



GABRIELE MESQUITA ANDRADE

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA SECA
METEOROLÓGICA DE UMA REGIÃO DE CABECEIRA
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE**

LAVRAS – MG

2022

GABRIELE MESQUITA ANDRADE

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA SECA
METEOROLÓGICA DE UMA REGIÃO DE CABECEIRA
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Ambiental e
Sanitária, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof(a). Dr(a). Lívia Alves Alvarenga

Orientador(a)

Prof. Dr. André Ferreira Rodrigues

Coorientador

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre iluminar minha caminhada e me dar forças para enfrentar todas as dificuldades.

À toda a minha família, em especial, minha mãe Amarilda pelo apoio e dedicação, meu pai Mauro, que não está mais entre nós, mas continua me dando forças, sua lembrança me faz prosseguir, e minhas irmãs Rafaela e Janaina por todo companheirismo.

Ao meu noivo Virgílio, por estar comigo desde é o início e permanecer sempre me apoiando e ajudando, seu amor e companheirismo foram essenciais neste período.

Aos meus amigos da graduação, em especial, Wesley, Breno e Debora, por toda ajuda e amizade.

À minha orientadora Livia Alves Alvarenga, pela oportunidade de trabalharmos juntas, por toda compreensão e ensinamentos neste período.

Ao meu coorientador André Ferreira Rodrigues, por toda ajuda, ensinamentos e compreensão.

RESUMO

O fenômeno da seca pode causar diversos prejuízos para os setores elétricos, sociais e ambientais. Na região sudeste uma redução de 20-23% da precipitação em um período prolongado de três anos é o suficiente para criar condições de escassez de água para a região. Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo avaliar com base nas projeções de modelos climáticos as características da seca (frequência, intensidade e duração) para a região Sudeste do país. A pesquisa foi realizada com base nos índices *Standard Precipitation Index* (SPI) e *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), na escala de tempo anual, para as cidades, Barbacena, Lavras, São Lourenço e Resende, próximas a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, localizada no sudeste do Brasil. Os índices foram calculados com base em projeções ao longo do século XXI geradas pelos modelos climáticos globais HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, regionalizados pelo modelo climático regional Eta, associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5. De modo geral, constatou-se que para as simulações no período de (1980 – 2005) os resultados de secas, obtidos pelas simulações do Eta – MIROC foram os que mais se aproximaram do observado na região, de acordo com a literatura, sendo o período estimado como mais seco (2000 – 2001). Para as projeções dos cenários futuros (2006 – 2099) o modelo Eta – HadGEM2-ES foi o que mais apresentou semelhança com o já registrado na literatura, estimando anos consecutivos secos para o período de 2013 a 2019, em ambos os cenários. Avaliando os dois índices, conclui-se que as projeções geradas pelos modelos não tendem a intensificar os efeitos das secas. Entretanto, o SPI e o SPEI mostraram que pode haver vários anos consecutivos com déficit de precipitação e aumento da temperatura, principalmente no cenário RCP 8.5. Compreender as características da seca para o cenário futuro é uma ótima ferramenta para auxiliar em uma gestão correta.

Palavras-chave: Índices de seca, mudanças climáticas, modelos climáticos, cenários RCP's.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Secas	7
2.2 Índices de seca	8
2.2.1. Standard Precipitation Index (SPI).....	10
2.2.2 Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	10
2.3 Modelos climáticos globais e modelos climáticos regionais	11
2.4 Mudanças climáticas e seus impactos na seca	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Caracterização da área de estudo.....	14
3.2 Série de dados climáticos.....	16
3.3 Índice SPI.....	17
3.4 Índice SPEI.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Avaliação da aderência das FDPs.....	20
4.2 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o tempo presente	21
4.3 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o cenário RCP 4.5.	29
4.4 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o cenário RCP 8.5.	36
5. CONCLUSÃO	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

A seca é um estado natural transitório que ocorre nas diversas zonas climáticas com diferentes intensidades, duração e frequência. Apesar de ser um fenômeno bastante estudado devido à sua importância para os setores elétricos, sociais e ambientais (RODRIGUES et al. 2021), definir o início e o fim de um episódio de seca continua sendo um desafio para os pesquisadores e tomadores de decisão (GONÇALVES et al., 2021; SANTOS; COSTA; GALVINCIO, 2021).

Secas são decorrentes de anormalidades climáticas que causam algum tipo de deficiência na disponibilidade hídrica. Esse déficit ocorre em diferentes componentes do ciclo hidrológico e em diferentes intervalos de tempo (JUNQUEIRA et al., 2020; SHAH; MISHRA, 2020). A redução das precipitações em determinada região é o primeiro indicativo da ocorrência de secas (SILVA E MELLO, 2021; QUIRING, 2009). Esta pode se propagar para o solo, os cursos d'água e à água subterrânea. Todavia, a propagação de secas entre os componentes do ciclo hidrológico apresenta certo retardamento a depender das características do solo, da geologia e da geração de escoamento da bacia hidrográfica em estudo (JUNQUEIRA ET AL., 2020; QUIRING, 2009).

No Sudeste Brasileiro a distribuição dos períodos de precipitação apresenta sazonalidade, demonstrando um ritmo sazonal tipicamente tropical (OBREGÓN; MARENGO; NOBRE, 2014). Nos anos de 2013, 2014 e 2015, esta região apresentou precipitação muito abaixo do habitual registrado no período chuvoso, essa tendência tem sido associada a mudanças na variabilidade das chuvas nessa região. Assim, torna-se importante enfatizar que uma redução de 20-23% da precipitação em um período prolongado de três anos é o suficiente para criar condições de escassez de água no sudeste do Brasil (NOBRE et al., 2016; SILVA, MELLO e CHOU, 2022). Uma região importante para o sudeste do Brasil é o sul de Minas Gerais que se destaca na produção de café (aproximadamente 30% da produção do país) e geração hidrelétrica (1216 MW de potência instalada) (SILVA, MELLO e CHOU, 2022), principalmente na bacia do rio Grande. Nesse sentido, estudos têm sido desenvolvidos nessa região para avaliar o efeito de eventos extremos na disponibilidade hídrica e fornecer subsídio aos tomadores de decisão (OLIVEIRA, et al., 2017)

Para o estudo das secas é importante identificar e analisar o seu grau de severidade, intensidade, frequência e duração, para isso foram elaborados índices de seca (QUIRING, 2009). Estes índices padronizam o déficit e o superávit da variável meteorológica para o intervalo de tempo de interesse (por exemplo, precipitação). Essa padronização permite que as condições sejam comparadas entre regiões com diferenças climáticas, além de caracterizar a

seca quanto à sua probabilidade de ocorrência (QUIRING, 2009). Dois importantes índices para estudos em recursos hídricos são o *Standard Precipitation Index* (SPI) que foi desenvolvido por McKee et. al (1993) e o *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), que utiliza a diferença entre precipitação e evapotranspiração de referência ($P - ET$) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010a).

Pensando na importância de se analisar a frequência e duração das secas para o futuro, em relação ao meio ambiente e as diversas atividades econômicas, modelos de simulação do clima global (GCMs), são ótimos mecanismos para estudar os possíveis cenários que se baseiam em simulações de cenários de emissões de gases do efeito estufa na atmosfera do planeta. Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) representam uma referência padrão sobre as causas, impactos e medidas de mitigação das mudanças climáticas globais para toda a comunidade científica e população em todo o mundo.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi analisar, com base nos índices *Standard Precipitation Index* (SPI) e *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), o comportamento e a frequência de secas nos municípios de Barbacena, Lavras, São Lourenço e Resende, próximos à bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, uma região de cabeceira da bacia do Rio Grande utilizando dados gerados por modelos climáticos. Assim, procurou-se estimar os índices de seca ao longo do século XXI, utilizando dados simulados históricos e projeções futuras dos modelos climáticos globais HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, regionalizados pelo modelo climático regional Eta e associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Secas

A seca é um fenômeno natural que apresenta diversos danos para o ambiente, sociedade e economia. Por mais que a seca seja um dos principais fenômenos naturais, esta é complexa e de difícil explicação (SHAH; MISHRA, 2020). As secas manifestam um estado transitório e são evidentes depois de um longo período sem precipitação, porém seu início, extensão e fim são difíceis de serem definidos (GONÇALVES et al., 2021; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010b). Embora seja complicado relacionar apenas um fator responsável pela seca, a seca pode ser dividida em diferentes vertentes que correspondem ao tipo de impacto ocasionado, facilitando seu monitoramento e as tomadas de decisão. Dessa forma, as secas podem ser classificadas em: meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e socioeconômicas (QUIRING, 2009).

A seca meteorológica é proveniente de um longo período sem precipitação e a um grande aumento na evapotranspiração, levando em consideração uma média histórica em uma determinada área (PESSINI, 2017; VAN LOON, 2015). A seca meteorológica é a responsável para a ocorrência das secas agrícola e hidrológica, uma vez que o déficit de precipitação afeta tanto a disponibilidade de água no solo quanto às vazões dos rios (VAN LOON et al., 2016). A seca agrícola tem início quando ocorre diminuição da disponibilidade de água no solo afetando, assim, o desenvolvimento das culturas agrícolas (WILHITE, 2000). Segundo Wilhite (2000), este tipo de seca está associado aos impactos causados pela seca meteorológica na produção agrícola, com foco na escassez da precipitação, diferenças entre a evapotranspiração real e potencial, déficit de água no solo, entre outros (GONÇALVES et al. 2021).

De acordo com Van Loon (2015), a seca hidrológica indica que existe deficiência de água no sistema hidrológico, o que é demonstrado num escoamento excessivamente baixo nos cursos d'água, assim como nos reservatórios, lagos e aquíferos. Este tipo de seca traz consequências como o racionamento nos sistemas de abastecimento hídrico das cidades ou das áreas de irrigação (GONÇALVES et al. 2021). Quando combinadas as secas mencionadas acima, surge a seca socioeconômica. Esta ocorre devido à escassez hídrica, assim, o abastecimento de água para consumo humano e outras atividades fica insuficiente, criando problemas socioeconômicos (PESSINI, 2017; VAN LOON, 2015).

Os três primeiros tipos de seca (meteorológica, agrícola, hidrológica) relacionam maneiras de quantificar a seca como um fenômeno físico, entretanto, a seca socioeconômica é mais complexa e depende não apenas da disponibilidade hídrica, como também da demanda sobre os recursos hídricos e seus impactos socioeconômicos (JUNQUEIRA et al., 2020).

2.2 Índices de seca

Os índices de seca são ferramentas para que as secas sejam compreendidas de uma forma mais eficiente, podendo identificar seus impactos, assim como, quantificar sua intensidade, duração, início e término (FERNANDES ET AL. 2009). Tais índices utilizam series históricas de diversas variáveis, como precipitação, temperatura do ar, evapotranspiração, escoamento superficial e umidade do solo. Além disso, cada um apresenta uma metodologia a fim de calcular a severidade deste fenômeno em determinada região (TEIXEIRA et al. 2013, FERNANDES ET AL. 2009).

A Tabela 1 apresenta os principais índices de seca da literatura, em que cada um possui grande importância na determinação da seca em determinado tipo de pesquisa.

Tabela 1 – Principais índices de determinação de seca.

Índice	Parâmetros	Tipo de seca	Autor
--------	------------	--------------	-------

Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	Precipitação, evapotranspiração e capacidade de campo do solo	Meteorológica	Palmer (1965)
Índice de Anomalia de Chuva (RAI)	Precipitação	Meteorológica	Rooy (1965)
Índice de Severidade de Herbst (HSI)	Precipitação	Meteorológica	Herbst, Bredenkamp e Barker (1966)
Método dos Decis (MD)	Precipitação	Meteorológica	Gibbs (1967)
Índice de Umidade de Cultura (CMI)	Precipitação, temperatura e umidade do solo	Agrícola	Palmer (1968)
Índice de Seca e Bhalme & Mooley (BMDI)	Precipitação	Meteorológica	Bhalme e Mooley (1980)
Índice de Abastecimento de Água em Superfície (SWSI)	Precipitação, quantidade de neve, escoamento e runoff	Hidrológica	Shafer (1982)
Índice de Desvio de Chuva de Lamb (LRDI)	Precipitação	Meteorológica	Lamb; Peppler e Hastenrath (1986)
Índice de Precipitação Padronizado (SPI)	Precipitação	Meteorológica	McKee, Doesken e Kleist (1993)
Índice de Seca Efetiva (EDI)	Precipitação, temperatura e umidade do solo	Agrícola	Byun e Wilhite (1999)
Índice de Severidade de Seca de Palmer autocalibrado (scPDSI)	Precipitação e evapotranspiração	Meteorológica	Wells, Goddard e Hayes (2004)
Índice de Seca de Reconhecimento (RDI)	Precipitação e evapotranspiração	Meteorológica	Tsakiris e Vangelis (2005)
Índice de Escoamento Padronizado (SSFI)	Escoamento	Hidrológica	Modarres (2007)
Índice de Precipitação Evapotranspiração Padronizado (SPEI)	Precipitação e Evapotranspiração	Meteorológica	Vicente-Serrano, Beguería e LópezMoreno (2010)
Índice de Porcentagem Normal (IPN)	Precipitação	Meteorológica	

Fonte: Adaptado de Junqueira 2019.

2.2.1. Standard Precipitation Index (SPI)

O *Standard Precipitation Index (SPI)*, que significa Índice de Precipitação Padronizado, foi desenvolvido na Universidade Estadual do Colorado por McKee, Doesken e Kleist (1993). Este é um índice que possibilita avaliar o déficit ou superávit de precipitação em um determinado local (JUNQUEIRA et al., 2020).

O SPI é calculado utilizando-se dados pluviométricos e o ideal é que o período de dados seja de pelo menos 30 anos. A escala temporal com que ele é calculado depende do objetivo da pesquisa realizada, podendo ser de 3, 6, 12, 24 ou 48 meses. Se as escalas de tempo são pequenas, 3 ou 6 meses, o SPI apresenta mais variação entre os valores negativos e positivos. Conforme esta escala aumenta como em 12, 24 ou 48 meses, o SPI responde mais lentamente às mudanças na precipitação. Assim, os valores de SPI negativos e positivos tornam-se menores em números, mas com uma duração maior (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993).

A Organização Meteorológica Mundial (2012) recomenda que o índice SPI seja padrão já que este apresenta uma boa precisão e é fácil de ser determinado, uma vez que necessita apenas de dados de precipitação. Neste sentido, o índice é muito usado para determinar secas em diversas regiões do mundo. Hayes et al. (1999) por exemplo usaram o SPI para estudar a seca que aconteceu nos Estados Unidos em 1996. Karavitis et al. (2011) aplicaram o SPI na Grécia em 46 estações meteorológicas para os anos de 1947-2004 e o índice descreveu com eficácia os eventos de seca observados, além disso os autores recomendaram o SPI como ferramenta para categorização (secas severas ou brandas) e monitoramento desses fenômenos.

No Brasil existem diversos estudos usando o SPI. Os pesquisadores Santos et al. (2016), por exemplo, utilizaram este índice para determinar as regiões homogêneas da Amazônia Oriental numa escala de 6 meses e para analisar as principais características dos eventos secos e chuvosos em cada região. Os resultados obtidos conseguiram identificar os maiores eventos secos na região litoral. As regiões sul e central apresentaram mais eventos chuvosos, porém com pouca duração.

Carmo e Lima (2020), utilizaram o SPI para pesquisar as secas no Nordeste brasileiro no período de 1980-2013, onde foi observado que as secas mais severas e extremas coincidiram com os anos citados pela literatura (1982 e 1993). Além disso, os autores identificaram também secas menores, que não são apresentadas na literatura, as quais ocorreram em 1981, 1996 e 1998 e atingiram cerca de 20% a 36% do local.

2.2.2. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

O índice *Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*, que significa Índice Precipitação e Evapotranspiração Padronizado foi desenvolvido por Vicente-Serrano et al.,

(2009) no Instituto Pirenaico de Ecologia in Zaragoza na Espanha. O motivo da sua criação veio da possibilidade de adicionar mais variáveis ao SPI, trazendo mais informações sobre as secas. Este índice inclui a componente temperatura em seus cálculos, o que permite que o seu efeito nas secas seja estudado por meio do balanço hidrológico vertical. O SPEI tem uma sensibilidade maior que o SPI em valores negativos extremos, sendo uma ótima ferramenta para monitorar eventos extremos de seca (SILVA; MELLO; CHOU, 2021).

LI et al., (2020) estudaram a característica das secas na China em 1980 e 2015, usando os índices SPI e SPEI. Os autores constataram que, comparando os dois índices, o SPEI identifica uma frequência de seca mais baixa, porém com áreas totais de seca maiores em geral. Além disso, o SPEI identifica um número maior de eventos severos de seca que o SPI. Eles também concluíram que, considerando que a evapotranspiração potencial aumenta em climas quentes, o SPEI pode ser mais adequado do que o SPI no monitoramento de secas para as mudanças climáticas.

Em busca de analisar a presença de secas em locais da Índia, Das et al., (2016) também utilizaram o SPEI para estudar o comportamento e tendência das secas no período de 1901 a 2008. O SPEI apresentou maior sensibilidade na identificação de secas extremas, além disso as secas na parte leste da Índia ocorreram em sua maioria pela ausência de chuva, entretanto, na parte oeste do país, a maioria das secas foram motivadas pelo aumento da evapotranspiração.

2.3 Modelos climáticos globais e modelos climáticos regionais

Os modelos climáticos surgiram como um dos diversos avanços científicos, tendo a finalidade de simular sistemas físicos e químicos na atmosfera e oceano com alta complexidade, estes são formados por representações matemáticas que se aproximam da realidade (SAMPAIO et al., 2014).

As simulações dos modelos climáticos, diferente das previsões do tempo, conseguem não só prever condições para dias consecutivos próximos, mas também para cenários futuros, projetando características gerais para o clima dos próximos anos. Para tal simulação os modelos consideram informações como, por exemplo, as mudanças no uso do solo e das concentrações de gases de efeito estufa (SILVA; MELLO; CHOU, 2021; REBOITA, et al., 2017). As equações de um modelo climático são separadas por quatro dimensões, sendo elas: latitude, longitude, altitude (“pontos de grade”) e tempo (ZÁKHIA, 2020).

Existem dois tipos destes modelos que são os modelos de circulação geral da atmosfera (MCG) e os modelos com áreas mais limitadas e que utiliza os modelos climáticos como condição de contorno, mais conhecidos como modelos climáticos regionais (MCR). Os MCR

apresentam resultados mais precisos que os MCG, já que possuem melhor resolução horizontal e parametrizações físicas mais adequadas para resolver os processos atmosféricos de mesoescala, pensando nisso os modelos regionais podem ser ótimos simuladores para regiões de topografia complexa como o sudeste do brasileiro. (REBOITA, et al., 2017).

Dentre os MCGs disponibilizados *no Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), neste trabalho serão ressaltados três modelos, denominados HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2. O motivo da escolha dos MCGs está ligada aos desempenhos apresentados para a simulação na América do Sul (LYRA et al., 2018). Além do mais estes já foram aplicados em estudos anteriores sobre mudanças climáticas e estão facilmente disponíveis no acesso pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC do INPE (ALVARENGA et al., 2018). A tabela 2 apresenta informações sobre os modelos estudados.

Tabela 2 – Informações sobre os modelos de circulação geral da atmosfera (MCG).

Nome do Modelo	Abreviação	Período de Simulação		Referências
		Presente	Projeções	
<i>Hadley Centre Global Environmental Model 2- Earth System</i>	HadGEM2-ES	1950 - 2005	2006 - 2300	Collins et al. (2011), Jones et al. (2011)
<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>	MIROC5	1950 - 2005	2006 - 2100	Watanabe et al. (2010)
<i>Canadian Earth System Model Version 2</i>	CanESM2	1850 - 2005	2006 - 2100	Arora et al. (2011), Chylek et al. (2011)

Fonte: Adaptado de Zákha, 2020.

Uma vez que a resolução dos MCGs são de em torno de 100 a 200 km, uma forma muito comum de estimar na hidrologia os impactos de mudanças climáticas, onde se envolve variáveis meteorológicas, como, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar etc., é a combinação dos MCGs com os MCRs (CHOU et al., 2014b; TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Assim, a

regionalização (*downscaling*) dos resultados provenientes dos MCGs por meio de MCRs com alta resolução sobre a área de interesse é uma ótima escolha para escalonar as variáveis de baixa resolução espacial dos modelos globais para escalas locais mais refinadas (CHOU et al., 2014b).

Um modelo muito utilizado na América do Sul para fazer tal regionalização é o modelo regional conhecido com Eta, este foi desenvolvido por Mesinger (1984) em união com o Instituto Hidrometeorológico da Sérvia e Universidade de Belgra e posteriormente melhorado por Black (1994) com ajuda do Centro Meteorológico dos Estados Unidos, atingindo na época a resolução de 30 km e 50 níveis na atmosfera, atualmente esta resolução pode chegar a 5 km.

Este modelo é utilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) desde 1997 para previsões do tempo e desde 2002 para previsões de estações do ano (CHOU et al., 2014a).

2.4 Mudanças climáticas e seus impactos na seca

O termo mudança climática advém da mudança no estado do clima podendo ser identificada por alterações na média e/ou da variabilidade de suas propriedades, existindo por diversos anos. A grande concentração de gases na atmosfera, principalmente pela ação antropogênica, tem sido detectada em todo meio ambiente, sendo esta a principal influência para o aquecimento do planeta desde a metade do século XX (IPCC, 2015).

Entre os impactos causados pelas mudanças no clima, a agricultura e geração de energia são setores muito prejudicados, principalmente na região sudeste do Brasil, uma vez que estes setores são extremamente importantes para sua economia. Na agricultura o excesso ou a falta de água, causados por tal fenômeno, pode levar a uma crise de alimentos em todo mundo (SILVA; MELLO; CHOU, 2021). Na geração de energia, seu potencial produtivo pode ser diminuído devido à falta de pluviosidade e o aumento na temperatura, o que alavanca a utilização de outras fontes de combustíveis para suprir o déficit energético e aumenta o preço da energia repassado a população (SILVA; MELLO; CHOU, 2021).

Para a avaliação das mudanças climáticas Chou et al. (2014a) estudaram os impactos causados na América do Sul utilizando-se de técnicas de regionalização (*downscaling*) por meio do modelo Eta associados a três MCGs, sendo estes, HadGEM2-ES, BESM e MIROC5. Para o clima presente (1961 - 1990), os resultados foram satisfatórios com esta regionalização, apresentando características climatológicas gerais sobre a América do Sul parecidas com os dados de clima observados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Chou et al. (2014b) também avaliaram quatro simulações sobre a América do Sul até o fim do século XXI por meio da regionalização do modelo Eta aos modelos HadGEM2-ES e MIROC5. As projeções foram baseadas nos cenários futuros RCP4.5 e RCP8.5. O resultado

demonstrou que o modelo Eta-HadGEM2-ES teve maior sensibilidade quanto ao aumento dos gases do efeito estufa (GEE), o que implica que este apresentou mudanças climáticas futuras com maior impacto em relação ao Eta-MIROC5. Agora, quanto a temperatura e precipitação, o Eta-HadGEM2-ES apresentou tendências de aquecimento maiores e também maior diminuição da precipitação na região central do Brasil. Já o Eta-MIROC5 estima maior área com aumento da precipitação no Sul e Sudeste do Brasil.

Ao associarem as mudanças climáticas à seca, os autores Silva, Mello e Chou (2022), analisaram sua gravidade no sul de Minas Gerais para o período de 1970 a 2020. Além disto, eles fizeram uma projeção utilizando quatro modelos de circulação global, sendo estes HadGEM2-ES, MIROC5, BESM e CanESM2 até o final do século, pelos cenários do IPCC, RCP4,5 e RCP8,5, para identificar o comportamento da seca meteorológica na região em condições de mudanças climáticas, por meio do índice de seca SPI. Os autores identificaram que o ano hidrológico de 2013-2014 foi o mais seco, seguido de 2014-2015, o que se pôde constatar a escassez de água, que levou a redução hidroeleticidade e redução da produção cafeeira no estado. Para o futuro foi constatado que as secas extremas continuarão acontecendo e com característica semelhante. No entanto, a redução das chuvas apontou a possível ocorrência de vários anos secos consecutivos, o que pode prejudicar a hidrologia e colocar em risco a economia da região.

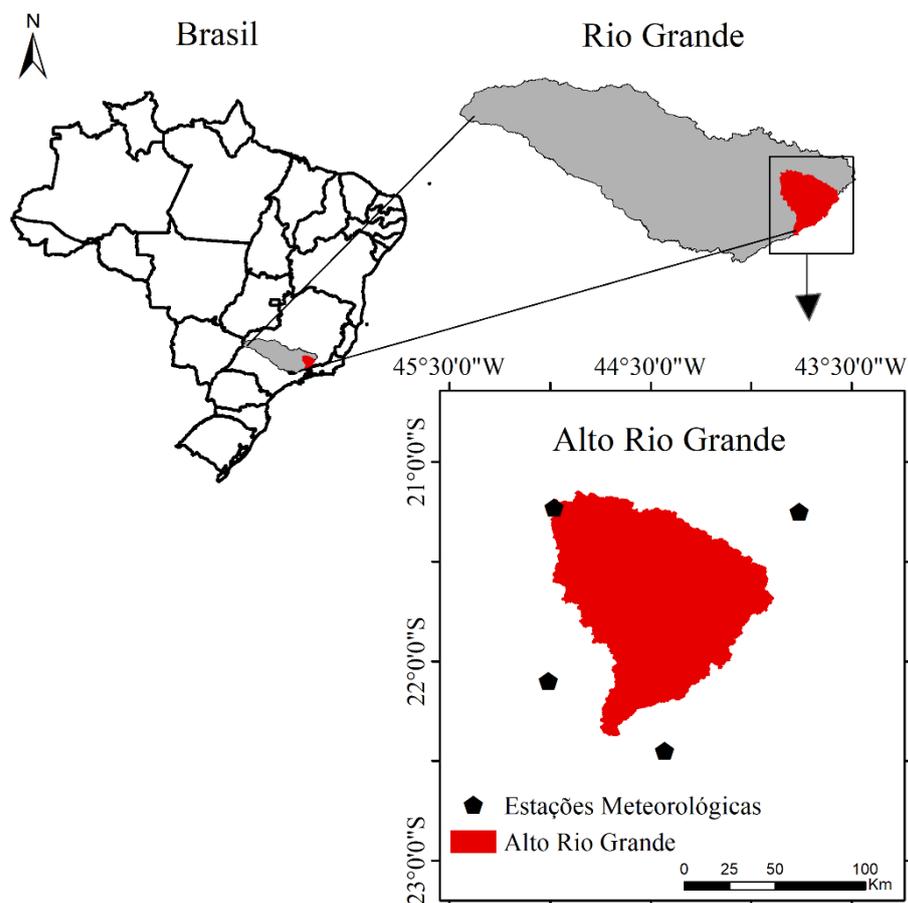
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi realizado nas proximidades da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande - BHARG, que está inserida na bacia hidrográfica do Rio Grande, que é um dos principais afluentes do Rio Paraná e possui reconhecimento nacional por sua disponibilidade hídrica e seu potencial energético (ARPA, 2022). Na Bacia do Alto Rio Grande está instalada três usinas hidrelétricas, sendo essas usinas denominadas de Camargos, Itutinga e Funil, a BHARG possui cerca 8758 km² de área de drenagem e potencial hidrelétrico total projetado de 277 MW (OLIVEIRA et al, 2017).

Para este estudo foram escolhidas 4 estações meteorológicas próximas da BHARG para obtenção da base de dados. As estações meteorológicas estão localizadas em: Lavras, Barbacena, São Lourenço e Resende, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A Figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica e as estações meteorológicas utilizadas.

Figura 1: Localização geográfica da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande e das estações meteorológicas.



Fonte: Da autora (2022).

O clima da região é classificado como Cwa (Norte) e Cwb (Sul), de acordo com a classificação climática de Köppen. Nestas classificações os verões são úmidos e amenos no Cwb e quente no Cwa, os invernos são secos e frescos, permitindo caracterizar um ano hidrológico bem definido entre outubro de um ano e setembro do ano seguinte (MELLO et al, 2012; VIOLA et al, 2015).

De acordo com as Normais Climatológicas (INMET, 2022), ambas as cidades apresentam precipitação média anual acima de 1300 mm. O maior total de precipitação foi encontrado em Resende – RJ, com cerca de 1600 mm por ano. A temperatura média da região é de em torno de 20 °C no ano.

A região é fundamental para o abastecimento de água, a irrigação e para a regulação da vazão dos reservatórios no sul de Minas Gerais (OLIVEIRA et al, 2017). Uma sequência grande de anos secos pode afetar diretamente as atividades da BHARG.

3.2 Série de dados climáticos

Para a avaliação do clima futuro, foram utilizados os dados de projeções climáticas de três modelos climáticos globais, sendo estes, HadGEM2-ES, MIROC5 e CanNES2. Para uma melhor resolução dos dados, os modelos climáticos foram regionalizados (*downscaling*) pelo modelo climático regional Eta. O acoplamento ao modelo regional Eta disponibilizou células de grade de 20 km (Chou et al. 2014a, b). Os modelos foram simulados utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Os cenários mencionados acima são denominados de Cenários Representativos de Concentração, que foram propostos no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) (IPCC, 2013). Estes foram utilizados para as simulações com modelos climáticos realizadas no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). O RCP 4.5 é um cenário intermediário com uma previsão de aquecimento da superfície do planeta de 1,1 a 2,6 °C até o fim do século XXI, já o RCP8.5 consiste em um cenário mais pessimista, simulando um aumento contínuo de temperatura da superfície do planeta que pode chegar até 5,0 °C aproximadamente (SILVA,2018).

No RCP 4.5 a forçante radioativa aumenta linearmente até aproximadamente 2060 e diminui sua taxa no final do século XXI. Já no RCP 8.5 estes valores crescem quase linearmente durante o século todo e apresenta valores mais altos no final do século (CHOU et al., 2014b).

Os dados de precipitação e temperatura das projeções climáticas foram obtidos por meio da plataforma de Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul regionalizadas pelo Modelo Eta – PROJETA., para cada uma das cidades (Lavras, Barbacena, São Lourenço, Resende). O período de dados selecionados são de 1980 à 2005 para o clima presente (*baseline*) e para o clima futuro foi considerado o período de 2006 à 2099.

Devido aos vieses presentes nos resultados dos modelos regionais o uso direto nas aplicações hidrológicas é questionável. A hidrologia regional é sensível aos valores de precipitação e temperatura, fazendo com que mesmo pequenos desvios possam modificar o equilíbrio hidrológico, portanto faz-se necessária a correção destes dados (BÁRDOSY; PEGRAM, 2011).

O método escolhido para corrigir os dados foi desenvolvido por Bárdossy e Pegram (2011). Tal método é denominado percentil por percentil e ocorre da seguinte forma: são geradas funções densidade de probabilidade cumulativas (FDPs) ou função de distribuição de frequência empírica para cada mês da variável meteorológica que são corrigidas através do ponto de grade em questão e para todo o período de observação. O método atribui os erros sistemáticos como a diferença das FDPs dos dados observados e simulados para o mesmo nível

de frequência experimental. Desta forma, para cada valor da variável meteorológica observada e estimada pelos modelos, foi determinada a frequência associada a esse valor usando a função de distribuição de frequência empírica. Para a mesma frequência, o valor corrigido de cada variável meteorológica no modelo foi determinado pela diferença entre o valor modelado no clima presente e o observado nas 4 cidades.

A obtenção das séries históricas de precipitação e temperatura dos dados observados nas 4 cidades foi feita utilizando a plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. As coordenadas e códigos das estações meteorológicas convencionais são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Estações meteorológicas, latitude, longitude e código.

Estação	Latitude	Longitude	Código
Lavras - MG	-21,23	-44,98	83687
São Lourenço - MG	-22,13	-45,04	83736
Barbacena - MG	-21,24	-43,78	83689
Resende - RJ	-22,45	-44,44	83738

Fonte: Da autora (2022).

Estas estações foram selecionadas pois apresentam maior série histórica, além de registrar os dados de precipitação e temperatura que são necessários para o estudo. As séries históricas observadas foram de 1980 a 2005.

Como a região sul de Minas Gerais tem um papel fundamental para o país em termos de geração de energia elétrica e produção agrícola, utilizou-se um período de 12 meses (outubro a setembro), com o intuito de identificar secas no longo prazo. Pois, nesta escala os valores negativos de SPI podem indicar que não houve recarga dos aquíferos e mananciais, o que gera dificuldades no abastecimento de água e produção de energia. Uma sequência temporal de SPI negativos indica um período de seca prolongado (WMO E GWP 2016, FEITOSA, 2016)

3.3 Índice SPI

Para a determinação do SPI, primeiro ajusta-se uma função densidade de probabilidade (FDP) à série histórica de precipitação para a média anual (WMO; GWP, 2016). Posteriormente, as probabilidades associadas a cada precipitação são aplicadas a uma distribuição normal padronizada (z), a qual possui média zero e desvio-padrão igual a um (MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993). Os valores positivos e negativos de z correspondem ao SPI para superávit e déficit de precipitação, respectivamente. Dessa forma, os valores de SPI podem ser comparados entre regiões que possuem diferenças climáticas, uma vez que são padronizados pela função normal. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda

a utilização da FDP GAMA 2 parâmetros para o desenvolvimento do SPI, porém outras FDP têm demonstrado desempenho satisfatório em bacias hidrográficas brasileiras (JUNQUEIRA et al., 2020).

A FDP GAMA 2P é descrita pela seguinte equação (Equação 1):

$$f(x) = \frac{1}{\beta\alpha*\Gamma(\alpha)} * x^{\alpha-1} * e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

Onde, β e α (Equações 2 e 3) são os parâmetros da FDP GAMA, Γ é a função gama, e

$$x \text{ são os valores de precipitação, em que } \beta \text{ e } \alpha \text{ são dados pelas: } \alpha = \frac{\bar{x}^2}{s^2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{s^2}{\bar{x}} \quad (3)$$

em que, \bar{x} é a média aritmética e s é o desvio padrão da série de precipitação.

Para verificar a adequabilidade da distribuição Gama foi aplicado o teste de aderência de Anderson – Darling com nível de significância a 5% ($p(\alpha)$ crítico= 0,757).

As secas podem ser associadas a diferentes graus de severidade, os quais estão associados à sua probabilidade de ocorrência. A classificação facilita a interpretação dos dados de SPI e servem como ferramenta para tomada de decisão no tocante a gestão dos recursos hídricos. A classificação pode ser encontrada no trabalho de Mckee, Doesken e Kleist (1993) (Tabela 4).

Tabela 4: Classificação SPI.

Valores de SPI	Classificação da Seca
0 a -0,99	Levemente seco
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Severamente seco
$\leq -2,00$	Extremamente seco

Fonte: Adaptado Mckee, Doesken e Kleist (1993)

3.4 Índice SPEI

O SPEI difere do SPI ao acrescentar a evapotranspiração no cálculo do índice, i.e., o índice é calculado pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial no período considerado ($P - ET$). A temperatura do ar é utilizada para estimar a evapotranspiração potencial a partir do método de Thornthwaite (VICENTE-SERRANO; BEGUERIA; LÓPEZ-

MORENO 2009). O método de Thornthwaite (1948) é composto por um conjunto de equações que permitem determinar a evapotranspiração a partir do conhecimento apenas da temperatura do ar (Equações 4 a 10).

$$ETp = 16K * \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (4)$$

onde, T é a temperatura média do mês, em °C e I é calculado pela soma mensal, como na Equação 5; m é o coeficiente que depende de I e pode ser calculado pela equação 6; e K é um coeficiente de correção para a latitude e mês, descrito pela Equação 7. $I =$

$$\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (5)$$

Na Equação 4, m é o coeficiente que depende de I e pode ser calculado por:

$$m = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (6)$$

K é um coeficiente de correção para a latitude e mês, descrito pela Equação 7:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (7)$$

onde, NDM é o número de dias no mês e N é o número máximo de horas de sol, que é calculado por:

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) * \varpi \quad (8)$$

em que ϖ é a angulação do sol, que é calculada por:

$$\varpi = \arcsin(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (9)$$

onde, φ é a latitude, em radianos, e δ é a declinação do sol, em radianos, calculada por:

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi J}{365}\right) - 1,405 \quad (10)$$

J é o dia juliano médio do mês.

Com o resultado da evapotranspiração potencial mensal foi feita a soma da evapotranspiração para o ano hidrológico. Assim foi possível subtrair a precipitação da evapotranspiração ($P - ET$). Para gerar o SPEI foi utilizada a função densidade de probabilidade (FDP) Generalizada de Extremos (GEV), uma vez que na diferença entre $P - ET$ pode existir valores negativos (SILVA; MELLO; CHOU, 2021). O ajuste da FDP GEV é realizado por meio da seguinte Equação 11:

$$FDP = \frac{1}{\sigma} * \left[1 - \varepsilon * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(\frac{1}{\varepsilon-1}\right)} * \exp\left\{-\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{\frac{1}{\varepsilon}}\right\} \quad (11)$$

Onde, ε é o parâmetro de forma, σ é o parâmetro de escala e o μ é o parâmetro de posição. Para $\varepsilon < 0$, a FDP GEV apresenta uma tendencia de valores mínimos e existe se $x >$

$\frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$. Agora se $\varepsilon > 0$, GEV representa uma distribuição de máximos se $x < \frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$ (NAGHETTINI, 2017; SILVA; MELLO; CHOU, 2021).

Assim como no SPI, após o cálculo da FDP é aplicado uma distribuição normal padronizada (z) com média zero e desvio padrão um, tendo que os valores negativos e positivos de z são o resultado do SPEI. Como Vicente-Serrano, Begueria e López-Moreno (2009) não apresentam uma classificação para o SPEI, porém seus resultados são comparados com o SPI, desta forma adotou-se também a classificação de acordo com Mckee, Doesken e Kleist (1993).

Para verificar a adequabilidade da distribuição GEV, assim como na GAMA, foi aplicado o teste de aderência de Anderson – Darling com nível de significância a 5% ($p(\alpha)$ crítico= 0,757).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação da aderência das FDPs

Nos ajustes das duas distribuições aplicadas nos cálculos dos índices SPI e SPEI foi utilizado o teste Anderson – Darling (AD). Primeiramente aplicou-se o teste de AD a um nível de significância de 5%. Valores de AD menor que o valor crítico ($p(\alpha)$ crítico= 0,757) foram observados para os ajustes das funções GAMMA e GEV para todas as simulações dos três modelos no período presente (1980-2006), ou seja, as distribuições GAMA e GEV aderiram aos dados dos modelos estudados.

Já para as projeções RCP4.5 e RCP8.5 as funções não se ajustaram aos dados de algumas simulações para o nível de significância de 5%, principalmente as do modelo Eta -CanESM2. Como recomendado por Silva, Mello e Chou (2021) a aplicação dessas distribuições mostram bons ajustes para estudos de projeção de secas na região sudeste do Brasil. Dessa forma, no intuito de mostrar os resultados dos índices com todas as projeções, diminuiu-se o nível de significância para 1% ($p(\alpha)$ crítico = 1,038) para os casos em que a FDP não se adequou aos dados da simulação climática. Para a situação menos restritiva ($\alpha = 1\%$), as distribuições se adequaram aos dados, permitindo que os diferentes modelos climáticos pudessem ser comparados nas projeções das condições de seca na região da bacia do Alto rio Grande.

É importante ressaltar que o modelo Eta-MIROC5 foi o único a aderir as FDPs para todos as simulações no nível de significância de 5%. De acordo com Chou et. Al (2014b), o Eta-MIROC5 estima aumento da precipitação para o Sul e para o Sudeste simula a expansão da área de aumento da precipitação do Sul para o Sudeste do Brasil o que pode justificar sua melhor adequação às distribuições.

4.2 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o tempo presente

A Figura 2 apresenta o comportamento do SPI nas simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2) nas 4 localidades para o tempo presente (1980 a 2005).

De modo geral, foi possível constatar que nenhum modelo apresentou uma sequência de anos consecutivos secos, a maior sequência de SPIs negativos apareceu com os dados do Eta – MIROC5 e a menor com os dados do Eta – CanESM2. Além disso, a sequência de SPIs negativos no início do século XXI identificado com os dados do Eta – HadGEM2-ES foi o oposto do observado com os dados do Eta – MIROC5, já que este apresentou anos úmidos para este período. Na análise da intensidade das secas, os dados do Eta – HadGEM2-ES apresentaram secas mais extremas.

Os anos mais secos constatados com os dados do Eta – HadGEM2-ES foram para as cidades de Lavras, Resende e São Lourenço. Foi verificado um evento classificado como “extremamente seco” e todos no mesmo ano hidrológico (2002- 2003), onde os valores de SPI para esses municípios foram de -2,72, -2,62, -2,96, respectivamente. Já a cidade de Barbacena não apresentou nenhum valor considerado “extremamente seco”, porém o ano hidrológico mais seco também foi (2002- 2003) com valor de -1,84 e classificado como “severamente seco”.

Os dados do modelo Eta - MIROC5 apresentaram secas mais intensas nos anos (2000 – 2001), em Barbacena, Resende e São Lourenço, com SPI de -1,90, -2,02 e -1,83, “severamente seco”, “extremamente seco” e “severamente seco”, respectivamente. Já para Lavras a seca mais intensa foi no período (1994-1995) com SPI de -2,11, “extremamente seco”.

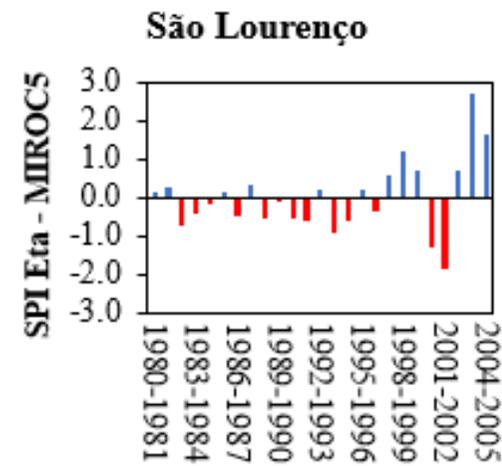
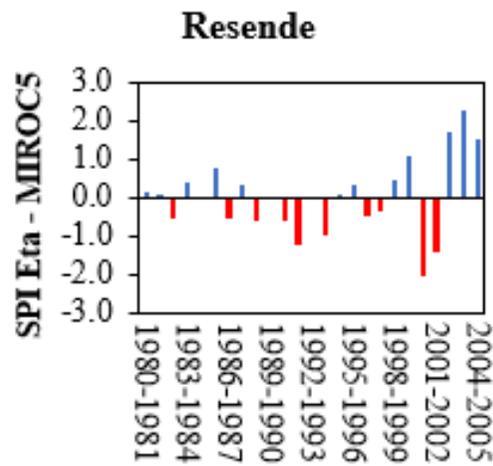
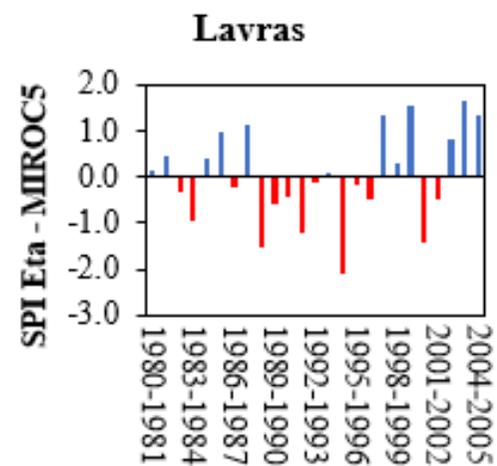
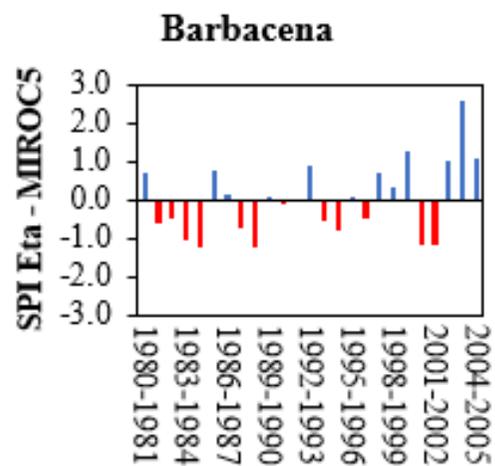
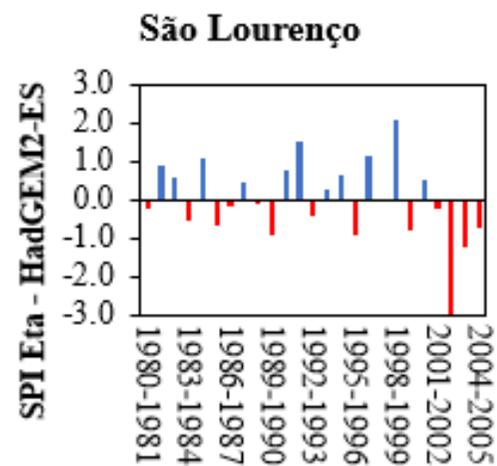
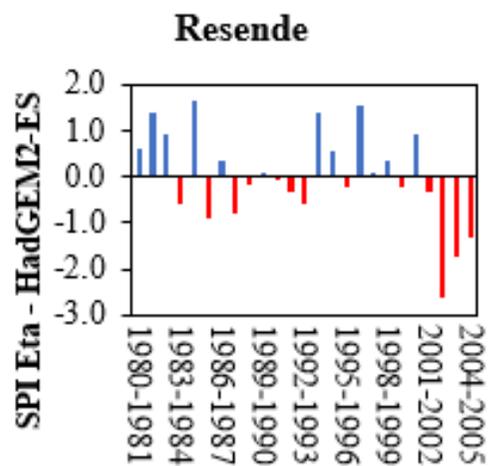
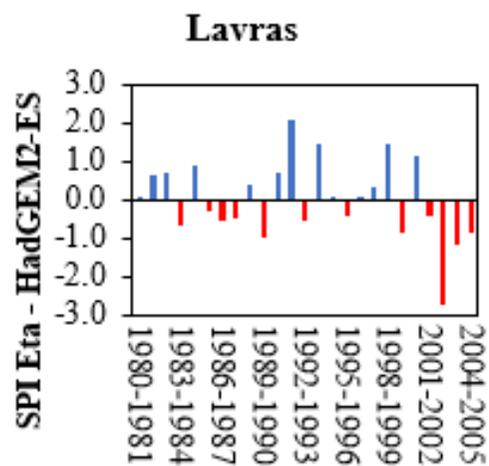
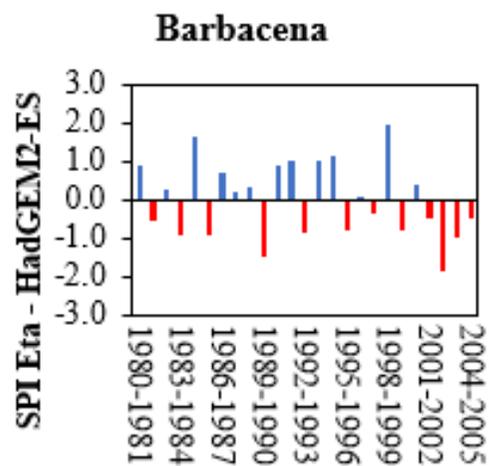
Os dados do modelo Eta – CanESM2 apresentaram em Barbacena o ano hidrológico mais seco em (1981-1982) com SPI de -1,83, “severamente seco”. Em Lavras o ano hidrológico mais seco foi em (1993-1994) com SPI -2,10, “extremamente seco”. Em Resende e São Lourenço o ano hidrológico mais seco foi (1990-1991), classificado como “extremamente seco” e “severamente seco” com valor de SPI de -2,28 e -1,50, respectivamente.

Santos et al. (2016), estudaram as secas registradas no sudeste brasileiro pelo SPI para os anos de 1979 a 2014, período semelhante aos dados simulados no presente estudo. Os autores encontraram um evento de seca extrema para o ano hidrológico de 1982 a 1983. Dos três modelos avaliados no presente estudo, o único que simulou a seca para o ano 1982-1983 como no estudo de Santos et al. (2016) foi o Eta – MIROC5.

Vale ressaltar também um evento registrado na região no ano 2000-2001, onde ocorreu um grande déficit de precipitação no sudeste brasileiro, levando a uma crise energética devido

à falta de água para a produção de energia hídrica, em que o país sofreu com o “Apagão” do Sistema Elétrico Nacional, levando à necessidade de racionamento de energia, principalmente na região Sudeste (SANTOS et al. 2016, SILVA 2018). Mais uma vez o único modelo que simulou seca neste ano e em todas as cidades foi o Eta – MIROC5.

Analisando as informações acima é possível constatar que no geral os dados do modelo Eta – MIROC5 são os que mais se aproximaram dos dados observados na literatura, e estes dados climáticos simulados também são os que melhor aderiram as distribuições de probabilidade.



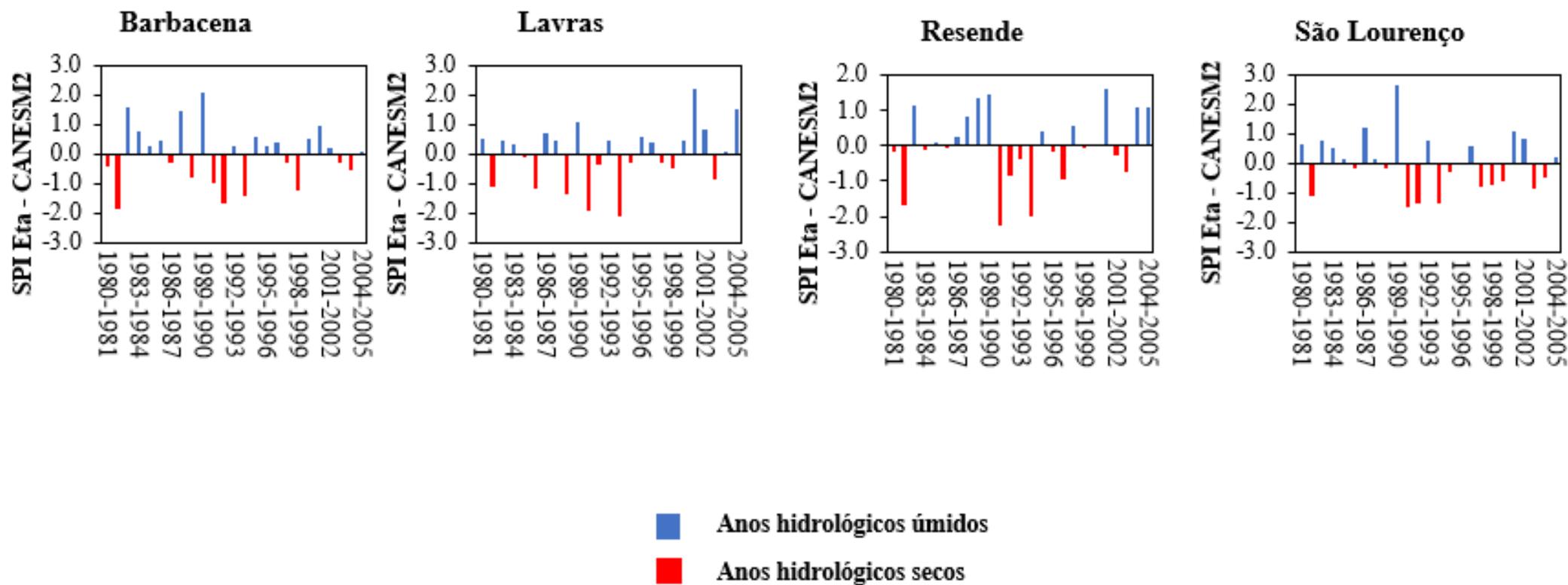


Figura 2. Comportamento do SPI a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o tempo presente (1980 – 2005), em quatro localidades.

Como o índice SPEI utiliza além da precipitação a variável evapotranspiração, é importante ressaltar que tal variável pode influenciar diretamente o nível de represas e reservatórios. Deste modo o SPEI funciona como ferramenta importante para interpretação do impacto desse fenômeno meteorológico, já que a região é importante para geração de energia no país (SILVA; MELLO; CHOU, 2021). Além disso, a intensidade das secas simuladas pode dizer qual variável mais influenciou nos eventos de secas quando se faz a comparação com o SPI, que considera somente a precipitação (VICENTE-SERRANO et al., 2009).

A Figura 3 apresenta o comportamento do SPEI nas simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2), para o tempo presente (1980 a 2005) nas 4 cidades escolhidas.

Analisando as Figuras 2 e 3 pôde-se perceber que o SPI e SPEI não apresentaram diferença significativa na frequência de ocorrência das secas simuladas nos três modelos. Para a intensidade de secas simuladas foi possível constatar que os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta - CanESM2 apresentaram para o SPI valores mais extremos de seca que para o SPEI, fator que pode indicar que as secas sofreram mais influência da precipitação do que da temperatura. Essa menor intensidade refletida no índice SPEI demonstra que, apesar da precipitação ter sido bastante abaixo da média nos eventos, o efeito dessa falta de chuva foi menos intenso do que mostra o SPI, por conta da retenção da água (avaliada pelo balanço entre precipitação e evapotranspiração). Já o Eta – MIROC5 nas simulações de Resende e São Lourenço foram identificados SPEIs mais extremos que SPIs, mostrando característica contrária ao apresentado anteriormente.

Para o Eta – HadGEM2-ES todas as cidades estudadas apresentaram o mesmo ano hidrológico (2002-2003) simulado como o mais seco. Para Barbace

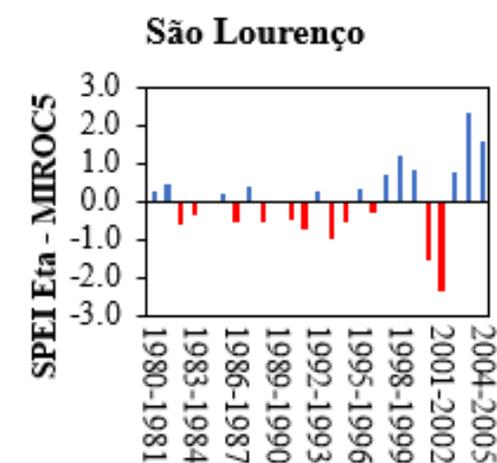
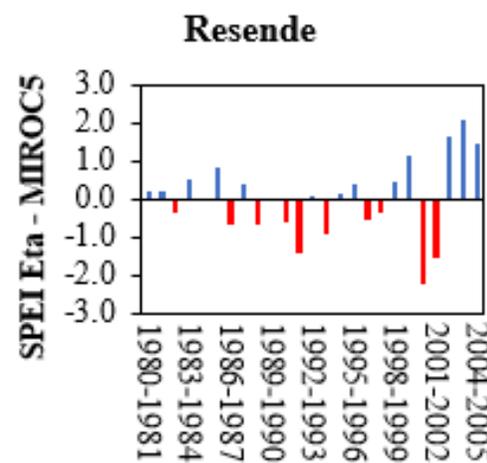
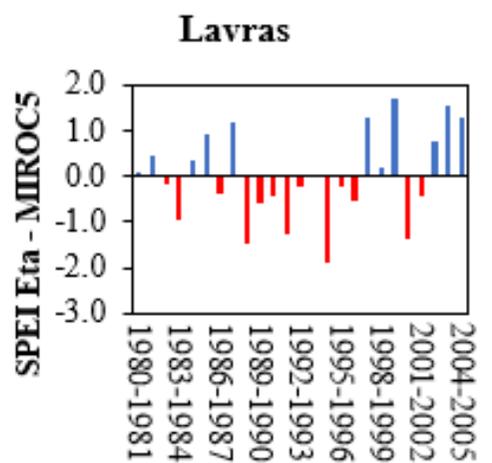
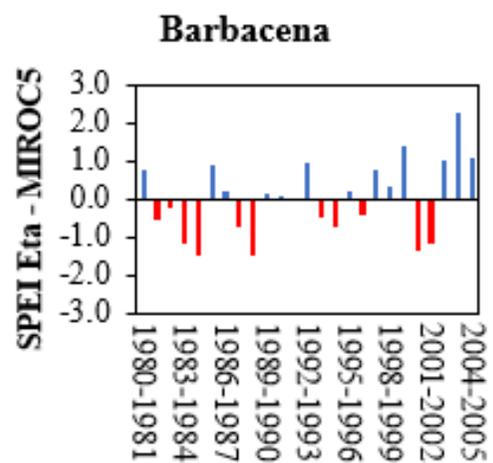
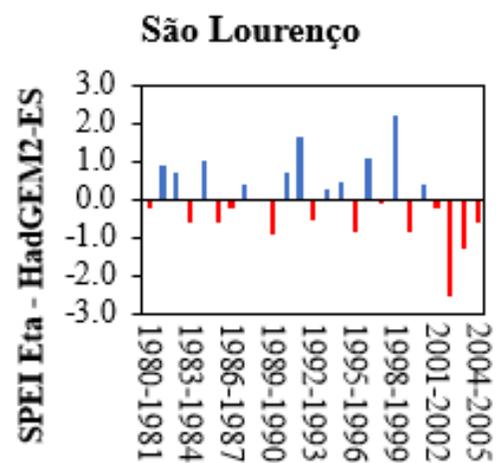
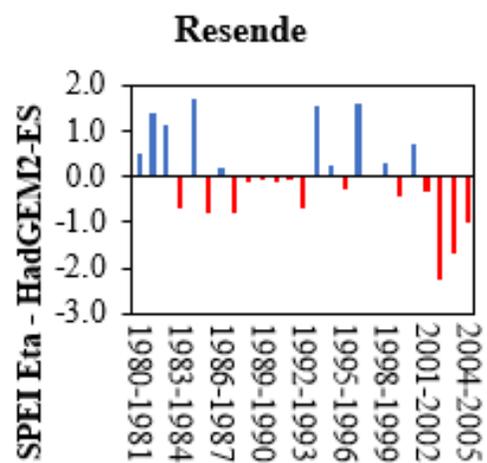
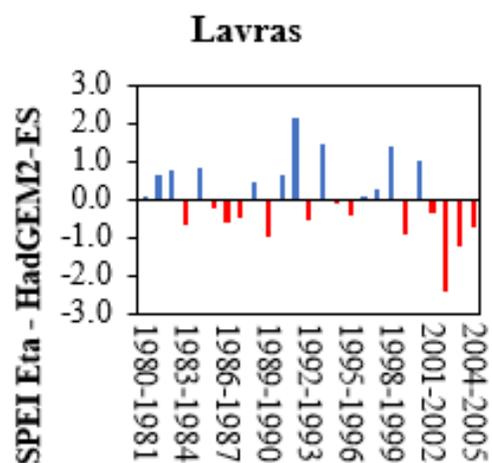
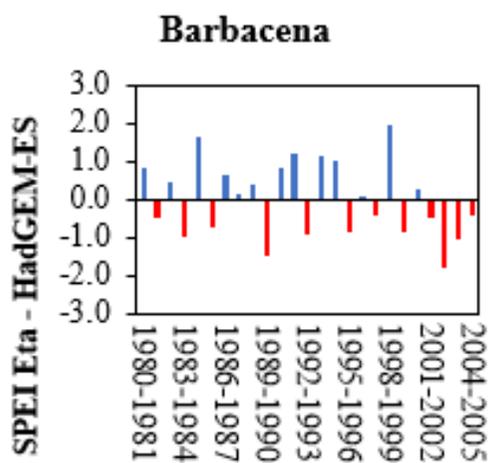
na o menor valor de SPEI foi -1,79 “severamente seco”. As cidades Lavras, Resende e São Lourenço apresentaram valor extremo de -2,44, -2,24, -2,56, respectivamente, ambos valores classificados como “extremamente secos”.

Já o Eta – MIROC5 apresentou o ano hidrológico mais seco em Barbacena, Resende e São Lourenço em (2000-2001) com SPEI de -1,37 “severamente seco”, -2,25 “extremamente seco”, -2,38 “extremamente seco”, respectivamente. Em Lavras o SPEI mais severo foi em (1994 – 1995), com valor de -1.90 “severamente seco”.

Para o modelo Eta - CanESM2 em Barbacena o ano hidrológico mais seco foi (1981-1982) com SPEI de -1,89 “severamente seco”. Para Lavras a simulação resultou no ano hidrológico mais seco em (1993-1994), com SPEI -1,98, “severamente seco”. Em Resende o

ano mais seco foi (1990-1991) “severamente seco”, com valor de SPEI de -1,86. São Lourenço também apresentou o menor SPI em (1990-1991), com valor de -1,83 “severamente seco”.

Do mesmo modo que no SPEI, comparando-se com os estudos de Santos et al. (2016) e Silva (2018) o modelo que mais se aproximou dos eventos de seca reais observados na região foi o Eta – MIROC5.



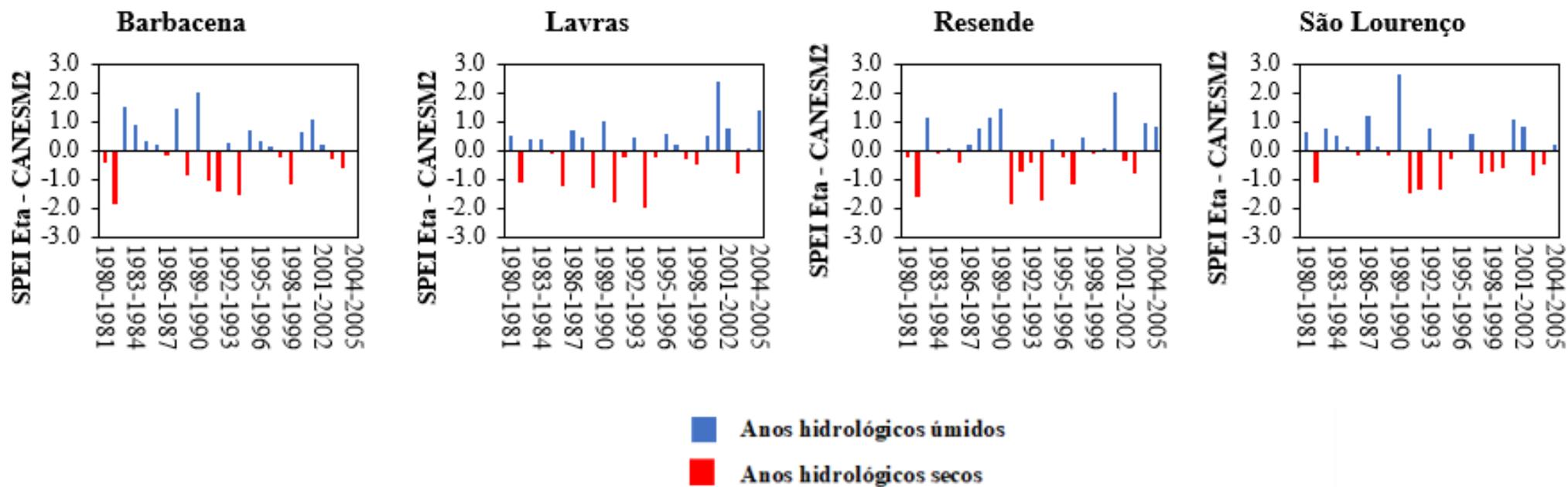


Figura 3. Comportamento do SPEI a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o tempo presente (1980 – 2005), em quatro localidades.

4.3 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o cenário RCP 4.5.

Na Figura 4 é possível identificar o comportamento do SPI nas simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2) nas 4 localidades estudadas, desta vez para o futuro (2006 a 2099).

O modelo climático Eta – HadGEM2-ES apresentou anos mais secos em: Barbacena em 2066-2067, com SPI de -2,58 “extremamente seco”. Lavras também foi projetado (2066-2067), com SPI de -2,06 “extremamente seco”. Já Resende apresentou como ano hidrológico mais seco (2015-2016), com SPI de -2,62 “extremamente seco”. São Lourenço também resultou em (2015-2016) como sendo o mais seco, seu SPI é de -2,50 “extremamente seco”.

Já o Eta – MIROC5 identificou em Barbacena o ano hidrológico mais seco em (2028-2029), com SPI de -2,36 “extremamente seco”. Para as outras três cidades (Lavras, Resende, São Lourenço) foi projetado que o ano hidrológico mais seco em (2098-2099), com SPIs de -3,17, -2,65, -2,38, respectivamente, e classificação “excepcionalmente seco”.

O Eta – CanESM2 identificou em Barbacena o ano hidrológico mais seco em (2061-2062), com SPI de -2,29 “extremamente seco”. Para a cidade de Lavras foi projetado o ano mais seco em (2029-2030), com SPI de -2,09 “extremamente seco”. Para Resende será em (2070-2071), com SPI de -2,90 “extremamente seco”. A cidade de São Lourenço apresentou SPI mais severo em (2091-2092) com valor de -1,84 “severamente seco”.

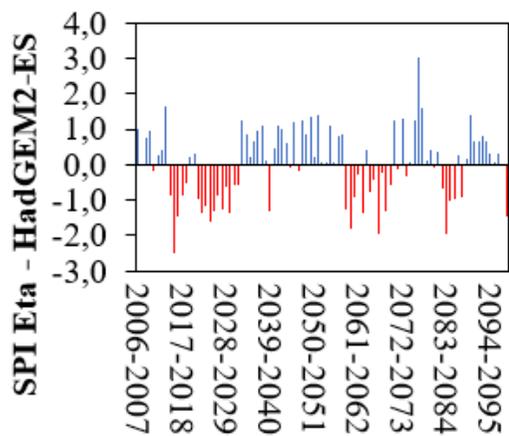
Fazendo uma comparação entre os três modelos pode-se observar na Figura 4 que os valores negativos de SPI apareceram de forma distinta. O Eta – HadGEM2-ES resultou em uma frequência maior de anos secos no início e mais para a metade do século. O Eta – MIROC5 também apresentou uma sequência de anos consecutivos secos no início do século, porém a segunda maior frequência destes anos apareceu mais para o final do século. O modelo Eta – CanESM2 apresentou SPIs negativos em todos os períodos do século XXI, com maior intensidade a partir de 2060 e o que foi diminuindo mais para o final do século.

Ressalta -se que em todas as localidades o modelo Eta – HadGEM2-ES foi o único que simulou eventos mais intensos de seca no período de 2013 a 2019, o que pode ser comparado ao que aconteceu no sudeste brasileiro neste mesmo período. Os anos (2014, 2015 e 2016) foram detectados na literatura como sendo secos e essa tendência tem sido associada a mudanças na variabilidade das chuvas nessa região (COELHO et al., 2014). Neste período, a região Sudeste do Brasil passou por uma estiagem muito intensa, sendo registrados volumes de chuva muito abaixo das médias históricas. O ano hidrológico de 2013-2014 teve uma das piores secas já registrada na Serra da Cantareira, sendo este o principal reservatório responsável pelo

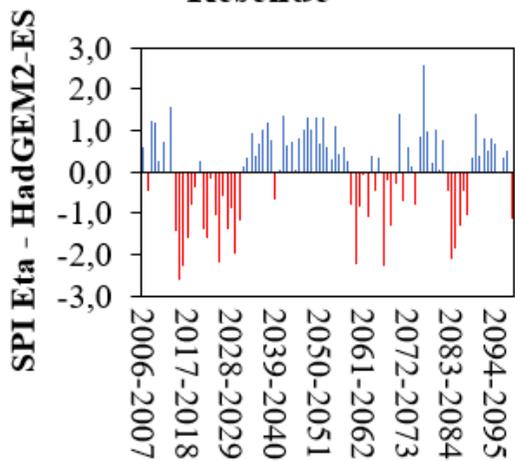
abastecimento de água da cidade de São Paulo (SILVA, MELLO e CHOU, 2022). Rodrigues et al (2021) também observaram mudanças no balanço hídrico de um fragmento de Mata Atlântica nativa na cidade de Lavras entre os anos 2013 e 2018 devido a condições prolongadas de seca.

Diferente do que foi apresentado para o tempo presente, acima, o Eta – MIROC5 apresentou um ponto fraco para o local de estudo. Visto que não foi identificado uma frequência e intensidade significativa no período de 2013-2019, como registrado para a região. Da mesma maneira também não foi possível identificar tal característica no Eta – CanNESM2.

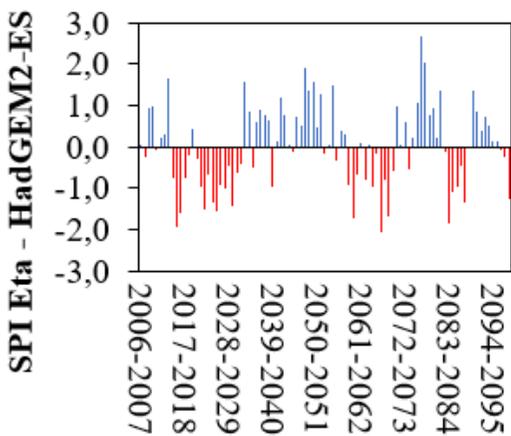
São Lourenço



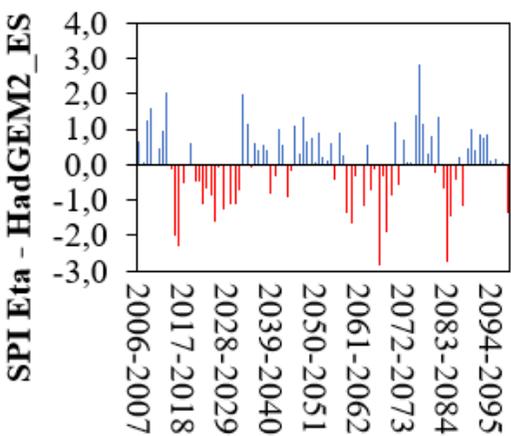
Resende



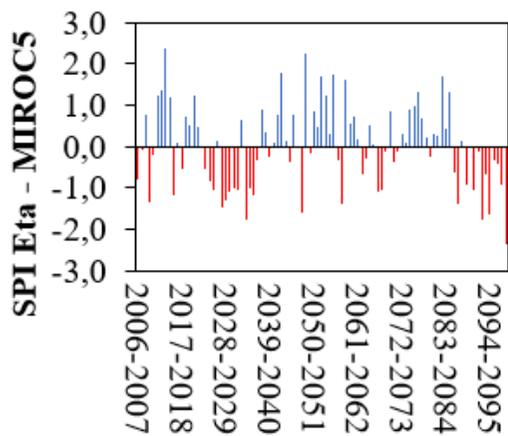
Lavras



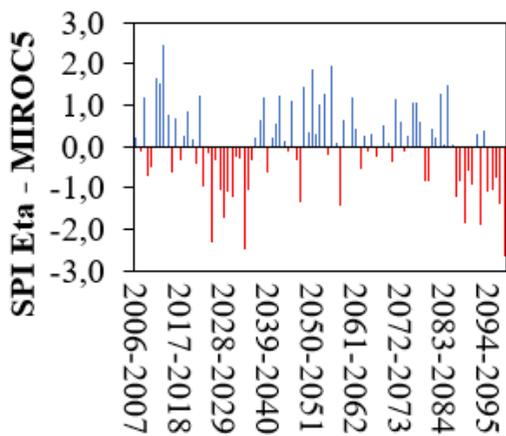
Babacena



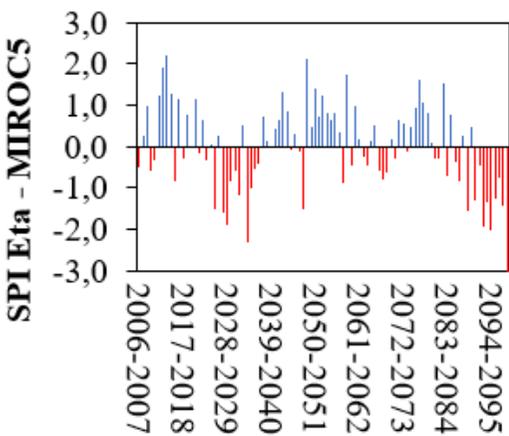
São Lourenço



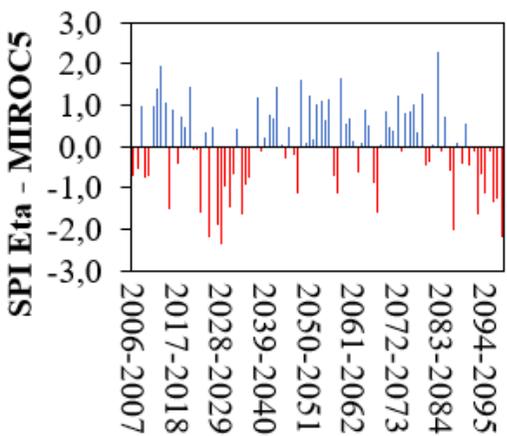
Resende



Lavras



Barbacena



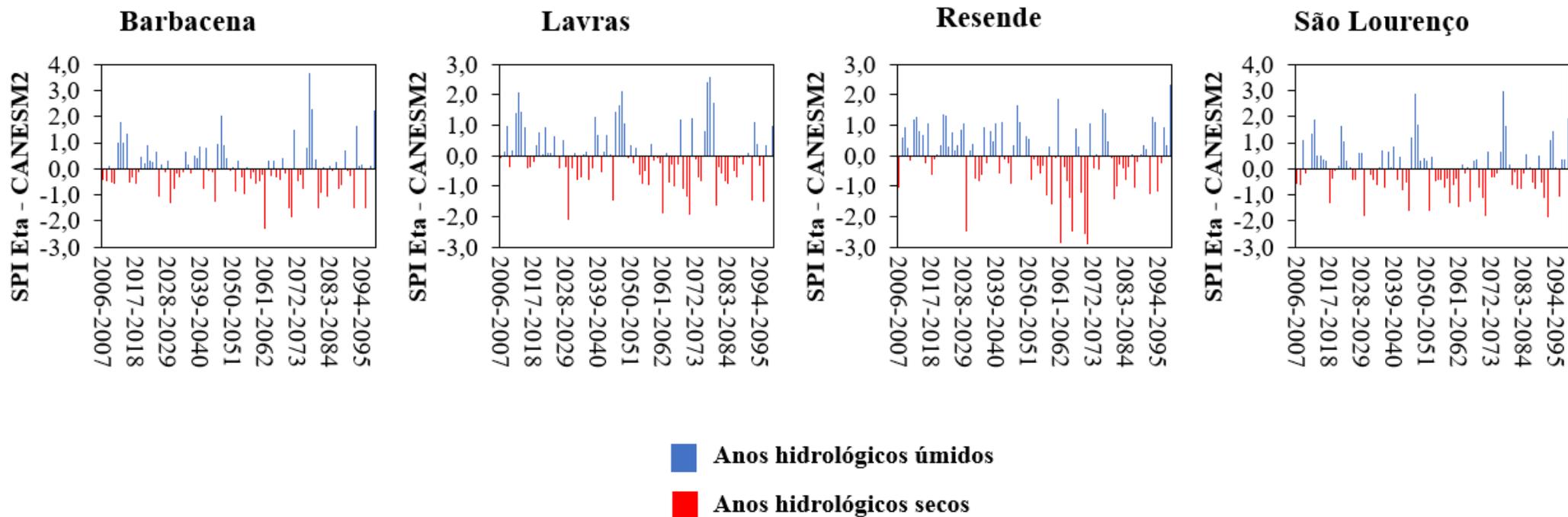


Figura 4. Comportamento do SPI a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o cenário RCP 4.5 (2006 – 2099), em quatro localidades.

A figura 5 apresenta o comportamento do SPEI nas simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2) para as 4 localidades estudadas, para o período de (2006 a 2099).

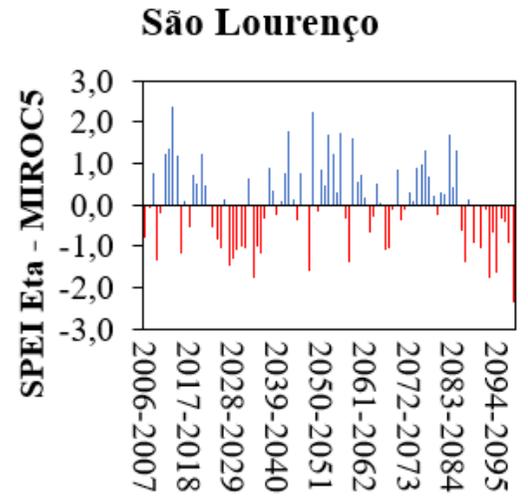
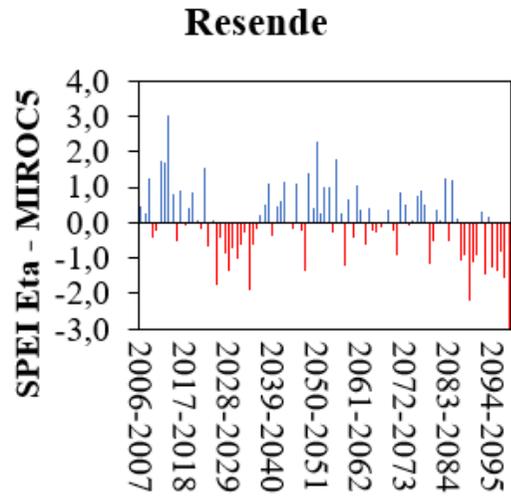
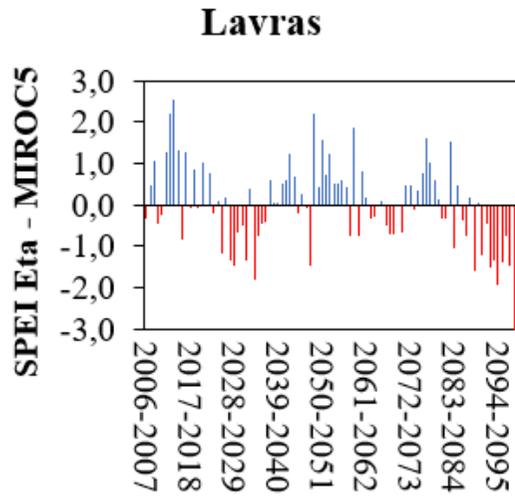
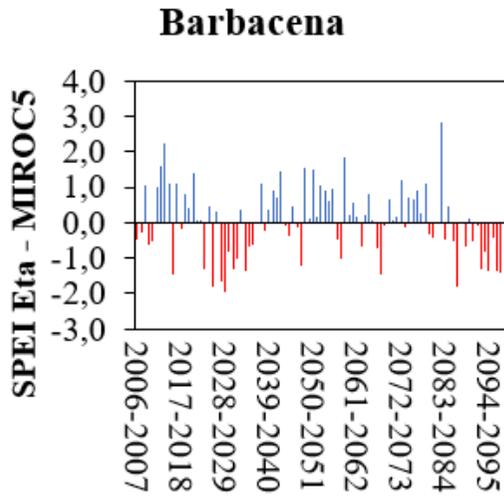
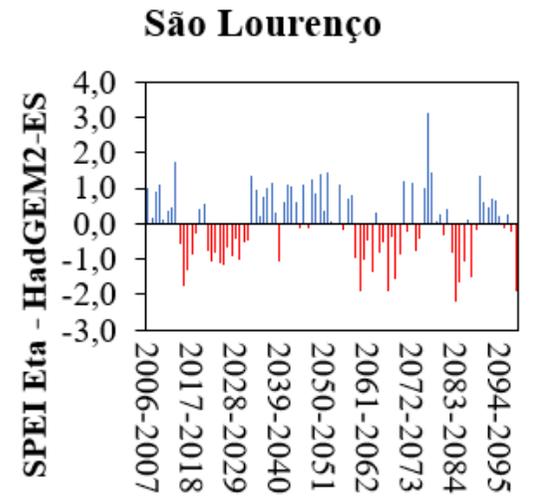
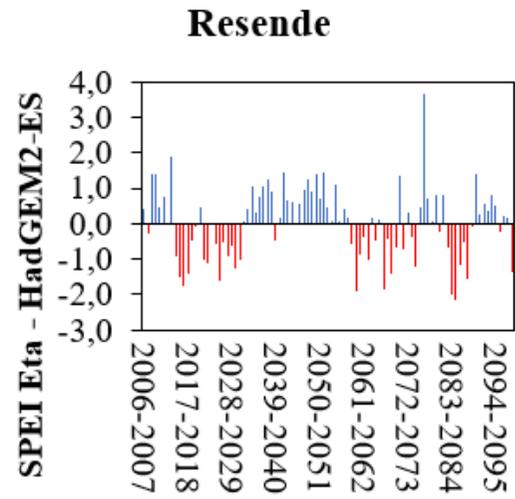
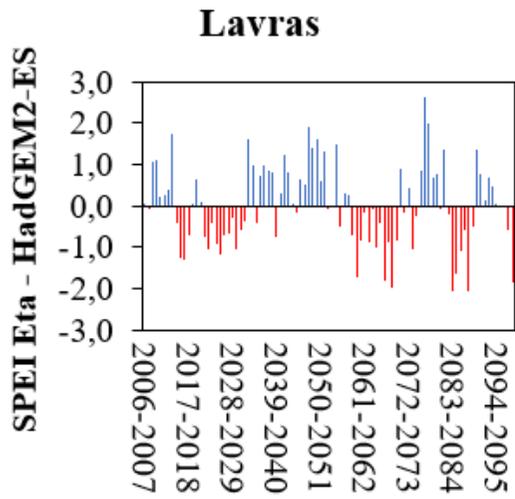
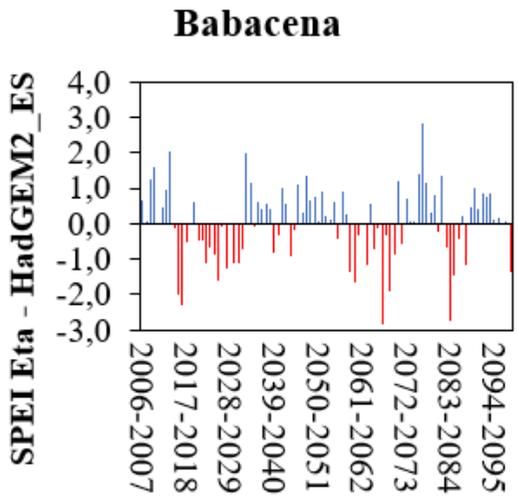
O modelo Eta - HadGEM2-ES para Barbacena identificou SPEI mais seco em (2083-2084), com SPI de -2,57 “extremamente seco”. Em Lavras o ano mais seco simulado foi (2087-2088), com SPI de -2,05 “extremamente seco”. Já Resende apresentou como ano hidrológico mais seco (2084-2085), com SPI de -2,13, também classificado como “extremamente seco”. A cidade de São Lourenço, assim como Resende, também resultou em (2084-2085) como sendo o mais seco, seu SPI foi de -2,19 “extremamente seco”.

Para o Eta – MIROC5 todas as cidades (Barbacena, Lavras, Resende, São Lourenço) projetaram o ano hidrológico mais seco em (2098-2099), com SPEIs de -2,54, -3,06, -2,97, -2,93, respectivamente, e classificação “excepcionalmente seco”.

No Eta - CanESM2 ano hidrológico mais seco projetado para Barbacena foi (2061-2062), com SPEI de -3,49 “extremamente seco”. Para a cidade de Lavras foi projetado que o ano mais seco em (2061-2062), com SPEI de -2,22 “extremamente seco”. Assim como Lavras, a cidade de Resende apresentou como ano hidrológico mais seco (2061-2062), com SPEI de -2,21 “extremamente seco”. A cidade de São Lourenço, assim como Resende, resultou em (2070-2071) como sendo o mais seco, seu SPEI foi de -2,39 “extremamente seco”.

Comparando as Figuras 4 e 5 não foi possível identificar uma diferença significativa na frequência e ocorrência entre o SPI e o SPEI, somente o modelo Eta - CanESM2 que apresentou ainda mais anos úmidos no início do século para o SPEI que no SPI. Analisando a intensidade das secas, constatou-se que de um modo geral o SPEI apresentou valores mais extremos para os eventos de seca, porém é difícil fazer uma comparação, pois os anos mais secos registrados no SPEI foram em algumas localidades, diferentes dos simulados pelo SPI.

Porém, uma análise que pode ser feita na comparação dos dois índices, na representação das duas Figuras (4 e 5), é que a intensidade de SPEI extremos se dá após a metade do século e não na primeira metade como no SPI. Desta forma, observa-se que para o cenário futuro, a temperatura tende a influenciar mais no aumento da evapotranspiração, fazendo com que a seca seja mais intensa com o SPEI.



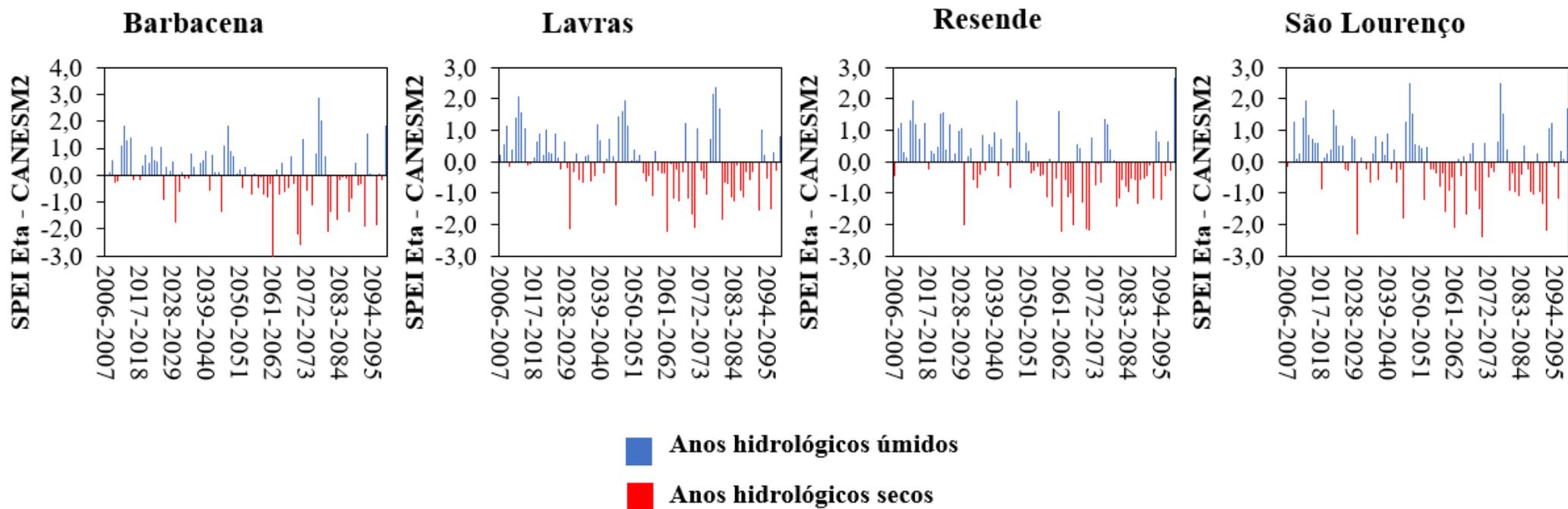


Figura 5. Comportamento do SPEI a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o cenário RCP 4.5 (2006 – 2099), em quatro localidades.

4.4 Análise do comportamento dos índices SPI e SPEI de acordo com as simulações dos modelos climáticos para o cenário RCP 8.5.

Com base nas projeções do cenário RCP 8.5 a figura 6 apresenta o comportamento do SPI nas simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2) nas 4 cidades, para o futuro (2006 a 2099).

Em Barbacena, Lavras e Resende o ano hidrológico mais seco simulado para o modelo Eta – HadGEM2-ES foi (2022-2023), com SPIs de -3,71, -3,18, -3,94, respectivamente, todos “extremamente secos”. A cidade de São Lourenço, resultou em (2079-2080) como sendo o mais seco, seu SPI foi de -2,80 “extremamente seco”.

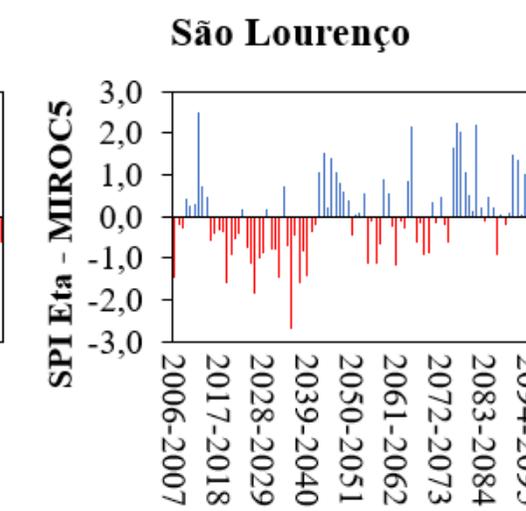
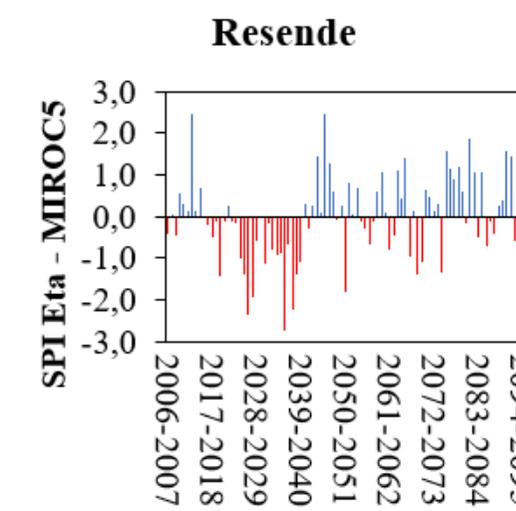
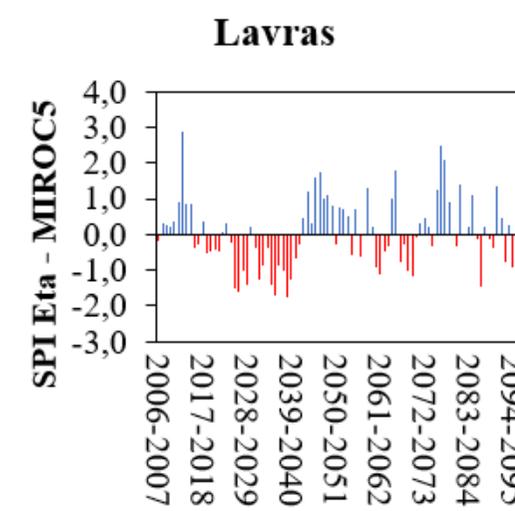
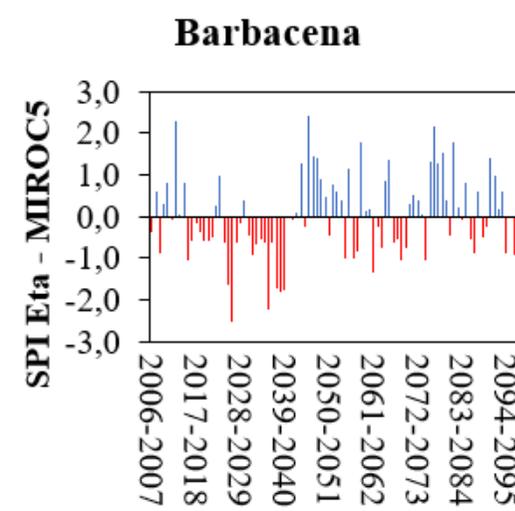
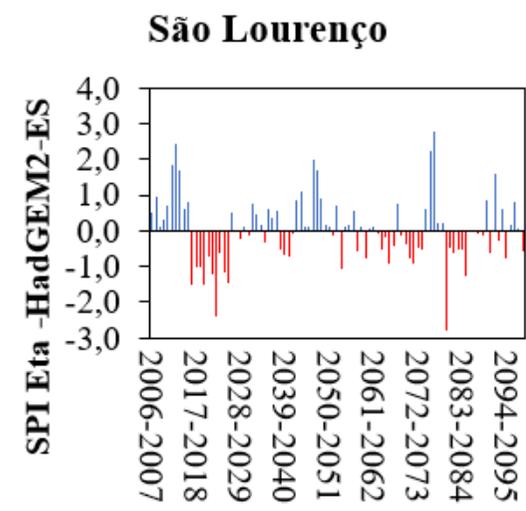
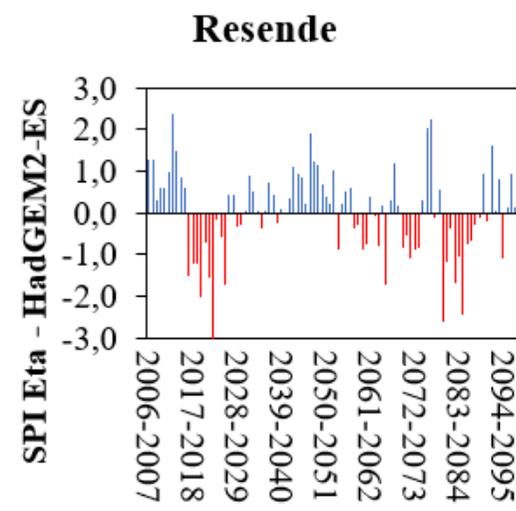
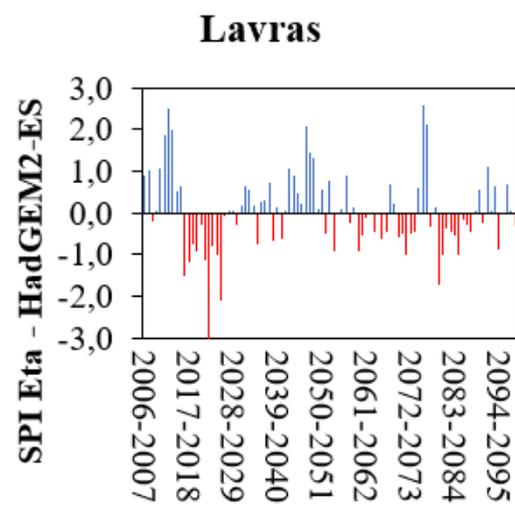
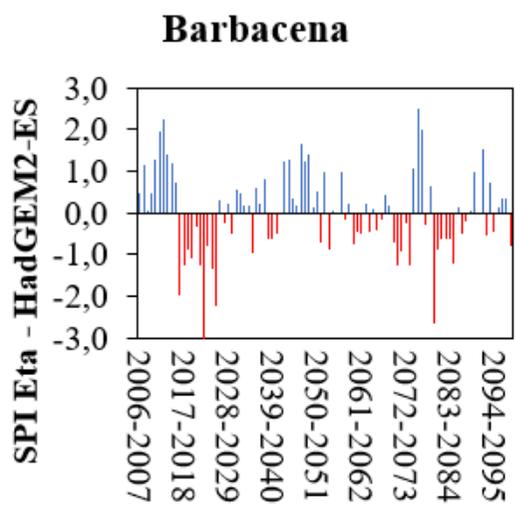
No Eta – MIROC5, Barbacena, apresentou menor SPI em (2026-2027), com valor -2,53, “extremamente seco”. Lavras não apresentou nenhum ano extremamente seco para o período projetado, o menor valor de SPI apareceu em (2038-2039) com valor de -1,76, “severamente seco”. Nas demais cidades, Resende e São Lourenço, o menor SPI foi simulado para (2035-2036), com valores -2,71 e -2,70, respectivamente, “extremamente secos”

Para o Eta – CanESM2, todas as 4 cidades tiveram como ano mais seco (2068 – 2069), os valores foram de -3,83, -2,72, -4,81 e -3,81, respectivamente, ambos “extremamente secos”.

Comparando os três modelos de acordo com a Figura 6, é possível identificar que os modelos Eta - HadGEM2-ES e Eta - MIROC5 apresentaram maior frequência e intensidade de secas para o futuro, nos eventos de seca nos primeiros 40 anos do século XXI. O que difere totalmente do modelo Eta – CanESM2, uma vez que essas características aparecem no final do século.

Ao se avaliar o período de 2013 a 2019, para identificar a semelhança dos modelos com o cenário real observado na localidade, constatou-se que assim como no cenário RCP 4.5 o modelo Eta - HadGEM2-ES projetou eventos extremos para este período. Diferente do RCP 4.5 o Eta - MIROC5 também identificou anos secos neste período (2013-2019), porém a intensidade das secas foi menor que no Eta - HadGEM2-ES. Agora o modelo Eta – CanESM2 quase não simulou seca para tal período, sendo o que mais se diferenciou do registrado na realidade.

Outro fato verificado nos resultados deste cenário, é que os valores de SPIs para os anos mais extremos de seca foram bem mais negativos para o cenário RCP 8.5 que para o cenário RCP 4.5. Isso é explicado pela característica do RCP8.5, que consiste em um cenário mais pessimista (CHOU et al., 2014b).



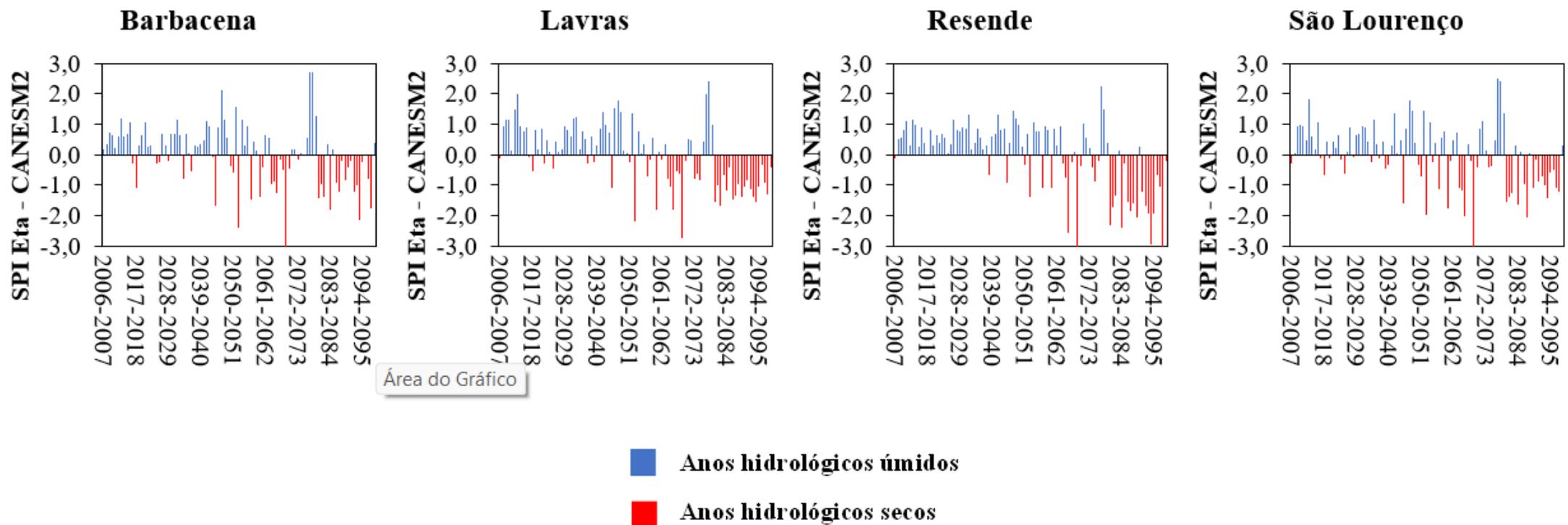


Figura 6. Comportamento do SPI a partir simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o cenário RCP 8.5 (2006 – 2099), em quatro localidades.

O índice SPEI resultado das projeções do cenário RCP 8.5 pode ser visto na figura 7 apresentando as simulações dos três modelos estudados (Eta - HadGEM2-ES, Eta - MIROC5, Eta - CanESM2) para as 4 localidades estudadas, no período de 2006 a 2099.

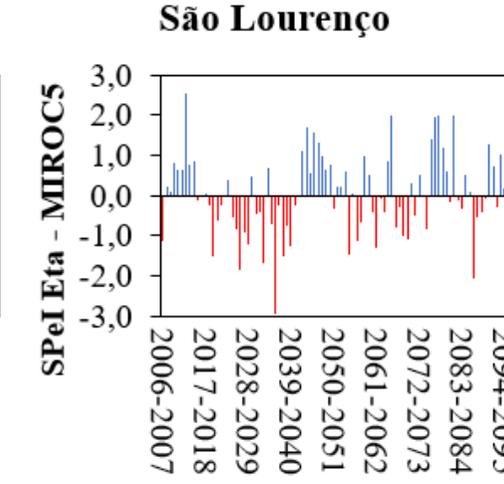
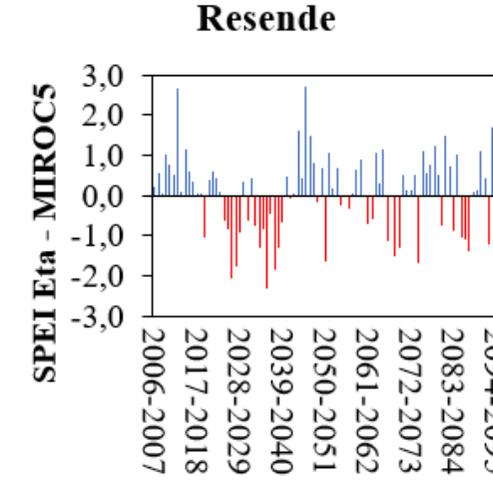
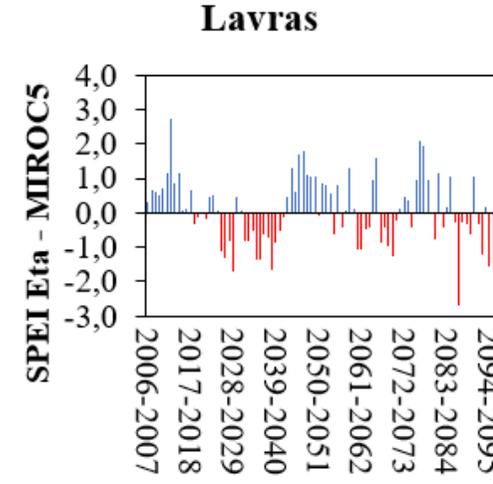
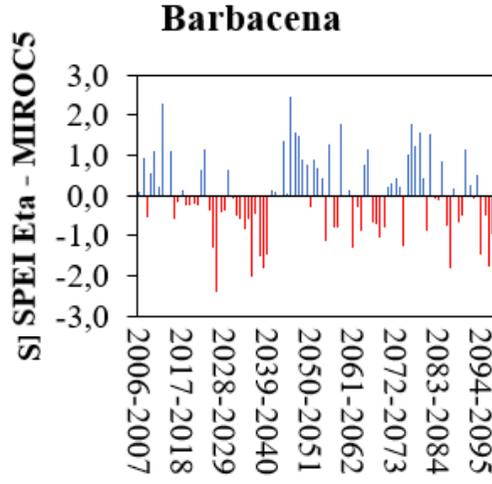
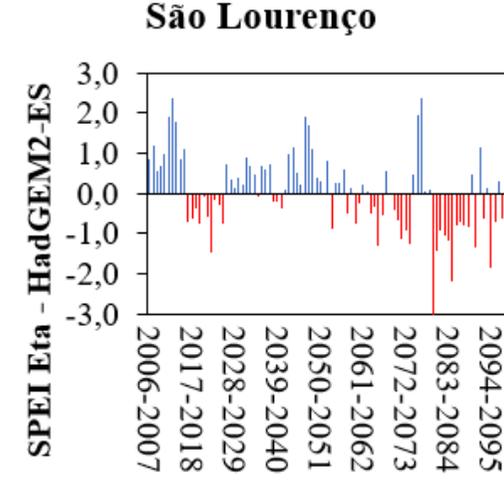
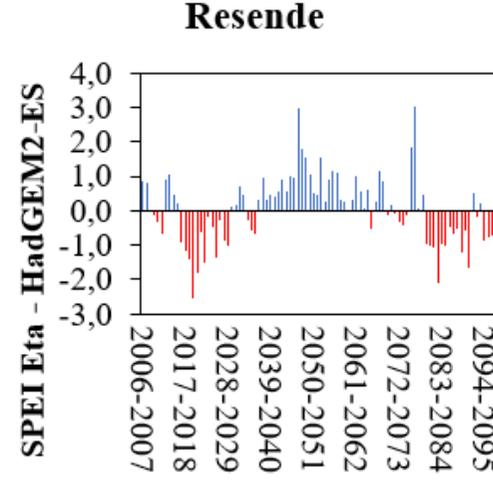
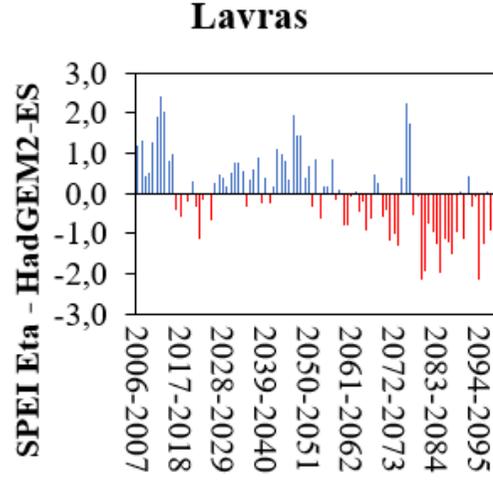
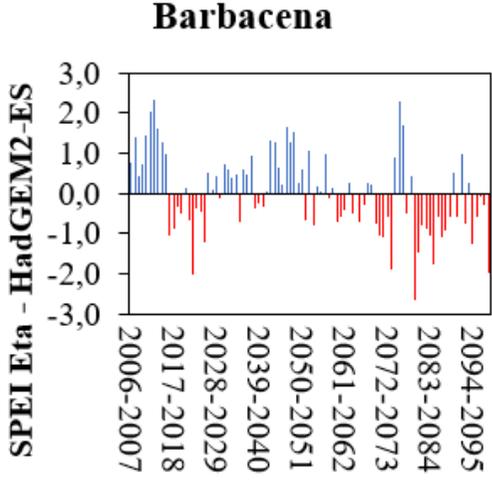
Para o Eta - HadGEM2-ES na cidade de Barbacena o ano hidrológico mais seco projetado foi (2079-2080), com SPEI de -2,64 “extremamente seco”. Para a cidade de Lavras foi projetado que o ano mais seco também será (2094-2095), com SPEI de -2,15 “extremamente seco”. Resende apresentou como ano hidrológico mais seco (2019-2020), com SPEI de -2,54 “extremamente seco”. A cidade de São Lourenço, assim como Resende, resultou em (2079-2080) como sendo o mais seco, seu SPEI foi de -3,14 “extremamente seco”.

O modelo Eta – MIROC5 projetou para Barbacena o ano hidrológico mais seco em (2026-2027) com SPEI -2,41, “extremamente seco”. Lavras não apresentou nenhum ano extremamente seco para o período de simulação, o menor valor de SPI apareceu em (2086-2087) com valor de -2,71 “extremamente seco”. Nas demais cidades, Resende e São Lourenço, o menor SPEI foi simulado para (2035-2086) com SPEIs de -2,30 e -2,93, respectivamente, “extremamente secos”.

O Eta – CanESM2 simulou para Barbacena, Lavras e São Lourenço o ano hidrológico mais seco em (2068-2069), seu SPEI foi de -2,30, -1,61 e 2,19, respectivamente, com as classificações “extremamente seco” e “severamente seco”. Resende apresentou o menor SPEI simulado para (2094-2095) com valor de -1,85 “severamente seco”.

Ao comparar os dois índices estudados para as projeções do RCP 8.5, foi possível identificar pelas figuras 6 e 7 que a frequência de SPEIs extremos se intensifica no final do século, tanto no Eta - HadGEM2-ES, quanto no Eta - MIROC5, porém com maior intensidade no Eta - HadGEM2-ES. Diferente do SPI que é mais extremo no início do século. Desta forma, como também discutido para o RCP 4.5, estas observações demonstram que no cenário futuro a temperatura tende a intensificar a seca

Assim como também no RCP 4.5 o modelo Eta – CanESM2, é o que mais se difere dos demais modelos e também do que já foi observado para a região no período de 2013 a 2019.



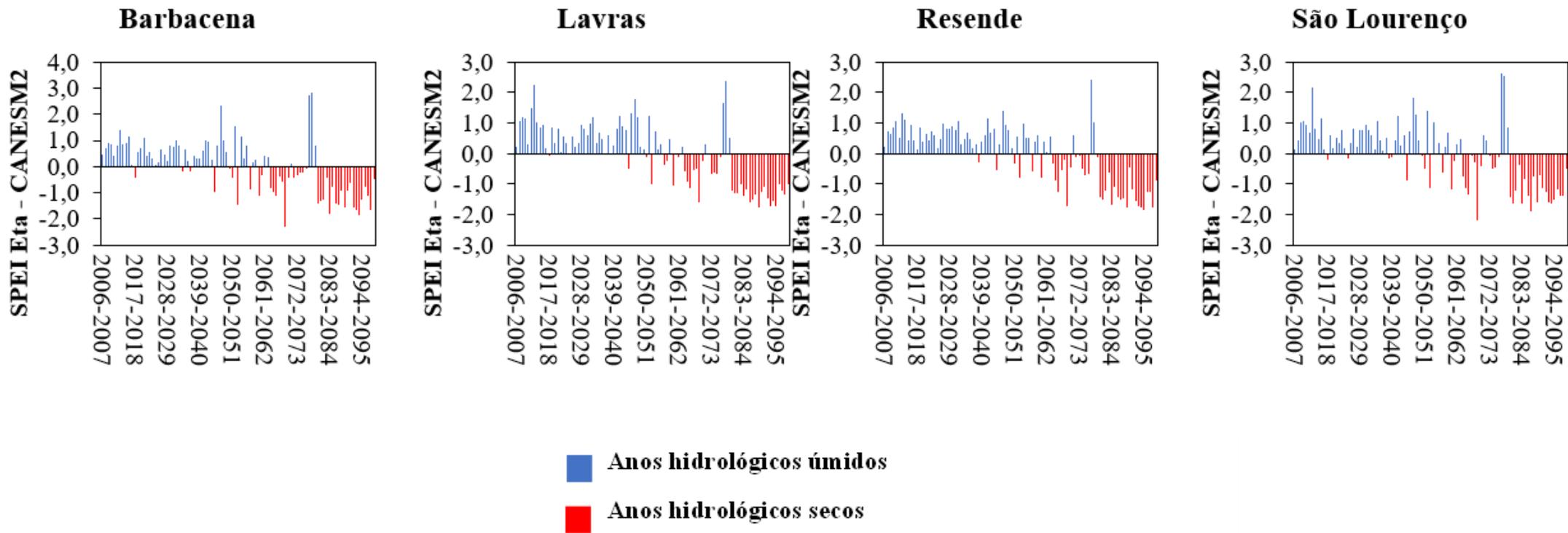


Figura 7. Comportamento do SPEI a partir das simulações dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta - MIROC5 e Eta – CanESM2 para o cenário RCP 8.5 (2006 – 2099), em quatro localidades.

5. CONCLUSÃO

O comportamento do fenômeno da seca, assim como sua frequência e duração foi determinado pelos índices SPI e SPEI de uma forma simples e considerada bastante eficaz. No estudo foi possível observar bem as características de cada um, levando em conta as variáveis de entrada utilizadas.

Ao se avaliar as simulações para o clima presente foi possível concluir que o modelo Eta – MIROC5 foi o que melhor estimou a seca de (2000-2001). Porém o modelo Eta – HadGEM2- ES foi o que mais se aproximou da grande frequência e duração de secas registradas na região para o período de (2013 a 2019) nos cenários futuros.

Dentre os três modelos apresentados o Eta – CanESM2 foi o que menos apresentou semelhança com o que já foi observado na literatura para o clima presente, além disso foi o que mais se diferiu em relação as projeções para o futuro.

Nas projeções de secas foi possível detectar que quando se leva em conta o balanço (P – ET), como no índice SPEI, a variável da temperatura se intensifica mais no cenário futuro, aumentando a frequência de secas ao longo do século.

Comparando-se os dois cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, conclui-se que o RCP 8.5 apresenta valores de SPI e SPEI mais extremos. Além disso ocorre uma maior frequência de anos consecutivos secos mais para o final do século no RCP 8.5.

O SPI e o SPEI demonstraram que pode haver períodos com grande frequência e duração das secas, com vários anos consecutivos com déficit de precipitação e aumento da temperatura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 07, n. 02, p. 355–366, 2018.

ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, Victoria, v. 38, n. 5, p.1-6, 2011.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, 2011.

BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265–278, 1994.

BYUN, H.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, v. 12, n. 9, p. 2747-2756, 1999.

CHOU, S. C. et al. Assessment of climate change over South America under RCP4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, Cachoeira Paulista, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014b.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Cachoeira Paulista, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014a.

COLLINS, W. J. et al. Evaluation of the HadGEM2 model. **Hadley Cent. Tech. Note**, Exeter, v. 74, p. 1 – 47, 2008.

DO CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Spatio-temporal characterization of droughts in northeast based on the analysis of the spi index. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 233–242, 1 abr. 2020.

DOS SANTOS, S. R. Q. et al. Determinação de regiões homogêneas do Índice de precipitação normalizada (SPI) na amazônia oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 111–122, 2017.

FEITOSA, G. P. **Análise comparativa da hidroclimatologia e de índices de seca de regiões hidrográficas do semiárido brasileiro, da Tunísia e da Mauritânia**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Do Ceará, Graduação em Ciências Ambientais, Fortaleza, 122p, 2016.

FERNANDES, D. S. F.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

GIBBS, W. J. **Rainfall deciles as drought indicators**. 1967.

GONÇALVES, S. T. N. et al. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 suppl, p. 495–511, set. 2021.

HAYES, M J. et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American meteorological society**, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.

HERBST, P. H.; BREDENKAMP, D. B.; BARKER, H. M. G. A technique for the evaluation of drought from rainfall data. **Journal of Hydrology**, v. 4, p. 264-272, 1966.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014 Synthesis Report**. Genebra, Suíça: p. 151. 2015

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, 2013.

JUNQUEIRA, R. et al. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1–2, p. 465–481, 1 jul. 2020.

JUNQUEIRA, R. **Índices de Severidade de Seca para a Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas), Universidade Federal de Lavras, 78 p, 2019.

KARAVITIS, C. A. et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. **Water**, v. 40, n.3 p. 200-219, 2011.

LAMB, P. J.; PEPLER, R. A.; HASTENRATH, S. Interannual variability in the tropical Atlantic. **Nature**, v. 322, n. 6076, p. 238, 1986.

LI, L. et al. Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 7, p. 1513-1530, 2020.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, Cachoeira Paulista, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2018.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. n. January, p. 17–22, 1993.

MELLO, C. R. et al. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 53-59, 2012.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista de Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1, p. 195–202, 1984.

MODARRES, R. Streamflow drought time series forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, n. 3, p. 223-233, 2007.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.

OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Rainfall and climate variability: Long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research**, v. 61, n. 2, p. 93–107, 23 set. 2014.

OLIVEIRA, V. A. et al. 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, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. **Weatherwise**, Washington, v. 21, p. 156–161, 1968

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. **US Weather Bureau Research Paper 45**: 58 pp. 1965.

- PESSINI, P.B. **Estudo dos Eventos de Seca Meteorológica na Região Sul do Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 87 p. 2017.
- QUIRING, S. M. Developing objective operational definitions for monitoring drought. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 6, p. 1217–1229, 2009.
- REBOITA, M. S. et al. Seasonal climate forecast to Brazil obtained through global and regional climate models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 207–224, 1 abr. 2018.
- RODRIGUES, A. F. et al. Water balance of an atlantic forest remnant under a prolonged drought period. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 45, 2021.
- ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.
- SANTOS, M. A. F.; COSTA, V. S. DE O.; GALVINCIO, J. D. SECAS METEOROLÓGICA, AGRÍCOLA, HIDROLÓGICA NO MUNICÍPIO DE SERRINHA-BA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.
- SANTOS, Sergio Rodrigo Quadros dos et al. Determinação de regiões homogêneas do índice de precipitação normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 111-122, 2017.
- SHAFER, B. A. Developemnet of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: **Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, 1982**. p. 165-175. 1982
- SHAH, D.; MISHRA, V. Integrated Drought Index (IDI) for Drought Monitoring and Assessment in India. **Water Resources Research**, v. 56, n. 2, 1 fev. 2020.
- SILVA, V. O; DE MELLO, C. R; CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 148, n. 3, p. 1289-1302, 2022.
- SILVA, V. O.; MELLO, C. R. Meteorological droughts in part of southeastern brazil: Understanding the last 100 years. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 93, 2021.
- SILVA, V. O; MELLO, C. R.; CHOU, S. C. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Episódios de Seca no Centro-Sul de Minas Gerais: Ocorrências Temporais e Comportamento Futuro**. 2021.
- TEIXEIRA, C. F. A, et al. Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, p. 203-213, 2013.

- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, Stockholm, v. 456, p. 12-29, 20127
- TSAKIRIS, G.; VANGELIS, H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration, **European Water**, v. 9, p. 3–11. 2005
- VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 359-392, 2015.
- VAN LOON, A. F.; STAHL, K.; DI BALDASSARRE, G.; CLARK, J.; RANGECROFT, S.; WANDERS, N.; GLESSON, T.; VAN DIJK, A. I. J. M.; TALLAKNSEN, L. M.; HANNAFORD, J.; UIJLENHOET, R.; TEULING, A. J.; HANNAH, D. M.; SHEFFIELD, J.; SVOBODA, M.; VERBEIREN, B.; WAGENER, T.; VAN LANEN, H. A. J. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 9, p. 3631, 2016.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, abr. 2010a.
- VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River basin hydrology, southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 2015.
- WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, Kashiwa, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010
- WELLS, N.; GODDARD, S.; HAYES, M. J. A self-calibrating Palmer drought severity index. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2335-2351, 2004
- WILHITE, D. A. **Drought as a natural hazard: concepts and definitions**. 2000.
- WMO; GWP. **Handbook of drought indicators and indices**. Genebra, Suíça: 2016.
- ZÁKHIA, S. M. E. **Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no sul do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas), Universidade Federal de Lavras, 90 p, 2020.