	-1.67*	Forte
19	1.39*	Moderada	-1.86**	Forte	-1.52*	Forte

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Observa-se na Tabela 4.11 os valores do teste de tendência para o cenário ETA/MIROC5 4,5, no período de 2011-2040, em que 13 pontos indicaram tendência decrescente significativa e 5 pontos mostraram tendência crescente significativa do escoamento. No período de 2041-2070, todos os pontos indicaram tendência crescente significativa do escoamento, sendo que, 10 pontos mostraram uma tendência fraca e 9 pontos uma tendência moderada de aumento do escoamento E, o período de 2071-2099, 13 pontos indicaram uma tendência crescente significativa, sendo 10 pontos mostrando uma fraca tendência e 3 pontos uma tendência moderada de aumento do escoamento, e 6 pontos mostrando uma tendência decrescente significativa

do escoamento.

Tabela 4.11 - Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/MIROC 4.5.

MIROC5 4.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	-0.11*	Fraca	0.82*	Fraca	0.81*	Fraca
2	-0.14*	Fraca	1.00*	Moderada	0.69*	Fraca
3	-0.14*	Fraca	0.68*	Fraca	1.07*	Moderada
4	-0.04*	Fraca	0.93*	Fraca	0.77*	Fraca
5	-0.25*	Fraca	1.00*	Moderada	-0.02*	Fraca
6	-0.14*	Fraca	0.71*	Fraca	-0.39*	Fraca
7	-0.54*	Fraca	0.89*	Fraca	-0.88*	Fraca
8	-0.32*	Fraca	0.96*	Fraca	0.99*	Fraca
9	0.00	Sem Tendência	1.25*	Moderada	0.77*	Fraca
10	-0.39*	Fraca	1.03*	Moderada	-0.54*	Fraca
11	-0.21*	Fraca	0.82*	Fraca	-0.47*	Fraca
12	-0.21*	Fraca	1.07*	Moderada	1.03*	Moderada
13	0.14*	Fraca	0.89*	Fraca	0.99*	Fraca
14	0.11*	Fraca	1.25*	Moderada	0.84*	Fraca
15	-0.36*	Fraca	0.86*	Fraca	-0.77*	Fraca
16	-0.04*	Fraca	1.11*	Moderada	1.07*	Moderada
17	0.21*	Fraca	1.00**	Moderada	0.77*	Fraca
18	0.21*	Fraca	0.89	Fraca	0.13*	Fraca
19	0.07*	Fraca	1.00*	Moderada	0.28*	Fraca

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Na Tabela 4.12 é apresentado o teste de tendência para o cenário ETA/MIROC5 8,5, nota-se que para o período de 2011-2040, 13 pontos indicaram uma tendência significativa crescente e 6 pontos mostraram uma tendência significativa decrescente do escoamento e, os sinais da tendência foram todos fracos. No período de 2041-2070 todos os pontos mostraram uma tendência significativa crescente do escoamento, sendo, 11 pontos indicando uma tendência forte e 8 pontos apresentaram uma tendência moderada de aumento do escoamento. E, no período de 2071-2099, todos os

pontos também indicaram uma tendência significativa crescente do escoamento, com 5 pontos mostrando uma tendência moderada e 14 pontos uma tendência fraca de aumento do escoamento.

Tabela 4.12 - Valores do teste de tendência de MK para o escoamento superficial, para o cenário climático do ETA/MIROC 8.5.

MIROC5 8.5						
Ponto	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência	Teste Z	Tendência
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
1	0.46*	Fraca	1.53*	Forte	1.22*	Moderada
2	0.18*	Fraca	1.07*	Moderada	0.62*	Fraca
3	0.29*	Fraca	1.57*	Forte	0.92*	Fraca
4	0.25*	Fraca	1.75*	Forte	0.84*	Fraca
5	-0.14*	Fraca	1.50*	Forte	1.03*	Moderada
6	0.32*	Fraca	1.53*	Forte	1.14*	Moderada
7	-0.25*	Fraca	1.53*	Forte	1.11*	Moderada
8	-0.32*	Fraca	1.53*	Forte	0.58*	Moderada
9	0.50*	Fraca	1.43*	Moderada	0.66*	Fraca
10	0.39*	Fraca	1.46*	Moderada	0.92*	Fraca
11	-0.14*	Fraca	1.57*	Forte	0.73*	Fraca
12	-0.07*	Fraca	1.61*	Forte	0.73*	Fraca
13	0.54*	Fraca	1.39*	Moderada	0.73*	Fraca
14	0.54*	Fraca	1.32*	Moderada	0.81*	Fraca
15	0.32*	Fraca	1.07*	Moderada	0.47*	Fraca
16	-0.07*	Fraca	1.03*	Moderada	0.96*	Fraca
17	0.57*	Fraca	1.14*	Moderada	0.92*	Fraca
18	0.39*	Fraca	1.03*	Moderada	0.69*	Fraca
19	0.32*	Fraca	1.07*	Moderada	0.39*	Fraca

\*: tendência significativa ( $p < 0,05$ )

\*\* : tendência significativa ( $p < 0,01$ )

\*\*\*: tendência significativa ( $p < 0,001$ )

Observa-se que os cenários ETA/MIROC5 4,5 e 8,5 foram semelhantes quanto ao sinal da tendência nos três períodos analisados, indicando uma fraca tendência no período de 2011-2040, no período de 2040-2071 mostraram todos os pontos com tendência de aumento do escoamento e no último período a maioria dos pontos indicando tendência fraca.

Analisando os cenários do ETA/HadGEM2-ES (4,5 e 8,5), e ETA/MIROC5 (4,5 e 8,5), observa-se que os mesmos apresentaram divergências nos períodos de 2041-2070 e 2071-2099, com o ETA/HadGEM2-ES indicou diminuição do escoamento, enquanto o ETA/MIROC5 indicando aumento do escoamento neste período. Isso mostra que os modelos não são claros quanto o que pode ocorrer na bacia, porém eles mostram que a Bacia do Itajaí pode passar por períodos de eventos extremos. São apresentados os gráficos da tendência no período de 2011-2040 para os cenários ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.21) e 8,5(Figura 4.22) e ETA/MIROC5 4,5 (Figura 4.23) e 8,5 (Figura 4.24). Nota-se que todos as retas de tendência dos cenários do ETA/HadGEM2-ES 4,5 e 8,5 apresentam inclinação positiva, ou seja, mostram aumento do escoamento, o que corrobora os valores de Z mostrados na Tabela 4.3 e 4.4. Observa-se que as inclinações das retas são bem claras e não deixa dúvida sobre a possibilidade de aumento do escoamento. Já, nos cenários ETA/MIROC5 4,5 e 8,5 (Figuras 4.23 e 4.24, nota-se que a maioria das retas apresentam inclinação negativa, o cenário 4,5 observa-se que as inclinações das retas apesar de serem negativas, estas não são tão acentuadas, o que mostra que as diminuições do escoamento podem não ser tão acentuadas a ponto de causar secas severas, e no cenário 8,5 a inclinação das retas são bem acentuadas, apontando para a possibilidade de diminuição do escoamento neste período, causando secas severas.

Figura 4.21 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

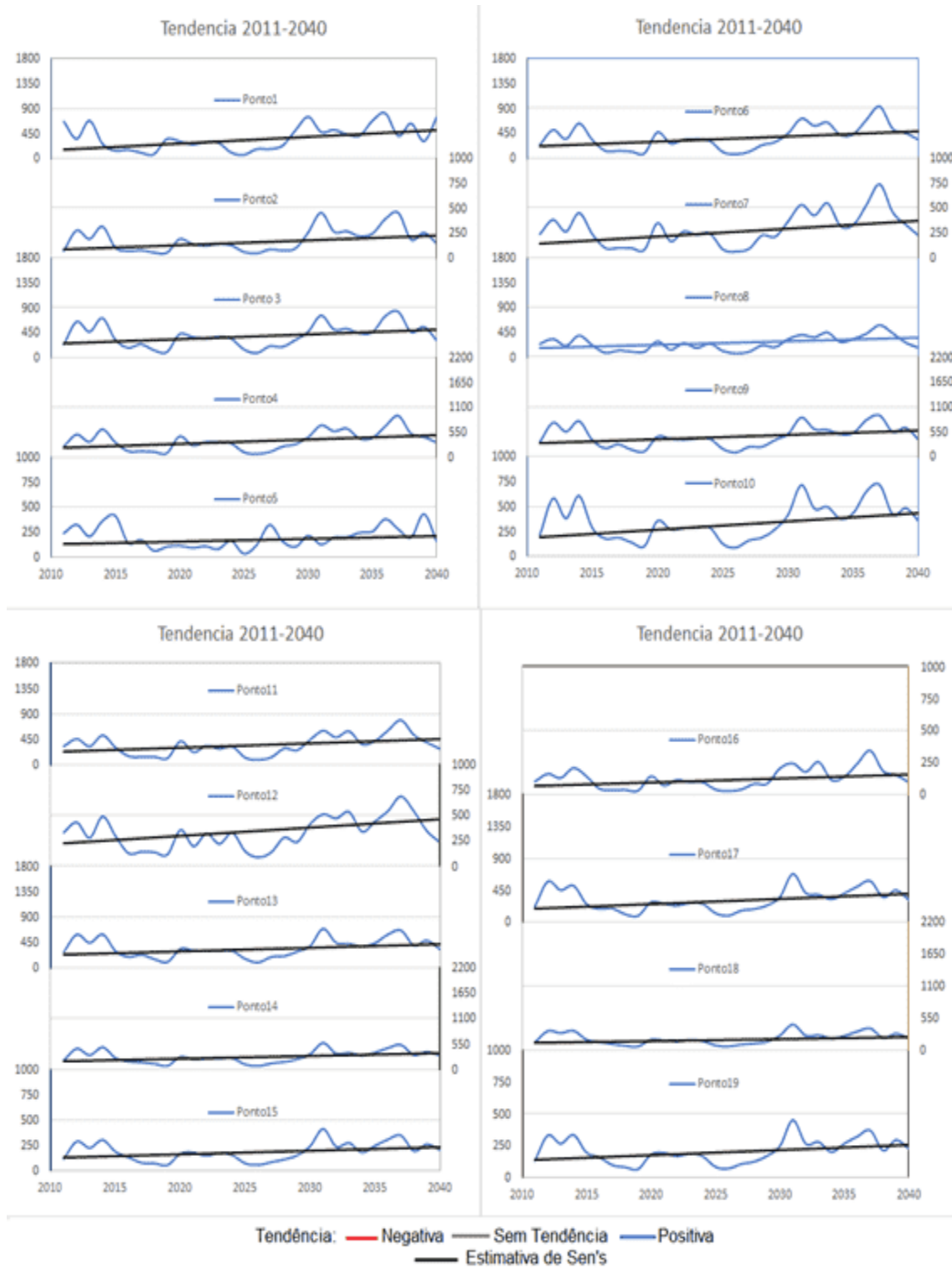


Figura 4.22 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5.

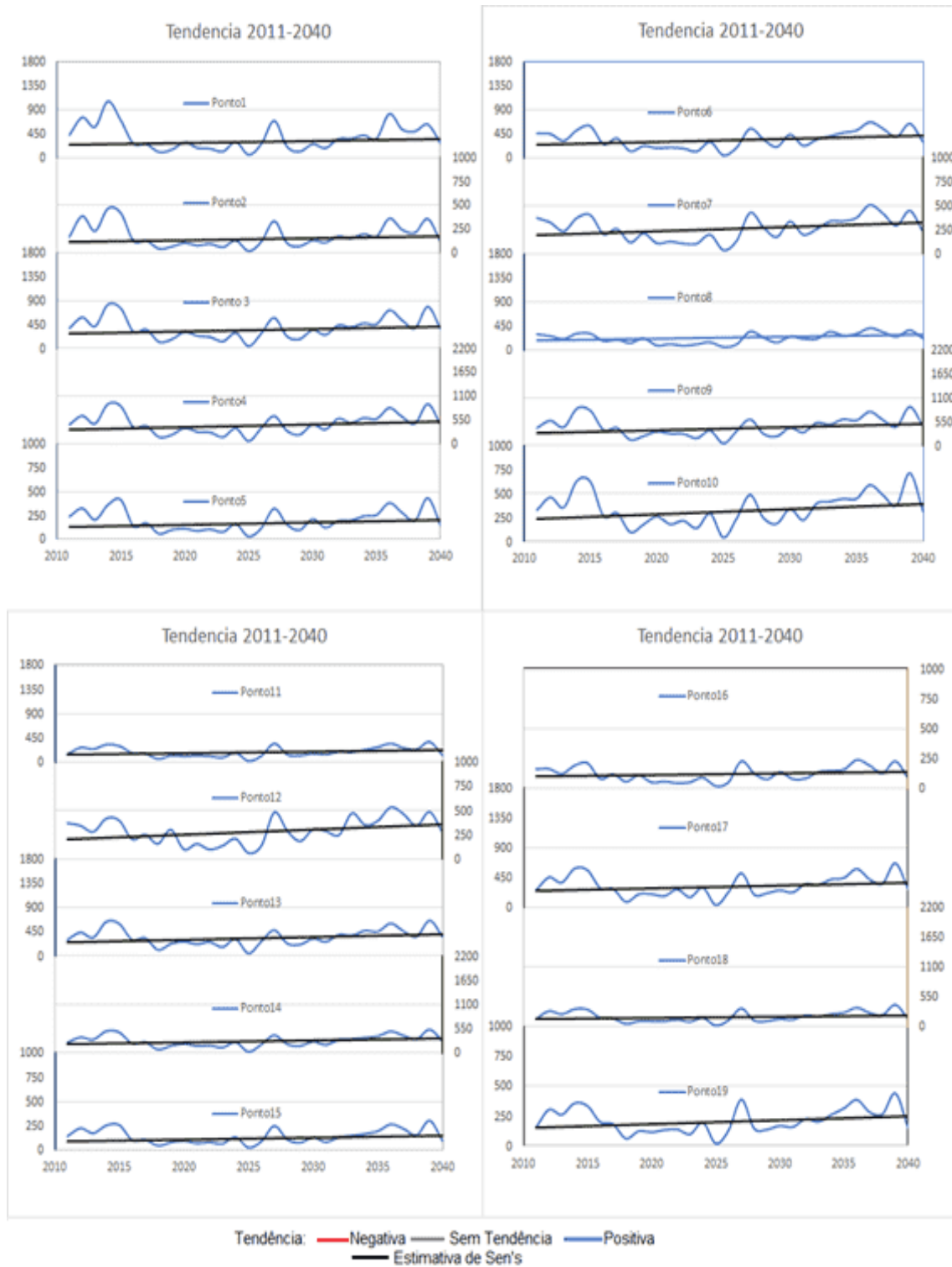


Figura 4.23 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5.

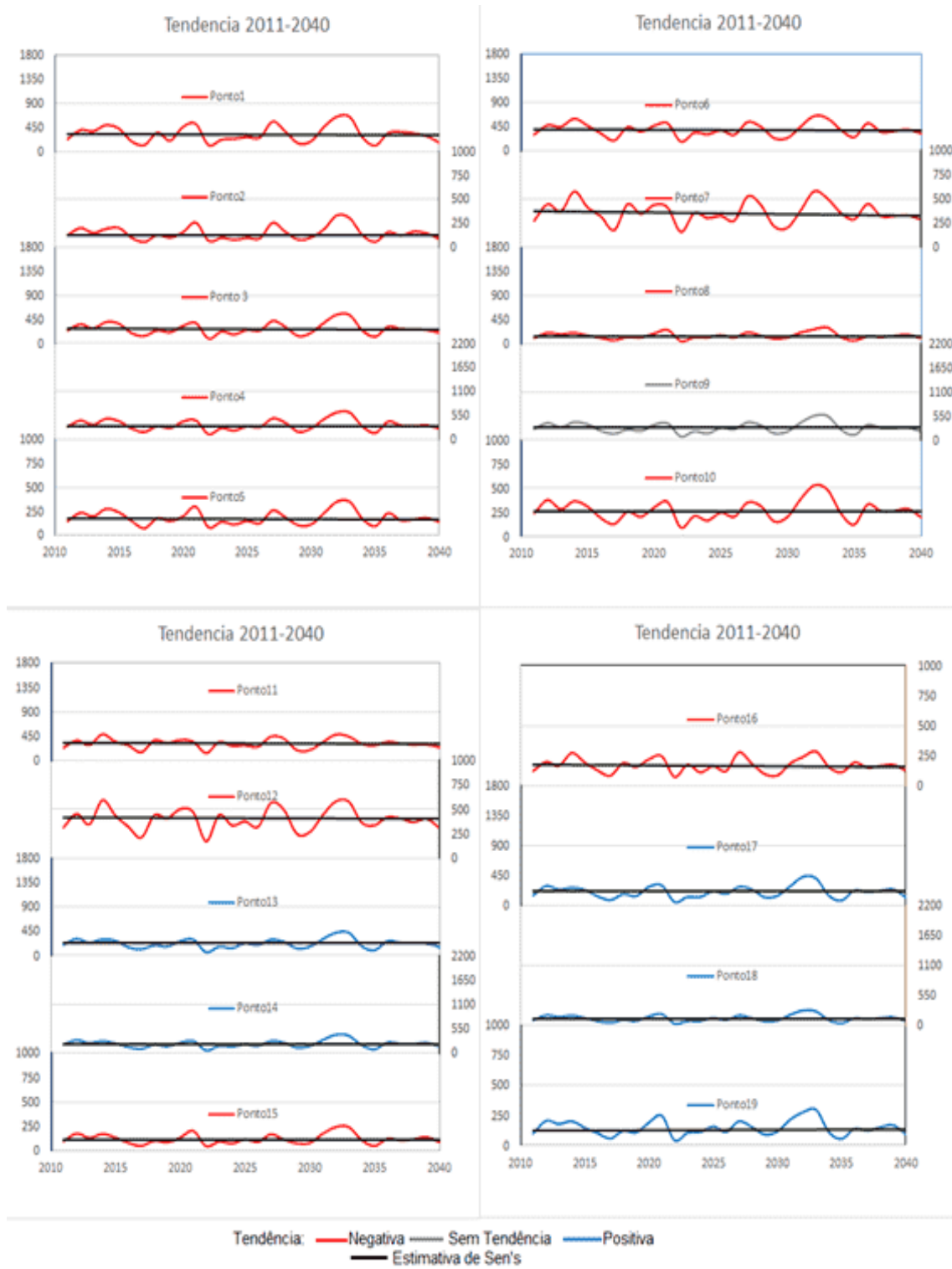
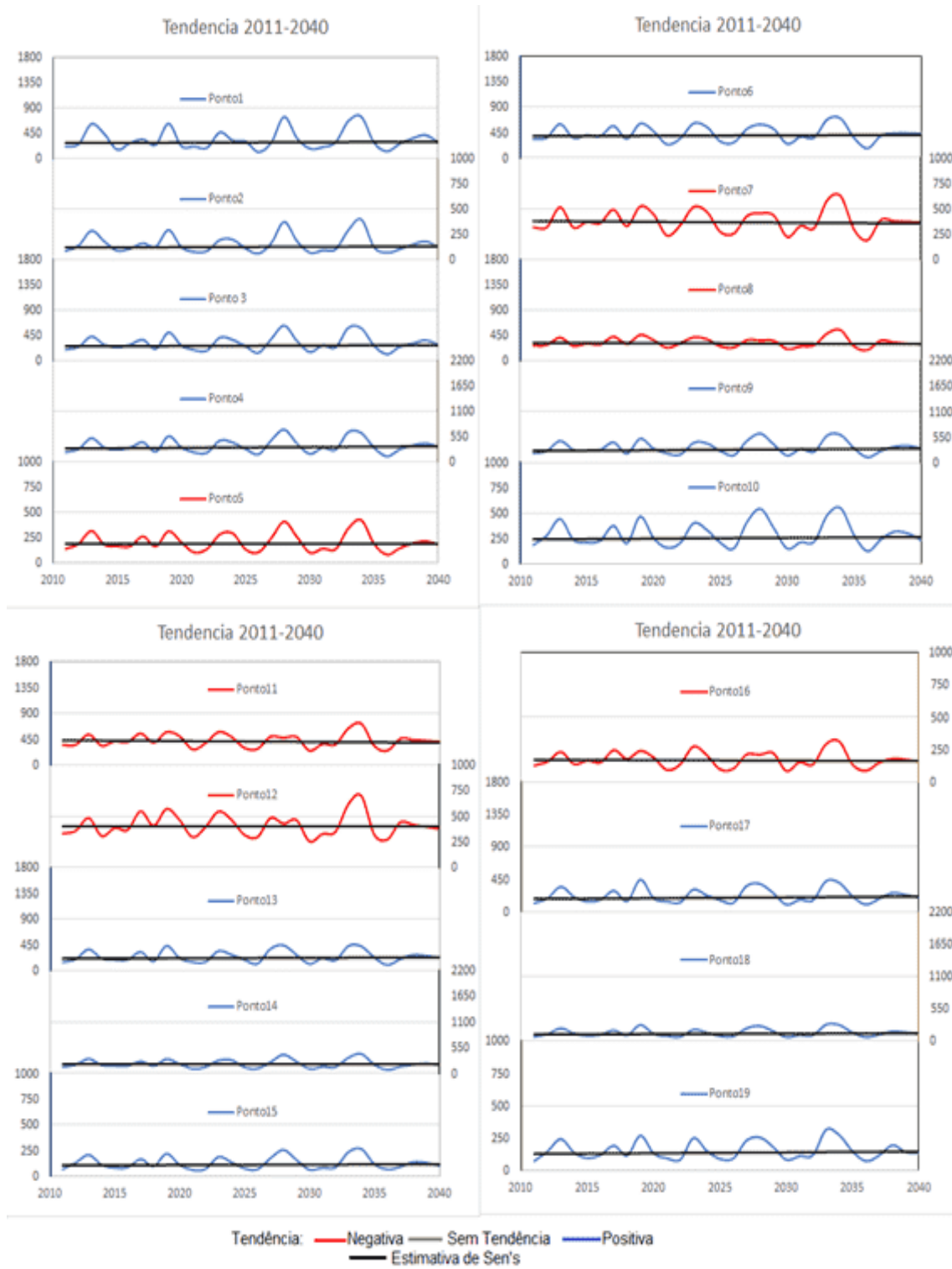




Figura 4.24 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2011-2040 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5



São apresentados os gráficos do teste de tendência para o período de 2041-2070 para os cenários ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.25) e 8,5 (Figura 4.26) e ETA/MIROC5 4,5 (Figura 4.27) e 8,5 (Figura 4.28), nota-se que nos cenários do ETA/HadGEM2-ES há uma mudança nas inclinações da reta em relação ao período anterior de 2011-2040, sendo que, a inclinação da reta é negativa, ou seja, indica diminuição do escoamento nos dois cenários do ETA/HadGEM2-ES. As inclinações das retas são bem acentuadas apontando para uma tendência muito acentuada de diminuição do escoamento. Quando se observa os cenários do ETA/MIROC5, estes mostram uma inclinação positiva da reta de tendência mantendo a mesma característica do período anterior, porém, contrário ao cenário do ETA/HadGEM2-ES. Nota-se que as retas são bem inclinadas em alguns pontos e em outros são bem mais paralelas a reta de tendência, pois, apesar de indicar aumento do escoamento estes podem não ser tão acentuados a ponto de causar eventos extremos.

Figura 4.25 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

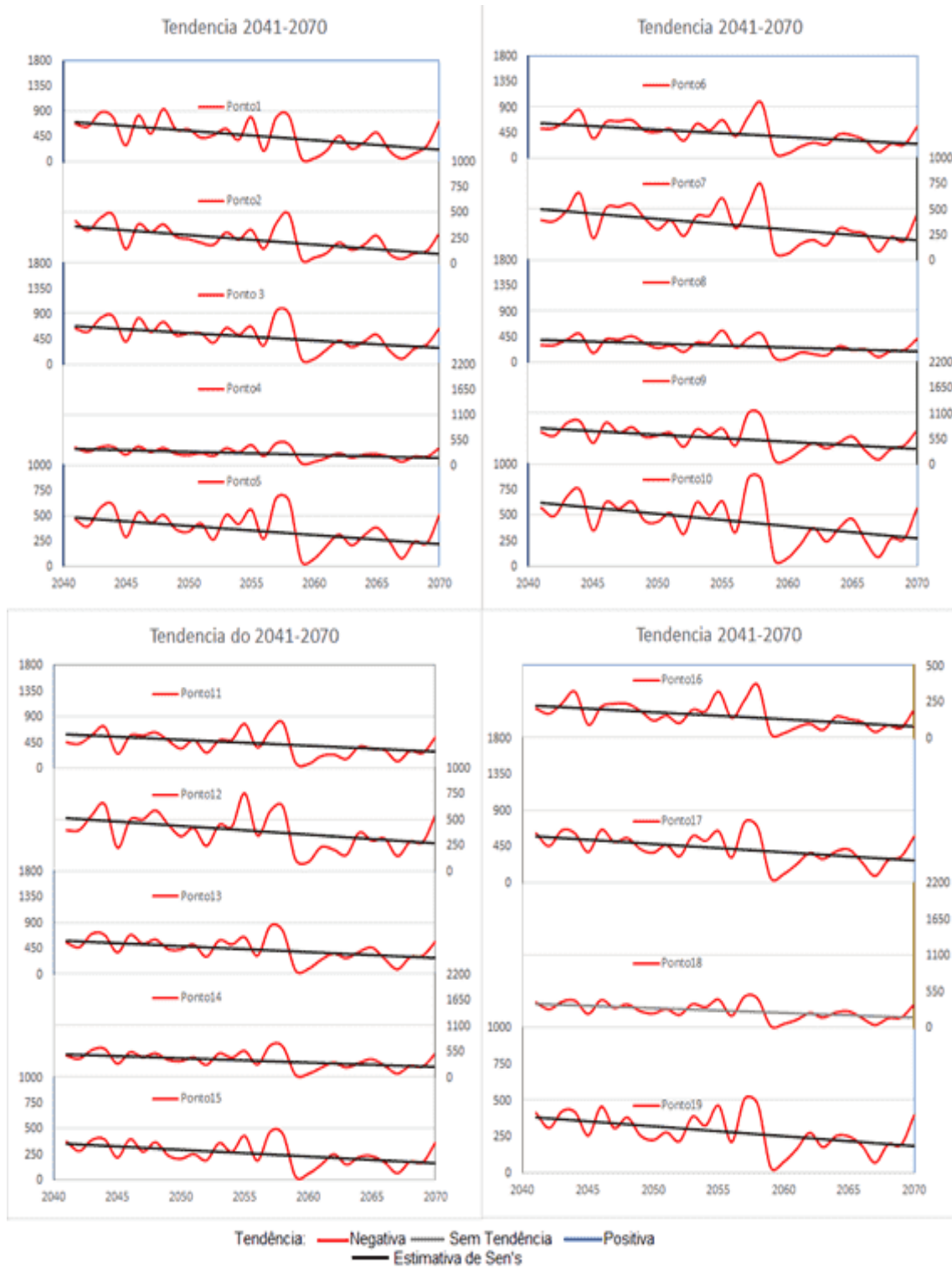


Figura 4.26 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5.

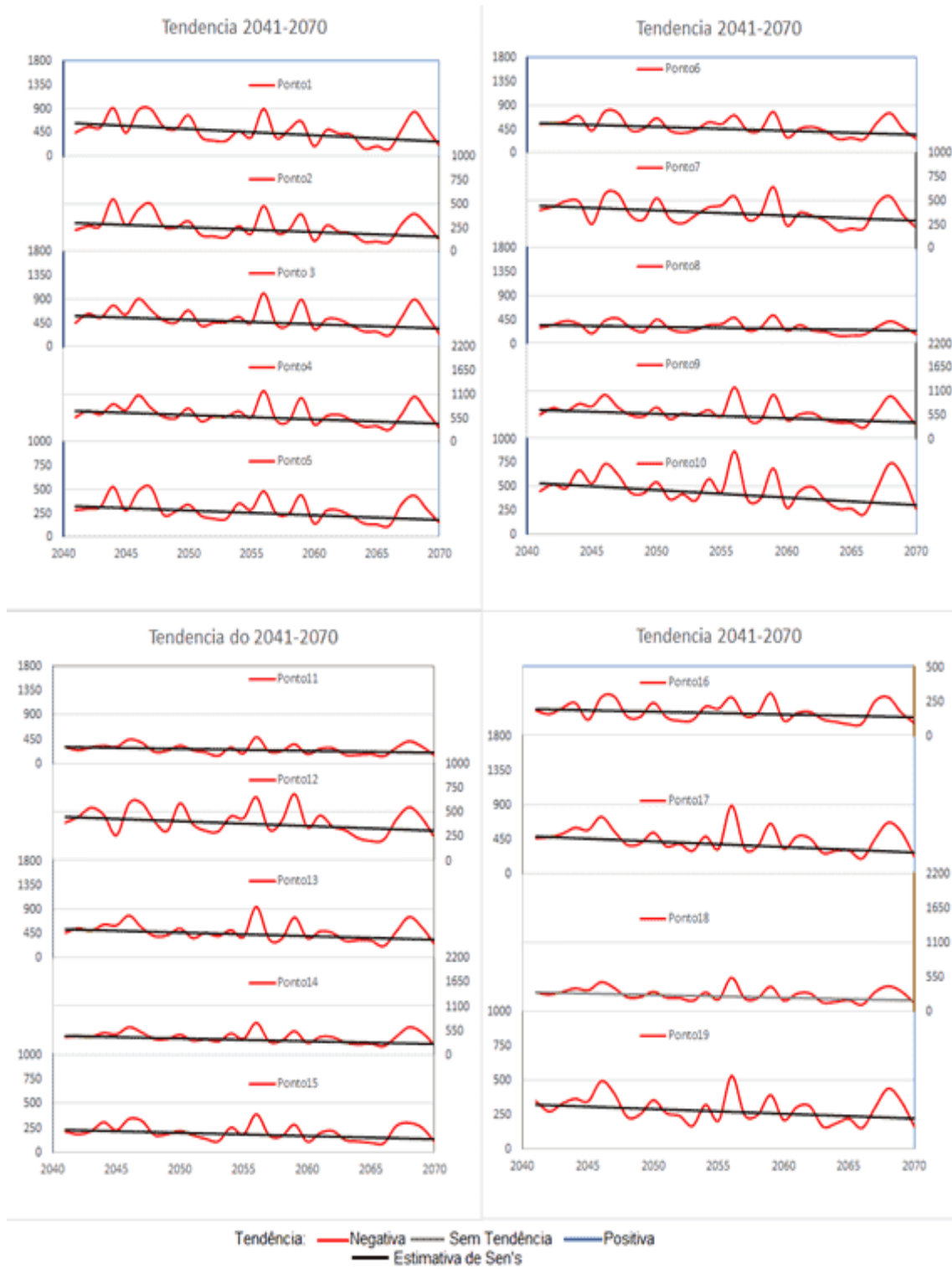


Figura 4.27 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5.

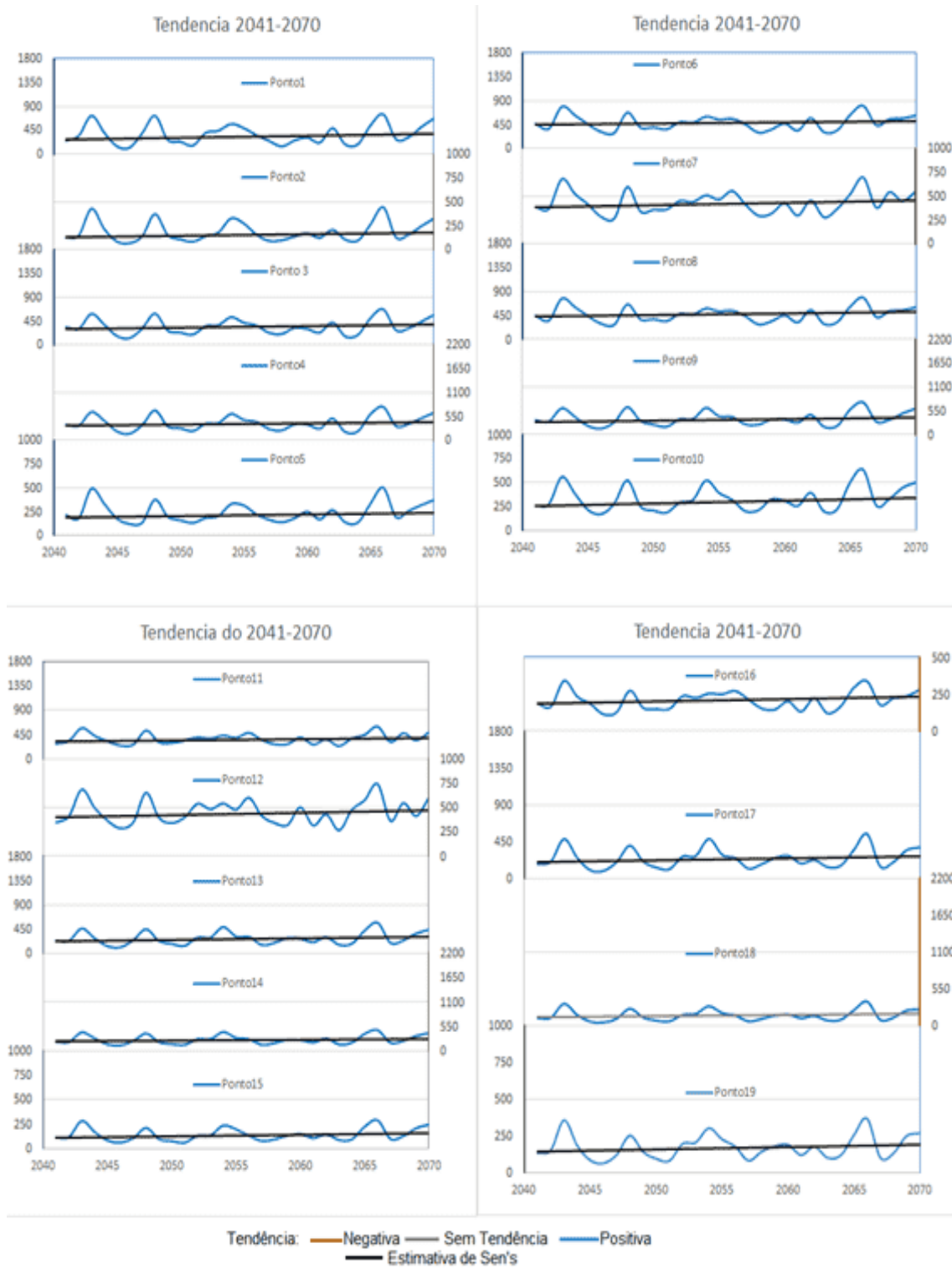
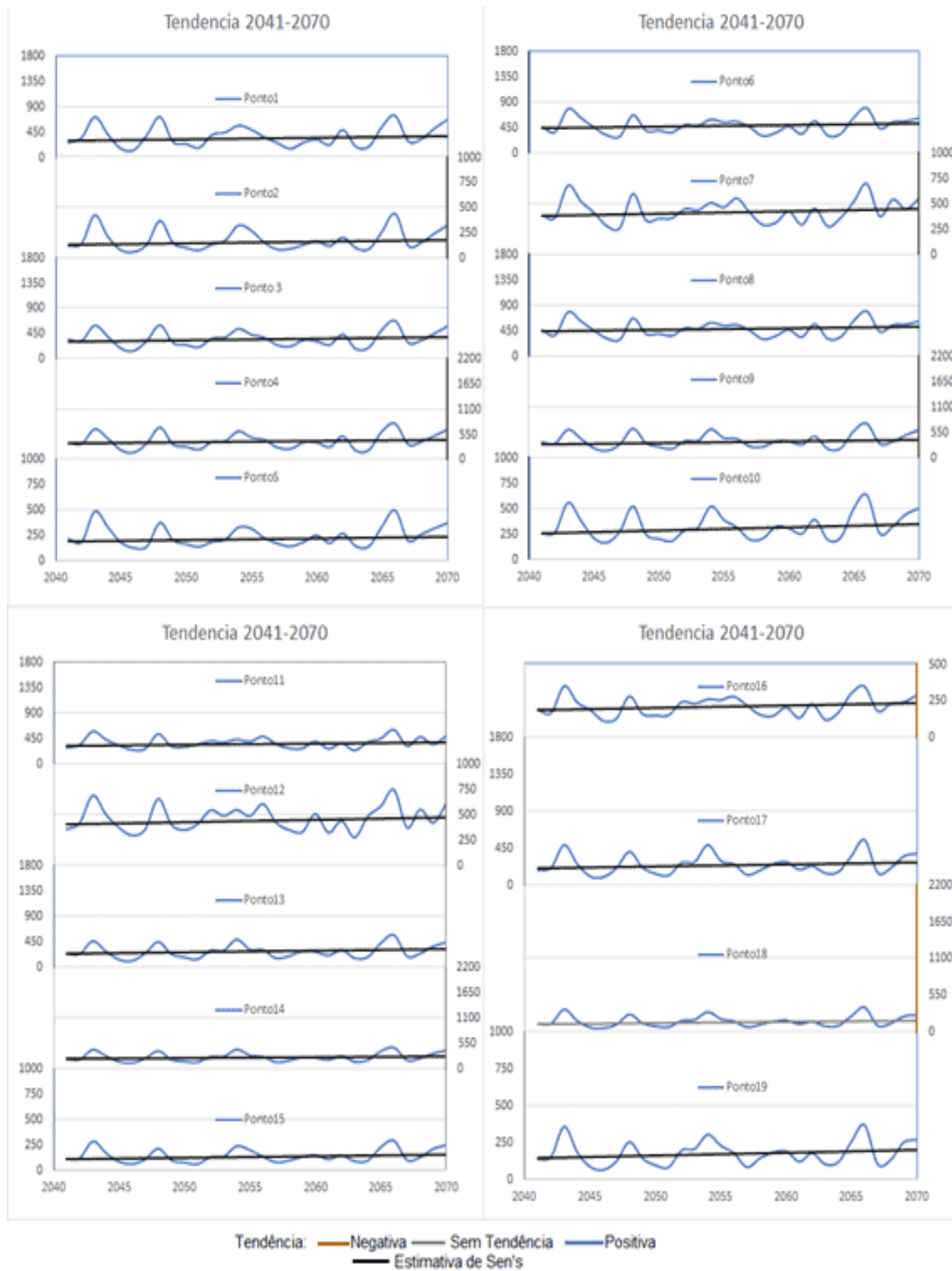


Figura 4.28 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2041-2070 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5



São apresentados os gráficos de tendência para o período de 2071-2099, nos cenários do ETA/HadGEM2-ES 4,5 (Figura 4.29) e 8,5(Figura 4.30) e ETA/MIROC5 4,5(Figura 4.31) e 8,5 (Figura 4.32), nota-se que o ETA/HadGEM2-ES as retas de inclinação são positivas, mantendo o mesmo sentido do período de 2041-2070, e com isso, indicando diminuição do escoamento. Já o ETA/MIROC5, também mantém o mesmo sentido, com inclinação positivas das retas na maioria dos pontos, sendo que essas inclinações não são tão acentuadas.

Figura 4.29 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 4,5.

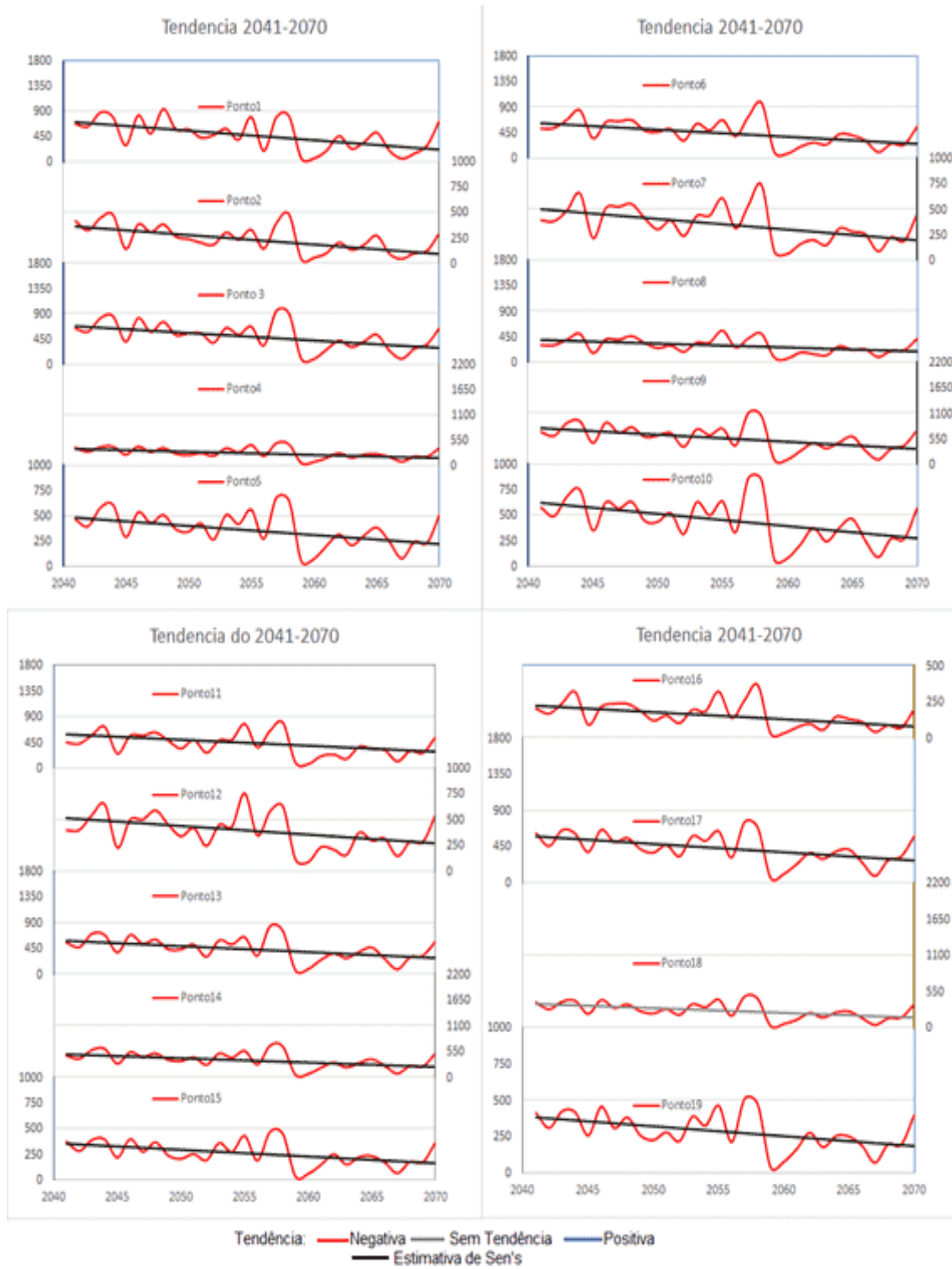




Figura 4.30 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/HadgemES RCP 8,5.

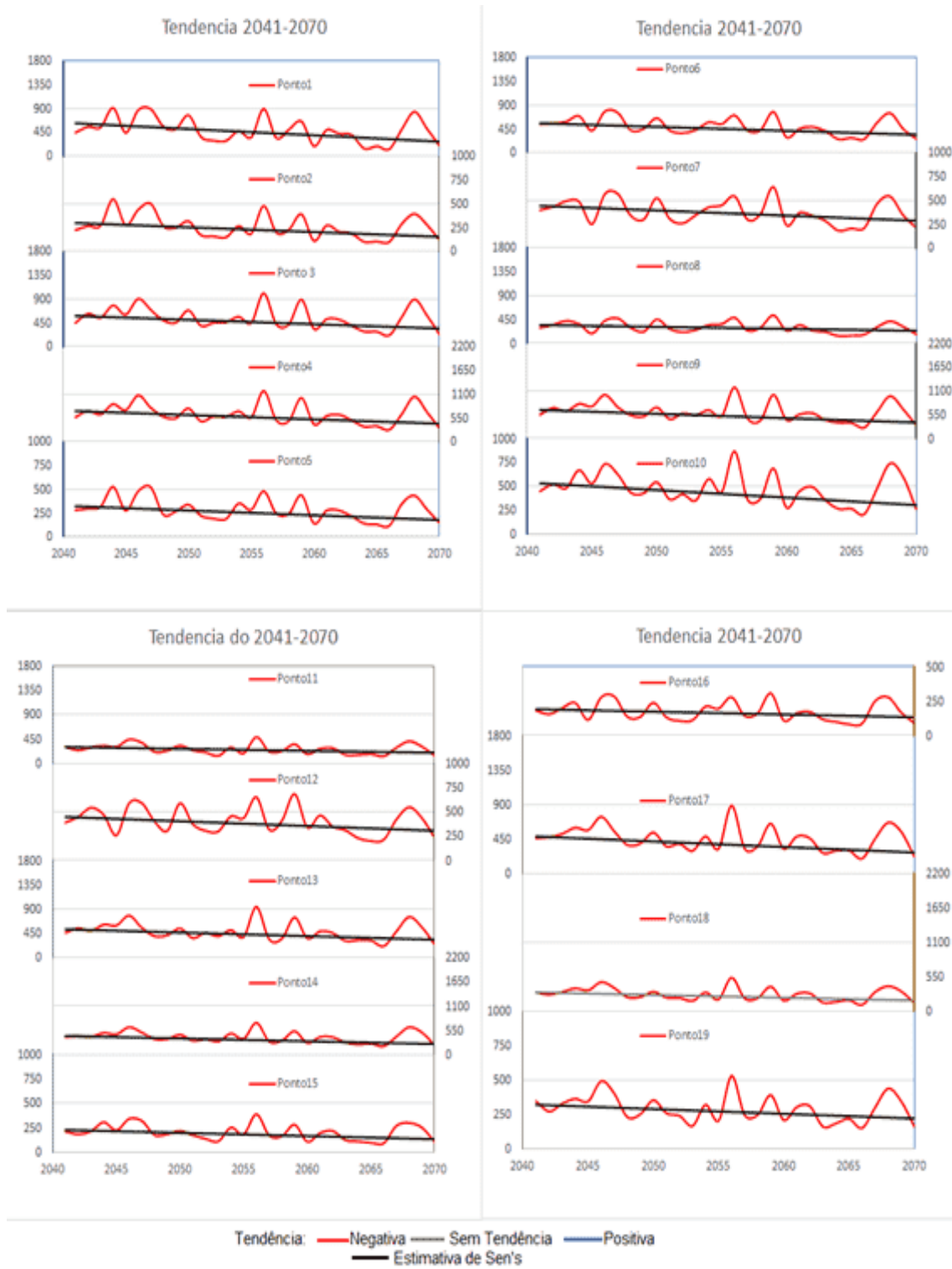


Figura 4.31 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 4,5.

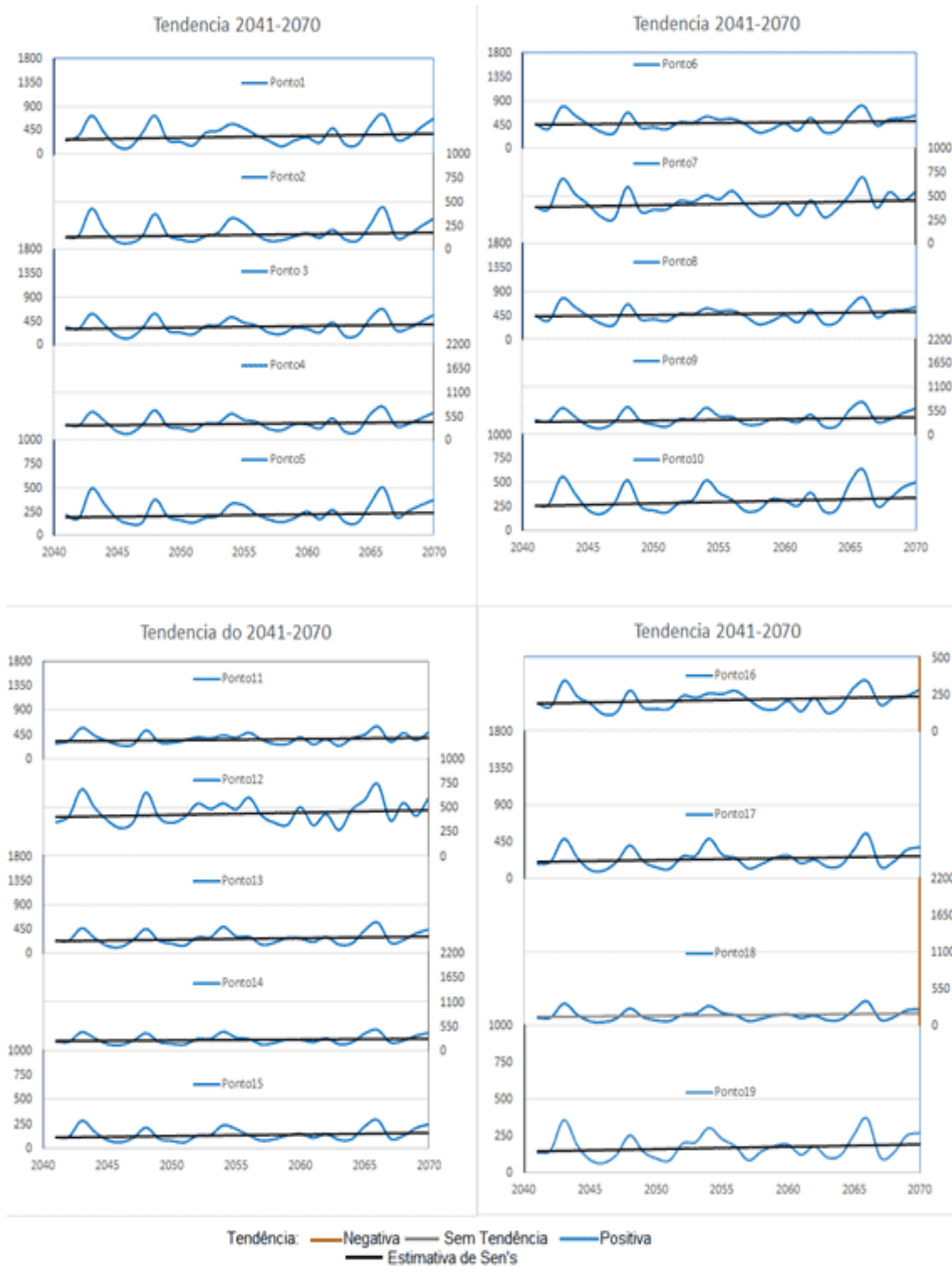
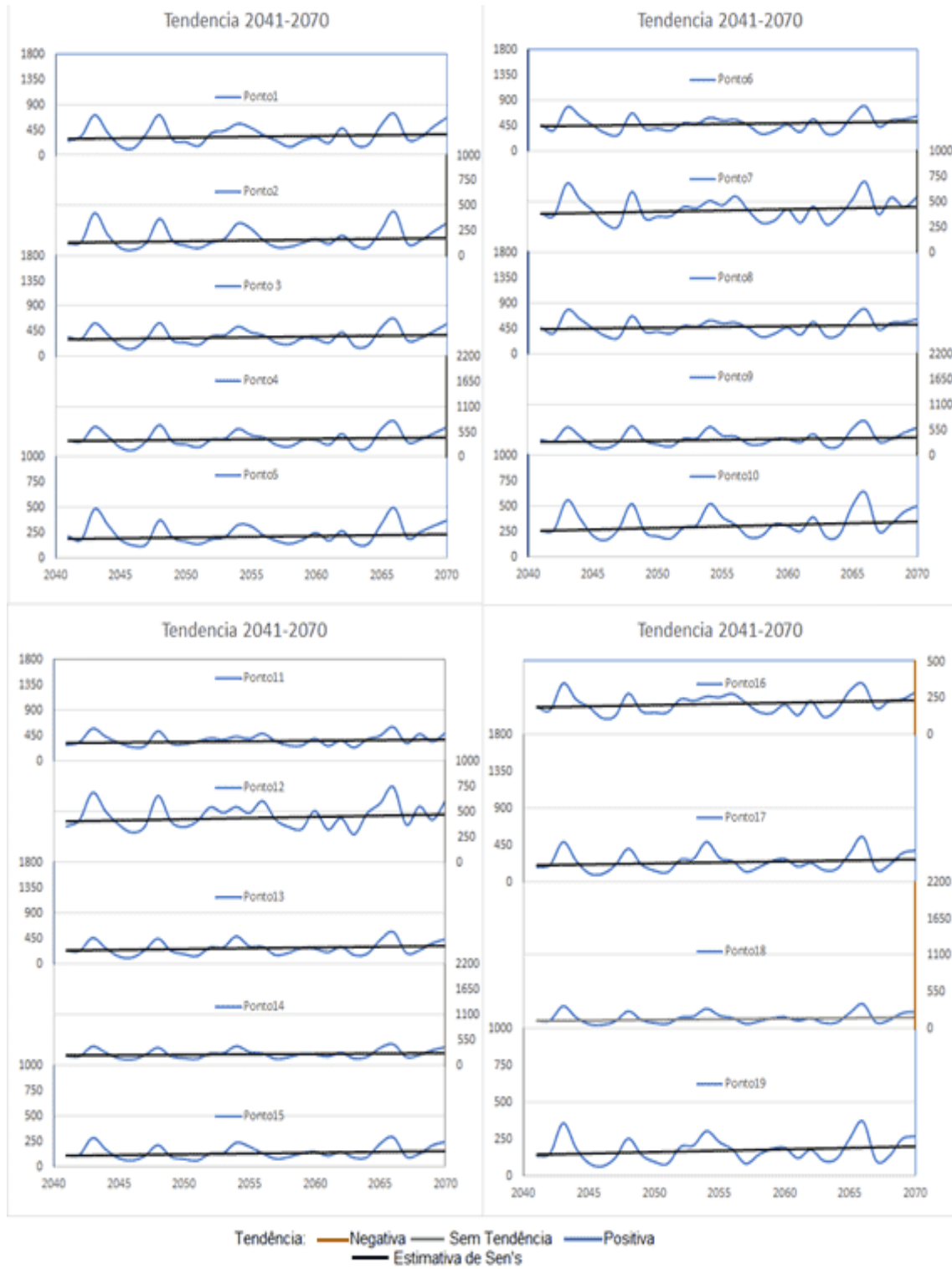
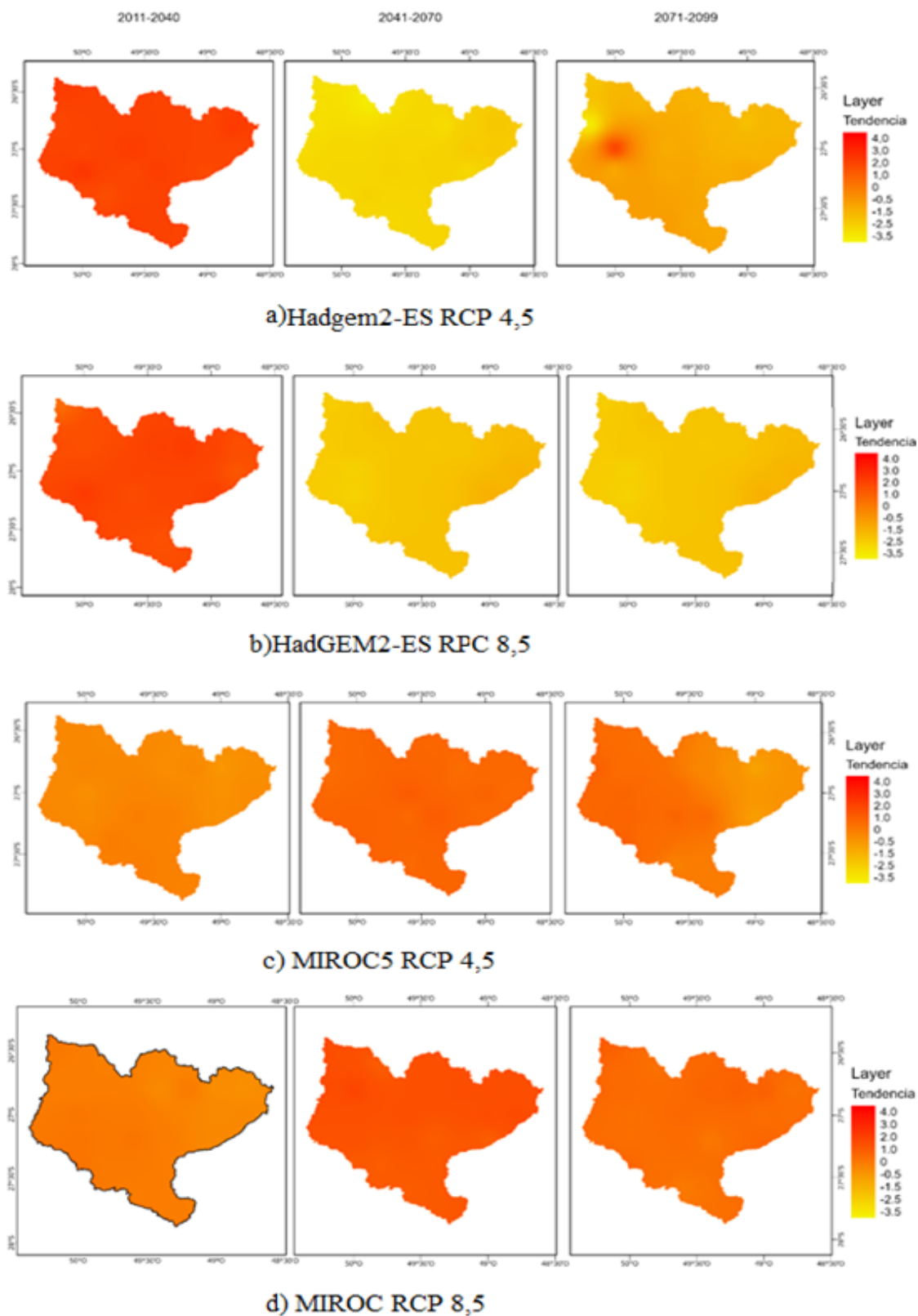


Figura 4.32 - Inclinação de Sen's do teste de tendência para o período de 2071-2099 para o cenário ETA/MIROC RCP 8,5



São apresentados os mapas da interpolação da tendência na área da Bacia do Itajaí no cenários ETA/HadGEM2-ES RCP 4,5 (Figura 4.33a) e ETA/HadGEM2-ES RCP 8,5, nota-se que cenário ETA/HadGEM2-ES (Figura 4.33b), no período de 2011-2040 os valores de tendência acima de 2,0, indica aumento do escoamento em toda a bacia, representado pela coloração alaranjado bem forte em toda área, passando para um tom de amarelo bem claro, mostrando que no período de 2041-2070 haverá uma diminuição do escoamento e no período de 2071-2099, apesar de ser menos acentuado essa diminuição continua, sendo assim, o ETA/HadGEM2-ES nos dois cenários de emissões RCP 4,5 e RCP 8,5, indicam aumento do escoamento no curto prazo e, no médio e longo prazo ocorrerá diminuição do escoamento. A mudança climática é um dos fatores de grande influência na diminuição do escoamento superficial (LEI et al., 2021). E segundo Shiferaw et al. (2018), os quais, em geral o aumento da temperatura diminui o escoamento superficial em nível de bacia. Já no cenário ETA/MIROC5 RCP 4,5 (Figura 4.33c) e ETA/MIROC RCP 8,5 (Figura 4.33d), observa-se que todos os períodos analisados indicaram aumento do escoamento em toda a área da bacia, sendo que, no curto prazo de 2011-2040, a tendência é fraca, no médio prazo é quando o aumento é mais forte, e no longo prazo, continua um aumento de moderado a forte. Ribeiro Neto et al. (2016) analisou o escoamento superficial no Brasil e encontrou aumento do escoamento na região Sul para os dois cenários de RCP 4,5 e 8,5.

Figura 4.33 - Mapa de interpolação da tendência de escoamento superficial na Bacia do Itajaí para os cenários ETA/HadGEM2-ES a) 4,5, b) 8,5 e ETA/MIROC5 c) 4,5 , d) 8,5.



Observa-se que para o cenário ETA/HadGEM2-ES 4,5, no curto prazo a tendência indicou aumento de moderado a forte do escoamento, no médio prazo a tendência mostrou aumento muito forte e a longo prazo uma tendência de moderada a forte de diminuição do escoamento. E, para o cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5, a tendência mostra um sinal fraco no curto-prazo de aumento do escoamento e, no médio prazo o sinal da tendência foi de forte a muito forte, e no longo prazo o sinal mostrou uma tendência de moderada a muito forte de diminuição do escoamento.

No cenário ETA/MIROC5 4,5, a curto prazo o sinal da tendência foi fraco, no médio prazo foi de moderado a forte e no longo-prazo foi de fraco a moderado de aumento do escoamento nos três períodos. E, no cenário ETA/MIROC5 8,5, o sinal da tendência se mostrou fraco no curto prazo, de moderado a forte no médio prazo e de fraco a moderado a longo-prazo para aumento do escoamento. Na bacia do Rio Grande, [Oliveira et al. \(2017\)](#) encontraram tendência de diminuição das vazões sob os cenários RCP 4,5 e RCP 8,5 até o fim do século. [Brouziyne et al. \(2018\)](#) encontraram redução da vazão e aumento na estação seca, sendo que, esta diminuição e este aumento seriam maiores sob o cenário RCP 4,5 em relação ao RCP 8,5.

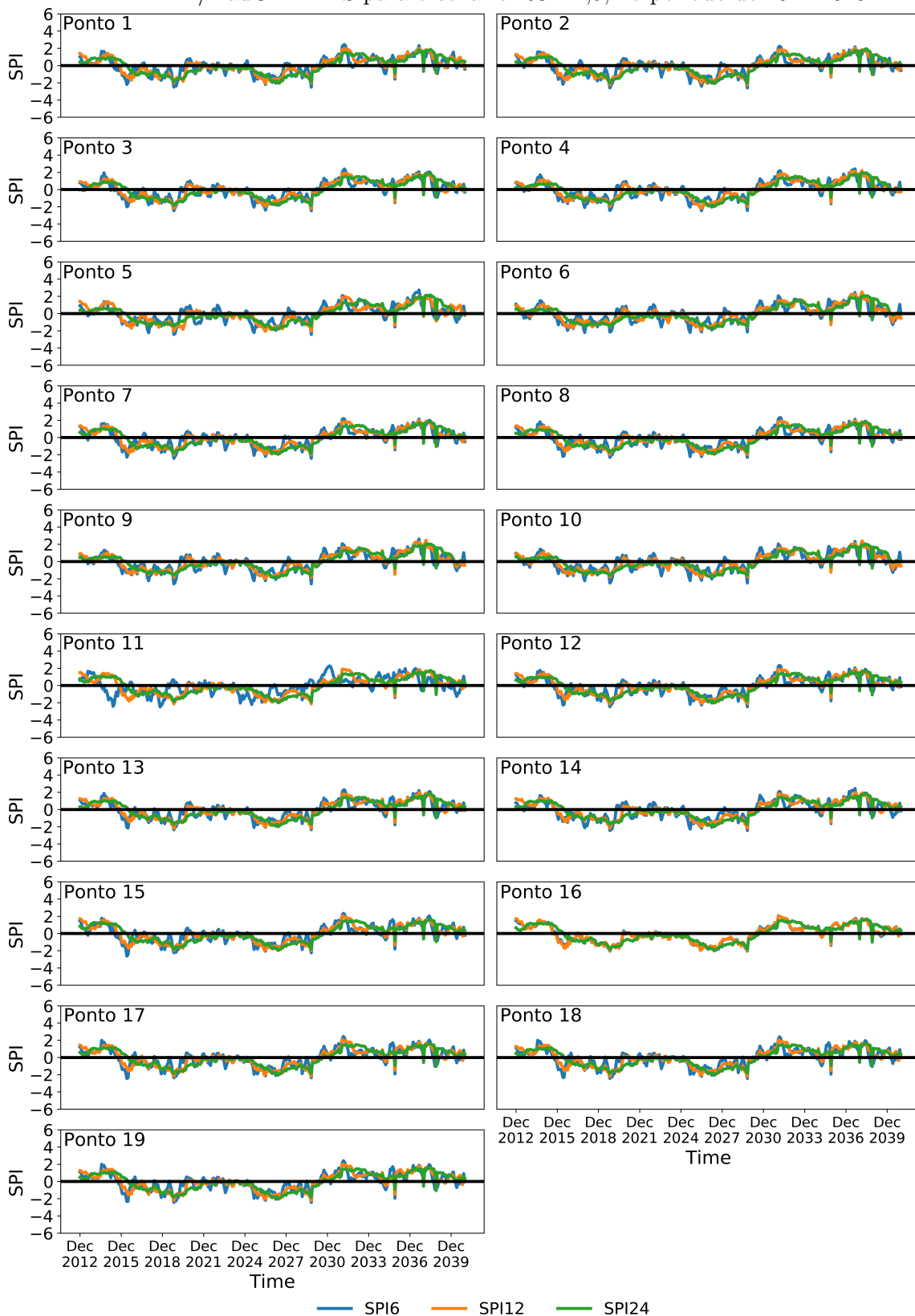
Nota-se que o comportamento do escoamento é bem semelhante ao da precipitação, nos dois modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5, nos dois cenários de emissões RCP 4,5 e RCP8,5, o sinal da tendência foi mais significativo no curto-prazo. Isto mostra-que a resposta da bacia ao ciclo hidrológico, quando tendência de precipitação foi positiva indicando aumento das chuvas, a tendência do escoamento também indicou aumento, e quando a tendência das chuvas foi de diminuição, o escoamento também diminui. Um aumento nos extremos de escoamento resultaria em uma condição de mais desastres naturais associados a inundações e secas ([RIBEIRO NETO et al., 2016](#)). [Lei et al. \(2021\)](#) estudaram os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas em uma bacia da China, utilizando o teste de

Mann Kendall e verificaram que o escoamento aumentou durante as estações de cheias devido as mudanças climáticas.

#### **4.1.3.2 Índices hidroclimáticos**

Na Figura 4.34 são apresentados os valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos da grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040. Observa-se que todos os pontos seguem o mesmo padrão dos gráficos, por volta do ano de 2016 até o ano de 2020, os valores do SPI 6, 12 e 24 começam a diminuir para valores abaixo de 0 até -2,5 isto mostra que a bacia passou por um período severamente a extremamente seco. Este período coincide com o período que a Bacia do Itajaí passou por déficit de água e causou prejuízos em alguns municípios da região, principalmente de 2018 a 2020, o nível dos principais rios que abastecem a região do Vale do Itajaí, ficaram abaixo do normal e houve municípios onde a população começou a sofrer com a falta d'água (EPAGRI, 2020). No ano de 2024 a 2028 os valores de SPI voltam a ficar abaixo de -2, depois começa o excesso de chuvas, com valores de SPI chegando à 2,5.

Figura 4.34 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.





Na Figura 4.35 estão representados os gráficos com os valores do SPI (6,12 e 24) em todos os pontos da grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, o período de 2041-2070, nota-se que os valores de SPI 6, SPI 12 e SPI 24 foram de 2,6, 2,3 e 2, respectivamente, os quais indicam excesso de precipitação, sendo que por volta de 2060 ocorre uma diminuição nas precipitações com os valores de SPI abaixo de -2, indicando um período extremamente seco, sendo que, com valores e SPI6 de -3,8, SPI 12 de -3,4 e o SPI 24 -3, já mostrando a recuperação das chuvas depois de quase 24 meses de resposta da bacia. E, logo depois da recuperação ocorre excesso de chuvas com valores de SPI em torno de 0 a 1, dentro da normalidade. No período de 2071-2099 representado nos gráficos da Figura 4.36, com os valores do SPI (6,12 e 24) em todos os pontos da grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, observa-se que os valores máximos do SPI foram de 2,2 nos períodos que indicam excesso de chuvas e de -3,4 no período de déficit da precipitação.

Figura 4.35 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA /HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070.

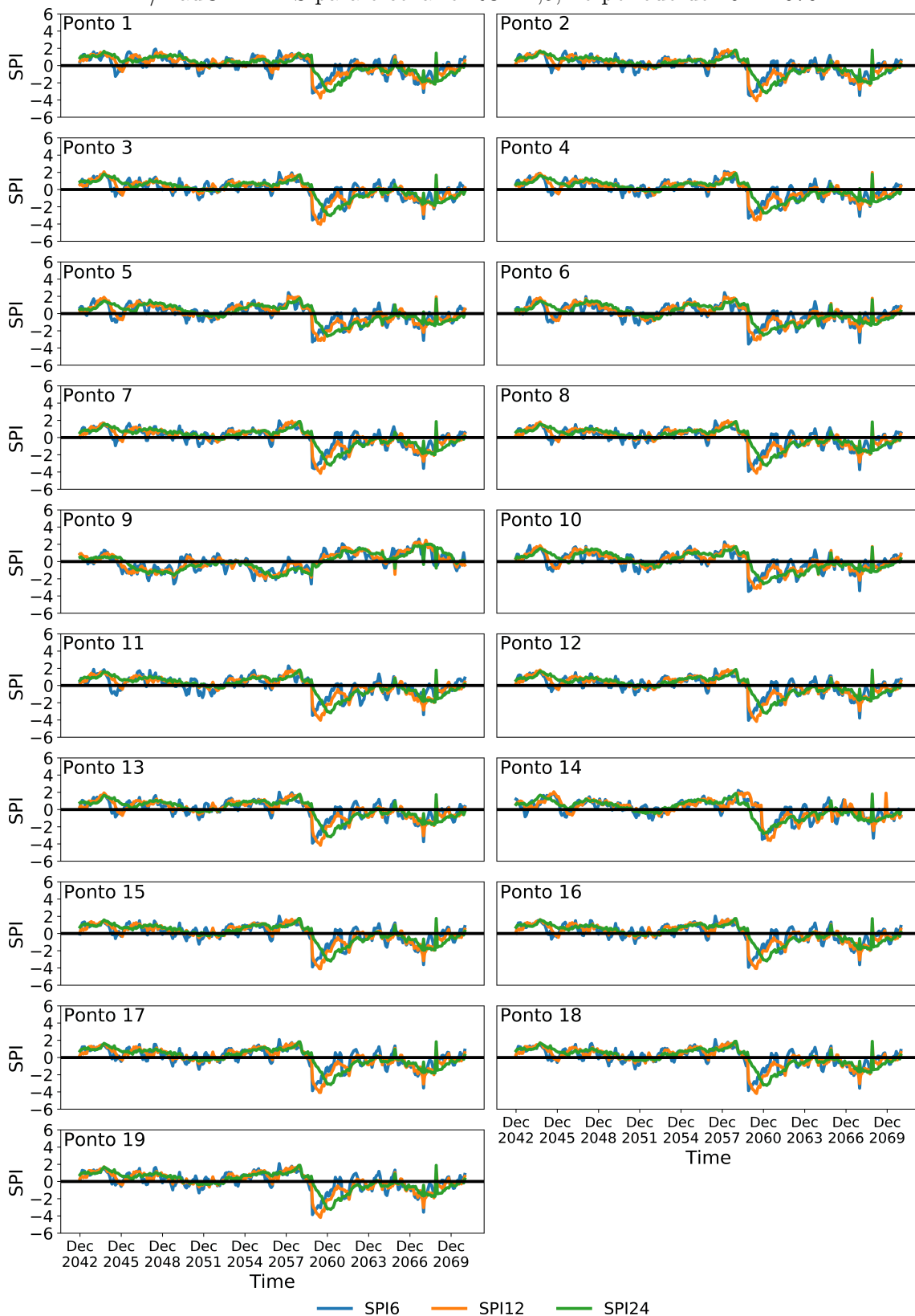
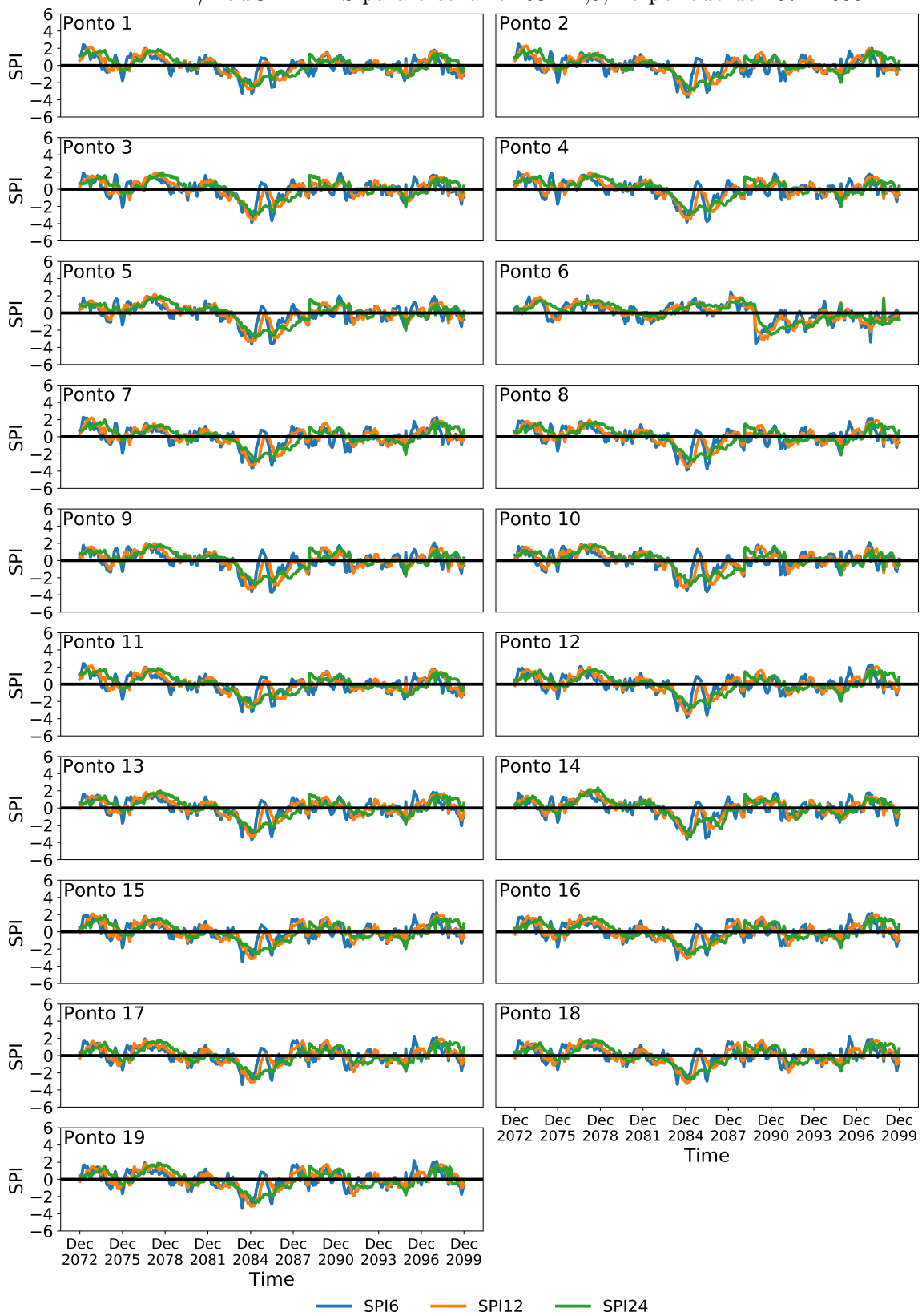


Figura 4.36 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099.



No cenário ETA/HadGEM2-ES 8,5, os valores de SPI para o período de 2011-2040 estão representados na Figura 4.37, mostram que alguns períodos que poderão ocorrer diminuição da precipitação, como os anos 2025 e 2026, com valores de máximos do SPI6 e SPI12 em torno de -4, e o SPI24 que ocorre com defasagem e começa a mostrar recuperação da bacia com valores de -3, ou seja, período extremamente seco. Já, nos períodos de excesso de precipitação os valores máximos de SPI foram de 1,95. No médio prazo (Figura 4.38), observa-se que os valores de máximos do SPI, que mostram excesso de precipitação foram de 2,7 e os que indicaram diminuição das chuvas foram de -2,2. O início do período de 2071-2099 (Figura 4.39), os valores de SPI começa mostrando déficit de chuvas, com valores máximos de SPI6 podendo atingir -2,8. E, nos períodos de excesso de chuvas os valores de SPI podem chegar a 1,8.

Nota-se que os valores máximos do SPI para o cenário ETA/HadGEM2-ES RCP 4.5, em todos os períodos analisados, ficaram todos acima de 2 e menor que -2, isto, mostra que a bacia deve passar por extremos de excesso e déficit de água, respectivamente, causando inundações e secas na região. O pior cenário do ETA/HadGEM2-ES RCP 4,5, foi no médio prazo, quando os valores de SPI podem chegar -3,8 e 2,6, períodos extremamente secos e úmidos.

No cenário ETA/HadGEM2-ES RCP 8,5, os valores do SPI variam de 1,8 a 2,7, ou seja, períodos severamente a extremamente úmidos, o que pode levar a ocorrência de inundações. E, valores de SPI entre -2,2 a -4, períodos extremamente secos, o que pode causar secas. Neste cenário, no curto prazo, foi quando o modelo indicou o período mais extremo quanto a ocorrência de secas e no médio prazo, o período extremamente úmido.

Figura 4.37 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

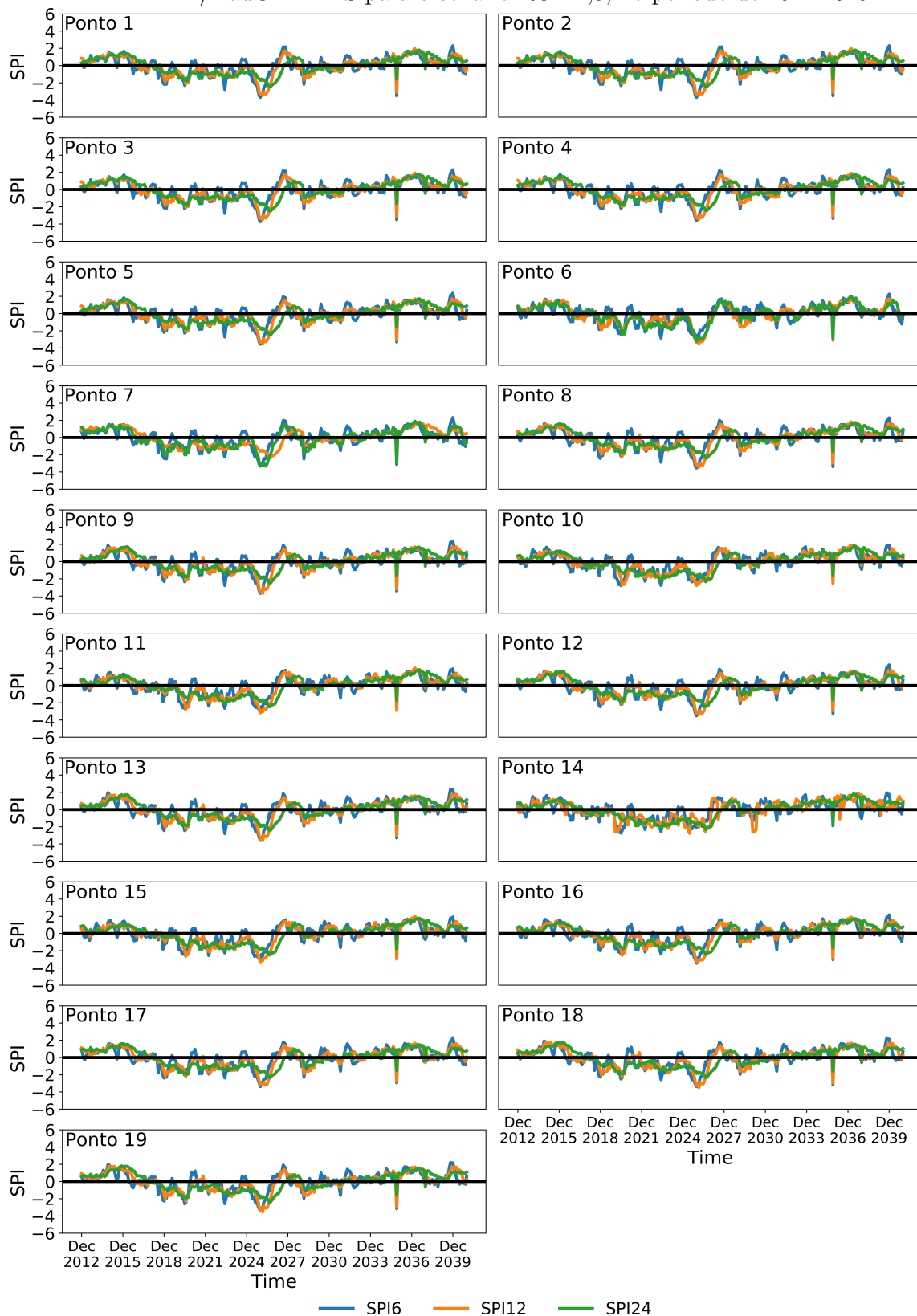


Figura 4.38 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070.

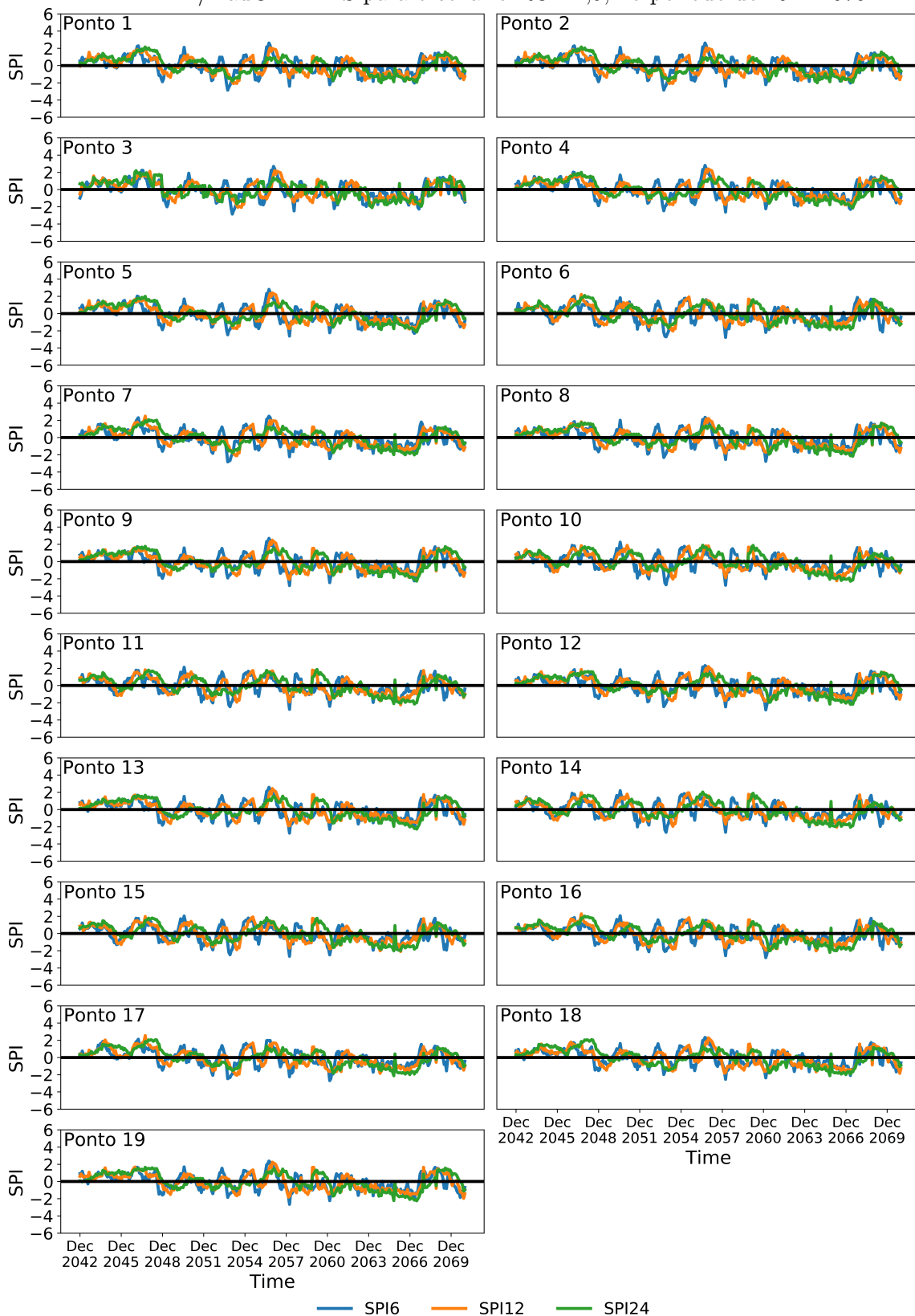
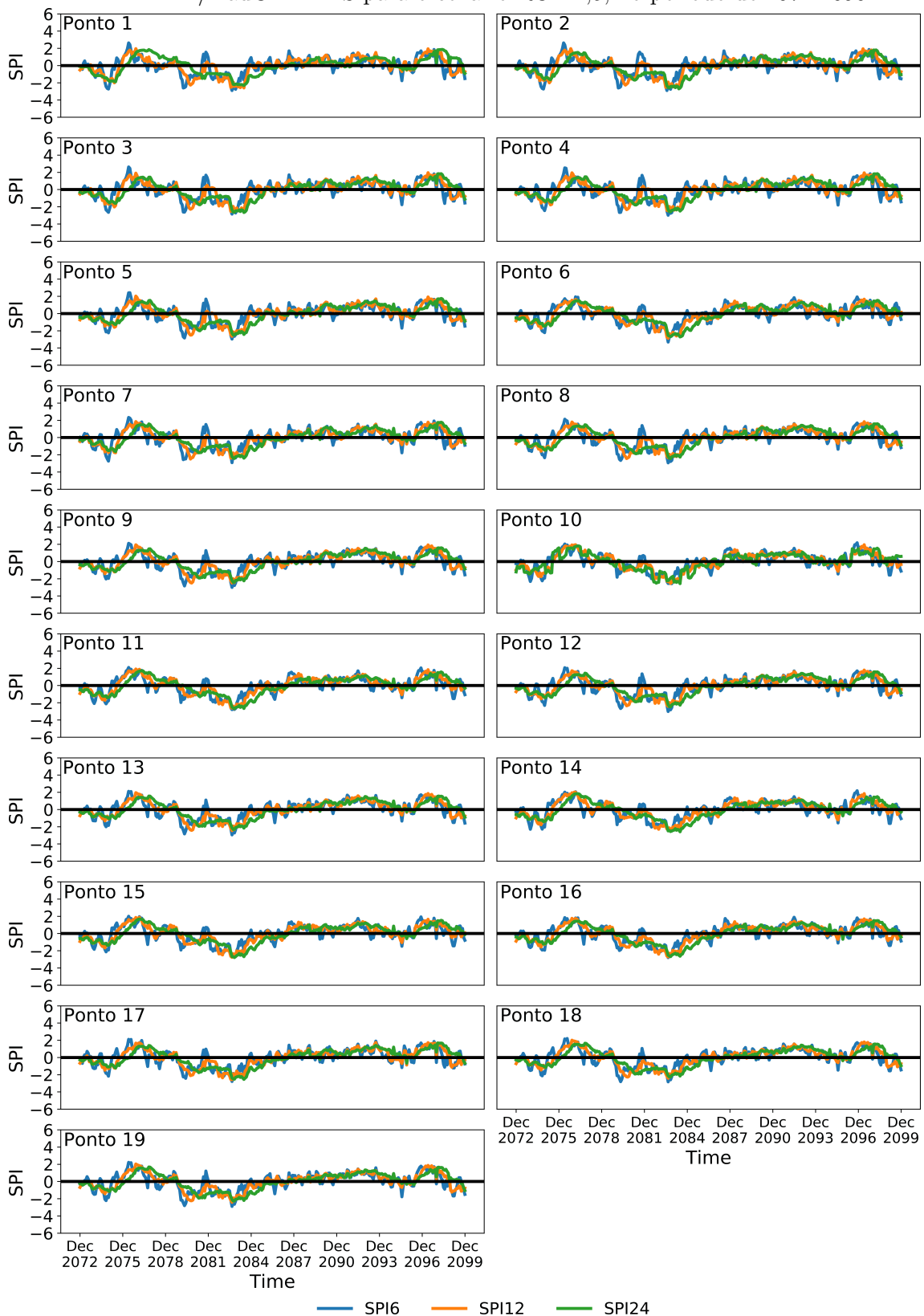


Figura 4.39 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2090.



Observa-se na Figura 4.40 que representa os gráficos com os valores do SPI 6, 12 e 24, para o cenário ETA/MIROC5 4,5 no período de 2011-2040, que no ano de 2016 a 2020, ele consegue mostrar o período em que a bacia passou por uma seca. Durante este período o valor máximo de SPI que indicaram excesso de chuvas foram de 2,4 e de -2,7 nos períodos que mostraram diminuição da precipitação.

Na Figura 4.41, no período de 2041-2070, os valores máximos do SPI foram de 2,0 e -2,6, respectivamente, indicando excesso e déficit de chuva. E, no longo prazo, os valores máximos de SPI mostrando excesso e déficit de chuvas foram, respectivamente, 2,7 e -3,1 (Figura 4.42).



Figura 4.40 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

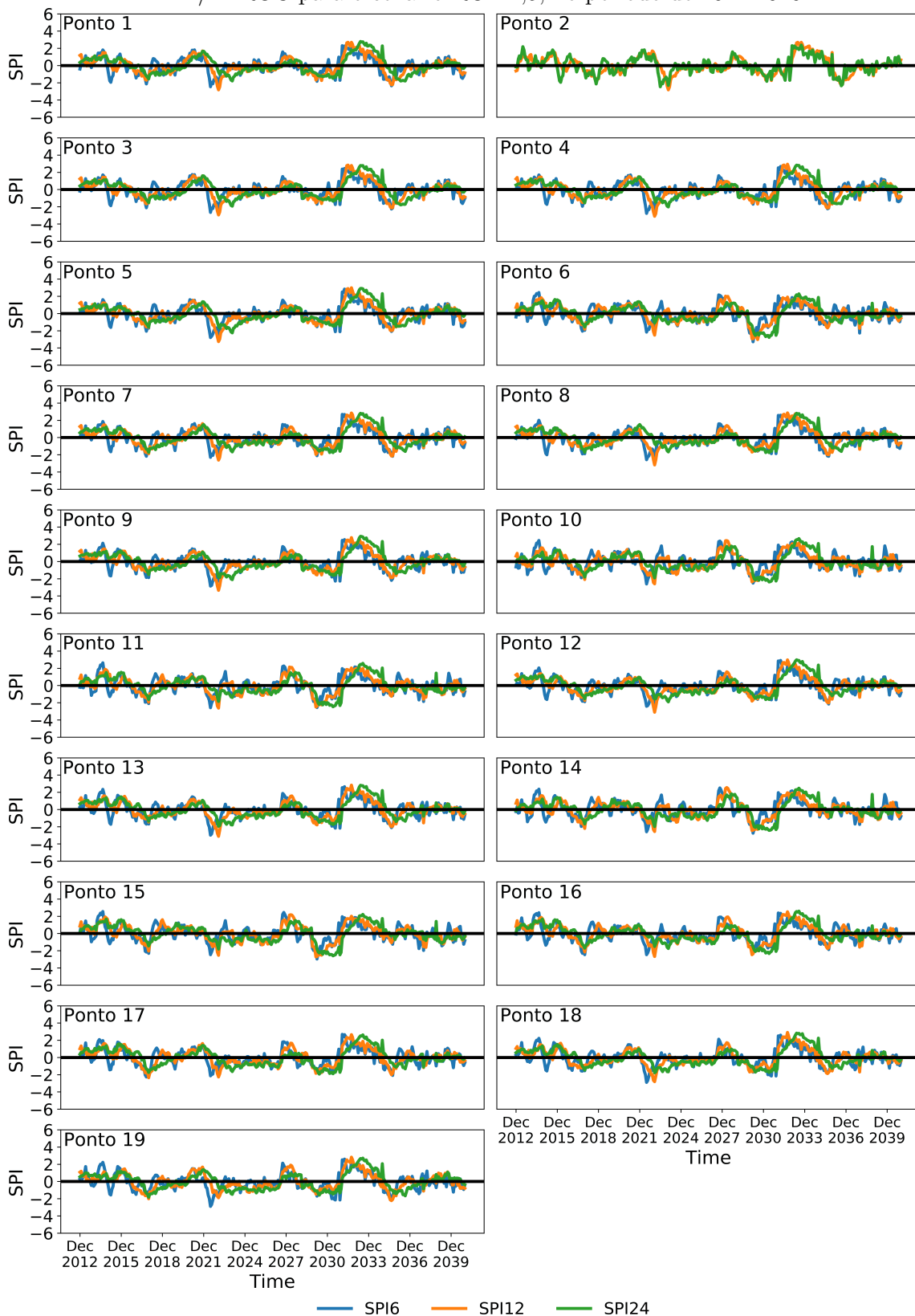


Figura 4.41 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

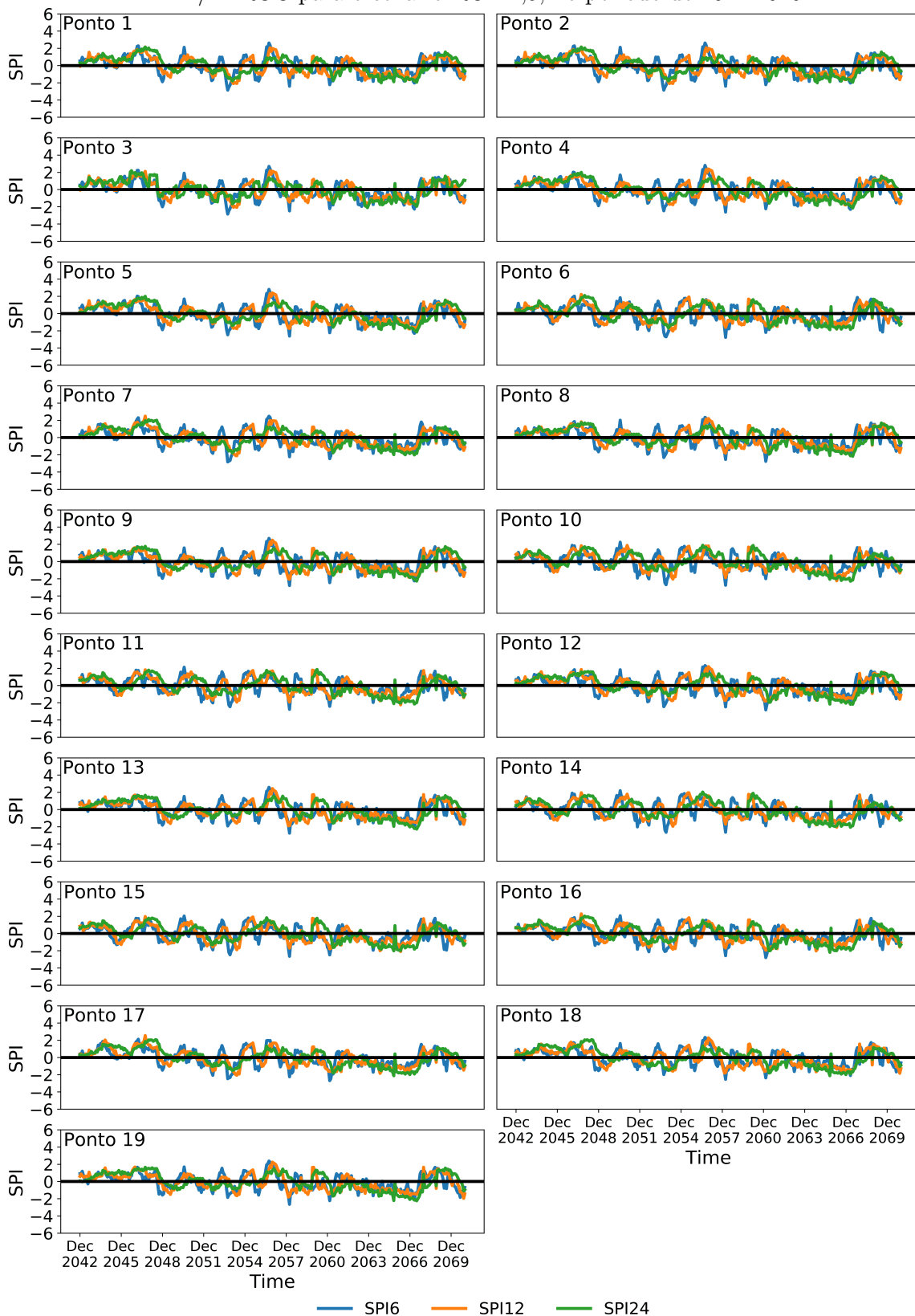
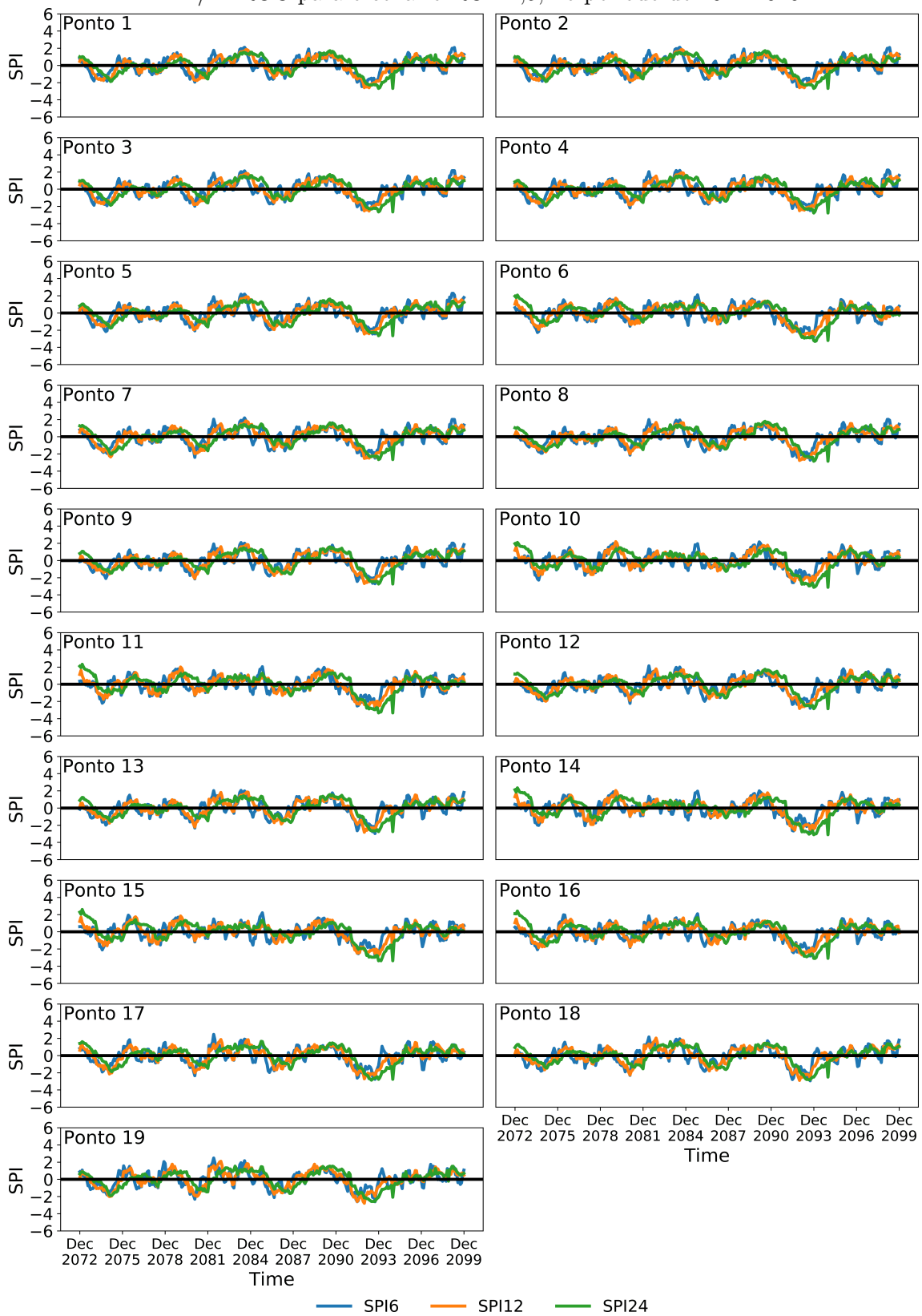


Figura 4.42 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.



Os valores de SPI 6, 12 e 24 no cenário ETA/MIROC5 8,5 (Figura 4.43) mostram um excesso de chuvas no período de 2011-2040, com picos de excesso de chuvas mais acentuados podendo chegar a 2,8 e nos períodos que indicam déficit de precipitação chegando a -1,9. No médio prazo (Figura 4.44) os valores máximos do SPI foram de 2,3 e -2,4, respectivamente, nos períodos de excesso e déficit de chuva. E, no período de 2071-2099 (Figura 4.45), os períodos de excesso e déficit de chuva atingiram picos de 3,2 e -2,9, respectivamente.

Analisando o cenário ETA/MIROC5 4,5, verifica-se que os valores de picos do SPI, nos três períodos, variam de 2 a 2,7, e de -2,6 a -3,1, indicando período extremamente úmidos e secos, respectivamente. O pior cenário foi no longo prazo, com os valores de SPI podendo chegar a 2,7 e -3,1. Todos os três períodos estão propícios há ocorrência de eventos extremos de inundações e secas. No cenário ETA/MIROC5 8,5, os valores máximos de SPI variam de -1,9 a -2,9, de severamente a extremamente seco, e de 2,3 a 3,2 extremamente úmido. O período de 2071-2099, foi o que apresentou os maiores picos de SPI extremamente úmido e seco, de 3,2 e -2,9, respectivamente.

Figura 4.43 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 8,5, no período de 2011-2040.

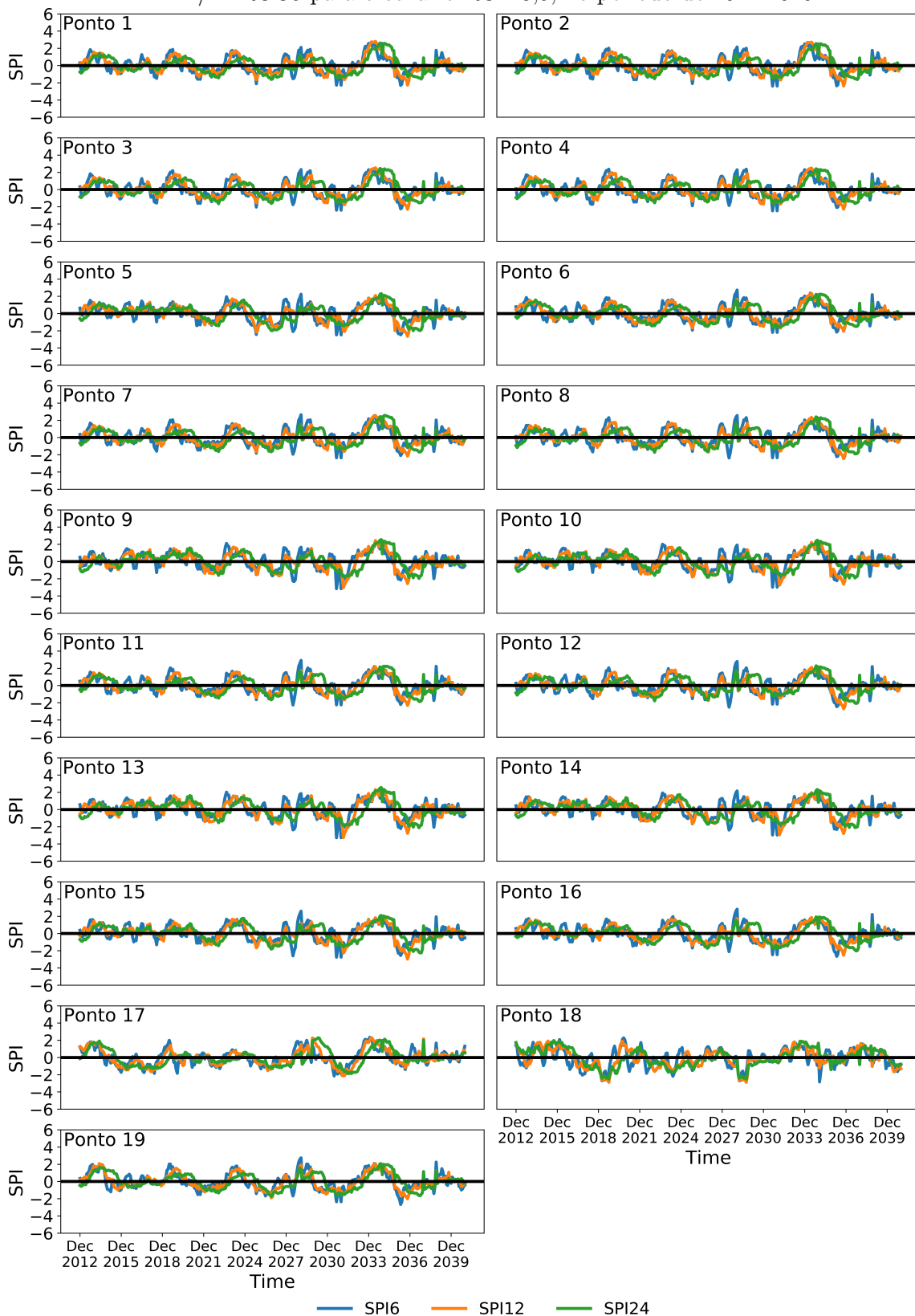


Figura 4.44 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 8,5, no período de 2041-2070.

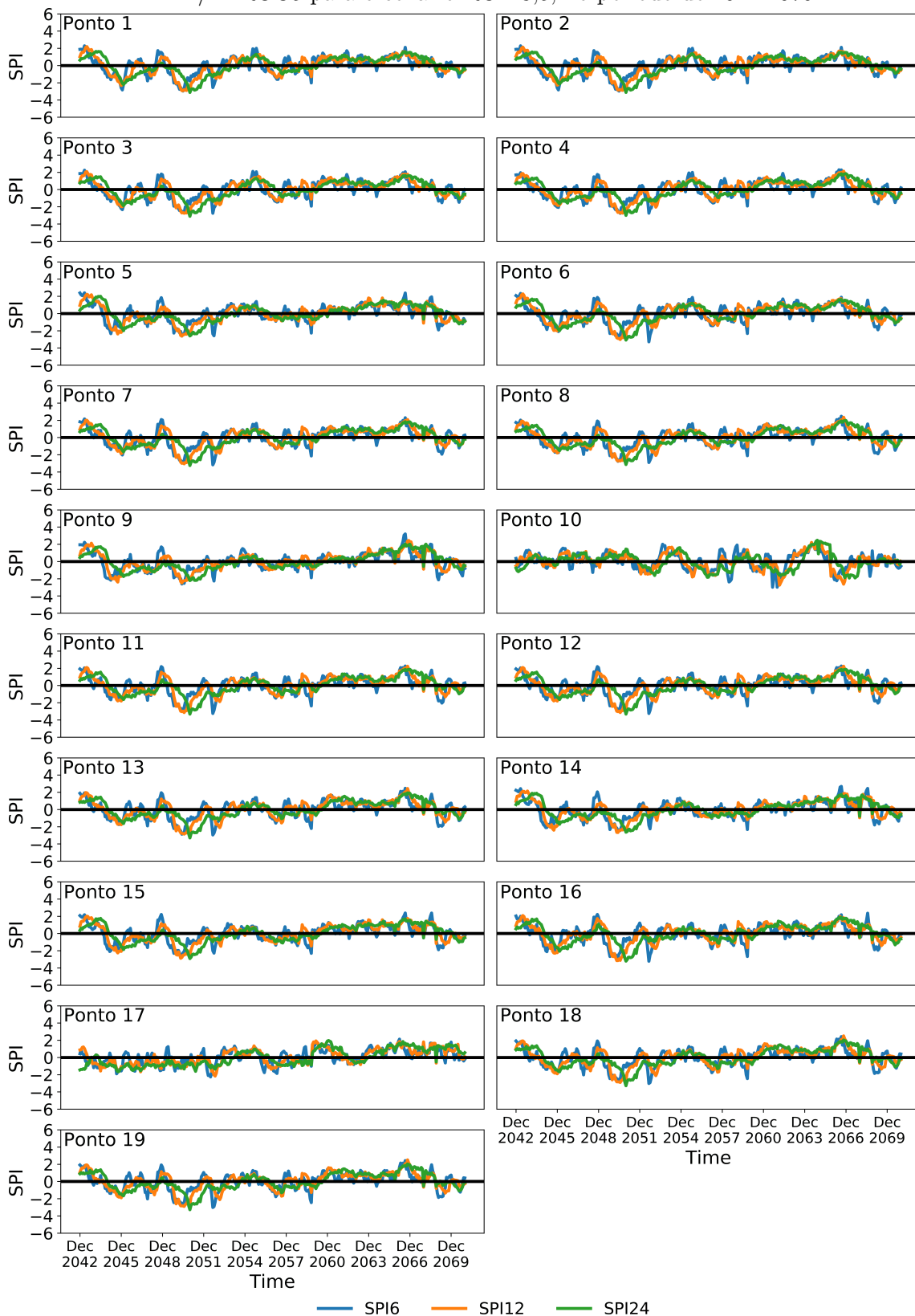
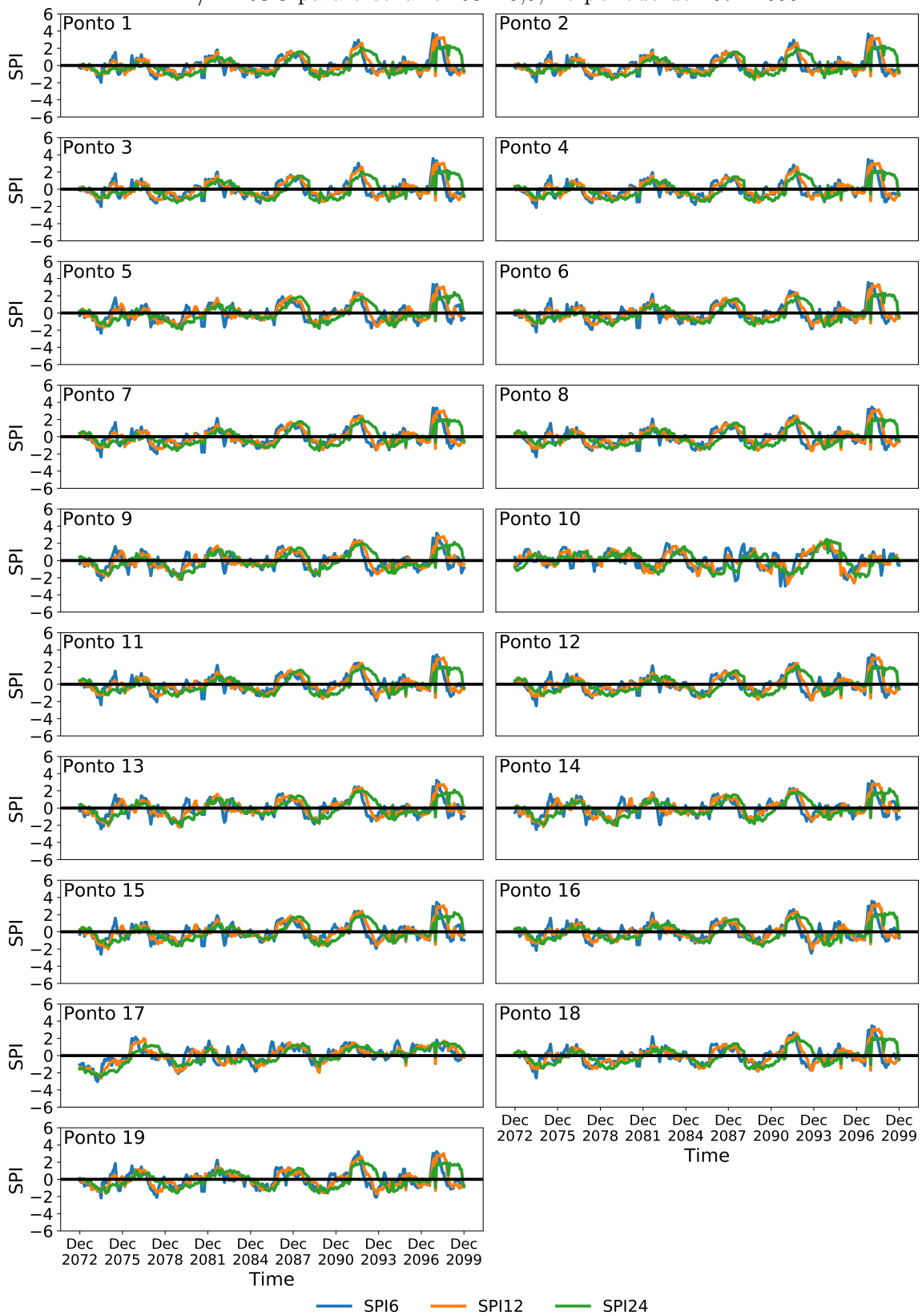


Figura 4.45 - Valores do SPI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC para o cenário RCP 8,5, no período de 2071-2099.



Na Figura 4.46 são apresentados os valores do SRI 6, 12 e 24 para o cenário ETA/HadGEM2-ES 4,5, no período de 2011-2040, nota-se que os valores do SRI de 6, 12 e 24 são muito próximos, pois, o espaço de tempo do SPI12 representa a seca hidrológica, ou seja, os valores do escoamento interferem nesta escala de tempo e também no SPI24, nestas escalas de tempo, quem influencia nestes valores é o escoamento como resposta da bacia ao acumulado de chuvas. Os picos máximos de escoamento neste período foram de 2,7 e -2,2, respectivamente, para o excesso e déficit do escoamento. No período de 2040-2071 (Figura 4.47), os valores máximos de SRI atingiram picos de 2, 8 e - 3,8, ou seja, períodos extremamente úmidos e secos, respectivamente, nas três escalas de tempo de 6, 12 e 24. E, no longo prazo (Figura 4.48) os valores máximos do SRI nos períodos de excesso e déficit de precipitação foram, respectivamente, de 2,52 e -2,7.

Nota-se que todos os três períodos os picos de SRI indicaram épocas extremamente úmidas e secas, propícios a ocorrência de eventos extremos de inundações e secas, sendo que, o pior cenário foi no médio prazo.



Figura 4.46 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

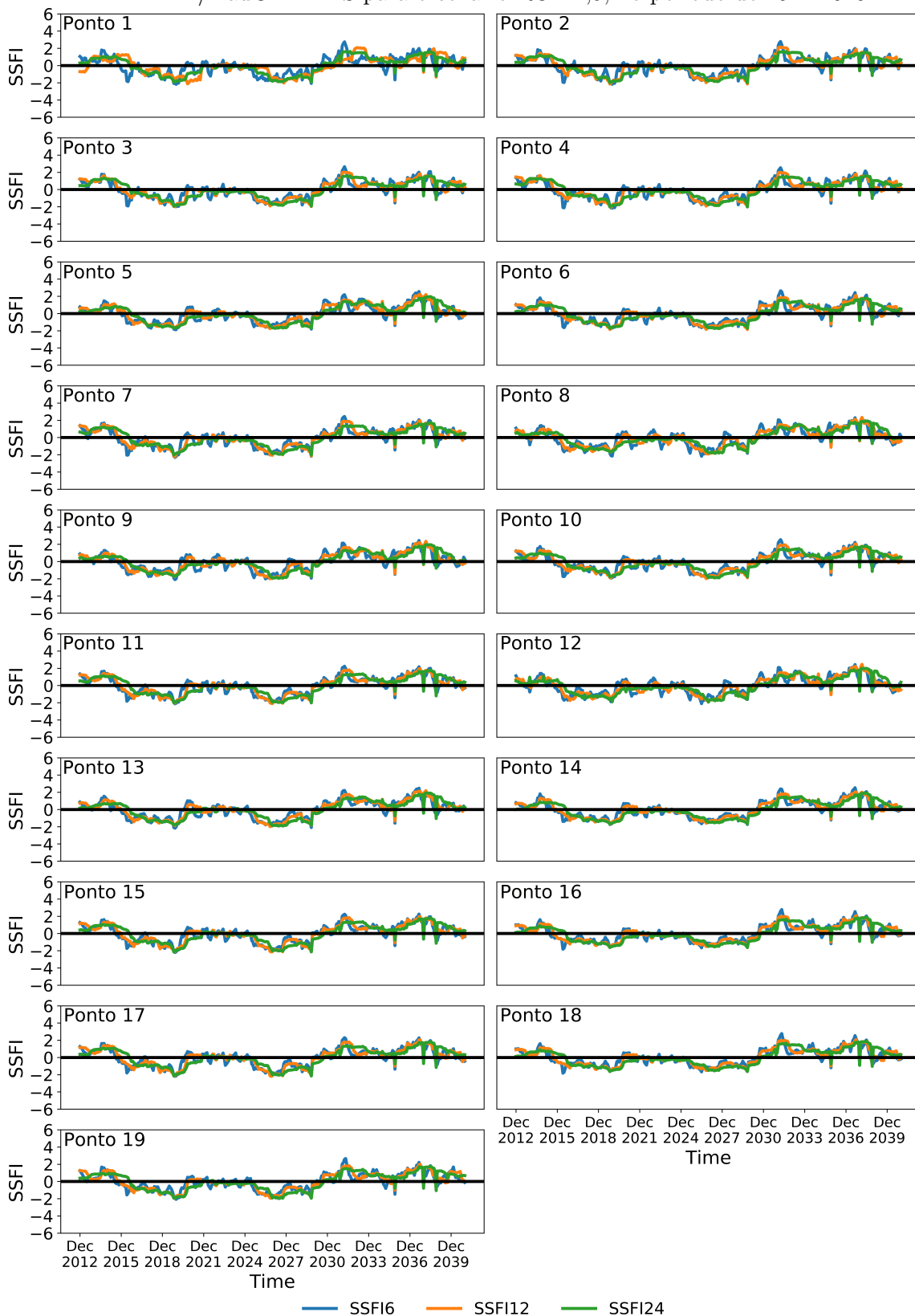


Figura 4.47 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070.

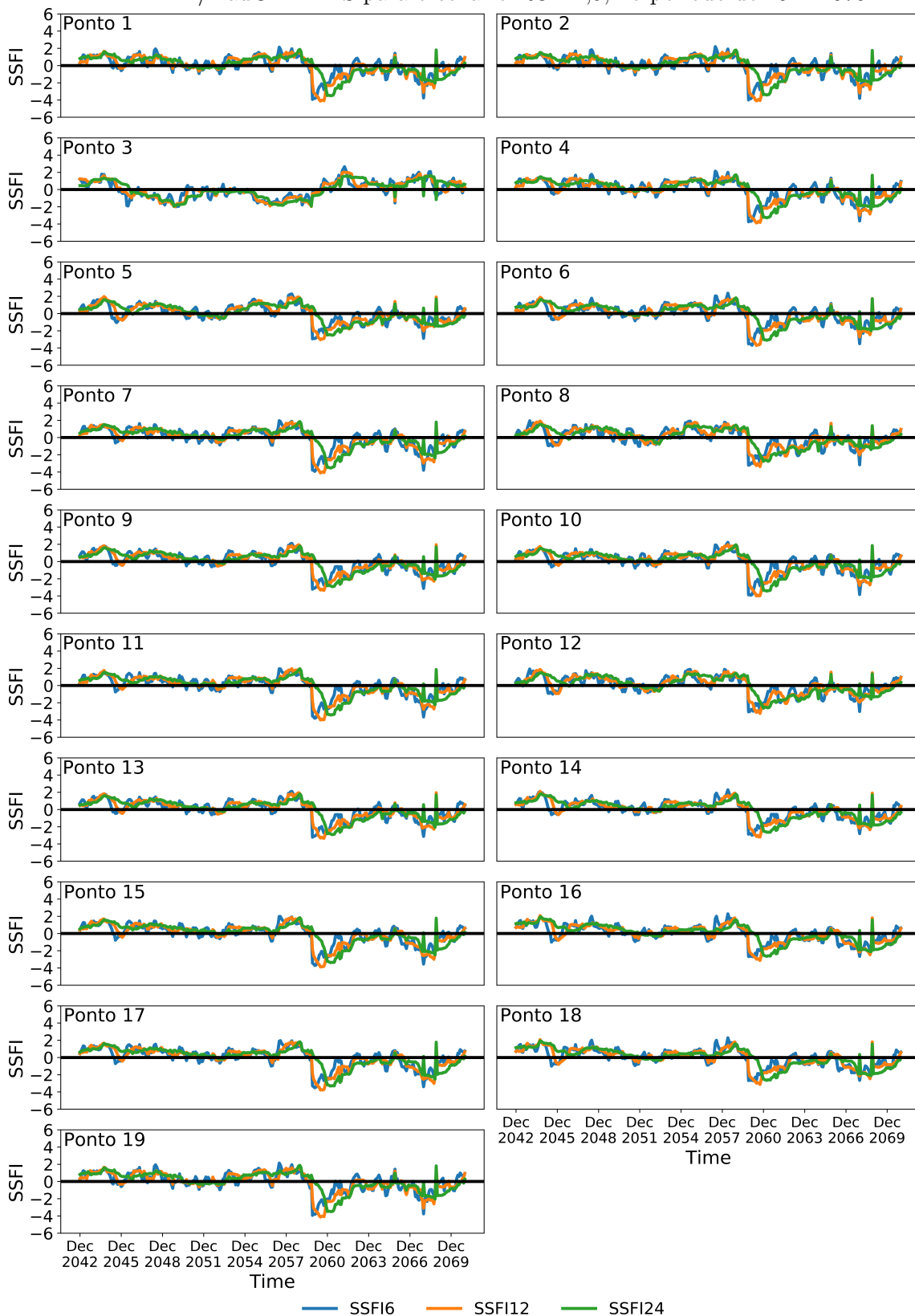
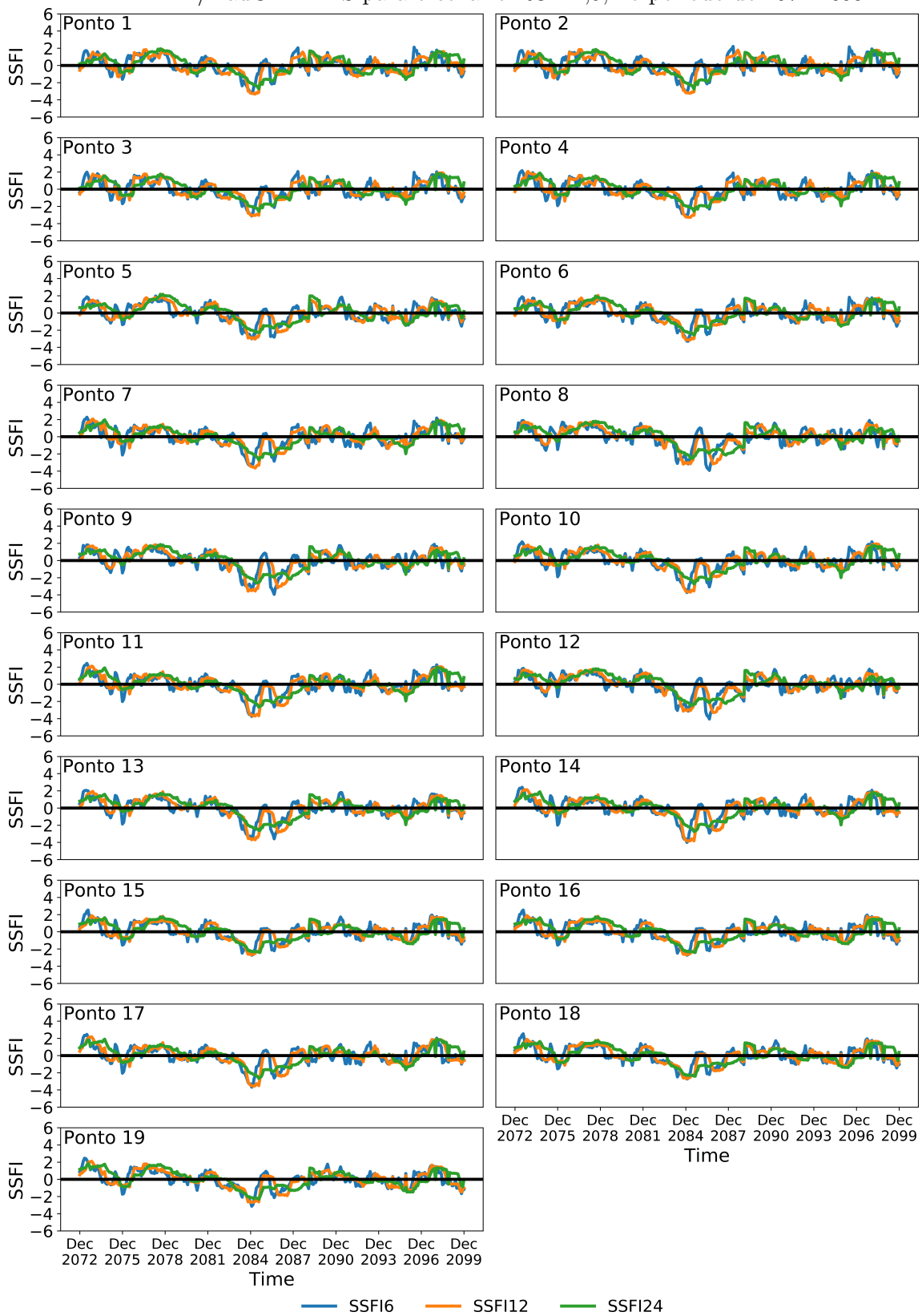


Figura 4.48 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099.



Os valores de SRI 6, 12 e 24 no curto prazo (Figura 4.49) para o cenário do ETA/HadGEM2-ES 8,5, também consegue mostrar o período de déficit de precipitação que a Bacia do Itajaí passou entre os anos de 2018 e 2020. Nota-se que durante o período de 2011-2040, os picos de valores que o SRI foi de 2,3 e -3,7, respectivamente, para o período extremamente úmido e seco. No médio prazo (Figura 4.50), os valores máximos do SRI podem chegar a 2,8 e -3,2, respectivamente, no período de excesso e déficit de escoamento. E, no longo prazo (Figura 4.51), os picos de valores do SRI podem atingir 2,2 e -3,2, respectivamente, nos períodos de excesso e déficit de chuvas.

Observa-se que o pior cenário quanto à ocorrência de épocas extremamente úmida foi no médio prazo, e quanto à ocorrência de períodos extremamente secos foi no curto prazo, porém, todos os três períodos mostraram-se propícios à ocorrência de extremos de chuvas e secas, causando inundações e secas.

Figura 4.49 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2011-2040.

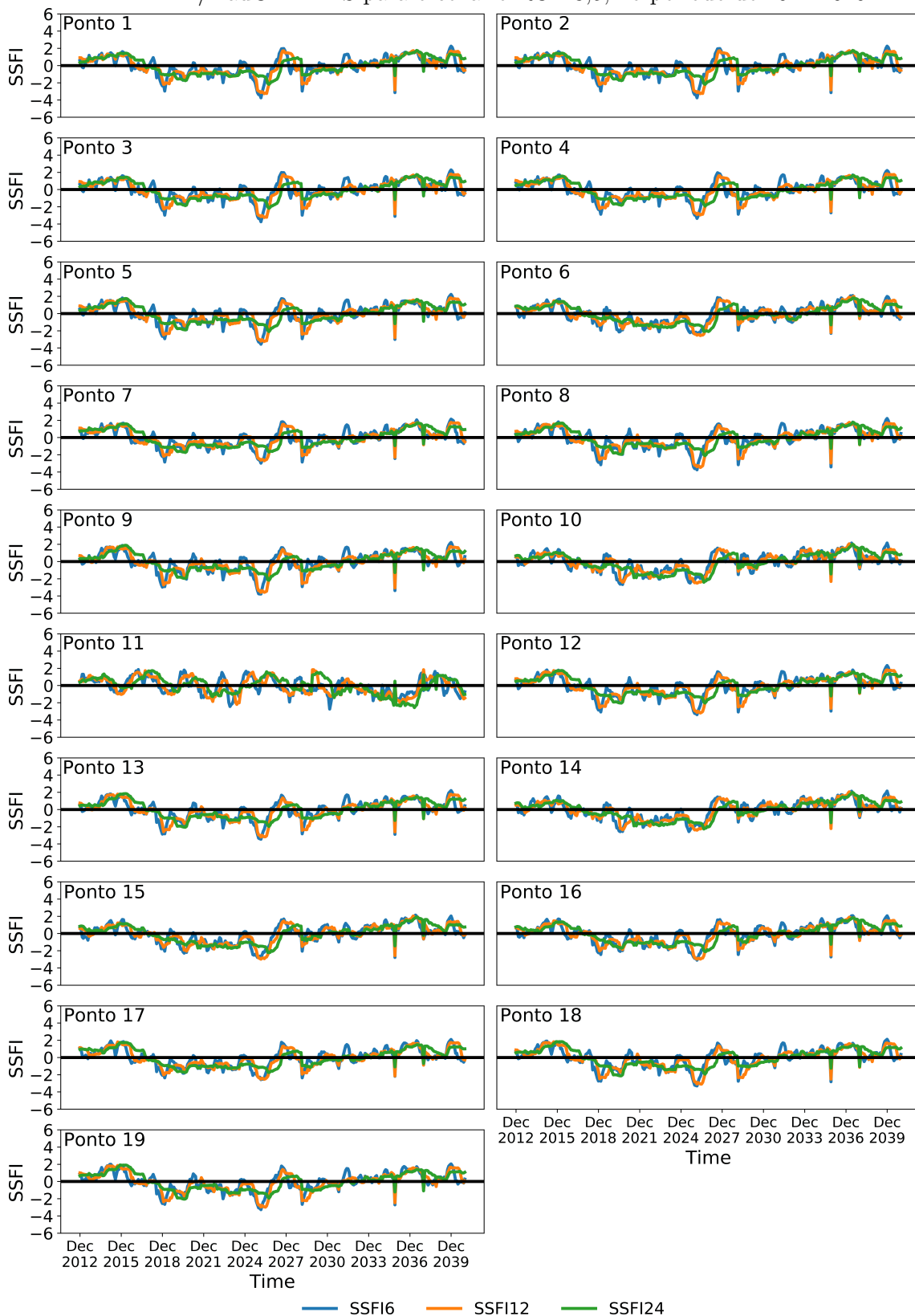


Figura 4.50 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2041-2070.

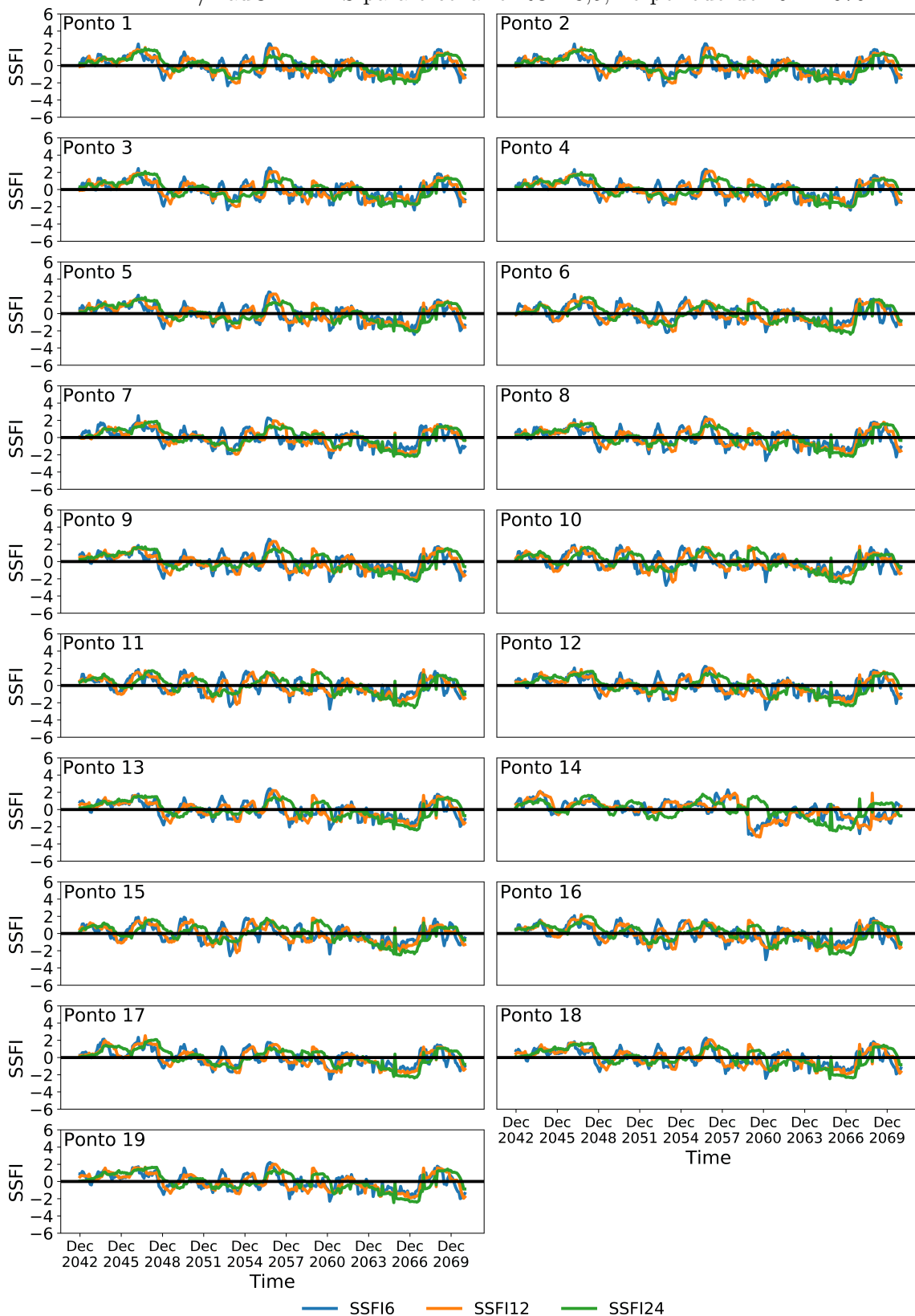
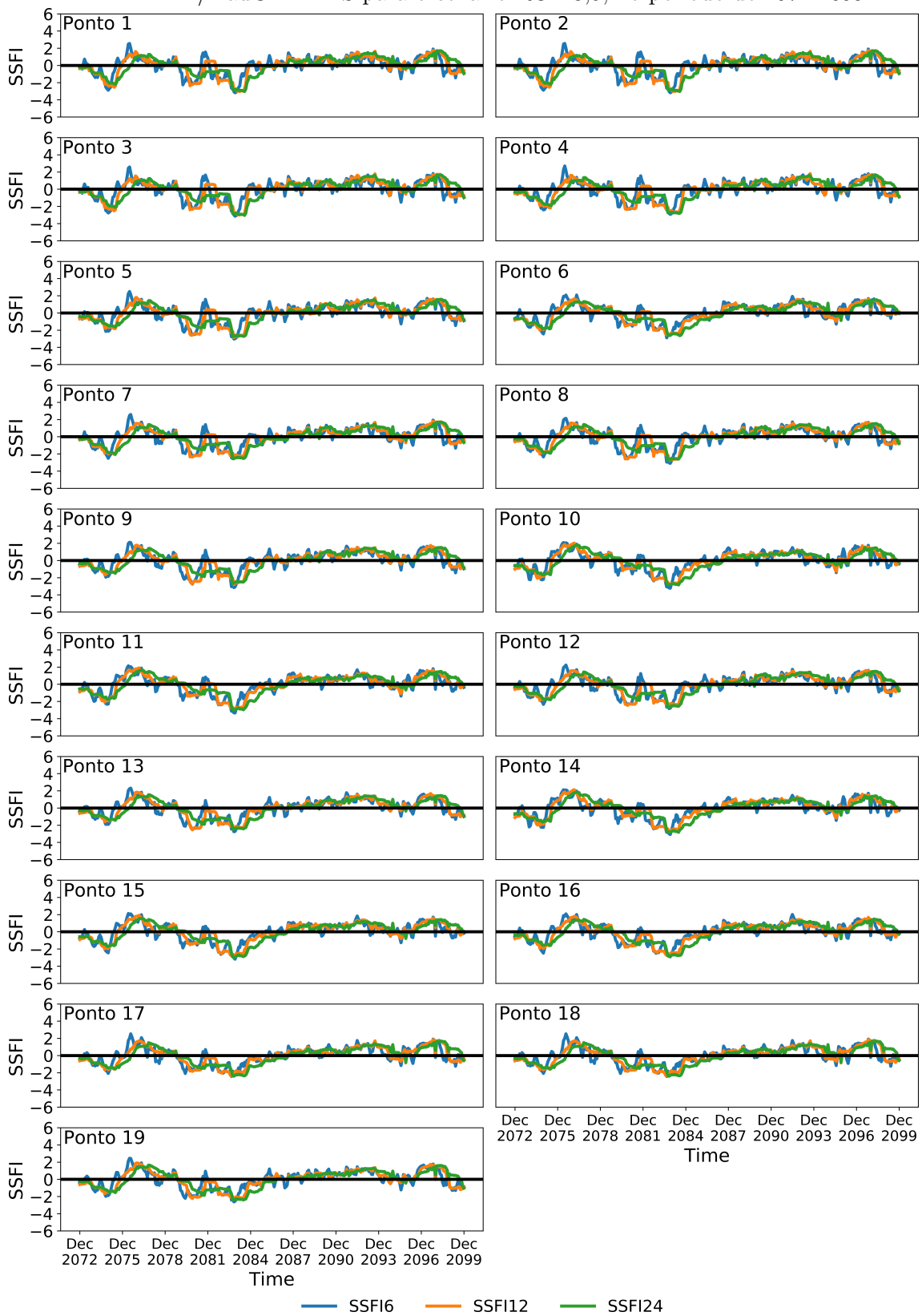


Figura 4.51 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/HadGEM2-ES para o cenário RCP 8,5, no período de 2071-2099.



Os valores de SRI 6,12 e 24 (Figura 4.52) para o cenário do ETA/MIROC5 4,5 mostra que no período de 2011-2040 os períodos de excesso de escoamento ocorrem com picos de valores de SRI que podem chegar a 2,8, e, os períodos de déficit do escoamento com picos de -2,6, períodos estes extremamente úmidos e secos. Em médio prazo (Figura 4.53), os valores de SRI podem atingir picos de 2,6 e -2,2, respectivamente, nos períodos déficit e excesso de chuvas. E, no último período de 2071-2099 (Figura 4.54), os maiores valores que o SRI podem chegar foram de 2,3 e -2,3, respectivamente, nos períodos extremamente úmidos e secos.



Figura 4.52 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

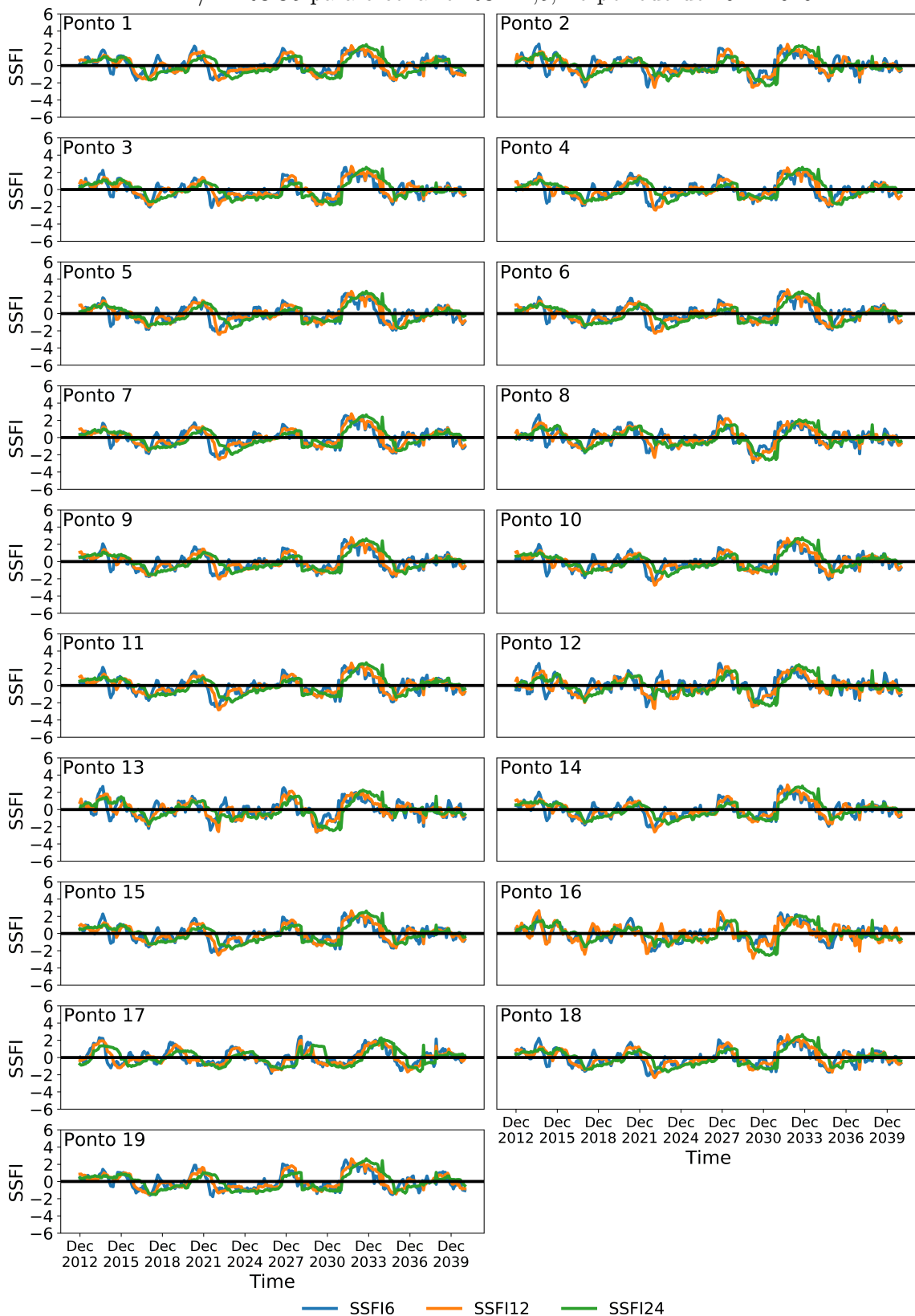


Figura 4.53 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070.

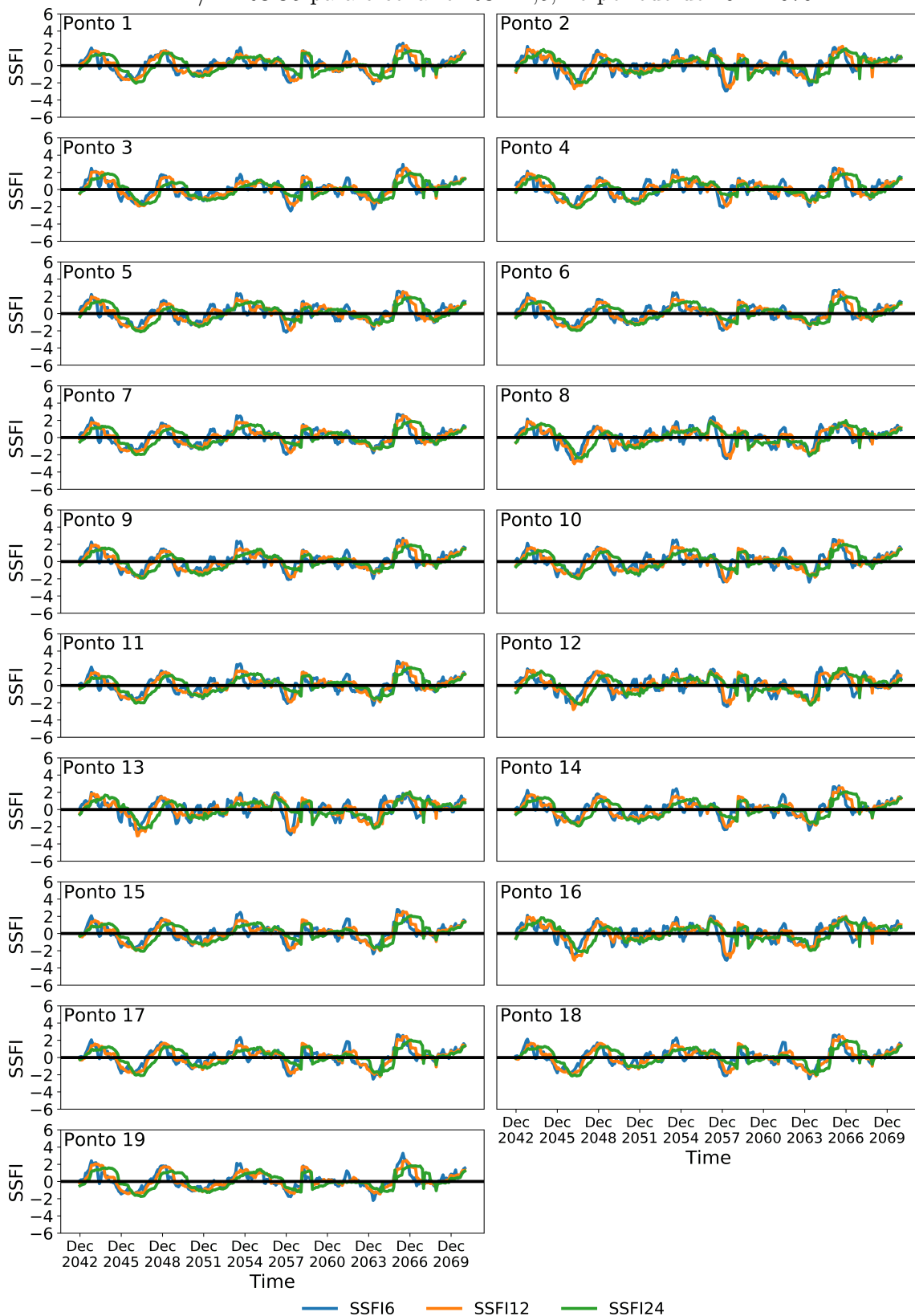
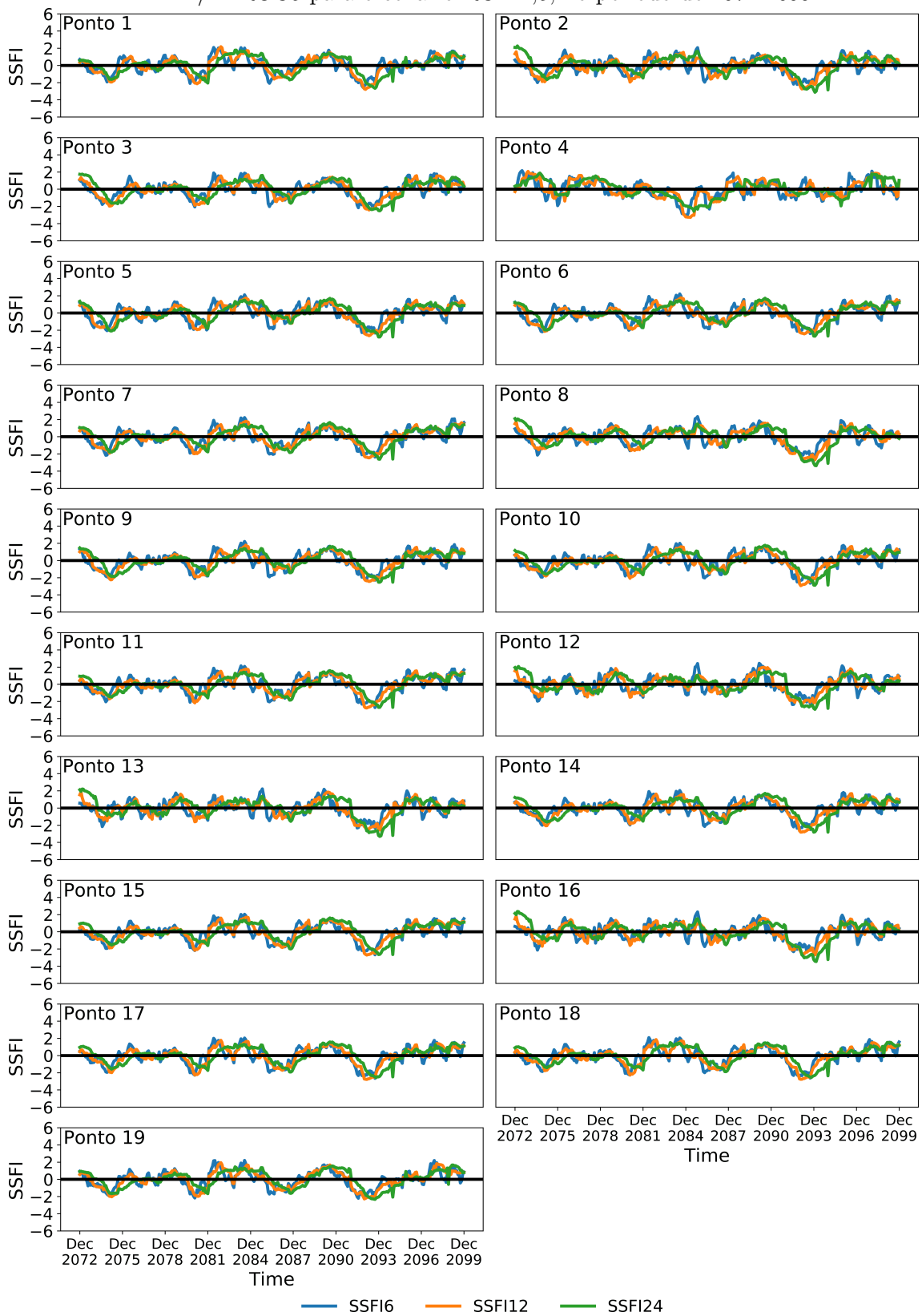


Figura 4.54 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099.



No cenário de SRI 6, 12 e 24 (Figura 4.55) para o modelo ETA/MIROC5 no cenário RCP 8,5 os picos de valores do SRI mostram são de 2,5 e -2,3, respectivamente, para o período extremamente úmido e seco. No médio prazo (Figura 4.56), os valores máximos do SRI podem chegar a 2,7 e -3,3, respectivamente, no período de excesso e déficit de escoamento. E, no longo prazo (Figura 4.57), os picos de valores do SRI podem atingir 3,9 e -2,2, respectivamente, nos períodos de excesso e déficit de chuvas.

Observa-se que os dois modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 nos dois cenários de RCP 4,5 e 8,5 mostraram que nos três períodos analisados que a Bacia do Itajaí está propícia a eventos extremos de inundações e secas, comprovado pelos valores do SPI e SRI acima de 2 e menos que -2, os quais indicam períodos extremamente úmidos e secos, respectivamente. Os resultados mostram uma forte consistência entre os valores de SPI e SRI, e de acordo com [Rodrigues et al. \(2019\)](#), os quais aplicaram os índices SPI e SRI para caracterizar a seca no cerrado brasileiro, o SPI tem uma alta consistência com o SRI. O SPI é mais sensível para capturar o início da seca, a seca meteorológica, enquanto o SRI é mais eficaz na identificação da persistência da seca hidrológica, devido, principalmente ao complexo processo de escoamento ([HUANG et al., 2015](#); [LOON, 2015](#)).

Figura 4.55 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2011-2040.

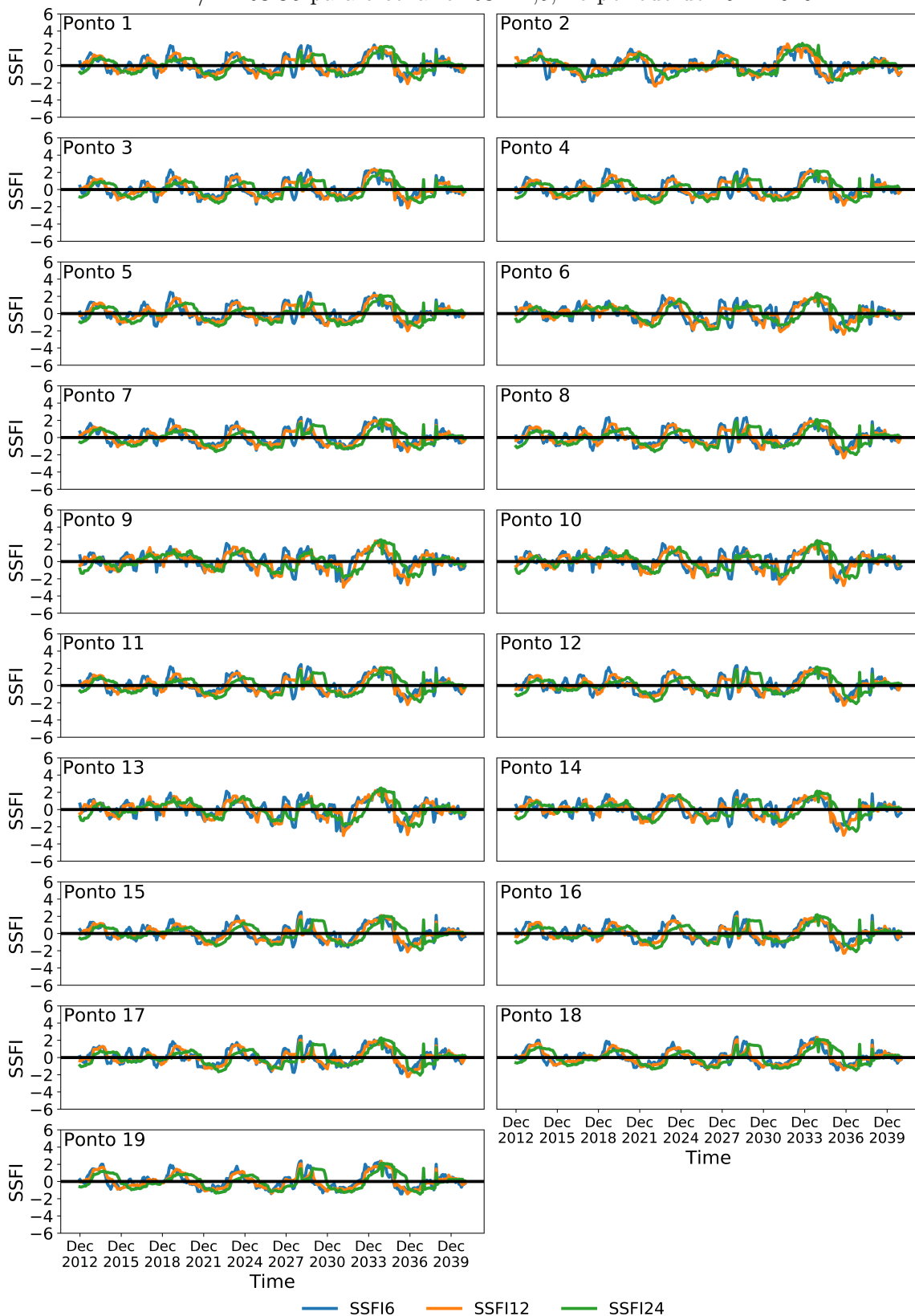


Figura 4.56 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2041-2070.

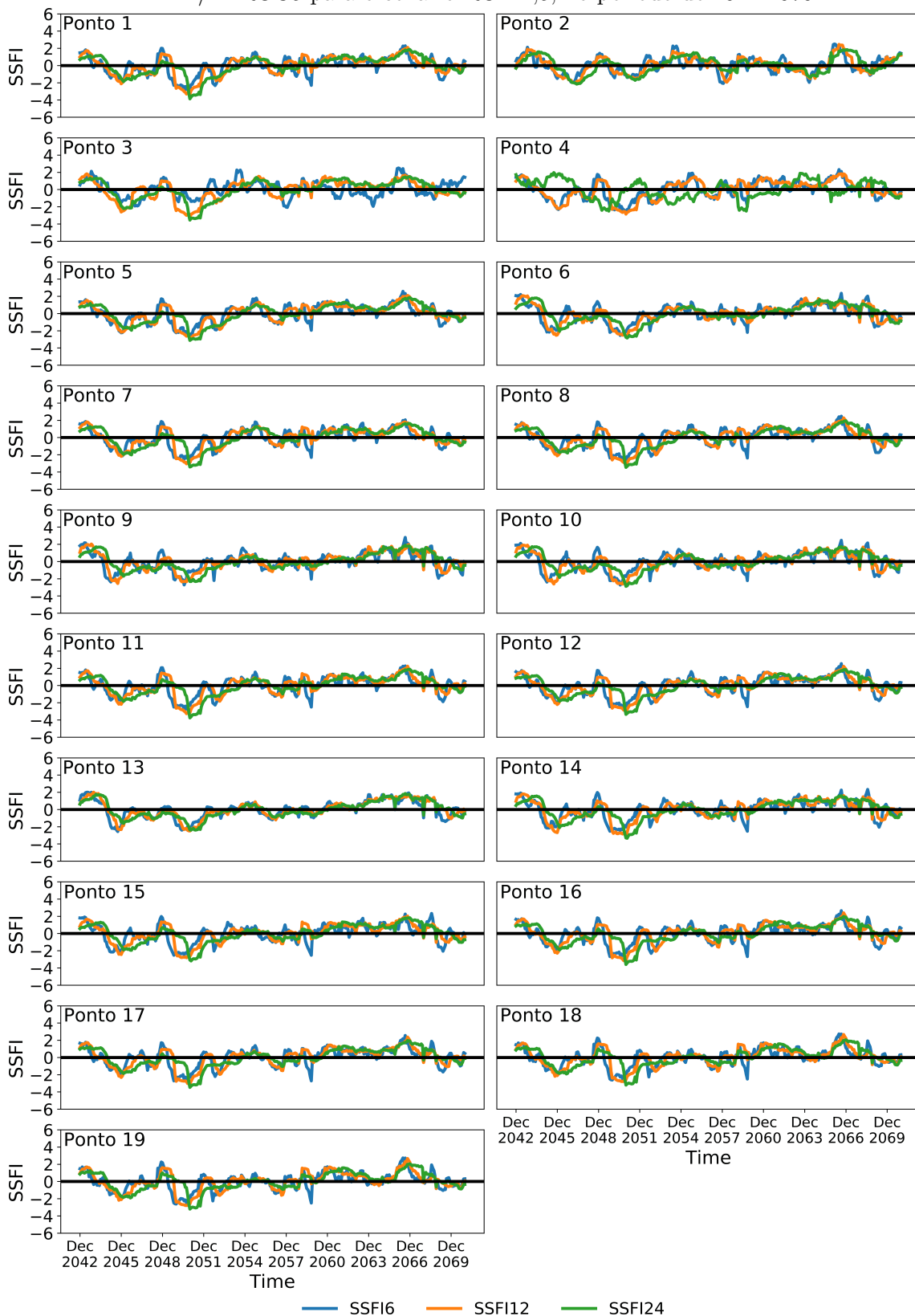
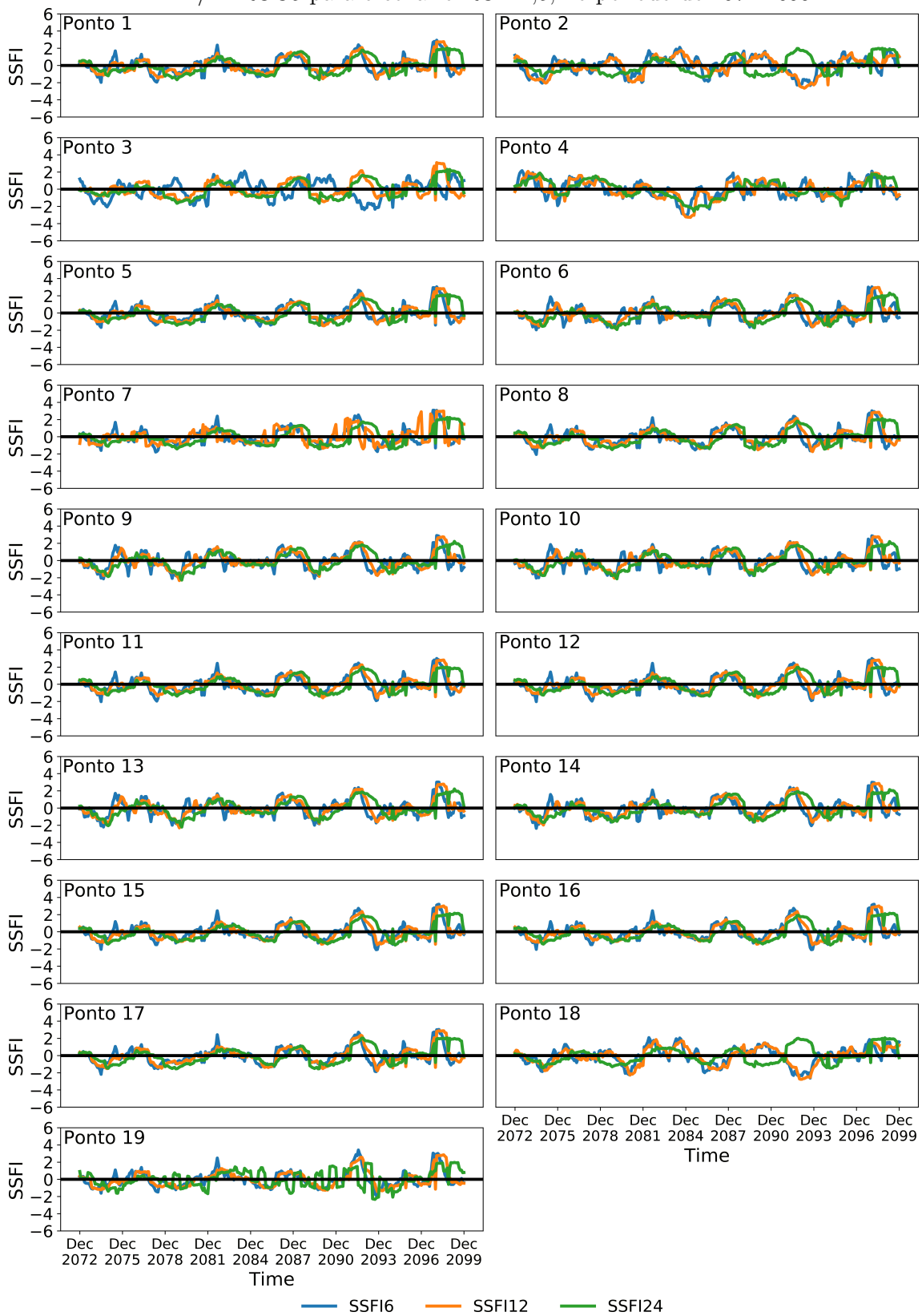


Figura 4.57 - Valores do SRI (6, 12 e 24) em todos os pontos de grade do modelo ETA/MIROC5 para o cenário RCP 4,5, no período de 2071-2099.



Ribeiro Neto et al. (2016) avaliando as mudanças climáticas na América do Sul, usando o ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 nos dois cenários de RCP 4,5 e 8,5, mostraram que a região do Sul e Sudeste do Brasil exibe os sinais mais mistos de mudanças na precipitação. Secci et al. (2021) investigaram os impactos das mudanças climáticas nas secas de águas subterrâneas utilizando índices padronizados para secas e projeções regionais sob dois cenários e verificaram no cenário RCP 4,5 uma maior redução no nível de águas subterrâneas no médio prazo, e no cenário RCP 8,5 os níveis diminuirão no longo prazo. Rodrigues et al. (2019) aplicaram o modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos climáticos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5, e usaram os índices SPI e SRI para caracterizar a seca em bacias do cerrado brasileiro e notaram que as secas meteorológicas e hidrológicas devem aumentar no futuro.

Observa-se que a Bacia do Itajaí está propícia à ocorrência de eventos extremos até o ano de 2100, tanto eventos de inundação quanto de seca e, o aumento de eventos extremos resultariam em uma condição de mais desastres naturais (RIBEIRO NETO et al., 2016). Os eventos de inundações e de secas podem impactar a economia e a sociedade, isto poderá levar, ao aumento dos riscos sociais, ambientais e econômicos, podem gerar impactos negativos sobre a produtividade e a produção agrícola, e conseqüentemente colocando em risco a segurança alimentar. Além disso, outras atividades serão impactadas, como a disponibilidade de água para abastecimento, indústria e irrigação, mobilidade urbana e rural, doenças de veiculação hídrica, pessoas desalojadas e desabrigadas e pode levar até a morte de milhares de pessoas.

Sendo assim, se faz necessário o conhecimento dos eventos extremos que podem afetar a bacia, a fim de compreender os impactos para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos por meio do dimensionamento adequado dos sistemas de infraestrutura hídricas, minimizando o risco e prejuízo para a economia e a sociedade.



### 4.1.3.3 Análise da severidade

Na análise de severidade para o cenário ETA/HAdGEM2-ES RCP 4,5, no período de 2011-2040, o SRI apresentou a maior severidade para eventos de seca na escala de 24 meses. Quanto a intensidade máxima os índices de seca variaram entre os pontos de grade, sendo que somente os pontos (1, 2, 4, 7, 9, 11, 15 e 17), detectaram severidade de secas extremas (Figura 4.34).

Conforme a Figura 4.35, no período de 2040-2071 a escala de 12 meses apresentou as maiores intensidades máximas, atingindo valores menores que -4 mostrando uma severidade extrema da seca. E no último período de 2071-2099 (Figura 4.36) a intensidade máxima atingiu picos de -3 em 12 meses. Nota-se que a escala de 12 meses foi a que apresentou os maiores picos de intensidade máximas, sendo que, o médio período foi o mais severo. Analisando a severidade da seca quanto ao índice SPI, no período de 2011-2040 o ponto 19 (-54,3), de 2041-2070 o ponto 1 (-127,6) e de 2071-2099 o ponto 6 (-109,1) apresentaram as secas mais severas. Quanto ao SRI (Figuras 4.46, 4.47 e 4.48), respectivamente, o período curto o ponto 4 (-111,3), no médio prazo o ponto 1 (-127,9) e no longo prazo o ponto 4 (-111,3) foram os que apresentaram a seca mais severa. Observa-se que tanto pela análise de severidade e intensidade o período de 2040-2071 foi o que apresentou a maior severidade da seca para os índices analisados.

Na análise de severidade dos períodos úmidos, o SRI detectou a maior severidade para eventos extremamente úmidos na escala de 12 meses. De acordo com o SRI, o período de 2011-2040, as maiores frequências de eventos extremamente úmidos foram nos anos de 2000-2013, quando os picos de intensidade máxima ficaram acima de 2, sendo que somente os pontos (2, 4, 6,7,11,15, 16 e 17) detectaram severidade de umidade extrema, o ponto 6 (65,3) foi o que apresentou a maior severidade da umidade extrema. No período de 2040-2071, somente os pontos (3, 4, 5, 7, 8,11, 13, 15, 16 e 17) detectaram eventos de umidade extrema, os anos de 2055-2067 foram os

que apresentaram maiores frequência de eventos úmidos, o ponto 13 (77,14) foi o que apresentou a maior severidade da umidade extrema. E, no longo prazo, os pontos (1, 2, 4, 5, 6, 8, 11, 14 e 15) foram os que detectaram a severidade dos eventos úmidos, com o ponto 15 (56,75) o que detectou a maior severidade de umidade extrema. De acordo com o SPI, o período de 2011-2040 o ponto 11 (49,2), no período de 2041-2070 o ponto 16 (55,19) e no período de 2071-2099 o ponto 9 (42,6) apresentaram a severidade de secas mais extremas. Nota-se no período de 2040-2011 foi o que detectou maior severidade dos eventos extremos de umidade.

No cenário ETA/HAdGEM2-ES RCP 8,5 nos três períodos avaliados foi bem semelhante ao cenário 4,5 com o SRI (Figuras 4.49, 4.50 e 4.51) detectando as maiores severidades extremas de umidade em relação ao SPI (Figuras 4.37, 4.38 e 4.39), porém a intensidade máxima os picos de severidade variaram entre os pontos de grade, de acordo com o índice avaliado. Em curto prazo somente os pontos (2, 3, 4, 7, 9, 11, 14 e 16), no período de 2040-2071 somente os pontos (1, 2, 5, 6, 7, 11, 12, 14 e 17) e longo prazo, os pontos (1, 2, 3, 7, 9, 10, 13, 14, 15, e 16) foram os que detectaram a severidade dos eventos úmidos. De acordo com o SPI, o período de 2011-2040 o ponto 4 (37,3), no período de 2041-2070 o ponto 16 (46,6) e no período de 2071-2099 o ponto 17 (31,8) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos. Quanto ao SRI, o período de 2011-2040 o ponto 14 (48,1), no período de 2041-2070 o ponto 10 (57,1) e no período de 2071-2099 o ponto 13 (56,3) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos.

Analisando o cenário ETA/MIROC5 RCP 4,5, observa-se que não houve um índice que detectou maior severidade de secas nos três períodos avaliados, e também os picos de severidade variaram em toda a bacia. De acordo com o SPI (Figuras 4.40, 4.41 e 4.42), o período de 2011-2040 o ponto 10 (-38,5) com picos de intensidade de -3,3 (somente os 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16 e 17 apresentaram períodos de seca), no período de 2041-2070 o ponto 15 (-51,37) com picos de -2,7 e no período

de 2071-2099 o ponto 18 (-79,6) com picos de -2,8 apresentaram a severidade de secas mais extremas. Já para o índice SRI (Figuras 4.52, 4.53 e 4.54), o período de 2011-2040 (somente os 2, 8, 12, 13 e 16) apresentaram períodos de seca) o ponto 13 (-49,3), no período de 2041-2070 o ponto 4 (-29,7) e no período de 2071-2099 o ponto 18 (-71,4) apresentaram a severidade de secas mais extremas.

Na análise dos eventos de umidade, assim como, para os eventos de seca, não houve um índice que detectou as maiores severidades extremas de umidade e os picos de severidade variaram entre os pontos de grade, de acordo com o índice avaliado. No curto prazo somente os pontos (1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14 e 16), no período de 2040-2071 somente os pontos (1, 2, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 15 e 17) e longo prazo, os pontos (3, 7, 9, 10, 13, 14, 15, e 18) foram os que detectaram a severidade dos eventos úmidos. De acordo com o SPI, o período de 2011-2040 o ponto 4 (41,23), no período de 2041-2070 o ponto 19 (34,1) e no período de 2071-2099 o ponto 18 (38,7) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos. Quanto ao SRI, o período de 2011-2040 o ponto 17 (38,1), no período de 2041-2070 o ponto 10 (47,4) e no período de 2071-2099 o ponto 13 (46,9) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos. Na análise do cenário ETA/MIROC5 RCP 8,5, o SRI detectou maior severidade de secas nos três períodos avaliados, com os picos de severidade variando em toda a bacia. De acordo com o SPI (Figuras 4.43, 4.44 e 4.45), o período de 2011-2040 o ponto 18 (-34,15) somente os pontos (12, 13, 14, 15, 16 e 18) apresentaram períodos de seca na escala de 24 meses, no período de 2041-2070 o ponto 6 (-61,9) com picos de -2,8, no período de 2071-2099 somente os pontos (9, 10, 13, 14, 15 e 17) detectaram secas e o ponto 15 (-65,3) apresentaram a severidade de secas mais extremas. Já para o índice SRI (Figuras 4.55, 4.56 e 4.57), o período de 2011-2040 (somente os pontos 6, 12, 13, 14, 15,16) apresentaram períodos de seca, o ponto 15 (-49,3) no período de 2041-2070, o ponto 18 (-101,6) e no período de 2071-2099 somente os pontos (2, 9, 10, 13 e 18) detectaram secas severas o ponto 9 (-73,4) apresentaram a severidade de secas mais extremas.

Na análise dos eventos de umidade, não houve um índice que detectou as maiores severidades de umidade extrema e os picos de severidade variaram entre os pontos de grade, de acordo com o índice avaliado. No curto prazo somente os pontos (1, 6, 7, 9, 11, 13,14 e 16), no período de 2040-2071 somente os pontos (1, 2, 4, 5, 11, 12, 13, 15 e 17) e longo prazo, os pontos (3, 7, 8, 10, 13, 14, 15, e 18) foram os que detectaram a severidade dos eventos úmidos. De acordo com o SPI, o período de 2011-2040 o ponto 6 (42,4), no período de 2041-2070 o ponto 8 (55,3) e no período de 2071-2099 o ponto 15 (42,5) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos. Quanto ao SRI, o período de 2011-2040 o ponto 14 (42,8), no período de 2041-2070 o ponto 11 (57,6) e no período de 2071-2099 o ponto 13 (38,6) apresentaram a severidade dos eventos úmidos mais extremos.

## 5 CONCLUSÕES

- Cenário Observado

O teste de Mann-Kendall e o estimador de Sen mostraram que a precipitação na Bacia do Itajaí apresentou tendência significativa crescente em 50% das estações e tendência significativa decrescente em 50%, houve neste período, eventos muito úmidos, causando inundações e eventos de déficit de chuvas, causando secas. Concerne à vazão, o teste de MK apontou tendência significativa de diminuição da vazão em 70% das estações e tendência significativa de aumento da vazão em 30% das estações. Isso mostra, que apesar da bacia do Itajaí estar mais propícia à ocorrência de inundações, nos últimos anos ela também vem sofrendo com períodos secos o que pode levar a ocorrência maior de eventos de seca.

Os índices SPI e SSFI indicaram os eventos de secas e inundações que mais causaram danos na Bacia do Itajaí. Os eventos de secas, que aconteceram nos anos de 2005, 2006, 2019, estão relacionados com episódios de EL Niño fraco, enquanto o ano de 2020 foi relacionado com evento de La Niña, sendo que na região Sul do Brasil os eventos de seca têm uma forte relação com eventos de La Niña, observa-se que com exceção do ano de 2020, não foi isso que se observou na Bacia do Itajaí. E, os os eventos de inundações de 2008 e de 2011 aconteceram numa configuração de La Niña fraca, e não de El Niño como era o esperado, portanto, outros sistemas climáticos também podem causar eventos extremos nesta região, e nada deve ser descartado, pois isso depende do estudo dos possíveis efeitos das combinações de oscilações climáticas. Uma das possíveis explicações aponta fortemente para as mudanças climáticas (IPCC, 2021), uma vez que as influências humanas têm tornado a ocorrência de eventos extremos cada vez mais frequentes.

- Cenário de Mudanças Climáticas

Para o teste de tendência aplicado o teste de Mann-Kendall, o ETA/HadGEM2-ES nos dois cenários de RCP 4,5 e RCP 8,5, e para as duas variáveis, precipitação e escoamento, mostram uma tendência positiva de aumento no curto prazo de 2011-2040, indicando uma tendência forte e muito forte das precipitações e do escoamento neste período. E, nos períodos de 2041-2070 e 2071-2099, os dois cenários indicaram uma tendência de diminuição da precipitação e do escoamento. Sendo assim, a Bacia do Itajaí no curto prazo está mais propícia a eventos extremos úmidos, e no médio-prazo e longo-prazo está mais propícia aos eventos de déficit de chuvas o que pode acarretar períodos prolongados de seca na região. Observa-se que o ETA/MIROC5 nos dois cenários de RCP 4,5 e RCP 8,5 foram semelhantes, mostrando uma fraca tendência de aumento em 69% dos pontos e uma fraca tendência de diminuição em 31% dos pontos tanto da precipitação e quanto do escoamento no período de 2011-2040. No período de 2041-2070, todos os pontos mostraram uma tendência de aumento da precipitação e do escoamento, e no período de 2071-2099, a maioria dos pontos indicaram tendência de aumento do escoamento e das chuvas.

Os modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 mostraram diferenças quanto as projeções de aumento e diminuição das chuvas e do escoamento, essas diferenças podem estar associadas às diferenças dos modelos climáticos e às incertezas e erros sistemáticos das projeções climáticas. Portanto, estudos como estes a nível local são essenciais, para entender melhor as projeções e buscar resultados mais realistas e confiáveis sobre o clima futuro, de maneira a fornecer informações para mitigar os impactos das mudanças climáticas no comportamento das bacias hidrológicas.

Quando analisamos os índices SPI e SRI os dois modelos, ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5, e nos dois cenários de RCP 4,5 e 8,5 mostraram que nos três períodos analisados, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, a Bacia do Itajaí está propícia a eventos extremos de inundações e secas, comprovado pelos valores do SPI e SRI acima de 2 e menor que -2, os quais indicam períodos extremamente úmidos e secos,

respectivamente. No curto-prazo todos os modelos e cenários conseguiram mostrar os períodos de estiagem que ocorreram na Bacia do Itajaí entre os anos de 2018 e 2020, que causou déficit de água em muitos municípios do estado de Santa Catarina, inclusive da Bacia do Itajaí, mostrando uma boa correlação dos modelos com o que foi observado, portanto, devido as mudanças climáticas a bacia pode experimentar uma alternância de eventos de inundações e secas. O ETA/HadGEM2-ES mostrou que a médio a longo prazo a bacia sofrerá mais com eventos de seca extrema, porém, apesar da diminuição das chuvas, pode também ocorrer períodos extremamente úmidos que causem inundações. Já, o ETA/MIROC5 mostrou que na Bacia do Itajaí os excessos de chuvas serão mais frequentes, nos três períodos analisados, entretanto, podem ocorrer épocas de secas extremas. Apesar das diferenças entre os modelos, verifica-se que ocorrerá eventos extremos na bacia, e o erro é uma premissa inerente tanto nos estudos climáticos. É importante prever o clima futuro para tomar medidas de mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas, bem como para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Como foi dito, os eventos extremos podem aumentar a vulnerabilidade das pessoas que vivem em áreas de risco. Portanto, os resultados deste estudo podem ser usados pelos gestores de recursos hídricos e tomadores de decisão no desenvolvimento de políticas públicas e planos de gestão que favoreçam o uso sustentável da água, bem como na adoção de práticas para garantir a segurança hídricos e dos recursos naturais, minimizando o risco e o prejuízo dos serviços essenciais que serão afetados: água para abastecimento, indústria e irrigação, mobilidade urbana e rural, doenças de veiculação hídrica, pessoas desalojadas e desabrigadas e tentar evitar, impactando a sociedade e a economia.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

- a) Para trabalhos futuros recomenda-se usar modelagem hidrológica pois os modelos hidrológicos incorporam mais variáveis do ciclo hidrológico que

podem trazer outra abordagem para as análises.

- b) Utilizar os índices SPI e SSFI para caracterizar as inundações em outras bacias brasileiras, pois estes índices são mais utilizados na análise de seca.
- c) Para o futuro os períodos de seca e inundações podem ser classificados por década para comparar esses cenários com fenômenos meteorológicos (por exemplo, ENSO, PDO, AMO e outros) e realizar uma análise robusta da seca.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão.** [S.l.]: ANA, 2020. 20 p. 53

AHMAD, I.; TANG, D.; WANG, T.; WANG, M.; WAGAN, B. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's rho tests in swat river basin, Pakistan. **Advances in Meteorology**, p. 1–15, 2015. 31

ALCANTARA, E.; MARENGO, J. A.; MANTOVANI, J.; LONDE, L. R.; SAN, R. L. Y.; PARK, E.; LIN, Y. N.; WANG, J.; MENDES, T.; CUNHA, A. P.; PAMPUCH, L.; SELUCHI, M.; SIMOES, S.; CUARTAS, L. A.; GONCALVES, D.; MASSI, K.; ALVALÁ, R. C.; MORAES, O.; FILHO, C. S.; MENDES, R.; NOBRE, C. Deadly disasters in southeastern south america: flash floods and landslides of february 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. **Natura Hazards and Earth System Sciences**, v. 23, p. 1157–1175, 2023. 15

ALVARENGA, L.; MELLO, C.; COLOMBO, A.; CUARTAS, L.; CHOU, S. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 6, n. 40, p. 647–657, 2016. 4

ALVES, M. P. A. **Análise comparativa dos fatores ambientais nos eventos de inundações na bacia hidrográfica do vale do Itajaí: Novembro de 2008 e Setembro de 2011.** 160 p. Monografia (Graduação em Geografia — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2013. 3, 55, 57

ANA, W. O. S.; BACK, A. J. Tendência do aumento de chuvas e suas implicações na estabilidade de encostas no sul de santa catarina. **Tecnologia e Ambiente**, v. 25, p. 95–109, 2019. 14

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. R. d. S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: a case study in mundaú river basin, northeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E1045–E1061, 2021. 5, 16, 17, 85

ANDREADIS, K. M.; CLARK, E. A.; WOOD, A. W.; HAMLET, A. F.; LETTENMAIER, D. P. Twentieth-century drought in the conterminous United States. **Journal of Hydrometeorology**, v. 6, n. 6, p. 985–1001, 2005. 11

ASSIS, J. M. O.; LACERDA, F. F.; SOBRAL, M. C. M. Análise de detecção de tendências no padrão pluviométrico na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 320–331, 2012. 3

AUMOND, J. J.; SEVEGNANI, L.; TACHINI, M.; BACCA, L. E. Condições naturais que tornam o vale do itajaí sujeito aos desastres. **Desastres**, p. 22–37, 2009. 21

ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil.

**Environmental Research Letters**, v. 11, n. 11, p. 114029, 2016. 2, 5

BARBOSA, S. E. S.; BARBOSA JUNIOR, A. R.; SILVA, G.; CAMPOS, E. N. B. Q.; RODRIGUES, V. C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais. **Sociedade e Natureza**, v. 10, p. 64–71, 2005. 22, 28

BLACK, T. L. The new nmc mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and forecasting**, v. 9, p. 265–278, 1994. 25

BRITO, Y. M. A. de; BRITO, H. C. de; RUFINO, I. A. A.; BRAGA, C. F. C. Panorama da seca plurianual 2012–2018 no semiárido brasileiro: impactos hidrológicos, agrícolas e medidas de convivência. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, 2021. 1, 2, 15

BRONSTERT, A.; AGARWAL, A.; BOESSENKOOL, B.; CRISOLOGO, I.; FISCHER, M.; HEISTERMANN, M.; KÖHN-REICH, L.; LÓPEZ-TARAZÓN, J. A.; MORAN, T.; OZTURK, U.; REINHARDT-IMJELA, C.; WENDI, D. Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: the 2016-05-29 event in braunsbach, sw germany. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 977–991, 2018. 1

BROUZIYNE, Y.; ABOUABDILLAH, A.; HIRICH, A.; BOUABID, R.; ZAABOUL, R.; BENAABIDATE, L. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a mediterranean watershed under projected climate change scenarios. **Agricultural Systems**, v. 162, p. 154—163, 2018. 110

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres**. Brasília, 2003. 174p. Relatório técnico. 12, 13

CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL - UFSC. **Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. [S.l.]: UFSC, 2013. 168 p. 2, 3, 14, 44, 47, 56

CHATTOPADHYAY, S.; EDWARDS, D. R.; YU, Y.; HAMIDISEPEHR, A. An assessment of climate change impacts on future water availability and droughts in the kentucky river basin. **Environmental Processes**, v. 4, p. 477—507, 2017. 16

CHEN, A.; GIESE, M.; CHEN, D. Flood impact on mainland southeast asia between 1985 and 2018—the role of tropical cyclones. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, p. e12598, 2020. 1

CHOU, S. C. Modelo regional eta. **Climanálise Boletim de Monitoramento e Análise Climaática**, v. 9, 1996. 25

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of eta model seasonal precipitation forecasts over south america. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537–555, 2005. 25

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURAO, 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.; MARENGO, J. A. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512—525, 2014a. 4, 15, 16, 25, 28

\_\_\_\_\_. Assessment of climate change over south america under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438—454, 2014b. 4, 15, 16, 25

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; TAVARES, P. Downscaling of south america present climate driven by 4-member hadcm3 runs. **Climate dynamics**, v. 38, p. 635–653, 2012. 16, 25, 28

COELHO, C. A.; OLIVEIRA, C. P. de; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P. D.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 3737—3752, 2016. 2

COMITÊ DO ITAJAÍ. **Plano de recursos hídricos da Bacia do Itajaí**. [S.l.], 2010. 1–80 p. 21

CORTEZ, B. N. **Precipitações extremas em condições não estacionárias para cenários de mudanças climáticas no Brasil**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) — Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG, 2020. 2, 5, 14, 15

COSTA, H.; TEUBER, W. **Enchentes no Estado do Rio de Janeiro – uma abordagem geral**. Rio de Janeiro: SEMA, 2001. 160p. Relatório técnico. 12

CUARTAS, L. A.; CUNHA, A. P. M. D. A.; ALVES, J. A.; PARRA, L. M. P.; DEUSDARÁ-LEAL, K.; COSTA, L. C. O.; MOLINA, R. D.; AMORE, D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; CUNNINGHAM, C.; ALVALÁ, R. C. S.; MARENGO, J. A. Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, v. 14, p. 601, 2022. 2, 58

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, p. 642, 2019. 2, 58

DEB, D.; BUTCHER, J.; SRINIVASAN, R. Projected hydrologic changes under mid-21st century climatic conditions in a subarctic watershed. **Water Resources Management**, v. 29, p. 1467—1487, 2014. 3, 15

DUNN, R. J.; ALEXANDER, L. V.; DONAT, M. G.; ZHANG, X.; BADOR, M.; HEROLD, N.; LIPPMANN, T.; ALLAN, R.; AGUILAR, E.; BARRY, A. A.; BRUNET, M.; CAESAR, J.; CHAGNAUD, G.; CHENG, V.; CINCO, T.; DURRE, I.; GUZMAN, R.; HTAY, T. M.; BADULLAH, W. M. I.; IBRAHIM, M. K. I. B.; KHOSHKAM, M.; KRUGER A. KUBOTA, H.; LENG, T. W.; LIM, G.; LI-SHA, L.; MARENGO, J.; MBATHA, S.; MCGREE, S.; MENNE, M.; KANSI, M. M.; NGWENYA, S.; NKRUMAH, F.; ONARIYA, C.; PABON-CAICEDO, J. D.; PANTHOU, G.; PHAM, C.; RAHIMZADEH, F.; RAMOS, A.; SALGADO, E.; SALINGER, J.; SANÉ, Y. Y.; SOPAHEL UWAKAN, A.; SRIVASTAVA, A.; SUN, Y.; TIMBAL, B.; TRACHOW, N.; TREWIN, B.; SCHRIER G. VAZQUEZ-AGUIRRE, J.; VASQUEZ, R.; VILLARROEL, C.; VINCENT, L.; VISCHER, T.; VOSE, R.; NOOR'ARIFIN, M.; HJ, B.; YUSSOF, M. N. A. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: Hadex3. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, p. e2019JD032226, 2020. **2**

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA - EPAGRI. **Relatório anual dos eventos extremos hidrológicos da sala de situação ANA/Epagri**. [S.l.]: EPAGRI, 2020. 1057 p. **2, 3, 45, 52, 53, 56, 111**

FERNANDES, V. R.; CUNHA, A. P. M. A.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; COSTA, L. C. O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A. Secas e os impactos na região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561—584, 2021. **2, 58**

FORSTER, A. **Estudo numérico de inundação no alto vale do Itajaí-SC**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) — Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande – RS, 2019. **47**

FREUND, M.; HENLEY, B. J.; KAROLY, D. J.; ALLEN, K. J.; BAKER, P. J. Multi-century cool-and warm-season rainfall reconstructions for Australia's major climatic regions. **Climate of the Past**, v. 13, p. 1751–1770, 2017. **1**

GOTADO, R.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E.; SEVERO, D. L.; KAUFMAN, V. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**, v. 33, p. 253–276, 2018. **48**

GRIMM, A. M.; ALMEIDA, A. S.; BENETI, C. A. A.; LEITE, E. A. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020. **57, 58**

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2863–2880, 1998. **56**

GUEDES, H. A. S.; PRIEBE, P. D. S.; MANKE, E. B. Tendências em séries temporais de precipitação no norte do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 283–291, 2019. **30**

GUTTMAN, N. B. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, p. 311–322, 1999. 49

HERRMANN, M. L. P. **Problemas geoambientais na faixa central do litoral catarinense**. 307 p. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo – SP, 1999. 13

HERRMANN, M. L. P. **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010**. Florianópolis: UFSC, 2014. 219p. 7, 49

HOSSEINI-MOGHARI, S. M.; ARAGHINEJAD, S. Monthly and seasonal drought forecasting using statistical neural networks. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, p. 397–412, 2015. 35

HUANG, S.; CHANG, J.; LENG, G.; HUANG, Q. Integrated index for drought assessment based on variable fuzzy set theory: a case study in the yellow river basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 608—618, 2015. 140

IBGE. **Cidades e estados**. 2010. Disponível em: <<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>>>. Acesso em: 26 jun. 2020. 56

\_\_\_\_\_. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros em 01/10/2020**. 2021. Disponível em: <<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa>>>. Acesso em: 27 ago. 2021. 56

IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. In: PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (Ed.). **Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: IPCC, 2014. Disponível em: <<[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)>>. Acesso em: 21 mar. 2023. 3, 4, 15

\_\_\_\_\_. Climate change 2021: the physical science basis. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). **Contribution of working group I to the sixth assessment report of the the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: IPCC, 2021. Disponível em: <<[https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)>>. Acesso em: 21 mar. 2023. 1, 14, 47, 57, 149

JIANG, Y.; ZHOU, L.; TUCKER, C. J.; RAGHAVENDRA, A.; HUA, W.; LIU, Y. Y.; JOINER, J. Widespread increase of boreal summer dry season length over the Congo rainforest. **Nature Climate Change**, v. 9, p. 617–622, 2019. 1

- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relation of south american summer rainfall interannual variations with the pacific decadal oscillation. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 27, p. 531–540, 2006. 57
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. Londres: Griffin, 1975. 5, 30
- KENDALL, M. G.; STUART, A. **The advanced theory of statistics**. Londres: Griffin, 1967. 31
- KING, A. D.; PITMAN, A. J.; HENLEY, B. J.; UKKOLA, A. M.; BROWN, J. R. The role of climate variability in australian drought. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 177–179, 2020. 1
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p. 13
- KOKS, E. E.; VAN GINKEL, K. C.; MARLE, M. J. V.; LEMNITZER, A. Brief communication: critical infrastructure impacts of the 2021 mid-july western european flood event. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, v. 22, p. 3831–3838, 2021. 1
- LEI, X.; LU, G.; WEI, J.; MA, M.; XU, L.; FAN, H.; LI, X.; GAO, J.; HAOFEI, D. Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the poyang lake basin of China. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 123, p. 103019, 2021. 108, 110
- LIRA, F. A.; CARDOSO, A. O. Tendência de vazões de rios das principais bacias hidrográficas brasileiras. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, v. 48, p. 21–37, 2018. 5, 47
- LOON, A. F. V. Hydrological drought explained. **Water**, v. 2, p. 359–392, 2015. 9, 10, 52, 140
- LOON, A. V.; LAAHA, G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 3–14, 2015. 52
- LUCENA, A. F. P.; HEJAZI, M.; ARROYO, E. V.; TURNER, S.; KÖBERLE, A. C.; DAENZER, K.; ROCHEDO, P. R. R.; KOBER, T.; Y., C.; BEACH, R. H.; GERNAAT, D.; VUUREN, D. P. V.; ZWAAN, B. V. D. Interactions between climate change mitigation and adaptation: the case of hydropower in Brazil. **Energy**, v. 164, p. 1161–1177, 2018. 16
- LYRA, A. A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J. A.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in southeast Brazil using the nonhydrostatic eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, p. 663–682, 2016. 16, 28

MANN, H. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945. 5, 30, 31

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; PINTO FILHO, R. D. F.; ROMERO, V. Caracterização hidromorfológica da bacia do vale do Itajaí. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., **Proceedings...**, Maceió, Alagoas, Brasil. [S.l.]: ABRHIDRO, 2011. On-line. 20

MARENGO, J. A.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C. A.; DOLIF, G.; GONCALVES, D.; DIAS, M. A.; CUARTAS, L. A.; BENDER, F.; RAMOS, A. M.; MANTOVANI, J. R.; ALVALÁ, R. C.; MORAES, O. L. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on may 25-28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, p. 100545, 2023. 15

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N.; RAMOS, A. M. Tendências em chuvas extremas e desastres hidrogeometeorológicos na região metropolitana de São Paulo: uma revisão. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, p. 5–20, 2020. 1, 2, 14

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; AVALA, R.; BRITO, S.; MORAES, O.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. O. climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1973–1985, 2017. 2

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M. S.; RAMOS, A. M. Mudanças nas tendências de extremos de chuva na região metropolitana de São Paulo: causas e impactos. **Frente Climatologia**, v. 3, p. 2, 2020. 1, 2

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUEIRO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná river basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829—1848, 2012. 3, 14, 16, 25, 28

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. P.; ANGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C. C.; BENDER, F. Extreme drought in the brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, p. 639204, 2021. 2

MARENGO, J. A.; NUNES, L. H.; R., G. S. C.; HOSOKAWA, E. K.; PEDRO, G. R.; HARARI, J.; M., P. F.; FRANCO, P. L.; BANDINI, M. P.; GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z. Risk management and vulnerability to sea level rise in Brazil, with emphasis to the legacy of the metropole project in Santos. **Derbyana**, v. 43, p. e768–e768, 2022. 15

- MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. 33p. Relatório técnico. 1, 2
- MARIN, M.; CLINCIU, I.; TUDOSE, N. C.; UNGUREAN, C.; ADORJANI, A.; MIHALACHE, A. L.; DAVIDESCU, A.; DAVIDESCU, S.; DINCA, L.; CACOVEAN, H. Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using swat: a review. **Environmental Research**, v. 184, p. 1–10, 2020. 4
- MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R. A seca de 2012-2015 no nordeste e seus impactos. **Revista Parcerias Estratégicas**, v. 20, p. 107–128, 2015. 2
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationships of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., **Proceedings...**, Anaheim, CA, USA. [S.l.]: American Meteorological Society, 1993. On-line. 5, 33, 34
- MCT. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. 2010. Disponível em: <<<https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4969>>>. Acesso em: 3 abr. 2023. 25
- MCTI. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Sumário Executivo**. 2016. Disponível em: <<<https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4312>>>. Acesso em: 3 abr. 2023. 25
- MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of 78 alpine lee cyclogenesis and for a case of an appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493–1518, 1988. 25
- MIRANDA JUNIOR, G. X.; RODRIGUES, M. L. G.; CRUZ, G. de S. A estiagem do outono 2020 em Santa Catarina: a atuação da Epagri, da medição do dado à análise da informação. **Agropecuária Catarinense**, v. 33, p. 642, 2020. 53, 56
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, 2010. 33
- MODARRES, R. Streamflow drought time series forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, p. 223–233, 2007. 5, 35
- MOSS R. H. EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VUUREN, D. P. V.; CARTES, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 466, p. 747—756, 2010. 4, 27



- MURARA, P.; ACQUAOTTA, F.; GARZENA, D.; FRATIANNI, S. Daily precipitation extremes and their variations in the itajaí river basin, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 131, p. 1145–1156, 2018. 4
- NAM, W. H.; HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; TADESSE, T.; WILHITE, D. A. Drought hazard assessment in the context of climate change for south Korea. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 106—117, 2015. 16
- NOBRE, P. **Brasil já sente impactos das mudanças climáticas e situação pode se agravar: Eventos extremos, como os temporais que atingem a região Sudeste, serão cada vez mais comuns caso a temperatura global continue a aumentar**. Brasil: National Geographic, 2020. 1–5 p. Disponível em: <<<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2020/02/brasil-ja-sente-impactos-das-mudancas-climaticas-e-situacao-pode-se-agravar>>>. Acesso em: 3 ago. 2021. 1, 14
- OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 5005–5023, 2017. 4, 28, 110
- ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Standardized precipitation index user guide**. 2012. 1–16 p. Disponível em: <<[http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO\\_1090\\_EN.pdf](http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf)>>. Acesso em: 21 nov. 2019. 34
- PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, P. J.; LINDEN, V. D.; HANSON, C. E. **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York, NY, USA, 2018. 11
- PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 75—93, 2010. 16, 25, 28
- PINOS, J.; QUESADA-ROMÁN, A. Flood risk-related research trends in latin america and the caribbean. **Water**, v. 14, 2022. 1
- PLOSZAI, R.; MINE, M. R. M.; DETZEL, D. H. M. An analysis of non-stationary drought conditions in Paraná state based on climate change scenarios. **Water Resour Manage**, v. 36, p. 3401—3415, 2022. 4, 6, 16, 17, 85
- PORTELA, M. M.; QUINTELA, A. C.; SANTOS, J. F.; VAZ, C.; MARTINS, C. Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH)**, v. 32, p. 43–60, 2011. 32
- PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na bacia do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 247–253, 2004. 22, 28

PSCHEIDT, I.; GRIMM, A. M. Frequency of extreme rainfall events in southern Brazil modulated by interannual and interdecadal variability. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 29, p. 1988–2011, 2009. 57

RAJIB, M.; RAHMAN, M. A comprehensive modeling study on regional climate model (rcm) application – regional warming projections in monthly resolutions under ipcc a1b scenario. **Atmosphere**, v. 3, p. 557—572, 2012. 4

RIBEIRO NETO, A.; PAZ, A. R. da; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1103–1127, 2016. 4, 14, 16, 47, 108, 110, 144

RIVERA, J. A.; GARCÍA, J. D.; HINRICHS, S.; LÓPEZ, M.; LORENZINI, P.; MARIANETTI, G.; VELASCO, M. J. M.; MENDEZ, S.; LARA, S. B. M.; RUBIO, J.; ESTRELLA, G. S.; STEVENS, L.; VANNELLI, M. Ocurrencia de precipitaciones extremas en la provincia de Mendoza y su relación con el fenómeno de El Niño. In: JORNADAS DE INVESTIGACIÓN, 9., **Proceedings...**, Mendoza, República Argentina. [S.l.]: Revista Jornadas de Investigación, 2017. On-line. 1

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R. de; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A. de; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. Daily precipitation extremes and their variations in the Itajaí river basin, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 40, p. 1511–2526, 2019. 5, 17, 140, 144

SAITO, S. M.; DIAS, M. C. A.; ALVALÁ, R. C. S.; STENNER, C.; FRANCO, C. O.; RIBEIRO, J. V. M.; SOUZA, P. A.; SANTANA, R. A. S. M. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 1–25, 2019. 47

SANTOS, A. P. P.; COELHO, C. A.; PINTO JUNIOR, O.; SANTOS, S. R. Q.; LIMA, F. J. L.; SOUZA, E. B. Climatic diagnostics associated with anomalous lightning incidence during the summer 2012/2013 in southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 996–1009, 2018. 4, 28, 35

SANTOS, D. N.; SILVA, V. P. R.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, R. A. Estudo de alguns cenários climáticos para o nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 492–500, 2010. 32

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; NEVES, T. D. A. T.; SANTOS, A. P. P. Droughts in the Amazon: identification, characterization and dynamical mechanisms associated. **American Journal of Climate Change**, v. 6, p. 425, 2017. 2, 4, 14, 30, 33, 34, 49

SCHETTINI, C. A. F. Caracterização física do estuário do rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre**, v. 7, p. 123–142, 2002. 21

- SECCI, D.; G., T. M.; D'ORIO, M.; TODARO, V.; FAGANDINI, C. Impacts of climate change on groundwater droughts by means of standardized indices and regional climate models. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127154, 2021. 144
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. **Journal of the American statistical association**, v. 63, p. 1379–1389, 1968. 32
- SEVERO, D.; SILVA, H.; TACHINI, M. Flutuações climáticas da precipitação no Vale do Itajaí (SC). **Revista de Estudos Ambientais**, v. 20, p. 37–48, 2019. 7, 56
- SHIFERAW, H.; GEBREMEDHIN, A.; GEBRETSADKAN, T.; ZENEBE, A. Modelling hydrological response under climate change scenarios using swat model: the case of ilala watershed, Northern Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, p. 437—449, 2018. 4, 108
- SHUKLA, S.; WOOD, A. W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical research letters**, v. 35, 2008. 35
- SIEBERT, C. **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. água, gente e política**. Blumenau – SC, 2009. 192p. Relatório técnico. 45, 56
- SILVA, F. B.; SANTOS, J. R. N.; FEITOSA, F. E. C. S.; SILVA, I. D. C.; ARAÚJO, M. L. S. D.; GUTERRES, C. E.; NERES, R. L. Evidências de mudanças climáticas na região de transição amazônia-cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 330–336, 2016. 3
- SILVA, J. L. S.; CRUZ-NETO, O.; PERES, C. A.; TABARELLI, M.; LOPES, A. V. Climate change will reduce suitable caatinga dry forest habitat for endemic plants with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies. **PLoS One**, v. 14, p. e021702, 2019. 2
- SILVA JUNIOR, C. H. L. Lógica fuzzy e processo analítico hierárquico (ahp) aplicados ao zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: uma revisão. **Monografias Ambientais**, v. 14, p. 42–55, 2015. 14
- SOUSA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES, M. V. G.; AVANZI, J. C. Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 330—347, 2019. 4
- SPINELLI, K.; NASCIMENTO, R.; FUENTES, M. Análise climática dos episódios de estiagem que provocaram danos socioeconômicos no oeste catarinense entre 1999 a 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2018. 49
- STAGGE, J. H.; KOHN, I.; TALLAKSEN, L. M.; STAHL, K. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 37—50, 2015. 6

STOCKER, T. **Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: [s.n.], 2014. 27

TACHINI, M. **Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau**. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis – SC, 2010. 12

TAN, M. L.; YUSOP, Z.; CHUA, V. P.; CHAN, N. W. Climate change impacts under cmip5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan river basin, Malaysia. **Atmospheric Research**, v. 189, p. 1–10, 2017. 4

TAO, H.; FRAEDERICH, K.; MENZ, C.; ZHAI, J. Trends in extreme temperature indices in the poyang lake basin, china. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, p. 1543–1553, 2014. 32

TAUFIK, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; VAN DAM, J. C.; JONES, P. D.; VAN LANEN, H. A. J. Human-induced changes in indonesian peatlands increase drought severity. **Environmental Research Letters**, v. 15, p. 084013, 2020. 1

TAYE, M.; WILLEMS, P.; BLOCK, P. Implications of climate change on hydrological extremes in the blue Nile basin: a review. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 280—293, 2020. 1, 4

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; OISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312—6335, 2010. 27

WILBY R. L. DAWSONB, C. W.; BARROWC, E. M. A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, p. 147—159, 2002. 3, 15

WU, S.; ZHANG, X.; SHE, D. Joint pattern of seasonal hydrological droughts and floods alternation in China's huai river basin using the multivariate l-moments. **Journal of Earth System Science**, v. 126, p. 1–17, 2017. 1, 14

ZHANG, Y.; YOU, Q.; CHEN, C.; GE, J. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: a case study in Xin river basin, China. **Atmospheric Research**, v. 178, p. 521—534, 2016. 4