

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GISELE CARVALHO RODRIGUES

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB OS CENÁRIOS RCP4.5 E RCP8.5**

Ilha Solteira
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GISELE CARVALHO RODRIGUES

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB OS CENÁRIOS RCP4.5 E RCP8.5**

Trabalho de defesa apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Prof. Dra. Liliane Lazzari Albertin
Orientadora

Ilha Solteira
2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R696m Rodrigues, Gisele Carvalho.
Metodologia para avaliação de eventos extremos em bacias hidrográficas
sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 / Gisele Carvalho Rodrigues. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2022
140 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais, 2022

Orientador: Liliane Lazzari Albertin
Inclui bibliografia

1. Seca. 2. Cheia. 3. Swat. 4. Projeção climática e hidrológica. 5. Mudanças
climáticas.

Rajane da Silva Santos
Rajane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CSB/SB - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS SOB OS CENÁRIOS RCP4.5 E RCP8.5

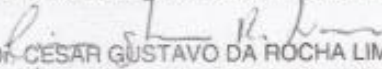
AUTORA: GISELE CARVALHO RODRIGUES

ORIENTADORA: LILIANE LAZZARI ALBERTIN

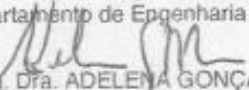
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL,
área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:



Prof.ª. Dr.ª. LILIANE LAZZARI ALBERTIN (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof.ª. Dr.ª. ADELENA GONÇALVES MAIA (Participação Virtual)
Departamento de engenharia civil e ambiental (DECA) / Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Ilha Solteira, 08 de julho de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus amados pais Gilberto e Sionara, os quais não mediram esforços para que meus sonhos se concretizassem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória. E ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os eventos extremos como de cheias e secas podem causar diversos impactos para a sociedade, como perdas de vidas, falta de água para abastecimento humano, perda de moradias e bens materiais (em casos de cheias), e além disso, podem causar danos ambientais e na agricultura. E isso fica mais preocupante com as mudanças climáticas, pois o aumento da temperatura média global pode influenciar na ocorrência e intensidade desses eventos extremos (cheia e seca).

Diante disso, esse trabalho tem como propósito detalhar uma metodologia para análise de tendência, intensidade e ocorrência dos eventos observados e projetados de cheia e seca no período do verão, período úmido e ano hidrológico, por meio do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e do Índice de Seca de Vazões (SDI). Isso para os horizontes de tempo observado (2002-2019), e de curto (2034-2051), médio (2058-2075) e longo prazo (2082-2099) com um cenário de alta emissão de gases de efeito estufa (RCP8.5) e um cenário de estabilização (RCP4.5).

O trabalho foi aplicado com a finalidade de exemplificação nas bacias hidrográficas do Alto Tiete (BH-AT) e do São José dos Dourados (BH-SJD), localizadas no Estado de São Paulo, sendo a primeira densamente urbanizada e a segunda predominantemente rural.

Os dados de precipitação e vazão observados em cada bacia foram utilizados para calcular o SPI e o SDI, respectivamente, no período observado. Para simular a vazão futura no exutório das bacias hidrográficas, foi usado o modelo hidrológico SWAT, os quais foram calibrados e validados através do SWAT-CUP.

As variáveis climáticas projetadas a partir de modelos climáticos Eta-MIROC5, Eta- CANESM2, Eta- HadGEM2-ES e Eta-BESM frente aos cenários RCP4.5 (Cenário I) e RCP8.5 (Cenário II) foram obtidas do CPTEC/INPE e corrigidas através do método *Direct Approach*.

Diversas análises foram realizadas comparando as variáveis climáticas observadas nas bacias, com as variáveis simuladas pelos modelos citados. A precipitação mensal, variável climática considerada como a principal neste estudo, simuladas pelo Eta- CANESM2 e Eta-BESM, apresentou correlação de 0,65 e 0,7 com a precipitação mensal observada na BH-AT e BH-SJD, respectivamente, sendo a maior entre os modelos analisados. Deste modo as projeções climáticas desses modelos foram utilizadas para

simular a vazão dos períodos futuros nas áreas de interesse, e posteriormente para calcular os índices.

No período observado da BH-SJD os principais eventos de seca ocorreram em 2002-2003 e de 2011 a 2014, que foram épocas de crise hídrica na região. Nos períodos projetados com o Cenário I observou-se tendência crescente significativa na série de SPI do verão, período úmido e do ano hidrológico a curto prazo e no verão do médio prazo, que apontam aumento de precipitação nesse período. Por outro lado, no Cenário II a tendência é de redução da precipitação no longo prazo nos três períodos analisados. Em relação as vazões os resultados do Cenário II mostraram tendência significativa decrescente na série de SDI nos três períodos analisados a partir do médio prazo. Já no Cenário I e no horizonte de médio prazo a tendência observada foi crescente no verão, indicando aumento de chuvas, e decrescente no longo prazo.

Na BH-AT foi identificado eventos de seca principalmente em 2013-2014, período o qual a região passou por uma crise hídrica, que afetou milhares de pessoas. Os resultados projetados pelo Cenário I e na série de SDI mostram tendência significativa, sendo crescente no período úmido a curto prazo e no ano hidrológico a longo prazo.

Os resultados dos índices de seca e cheia também indicam aumento da ocorrência dos eventos extremos nas duas bacias hidrográficas e alteração na intensidade de tais eventos.

Conclui-se que a metodologia apresentada tem potencial para ser uma grande ferramenta para estudos de eventos extremos, o que pode colaborar com a gestão dos recursos hídricos e apontar possíveis períodos de risco, tornando possível a elaboração de projetos de mitigação.

Palavras-chave: seca; cheia; SWAT; projeção climática e hidrológica; mudanças climáticas.

ABSTRACT

Extreme events such as floods and droughts can cause various impacts to society, such as loss of life, lack of water for human supply, loss of housing and material goods (in cases of floods), and in addition, they can cause environmental and in the farming. And this becomes more worrying with climate change, as the increase in the average global temperature can influence the occurrence and intensity of these extreme events (flood and drought).

Therefore, this work aims to detail a methodology for analyzing the trend, intensity and occurrence of observed and projected flood and drought events in the summer, wet season and hydrological year, through the Standardized Precipitation Index (SPI) and of the Flow Drought Index (SDI). This is for the observed time horizons (2002-2019), and for the short (2034-2051), medium (2058-2075) and long-term (2082-2099) time horizons with a high greenhouse gas emission scenario (RCP8.5) and a stabilization scenario (RCP4.5).

The work was applied with the purpose of exemplification in the hydrographic basins of Alto Tiete (BH-AT) and São José dos Dourados (BH-SJD), located in the State of São Paulo, the first being densely urbanized and the second predominantly rural. The rainfall and flow data observed in each basin were used to calculate the SPI and SDI, respectively, in the observed period. To simulate the future flow in the outlet of the hydrographic basins, the SWAT hydrological model was used, which were calibrated and validated through the SWAT-CUP.

The climate variables projected from climate models Eta-MIROC5, Eta-CANESM2, Eta-HadGEM2-ES and Eta-BESM against the scenarios RCP4.5 (Scenario I) and RCP8.5 (Scenario II) were obtained from CPTEC/INPE and corrected using the Direct Approach method.

Several analyzes were carried out comparing the climatic variables observed in the basins, with the variables simulated by the aforementioned models. The monthly precipitation, the climatic variable considered as the main one in this study, simulated by Eta-CANESM2 and Eta-BESM, presented a correlation of 0.65 and 0.7 with the monthly precipitation observed in BH-AT and BH-SJD, respectively, being the highest among the analyzed models. In this way, the climatic projections of these models were used to

simulate the flow of future periods in the areas of interest, and later to calculate the indices.

In the observed period of the BH-SJD, the main drought events occurred in 2002-2003 and from 2011 to 2014, which were times of water crisis in the region. In the periods projected with Scenario I, there was a significant increasing trend in the SPI series of the summer, wet period and the hydrological year in the short term and in the summer of the medium term, which indicate an increase in precipitation in this period. On the other hand, in Scenario II the tendency is for a long-term reduction in precipitation in the three analyzed periods. Regarding the flows, the results of Scenario II showed a significant downward trend in the SDI series in the three periods analyzed from the medium term. In Scenario I and in the medium-term horizon, the observed trend was increasing in the summer, indicating an increase in rainfall, and decreasing in the long term.

In BH-AT, drought events were identified mainly in 2013-2014, a period in which the region went through a water crisis, which affected thousands of people. The results projected by Scenario I and in the SDI series show a significant trend, increasing in the wet period in the short term and in the hydrological year in the long term.

The results of the drought and flood indices also indicate an increase in the occurrence of extreme events in the two river basins and a change in the intensity of such events.

It is concluded that the methodology presented has the potential to be a great tool for studies of extreme events, which can collaborate with the management of water resources and point out possible periods of risk, making it possible to develop mitigation projects.

Keywords: drought; full; SWAT; climatic and hydrological projection; climate changes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico natural sem a influência humana.	23
Figura 2 - Balaço hídrico em uma bacia hidrográfica	25
Figura 3 - Mudança na temperatura média anual global da superfície como observado e simulado usando a junção dos fatores antrópicos e anual e apenas fatores naturais (ambos de 1850-2020).	34
Figura 4 - Domínio MCR incorporado em uma grade MGC.	36
Figura 5 - Projeção de mudança da temperatura média global da terra com o cenário de menor impacto (RCP 2.6) e maior impacto (RCP8.5).	37
Figura 6 - Mapa de localização da Bacia hidrográfica do Alto Tietê e do São José dos Dourados.	44
Figura 7 -Diagrama dos processos metodológicos.	47
Figura 8 - Mapa de Localização das estações pluviométricas auxiliares e completas da BH-SJD.	58
Figura 9 - Mapa de Localização das estações pluviométricas auxiliares e completas da BH-AT	58
Figura 10 -Simulação preliminar do modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.	63
Figura 11 - Simulação preliminar do modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados	64
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica do Alto Tietê	73
Figura 13 - Mapa de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.	73
Figura 14 - Mapa Pedológico da bacia hidrográfica do Alto Tietê	75
Figura 15 - Tipos de solo da Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados.	75
Figura 16 - Classificação do relevo quanto a declividade expressa em porcentagem para a bacia hidrográfica do Alto Tietê	77
Figura 17 - Classes de declividade expressa em porcentagem para a Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.	77
Figura 18 - Localização das sub-bacias hidrográficas do Alto Tietê, localização das estações climáticas e do ponto de calibração.	78
Figura 19 - Localização das sub-bacias da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.	78

Figura 20 - Vazão simulada e a observada na estação 62335000 da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.....	80
Figura 21 - Vazão simulada e a observada na estação 6B-012 na Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.	80
Figura 22 - Comparação da radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação da IAG/USP no período de 1999 a 2019.....	82
Figura 23 - Comparação temperatura máxima e mínima do ar média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação da IAG/USP no período de 1999 a 2019.....	82
Figura 24 - Comparação entre a precipitação média mensal do período de 1999-2019 simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observadas na BH-AT.	83
Figura 25 - Comparação da radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação de Marinópolis (BH-SJD) no período de 1999 a 2019.	83
Figura 26 - Comparação temperatura máxima e mínima do ar média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação de Marinópolis (BH-SJD) no período de 1999 a 2019.....	84
Figura 27 - Comparação entre a precipitação média mensal do período1999-2019 simulada pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observada na BH-SJD.	85
Figura 28 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT.....	86
Figura 29 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-SJD	87
Figura 30 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT corrigido.	88
Figura 31 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-SJD corrigido.....	88
Figura 32 - Variação mensal da precipitação simulada pelo modelo Eta-CANESM2 com influência do Cenário I e II, comparado com a variação mensal observada na estação E3-085 localizada na BH-AT.....	90

Figura 33 - Variação mensal da precipitação simulada pelo modelo Eta-BESM com influência do Cenário I e II, comparado com a variação mensal observada na estação E3-085 localizada na BH-SJD.....	91
Figura 34 - Índice de seca padronizada (SPI) médio regional BH-AT para o período de 2002-2019.....	92
Figura 35 - Índice de seca padronizada (SPI) médio regional na BH-SJD para o período de 2002-2019.	94
Figura 36 - Gráficos de análise de tendência do Índice de Precipitação Padronizado do período de base da BH-AT nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.	95
Figura 37 - Gráficos de análise de tendência do Índice de Precipitação Padronizado do período de base da BH-SJD nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.	96
Figura 38 - Índice de Seca de Vazões do exultório da BH-AT para o período de 2002-2019.	96
Figura 39 - Índice de Seca de Vazões do exultório da BH-SJD para o período de 2002-2019.	97
Figura 40 - Gráficos de análise de tendência do índice de seca de vazões do período de base da BH-AT nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.	98
Figura 41 - Gráficos de análise de tendência do índice de seca de vazões do período de base da BH-SJD nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.	98
Figura 42 - Comparação entre o SPI no Ano Hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	100
Figura 43 - Gráficos de análise de tendência do SPI no ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT	101
Figura 44 - Gráficos de análise de tendência do SPI no ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT	101
Figura 45 - Comparação entre o SPI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	102
Figura 46 - Gráficos de análise de tendência do SPI no período úmido nos períodos de Curto (C), Médio (M) e Longo Prazo (L) no Cenário I - BH-AT	102
Figura 47 - Gráficos de análise de tendência do SPI no período úmido nos períodos de Curto (C), Médio (M) e Longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT.....	102

Figura 48 - Comparação entre o SPI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	103
Figura 49 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT.....	104
Figura 50 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-AT.	104
Figura 51 - Comparação entre o SDI no ano hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	105
Figura 52 - Gráficos de análise de tendência do SDI no ano hidrológico do período de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT	105
Figura 53 - Gráficos de análise de tendência do SDI no ano hidrológico do período de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II- BH-AT.....	106
Figura 54 - Comparação entre o SDI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	107
Figura 55 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT	107
Figura 56 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-AT.....	108
Figura 57 - Comparação entre o SDI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	108
Figura 58 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário I - BH-AT.....	109
Figura 59 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT.....	109
Figura 60 - Comparação entre o SPI no Ano Hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.....	110
Figura 61 - Gráficos de análise de tendência do SPI no hidrológico dos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	111

Figura 62 - Gráficos de análise de tendência do SPI no hidrológico dos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	111
Figura 63 - Comparação entre o SPI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	112
Figura 64 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	112
Figura 65 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	113
Figura 66 - Comparação entre o SPI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	113
Figura 67 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	114
Figura 68 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	114
Figura 69 - Comparação entre o SDI no ano hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.....	115
Figura 70 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	116
Figura 71 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	116
Figura 72 - Comparação entre o SDI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	117
Figura 73 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	118
Figura 74 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	118
Figura 75 - Comparação entre o SDI nos verões da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.	119

Figura 76 - Gráficos de análise de tendência do SDI para os verões nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD.....	119
Figura 77 - Gráficos de análise de tendência do SDI para os verões nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da intensidade de seca e chuvosos com base no SPI e SDI. ..	42
Tabela 2 - Períodos destinados a cada fase de execução do modelo SWAT.....	62
Tabela 3 - Parâmetros do SWAT calibrados para a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. 65	
Tabela 4 - Parâmetros do SWAT calibrados na Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.....	65
Tabela 5 - Classificação do desempenho do modelo baseado na NSE e PBIAS	67
Tabela 6 - Porcentagem de área ocupada por cada classe de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Tietê.	72
Tabela 7 - Classificação do uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Rio São José Dos Dourados	74
Tabela 8 - Parâmetros climáticos obtidos na Estação Climática da IAG/USP.....	79
Tabela 9 - Parâmetros climáticos obtidos para a estação de Marinópolis	79
Tabela 10 - Aumento projetado da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT	85
Tabela 11 - Aumento projetado da temperatura sob os cenários climáticos RCP4.5 e RCP8.5 na BH-SJD.	86
Tabela 12 - Comparação entre a precipitação mensal simulada pelos modelos climáticos e observadas nas estações pluviométricas da IAG/USP e E3-085 localizadas na BH-AT	89
Tabela 13 - Comparação entre a precipitação mensal simulada pelos modelos climáticos e observadas nas estações pluviométricas de Marinópolis e B7-053 localizadas na BH-SJD	89
Tabela 14 - Correlação entre os dados mensais das variáveis climáticas observadas BH-AT e BH-SJD simuladas pelos modelos climáticos Eta-CANESM2 e Eta-BESM, respectivamente.	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre os tipos de uso e ocupação encontrados nas bacias com os Dados do SWAT.....	53
Quadro 2 - Parâmetros pedológicos	54
Quadro 3 - Características das estações meteorológicas definitivas localizadas na BH-SJD	56
Quadro 4 - Características das estações meteorológicas definitivas localizadas na BH-AT	56
Quadro 5 - Parâmetros do gerador climático WGN.....	60
Quadro 6 - Dados relativos aos principais Reservatórios localizados na BH-AT	61
Quadro 7 - Parâmetros submetidos a análise de sensibilidade.....	63
Quadro 8 - Descrição dos horizontes de tempo	99
Quadro 9 -Esquema metodológico.....	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVO GERAL	22
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	CICLO HIDROLÓGICO.....	23
3.2	MODELOS HIDROLÓGICOS	25
3.2.1	<i>Soil and Water Assessment Tool- Uma Visão Geral</i>	27
3.2.1.1	<i>Equações de Modelagem Hidrológica</i>	28
3.2.2	<i>Análise de Sensibilidade, Calibração, Validação do Modelo SWAT</i>	31
3.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	32
3.3.1	<i>Modelos Climáticos Globais e Regionais</i>	35
3.3.2	<i>Cenários e Projeções Climáticas</i>	36
3.3.3	<i>Projeção Climática e Hidrológica</i>	39
3.4	EVENTOS DE SECAS E CHEIAS	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREAS DE ESTUDO.....	44
4.2	PROCESSOS METODOLÓGICOS.....	46
4.3	SOFTWARE NECESSÁRIOS	48
4.4	MODELO CLIMÁTICO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	48
4.4.1	<i>Ajuste dos Dados Simulados Pelos Modelos Climáticos</i>	49
4.4.2	<i>Critérios para Escolha do Modelo Climático</i>	50
4.5	MODELOS HIDROLÓGICOS – ELABORAÇÃO	51
4.5.1	<i>Delimitação das Bacias Hidrográficas</i>	51
4.5.2	<i>Banco de Dados de Uso e Ocupação do Solo</i>	51
4.5.3	<i>Banco de Dados Pedológicos</i>	53
4.5.4	<i>Declividade do Relevo</i>	54
4.5.5	<i>Unidades de Respostas Hidrológicas</i>	55
4.5.6	<i>Banco de Dados climáticos</i>	55
4.5.7	<i>Dados Meteorológicos e Preenchimento de Falhas</i>	57
4.5.8	<i>Gerador Climático</i>	59
4.5.9	<i>Dados dos Reservatórios Localizados na BH-AT</i>	60
4.6	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	61

4.6.1	<i>Indicadores de Desempenho dos Modelos Hidrológicos</i>	66
4.7	MÉTODO DE CÁLCULO DOS ÍNDICES DE SECA	67
4.8	ANÁLISE DE TENDÊNCIA	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	MODELOS HIDROLÓGICOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	72
5.1.1	<i>Uso e Ocupação do Solo</i>	72
5.1.1.1	Aspectos Pedológicos	74
5.1.1.2	Declividade do Relevo e Sub-Bacias Hidrográficas	76
5.1.1.3	Estatísticas Climáticas Geradas Pelo WGN	78
5.1.1.4	Calibração e Validação dos Modelos Hidrológicos	79
5.2	ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO	81
5.2.1	<i>Comportamentos Gerais das Simulações Climáticas</i>	81
5.2.1.1	Comportamento das projeções da Temperatura Média do Ar	85
5.2.1.2	Definição do Modelo Climático	89
5.3	RESULTADOS FINAIS	92
5.3.1	<i>Eventos Extremos Meteorológicos no Período de Base</i>	92
5.3.2	<i>Eventos Extremos Hidrológicos no Período de Base</i>	96
5.3.3	<i>Eventos Extremos em Cenários Futuros</i>	98
5.3.3.1	Estudo de Caso da BH-AT	99
5.3.3.2	Estudo de Caso da BH-SJD	109
5.4	ESQUEMA METODOLÓGICO PROPOSTO	120
6	CONCLUSÃO	122
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A	137
	APÊNDICE B	138
	APÊNDICE C	139

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa natural da terra torna a vida como conhecemos possível (IPCC, 2013). Entretanto, a intensificação desse efeito eleva a temperatura média global. Martel *et al.* (2018) relatam que o aumento da temperatura pode provocar mudanças significativas na distribuição de eventos extremos, como extremos de precipitação, secas e inundações. Isso vêm sendo relatado em vários estudos ao redor do planeta terra, que mostram tanto mudanças nos padrões de precipitação e temperatura, quanto na intensidade e frequência de eventos extremos (DEL-TORO-GUERRERO; KRETZSCHMAR, 2020).

Os eventos extremos, segundo a definição de Marengo (2009), são valores discrepantes de um estado climático médio e compreendem eventos de friagem, ondas de calor e frio, chuvas intensas, inundações, veranicos (fenômenos de curto prazo) e secas (médio prazo).

Conforme Sharma e Mujumdar (2019) as chuvas de alta intensidade e curta duração podem causar inundações repentinas, já os eventos de precipitação intensa e contínuos podem provocar cheias nos rios. Sabe-se que as cheias são eventos naturais, porém, o problema é que com a interferência humana no uso e ocupação das bacias hidrográficas, isso tem sido agravado, principalmente em áreas urbanas, pois além da área ser demasiadamente impermeabilizada, muitas pessoas têm suas residências localizadas nas planícies de inundação.

Jenkins e Warren (2015) relataram que as secas geram risco econômico, principalmente quando se fala em setores como: agricultura, pecuária, silvicultura, energia, indústria e abastecimento urbano. Além disso, podem provocar o aumento do efeito das cargas poluidoras, resultando em redução da qualidade da água e danos aos ecossistemas aquáticos (KIM *et al.*, 2019), visto que, o meio receptor terá menor capacidade de diluição, transporte e dissolução do poluente.

Segundo a Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016) os impactos exatos das mudanças climáticas nos ciclos hidrológicos globais e regionais são incertos, mas a expectativa para as principais bacias hidrográficas do Brasil é de que ocorra alterações pronunciadas na precipitação, no escoamento superficial das águas, e efeitos negativos nas taxas de recarga dos aquíferos subterrâneos.

Eventos extremos de seca e cheia já têm sido relatados em diferentes regiões do Brasil. Coelho *et al.* (2016) salientaram que na região sudeste do Brasil ocorreram alguns eventos de seca, como em 2001 e 2014, fazendo com que uma população de cerca de 12 milhões de pessoas sofressem com a escassez de água, devido aos baixos níveis dos reservatórios de abastecimento.

Cunha *et al.* (2018) apontaram eventos de seca no Nordeste entre 2012-2017, no Sudeste entre 2014 e 2015, na Amazônia em 2005, 2010 e 2016, e no Sul em 2005-2012. Também Duarte e Val (2020) relataram que foram registrados três eventos de inundações extensas e dois de secas na Bacia Amazônica entre 2005 e 2012, secas severas na Bacia do Atlântico Sudeste em 2013 e 2014 e nas bacias do Atlântico Nordeste Oriental e do Parnaíba entre 2012 e 2016. Ainda segundo Duarte e Val (2020) tais eventos afetaram negativamente a disponibilidade dos recursos hídricos e aumentou a vulnerabilidade da população ao estresse hídrico nas áreas atingidas.

ANA (2019) mostrou que, dos 5.570 municípios brasileiros, cerca de 49,2% e 51,1% já decretaram Situação de Emergência pelo menos uma vez entre 2003-2019, devido a cheias e secas, respectivamente. Em 2019 mais de 2 milhões de pessoas foram afetadas pelas cheias (alagamentos, enxurradas e inundações) e cerca de 22 milhões pelas secas e estiagem no Brasil.

Conforme ANA (2020) no ano de 2020, a combinação de altas temperaturas, baixa umidade e seca prolongada, provocou focos de incêndios, sendo o maior desde 1988 na região do Pantanal, gerando graves consequências para a fauna, flora e para os habitantes da região.

Segundo Ana (2021b) a região sudeste do Brasil enfrentou em 2021 secas excepcionais, que causam perdas de culturas agrícolas, e escassez de água generalizada. Nesse contexto, através do Sistema de Acompanhamento de Reservatório (SAR) foi possível notar que os reservatórios formados por barragens de Três Irmãos e de Ilha Solteira, localizados no noroeste do Estado de São Paulo, em outubro de 2021, estavam operando abaixo do seu volume útil (o reservatório atingiu a cota mínima de utilização da hidrovia).

Um ponto importante a ser ressaltado é que os padrões de chuva variam naturalmente, contudo eventos extremos de excesso ou escassez de chuvas como os observados, podem ser indícios de mudanças climáticas (ANA,2020).

Hajani e Rahman (2018) afirmam que os efeitos das mudanças climáticas variam de um lugar para o outro e também ao longo do tempo. Alguns trabalhos relacionados às projeções futuras de mudanças climáticas apontam para tendências crescentes na precipitação acumulada no Sudeste da América do Sul. Por outro lado, os efeitos das mudanças climáticas sobre a vazão dos cursos d'água variam de acordo com as características das regiões e dos cenários climáticos utilizados (SILVA *et al.*, 2018).

Diante do exposto, é de suma importância a realização de estudos detalhados dos episódios de cheia e seca, em escala local e regional, bem como a projeção das suas características, como intensidade, duração e frequência frente aos diferentes cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs). Entretanto, diversas incertezas surgem quando o assunto é sobre mudanças climáticas, projeções climáticas e hidrológicas. ADAM (2016) concluiu que entre as principais fontes de incertezas investigadas em seu estudo estão, em ordem decrescente, os modelos climáticos globais, os modelos climáticos regionais, as técnicas de remoção de viés e por fim os modelos hidrológicos.

Neste contexto, esse trabalho tem com intuito detalhar uma metodologia para análise de dois eventos extremos, cheia e seca, em duas bacias hidrográficas sob cenários de trajetórias representativas de concentrações ou *Representative Concentration Pathway* (RCP). O propósito é fornecer um método robusto, viável e que vise não negligencie as incertezas citadas anteriormente, para assim poder ser adaptado e replicado por órgãos gestores e demais interessados.

2 OBJETIVO GERAL

Realizar o detalhamento de uma metodologia para análise de eventos extremos (cheia e seca) nas bacias hidrográficas do Rio São José dos Dourados e do Alto Tietê, ambas localizadas no estado de São Paulo. Isso nos horizontes de tempo observado (2002-2019) e de curto (2034-2051), médio (2058-2075) e longo prazo (2082-2099) frente aos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar a metodologia proposta, a título de exemplificação.
- Realizar análise de tendência, de intensidade e de ocorrência dos eventos extremos no verão, período úmido e ano hidrológico por meio dos Índices SPI (*Standardized Precipitation Index*) e SDI (*Streamflow Drought Index*).

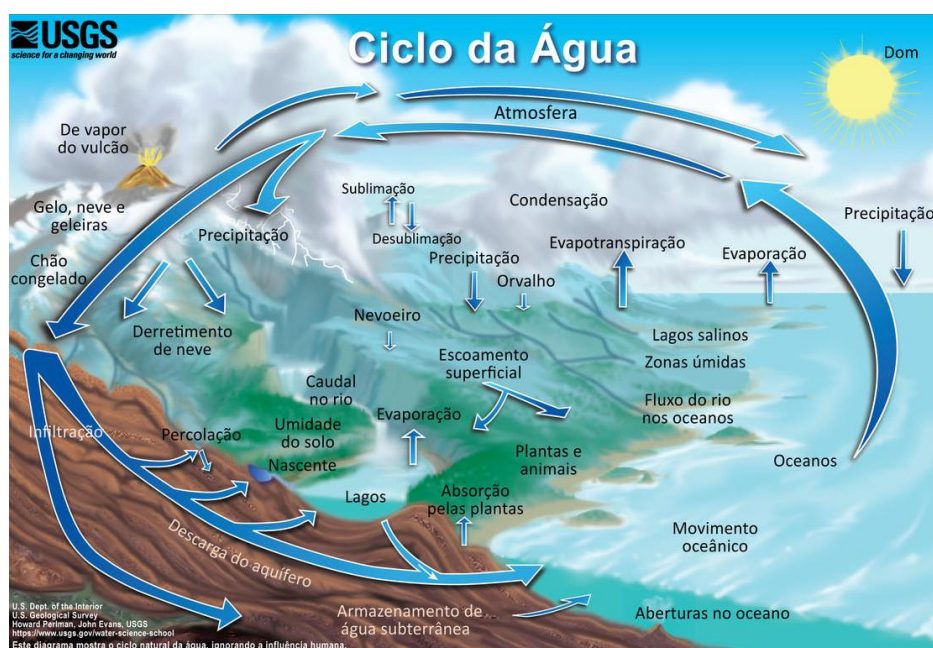
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

A circulação da água na terra, nos oceanos e mesmo na atmosfera, é exposta pelo ciclo hidrológico global (Figura 1), essencial à manutenção das funções do sistema terrestre (AJAMI, 2021).

Em síntese, a água que evapora nos oceanos ascende para atmosfera, podendo condensar, formar nuvens e precipitar sobre continentes e oceanos. Quando precipitada sobre o continente, passa por diferentes processos, podendo ser interceptada por plantas e outros obstáculos, sofrer evapotranspiração e retornar à atmosfera, infiltrar no solo, e escoar por fluxos subterrâneos e superficiais até atingir novamente o oceano devido à ação da gravidade (VILLELA; MATTOS, 1975).

Figura 1 - Ciclo hidrológico natural sem a influência humana.



Fonte: USGS (2017).

Um dos fatores responsáveis pelas mudanças no ciclo da água é o clima (FENG, ZOU e LUO, 2017). Por exemplo, a intensidade e sazonalidade da precipitação, e a duração dos períodos de seca e cheia são impactados pela temperatura do ar (AJAMI, 2021). Vale ressaltar que a precipitação é o principal impulsionador do ciclo da água e que sua variabilidade controla a disponibilidade dos recursos hídricos (AJAMI, 2021).

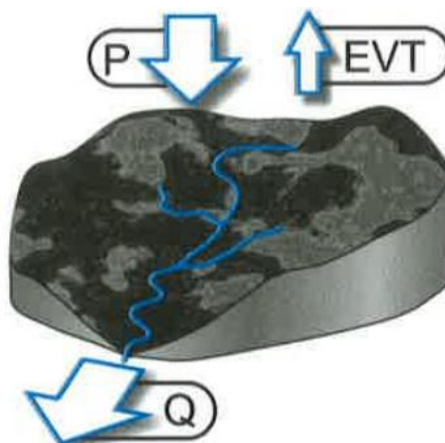
Outro ponto importante é que a evapotranspiração é responsável por aproximadamente 70% da precipitação global (AJAMI, 2021). Ela é controlada por fatores como radiação solar, temperatura, tipo de vegetação e a umidade do solo (AJAMI, 2021). Duarte e Val (2020) apontaram que em escala local a redução da cobertura florestal pode diminuir a evapotranspiração e promover aumento do escoamento superficial, e em escala regional o desmatamento pode atuar na variabilidade do regime de chuvas, por exemplo, a substituição de floresta por lavouras e pastagens podem reduzir a precipitação, mas também aumentar a frequência e intensidade das chuvas.

Sendo assim, a mudança na cobertura do solo pode ser considerada um fator responsável pelas alterações no ciclo da água, podendo modificar diretamente a evapotranspiração e indiretamente os eventos de precipitação (FENG; ZOU; LUO, 2017).

Para análise de eventos extremos analisa-se o ciclo da água local, que ocorre em uma bacia hidrográfica, definida por Collischonn e Dornelles (2013) como a área de captação natural da água precipitada que agrupa os fluxos dos escoamentos para um único ponto de saída denominado exutório. Conforme lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, a “[...] bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos [...]”.

Na bacia hidrográfica ocorrem entradas de água pela precipitação e saídas por escoamentos e evapotranspiração (Figura 2). Assim, para satisfazer o balanço hídrico da bacia, a variação de água armazenada na bacia pela variação do tempo deve ser igual ao volume de água precipitado menos o volume de evapotranspiração e escoado (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Figura 2 - Balaço hídrico em uma bacia hidrográfica



Fonte: (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Para compreender o ciclo hidrológico dentro de uma bacia hidrográfica, são comumente utilizados modelos hidrológicos.

3.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

Algumas definições e classificações são importantes para entender a robustez dos tipos de modelos hidrológicos. Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem, podendo ser estocástico ou determinístico. Estocástico quando pelo menos uma das variáveis utilizadas na modelagem tem comportamento aleatório e determinístico quando os conceitos de probabilidade são negligenciados durante a elaboração do modelo (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Quanto ao tipo de relação entre as variáveis, os modelos podem ser divididos em empíricos, em que utilizam funções baseadas em análises estatísticas como métodos de correlação ou regressão, e geralmente não levam em conta os processos físicos envolvidos, ou modelos conceituais, que representam os processos físicos, no qual envolvem o fenômeno estudado (SANTOS, 2009). E esse último, ainda pode ser subdividido em semi conceitual e físico, o primeiro relaciona características físicas do processo mantendo o empirismo na definição dos parâmetros e o segundo se aproxima bastante da física do sistema (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados também quanto a forma de representação dos dados, sendo contínuos quando representam os fenômenos

continuamente ao longo do tempo, e discretos quando as variáveis são obtidas em intervalos pré-definidos de tempo (MALAFAIA FILHO, 2019).

Inclusive são classificados quanto a existência ou não de relações espaciais, sendo eles concentrados, no qual consideram que as variáveis representam toda a área estudada, ou distribuídos, em que consideram uma variabilidade espacial das variáveis ao longo da área estudada, podendo a bacia hidrográfica ser subdividida em sub-bacias (semi-distribuído) ou até mesmo em células (distribuído) (MALAFAIA FILHO, 2019).

Os modelos ainda podem ser classificados quanto a sua dependência temporal, em que são estacionários quando descrevem o fenômeno em determinado momento e os parâmetros não variam com o tempo, ou dinâmicos em que os parâmetros variam com o tempo (MARINHO FILHO et al., 2012).

Alguns exemplos de modelos hidrológicos são: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998), Generalized Water Loading Function (GWLF) (EVANS *et al.*, 2002) e Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) (Crawford e Linsley, 1966).

O GWLF é um modelo concentrado que utiliza o método do SCS-CN para estimar a vazão (SANTOS, 2018). Por outro lado, os modelos HSPF e SWAT são contínuo e semi-distribuído, porém o primeiro é conceitual e exige informações meteorológicas horárias, e o segundo tem base física, é mais flexível, e requer de informações meteorológicas horárias ou diárias (CHEN *et al.*, 2019).

O modelo SWAT tem sido amplamente utilizado, visto que, ele tem sido utilizado em dezenas de estudos para avaliação futura de eventos extremos hidroclimáticos (TAN *et al.*, 2020). É uma ferramenta que tem sido amplamente utilizada para projetar mudanças hidrológicas de bacias hidrográficas sob diferentes cenários de mudanças climáticas em diferentes locais do mundo - por exemplo Bhatta *et al.* (2019), Oliveira *et al.* (2019) e Marin *et al.* (2020).

O SWAT também é considerado um dos modelos mais adequados para prever os impactos, em longo prazo, de medidas de gestão da água em bacias hidrográficas complexas, e com diferentes tipos e usos do solo (SANTOS, 2018). Ainda conforme Santos (2018) o SWAT opera sobre bacias médias e grandes, sendo capaz de simular longos períodos de tempo (>100anos), além de ser amplamente utilizado pela comunidade acadêmica.

Porém, é menos relatado o seu uso para aplicação de condições extremas de fluxo de água, o que deixa a desejar, pois isso pode ajudar na identificação de um perigo natural futuro, e a partir daí, as autoridades regionais e locais podem iniciar medidas de mitigação (TAN *et al.*, 2020).

3.2.1 Soil and Water Assessment Tool- Uma Visão Geral

O SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* do *United States Department of Agriculture* e é de domínio público (ARNOLD *et al.*, 1998).

Para realizar um modelo hidrológico no SWAT é necessário primeiro criar um banco de dados com as características da área de estudo, a partir disso, desenvolver o modelo em uma interface de sistemas de informações geográficas (no ArcGis ou Qgis, por exemplo), realizar análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e validação do mesmo.

O SWAT divide os processos hidrológicos em duas fases. Uma fase terrestre, baseada no conceito de balanço hídrico, que considera precipitação, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, escoamento lateral e subterrâneo. E outra fase de roteamento, que conecta todas as sub-bacias por meio do canal principal e simula o movimento da água e sedimentos até o exutório (CHEN *et al.*, 2019).

No SWAT a bacia hidrográfica é discretizada em sub-bacias, que são posteriormente segmentadas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH), conforme a homogeneidade de características, tais como: tipos de uso e ocupação de terra, tipos de solos e declividades (AZIMI *et al.*, 2020).

A entrada dos dados no SWAT é realizada por meio dos planos de informações e de dados alfanuméricos, o primeiro representa as características físicas da bacia (uso e ocupação do solo, tipos de solos e modelo digital de elevação (MDE)), e o último as informações climáticas (precipitação, radiação solar, temperatura, e umidade do ar) (NEITSCH *et al.*, 2011).

Os dados climáticos são inseridos pelo usuário do software com base em informações observadas e as informações faltantes podem ser geradas pelo próprio programa, porém é recomendado que sejam obtidos os registros a partir de medidores na área de estudo, para melhor aproximação com a realidade local (NEITSCH *et al.*, 2011).

Os atributos topográficos da bacia, incluindo área, declive e características do canal, são derivados do modelo digital de elevação (MDE) (MENGISTU; VAN

RENSBURG; WOYESSA, 2019). Assim, o MDE desempenha papel fundamental na geração da rede fluvial, na definição do limite da bacia, divisão das sub-bacias e unidades de respostas hidrológicas.

Para realizar a modelagem e os processos hidrológicos o SWAT faz uso de diversas equações que estão detalhadas no Manual no SWAT.

3.2.1.1 Equações de Modelagem Hidrológica

Abaixo segue uma síntese das principais equações apresentadas por Neitsch *et al.* (2011) no Manual do SWAT 2012.

O balanço hídrico da bacia hidrográfica é calculado pela Equação 01.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - W_{gw}) \quad \text{EQ.01}$$

Onde:

SW_t = quantidade de água no solo no fim do dia (mm);

SW_0 = quantidade de água no início do dia i (mm);

R_{day} = precipitação no dia i (mm);

Q_{sup} = escoamento superficial no dia i (mm);

W_{seep} = quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm);

W_{gw} = quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm);

E_a = a quantidade de água de evapotranspiração no dia i (mm) e

t = tempo (dias);

O escoamento superficial pode ser calculado pelo Método de Número Curva (CN) (SCS, 1972) ou pelo método de infiltração de Green e Ampt (1911). O método CN, cujo o escoamento superficial é calculado pela Equação 02.

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{EQ.02}$$

Onde:

Q_{sup} = escoamento superficial (mm);

P = precipitação (mm) e

S = capacidade máxima de armazenamento (mm).

Sendo que o parâmetro S varia espacialmente devido às condições de uso, tipo, declividade, umidade e cobertura do solo e fica em função de CN. Já o CN varia de 1 a 100, sendo 1 quando o solo é totalmente permeável e 100 impermeável. A capacidade máxima de armazenamento (S) em unidades métricas é calculada pela Equação 03.

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad \text{EQ.03}$$

Ademais, o CN é corrigido conforme a umidade antecedente do solo através das Equações 04 e 05.

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20 \times (100 - CN_{II})}{100 - CN_{II} + \exp[2,533 - 0,0636 \times (100 - CN_{II})]} \quad \text{EQ.04}$$

$$CN_{III} = CN_{II} \times \exp[0,00673 \times (100 - CN_{II})] \quad \text{EQ.05}$$

Onde o CN_I representa condições de seca, o CN_{II} condições normais e o CN_{III} condições de umidade.

O máximo escoamento superficial gerado a partir de um determinado evento de precipitação é denominado vazão de pico. A vazão de pico é calculada pela Equação 06.

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{sup} \times A}{3,6 \times t_{c,con}} \quad \text{EQ.06}$$

Onde:

q_{pico} = vazão de pico (m^3/s);

α_{tc} = fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração;

Q_{sup} = escoamento superficial (mm);

A = área da sub-bacia (km^2) e

t_{con} = tempo de concentração (h).

O tempo de concentração da bacia (t_{con}) (Equação 07) é calculado no SWAT como sendo a soma do tempo de concentração do fluxo superficial ($t_{c,sup}$) (Equação 08) e do tempo de concentração do fluxo através do canal ($t_{c,can}$) (Equação 09), conforme demonstrado abaixo.

$$t_{con} = t_{c,sup} + t_{c,can} \quad \text{EQ.07}$$

$$t_{c,sup} = \frac{L_{slp}^{0,6} \times n^{0,6}}{18 \times slp^{0,3}} \quad \text{EQ.08}$$

$$t_{c,can} = \frac{0,62 \times L \times n^{0,75}}{A^{0,125} \times slp_{can}^{0,375}} \quad \text{EQ.09}$$

Onde:

L_{slp} = comprimento da encosta (m);

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

slp = declividade média da sub-bacia (m/m);

L = comprimento do canal (km);

A = área da sub-bacia (km²) e

slp_{can} = declividade média do canal (mm).

A evapotranspiração inclui todos os processos que transformam a água da terra em vapor. Segundo Neitsch *et al.* (2011) a sua determinação é fundamental, pois, a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração resulta na água disponível para gerenciamento e uso. No SWAT a evapotranspiração potencial pode ser calculada através dos métodos de Pennman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972) ou Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1982).

Para a utilização do método de Pennman-Monteith são necessários dados de radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade do vento, já o método de Priestley-Taylor não precisa da velocidade do vento e o Hargreaves requer apenas dados de temperatura do ar (NEITSCH *et al.*, 2011).

Através dos dados de precipitação, radiação solar, umidade relativa do ar, temperatura do ar e velocidade do vento são desenvolvidas as variáveis necessárias para utilização do método de Pennman-Monteith (Equação 10):

$$\lambda E = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times c_p \times [e_z^0 - z]/ra}{\Delta + \gamma \times (1 + r^c/ra)} \quad \text{EQ.10}$$

Onde:

- λE é a densidade do fluxo de calor latente (MJ/m² /dia);
- E é a profundidade da taxa de evaporação (mm/dia);
- Δ é a inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor (KPa/°C);
- H_{net} é a radiação líquida (MJ/m²/dia);

- G representa a densidade de fluxo de calor para o solo ($\text{MJ/m}^2/\text{dia}$);
- ρ_{air} é a densidade do ar (kg/m^3);
- cp é o calor específico ($\text{MJ/kg/}^\circ\text{C}$);
- e_z^0 é a pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa);
- e_z é a pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa);
- γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa/}^\circ\text{C}$);
- rc é a resistência do dossel da planta e;
- ra é a resistência aerodinâmica.

Segundo Santos (2015) após esse processo, através da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, da transpiração dos vegetais e da evaporação do solo determina-se a evapotranspiração real.

As demais equações utilizadas pelo SWAT podem ser encontradas em seu manual (NEITSCH *et al.*, 2011).

O que torna o SWAT uma ferramenta de modelagem eficaz na produção de resultados realistas é que, além dos principais componentes de entrada, o modelo contém outros parâmetros de calibração que podem ser modificados para aproximar com a realidade da bacia em estudo (FRANCESCONI *et al.*, 2016).

3.2.2 Análise de Sensibilidade, Calibração, Validação do Modelo SWAT

Na análise de sensibilidade é possível identificar os parâmetros mais sensíveis para a área de interesse. Moriasi *et al.* (2015) afirmam que, para garantir uma representação adequada da bacia hidrográfica e dos cenários, na calibração os valores dos parâmetros de entrada e as condições iniciais são ajustadas até os resultados simulados coincidirem ou se aproximarem das variáveis observadas. E a validação verifica se o modelo calibrado é capaz de prever períodos posteriores.

Tan *et al.* (2020) relatam que a maioria dos estudos de eventos hidroclimáticos extremos no SWAT divide a vazão observada em dois períodos de tempo, um para análise de sensibilidade e calibração e outro para validação.

Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016) recomendaram que a série histórica seja dividida em partes iguais quando for suficientemente longa, e se a série for curta a divisão deve ser da seguinte maneira: os 70% iniciais da série para calibração e os 30% finais para validação. Porém, Blainski, Acosta e Nogueira (2017) utilizaram dados de vazão de dois anos, o primeiro ano para calibração e o segundo para validação do modelo SWAT.

Para o estudo de cenários sobre mudanças climáticas é recomendado por Brighenti; Bonumá; Chaffe (2016) que a série fluviométrica seja longa o suficiente para identificar as diferentes condições históricas, tornando possível a realização da calibração de anos úmidos e validação em anos secos, e vice-versa.

Diante do exposto, observa-se que a divisão da série histórica destinada à essas etapas dependem muito da disponibilidade dos dados, porém são essenciais.

Tan *et al.* (2020) relatam que muitas medidas estatísticas são utilizadas para avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT, mas que os índices mais utilizados são o Coeficiente de Determinação (R^2) e a eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) e os que os critérios sugeridos por Moriasi *et al.* (2007) e Moriasi *et al.* (2015) são os mais usados para interpretar os valores desses índices.

Essas etapas são facilitadas com o uso do SWAT-CUP, ele é um software que possibilita a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza de vários parâmetros hidrológicos, utilizando diferentes algoritmos e técnicas de análise de incerteza como o método de Markov Chain Monte Carlo (MCMC); a Estimativa de Incerteza de Probabilidade Generalizada (GLUE); a Solução de Parâmetros (ParaSol); e o Ajuste de Incerteza Sequencial Versão 2 (SUFI-2) (THAVHANA; SAVAGE; MOELETSI, 2018).

3.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O clima e a água estão nitidamente ligados, e, sendo assim, mudanças no sistema climático induz a alterações no sistema hídrico, em escala global e regional (BATES, 2008).

A associação internacional que realiza a compilação de pesquisas referentes as mudanças no clima é chamada de *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* (POO *et al.*, 2021). Segundo o IPCC (2014) as mudanças climáticas são provocadas por processos antrópicos e naturais, que afetam a variabilidade de suas propriedades por períodos prolongados de tempo.

Entre os processos naturais que afetam o clima global podemos citar: as atividades vulcânicas e as atividades solares (IPCC, 2014). Já os processos antrópicos, estão ligados às ações do homem, por exemplo, a emissão de gases como o dióxido de carbono (CO_2)

e o metano (CH_4) (TUCCI, 2012), que potencializam o efeito estufa, e consequentemente elevam a temperatura média global da superfície terrestre (IPCC, 2014). Os gases de efeito estufa podem, por exemplo, ser emitidos através da queima de combustíveis fósseis, digestão de animais ruminantes (TUCCI, 2012), como também, pela agricultura, outros usos da terra e aterros sanitários.

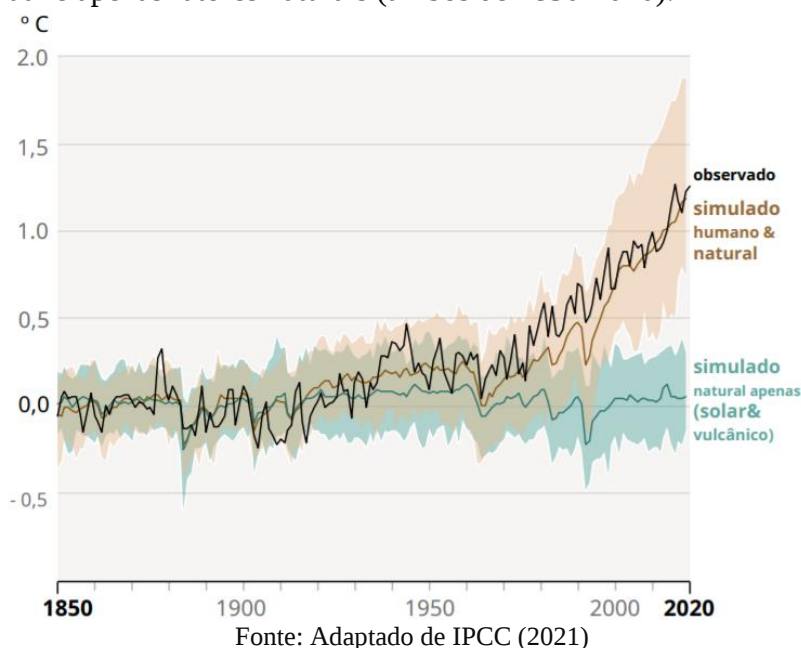
O IPCC (2014) relatou que a maior parte do aquecimento observado no período de 1951-2010 ocorreu, não só devido as forçantes naturais, mas também, com ação conjunta de forçantes antrópicas. Isso posto, é notório que a atividade humana tem influenciado no aumento da temperatura média global.

Diante disso, no Acordo de Paris em 2015, os países concordaram em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com intuito de manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2° C em relação aos níveis pré-industriais (1850–1900) e tentar limitar esse aumento da temperatura a 1,5° C (IPCC, 2018).

Segundo o IPCC (2014) a expectativa era que em 2100, caso não sejam reduzidas as taxas de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), poderá haver aumento de 4°C na temperatura global em relação ao período pré-industrial. Por outro lado, se forem implementadas técnicas de mitigação a temperatura aumentaria 1,5°C. Já em 2021 um novo relatório do IPCC apontou que é muito provável que o aumento da temperatura global média na superfície atinja entre os anos de 2081-2100 de 1°C a 1,8°C no cenário de emissões de GEEs muito baixas, e de 3,3°C a 5,7°C nos cenários de emissões de GEEs muito altas.

A Figura 3 ilustra a mudança na temperatura da superfície global de 1850 a 2020, em comparação com as simulações do modelo climático CMIP6 (IPCC, 2021). Conforme o relatório do IPCC (2021) a temperatura média da superfície terrestre observada no período de 2001-2020 foi 0,99°C superior ao período de 1850-1900. Sendo que a temperatura média mais alta ocorreu em 2011-2020 (1,09°C maior do que 1850-1900).

Figura 3 - Mudança na temperatura média anual global da superfície como observado e simulado usando a junção dos fatores antrópicos e natural e apenas fatores naturais (ambos de 1850-2020).



O aumento da temperatura da superfície terrestre provoca mudanças nas médias de precipitação, evaporação e escoamento, porém o maior problema são os eventos extremos (MISHRA; SINGH, 2010). Kim *et al.* (2019) relatam que as mudanças climáticas futuras provavelmente provocariam variações regionais na precipitação e aumentariam a incidência de secas severas. Segundo o IPCC (2021) a cada 0,5°C adicional de aquecimento global ocorrem aumentos na intensidade e frequência de eventos extremos.

Também é previsto, que submetidas às mudanças climáticas, as principais bacias hidrográficas sofram alterações no escoamento superficial e efeitos negativos na taxa de recarga dos aquíferos (DUARTE; VAL, 2020). Além disso CRED (2020) relatou que as mudanças nos padrões de chuva e aumento da variabilidade da precipitação apresentam um risco para 70% da agricultura global.

No Brasil os eventos extremos são preocupantes principalmente em centros urbanos, devido à grande aglomeração de indivíduos, que hora são afetados por cheias, inundações e alagamentos e outra por secas e em alguns casos precisam passar por longos períodos de racionamento de água e aumento em tarifas de energia elétrica. Esses eventos também afetam as áreas rurais, provocando danos às culturas agrícolas.

3.4.3 Modelos Climáticos Globais e Regionais

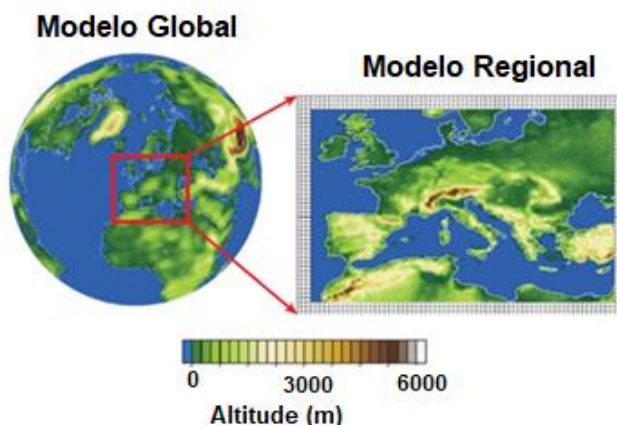
Os modelos climáticos globais (MCGs) são ferramentas utilizadas para investigar a resposta do sistema climático a forçantes radiativas (FLATO *et al.*, 2013). Essas forçantes radiativas são definidas como a variação líquida no balanço de energia do sistema terrestre devido a algumas perturbações, que quantifica o desequilíbrio de energia, que ocorre quando a mudança é imposta em um determinado tempo. Normalmente esse desequilíbrio é apresentado como sendo o valor das mudanças entres dois tempos, como o pré-industrial e os dias atuais (IPCC, 2013).

Os MCGs descrevem os efeitos de forças (como as forças resultantes de gases de efeito estufa, variações na atividade solar e grandes erupções) e processos (como as Oscilação El Nino-Sul (ENSO)) na atmosfera, que determinam a sequência de eventos climáticos globais (GIORGI; GUTOWSKI, 2015). Ou seja, os modelos climáticos globais abrangem a física e a dinâmica do sistema terrestre como um todo, deste modo, são as ferramentas mais avançadas para simular as respostas do clima global sob as variações das concentrações de gases de efeito estufa e para estudos de mudanças climáticas (ALMAGRO *et al.*, 2020).

Entretanto, para obter informações mais detalhadas de uma região, são necessários modelos climáticos regionais (MCRs) ou *downscaling* dinâmico, eles por sua vez são uma redução de algum modelo global para uma área delimitada (FLATO *et al.*, 2013). O método de redução do MCG para o MCR (Figura 4) utiliza de condições de contorno nas laterais do domínio geográfico dos dados provenientes dos modelos globais para realizar a regionalização.

Adam (2018) relatou que apesar das incertezas envolvendo os processos de modelagem atmosférica e projeções climáticas, estudos sugerem melhor desempenho nos resultados com o uso de modelos climáticos regionais do que globais. Adam (2018) ainda fala que os modelos regionais permitem análise mais detalhada dos impactos locais, pois tem melhor resolução espacial.

Figura 4 - Domínio MCR incorporado em uma grade MGC.



Fonte: Adaptado de Giorgi e Gutowski (2015).

Um exemplo de modelo regional é o modelo Eta (MESINGER *et al.*, 1988; BLACK, 1994). Ele foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para estudos de mudanças climáticas na América do Sul (BRAZIL, 2016) e especialmente no Brasil vêm sendo bastante utilizado (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

3.3.4 Cenários e Projeções Climáticas

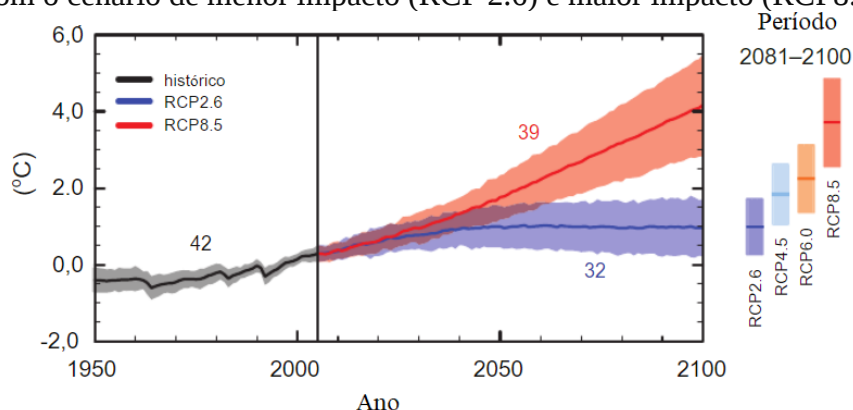
Para realizar projeções climáticas são realizadas simulações climáticas futuras com base em cenários de forçantes radiativas. Em 1995 foi criado o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) pelo Programa Mundial de Pesquisa e Climática (DIAS; REBOITA, 2021). Para o *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5) foram desenvolvidos 4 cenários denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Estes cenários especificam concentrações e emissões, que incluem gases de vida curta mais consistentes e mudanças no uso da terra (CUBASCH *et al.*, 2013).

Os RCPs são cenários que utilizam o forçamento radiativo para fornecer as trajetórias de concentrações de gases de efeito estufa (Figura 5), eles incluem cenários de mitigação de concentrações de GEEs (RCP2.6), dois cenários de estabilização (RCP4,5 e RCP 6.0) e um cenário de alta emissão (RCP8.6) (RAO *et al.*, 2020).

O RCP2.6 atinge o pico em 3 Wm^{-2} e diminui para aproximadamente $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100; o RCP4.5 e RCP6.0 são cenários que apresentam estabilização em $4,5$ e 6 Wm^{-2} por volta de 2100, respectivamente, já o RCP8.5 implica em um forçamento radiativo de $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100 (CUBASCH *et al.*, 2013).

Neste contexto, as aplicações dos modelos climáticos globais e regionais, assim como os cenários de concentração e emissão de GEEs, têm sido impulsionadas pela preocupação em relação aos impactos que estas mudanças no sistema climático podem provocar em diferentes setores.

Figura 5 - Projeção de mudança da temperatura média global da terra com o cenário de menor impacto (RCP 2.6) e maior impacto (RCP8.5).



O INPE disponibiliza na plataforma PROJETA um conjunto de dados resultados de modelos climáticos regionais, que facilitam e possibilitam realizações de diversas pesquisas (ALMAGRO *et al.*, 2020). As RCPs disponíveis são RCPs 4.5 e 8.5 e os modelos regionais são Eta-MIROC5, Eta- CANESM2, Eta- HadGEM2-ES e Eta-BESM.

Jong *et al.* (2021) realizaram um estudo para estimar o impacto das mudanças climáticas regionais nos recursos hidrelétricos na América do Sul, por meio de 3 modelos globais (HADGEM2-ES, MIROC5 e CANESM2) em escala reduzida através do Modelo Eta, considerando o cenário RCP8.5 e RCP4.5. Deste modo, Jong *et al.* (2021) puderam constatar que a projeção dos fluxos dos Rios São Francisco, Tocantins e Parnaíba é de redução de 46%, 31% e 26%, respectivamente, em comparação com os dados de 1961-1990.

No Brasil as projeções climáticas, até 2100, apontam um aumento da temperatura entre +1,7°C e +6,7°C, e consequentemente redução da chuva no Nordeste durante o verão e aumento das chuvas da região Sul até a parte Sudeste (BRAZIL, 2016).

É importante ressaltar que os modelos climáticos podem não representar perfeitamente o clima atual devido à discretização espacial dos modelos e erros sistemáticos (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015). Jong *et al.* (2021) relata que

os modelos climáticos estão sujeitos a incertezas cumulativas e isso é especialmente observado em projeções hidrológicas de longo prazo em escala regional.

Assim, é importante a remoção de viés dos dados de saída desses modelos. Alguns métodos de correção são: *Change Approach* e *Direct Approach* utilizadas por Lenderink *et al.* (2007). Adam (2020) apontou outras técnicas existentes: Regressão Linear Múltipla; Método análogos; Mapeamento quantil-quantil; Mapeamento quantil-quantil para uma distribuição gamma; Correções não-lineares; *Delta change* (Hay *et al.*, 2000); *Variance scaling*; e *Local Intensity Scaling*.

Apesar de existir muitos tipos de metodologias para remoção de viés é essencial que o método utilizado seja adequado com os objetivos dos estudos. Por exemplo, o método *Direct Approach* e *Delta change* apesar de não mostrarem diferença entre as médias, apresentam diferenças significativas quando avaliado os eventos extremos, sendo o *Direct Approach* o que melhor representa os extremos (LENDERINK *et al.* 2007). LENDERINK *et al.* (2007) ainda afirma que o *Direct Approach* consegue lidar com mudanças complexas, sendo uma vantagem quando se considera eventos extremos. Deste modo, nesse trabalho será utilizado o método.

Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) aplicaram o método *Direct Approach* para correção das variáveis climáticas geradas pelo modelo climático regional Eta. Os autores afirmaram que na utilização deste método assume-se o risco de considerar que as mesmas anomalias registradas no passado ocorram no futuro, porém com pequenas alterações na magnitude mensal.

Silva *et al.* (2020) utilizaram o método para corrigir as simulações de temperatura do ar e precipitação obtidos pelo modelo Eta/CPTEC para o estado do Rio de Janeiro. Eles constataram que a correção dos dados de precipitação propiciou a redução do erro padrão de estimativa em mais de 91% das estações. Também os dados de temperatura do ar apresentaram melhoras, principalmente na precisão e exatidão dos dados simulados.

Também Moura (2017) utilizou o método da *Direct Approach* para correção dos dados climáticos do modelo Eta-HADGEM2-ES, afim de analisar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do Alto Canoas, localizada no Estado da Santa Catarina.

3.3.5 *Projeção Climática e Hidrológica*

A realização de projeção climática e hidrológica é essencial para estudos que busquem entender sobre o comportamento do clima e da água no futuro, para assim, conseguir realizar medidas de prevenção e/ou mitigação de possíveis impactos.

O uso de modelos hidrológicos associados a modelos climáticos regionais tem sido a metodologia mais comum empregada para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos fluxos de rios (OLIVEIRA *et al.*, 2019) e em outras respostas hidrológicas de bacias hidrográficas com evapotranspiração e umidade do solo. Bhatta *et al.* (2019) afirma que o uso de modelos hidrológicos sob diferentes cenários de mudanças climáticas é uma forma confiável de estimar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica.

Oliveira *et al.* (2019) usaram o modelo hidrológico SWAT e dados de quatro modelos globais reduzidos (Eta/CPTEC-MCGs) para simular os impactos das mudanças climáticas na bacia do Alto Paranaíba (UPRB), sudeste do Brasil ao longo do século 21, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Estes autores constataram redução na vazão variando de 27,6% a 75%.

Bhatta *et al.* 2019 avaliaram os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia do Rio Himalaia, e para isso usaram quatro Modelos Climáticos Regionais sob as Vias de Concentração Representativa (RCP4.5 e RCP8.5) juntamente com um modelo hidrológico no SWAT. Eles descobriram que o clima futuro poderia reduzir a vazão dos rios em mais de 8,5% durante o século XXI sob os cenários RCP8.5.

3.4 EVENTOS DE SECAS E CHEIAS

Devido ao aumento da demanda de água gerado pelo crescimento populacional e a expansão dos setores agrícola, industrial e de energia, diversas partes do mundo vêm enfrentando a escassez de água e também picos e níveis de severidade elevados de inundações e secas (MISHRA; SINGH, 2010).

O termo seca foi classificado pelo IPCC (2013) quanto aos aspectos meteorológicos – quando a precipitação se situa bem abaixo da média; hidrológicos – quando a vazões e níveis dos rios, lagos e águas subterrâneas estão baixas; agrícolas – referente à umidade do solo baixa; e ambientais – combinação de todos os itens listados acima. O que

determina a ocorrência de secas são fatores como a temperatura, os ventos fortes, as baixas umidades e as características das chuvas (intensidade, duração e distribuição) (MISHRA; SINGH, 2010).

A seca agrícola ocorre geralmente devido à falta persistente de precipitação, ou seja, após uma seca meteorológica, isso acarreta a diminuição da umidade do solo e consequentemente, provoca estresse às lavouras (SOUZA; NETO; SOUZA, 2021). Fato que leva a perdas monetárias para o setor agrícola, visto que, é um setor altamente dependente dos recursos hídricos e das reservas de umidade do solo durante os estágios de crescimento da safra (NARASIMHAN; SRINIVASAN, 2005).

Por outro lado, as secas hidrológicas, podem impactar o abastecimento humano e industrial, a geração de energia elétrica e a manutenção dos ecossistemas. Segundo Awange; Mpelasoka; Goncalves (2016) no Brasil o reservatório de água Cantareira, localizado na bacia do Alto Tiete, responsável pelo abastecimento de milhões de habitantes de São Paulo, registrou menos de 11% de sua capacidade em 2015.

Vários casos de secas foram relatados por todo o Brasil. Entre 2012 e 2014 a seca nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, levou o país a uma crise hídrica, o que gerou impacto na produção agrícola, na geração de energia hidrelétrica e no abastecimento de água urbano (REBELLO *et al.*, 2020). Complexo são as redes de impactos que as secas produzem, visto que abrangem muitos setores da sociedade, como já mencionado, e além disso podem atingir muito além da área que está passando pela seca (MISHRA; SINGH, 2010). Visto que, se ocorre uma seca que tem impacto na agricultura, por exemplo, diversas regiões do país que ela ocorreu, e até mesmo de outros países podem ser afetados, se dependerem desses produtos.

Deste modo, para os estudos de secas foram desenvolvidos diversos índices, sendo os principais baseados em variáveis e parâmetros climáticos. Por meio destes índices pode ser realizada a quantificação e caracterização da severidade e os impactos da seca (OLIVEIRA-JÚNIOR *et al.*, 2018).

Segundo Mishra e Singh (2010) os índices de seca são variáveis primária para análise dos efeitos de uma seca e definição dos parâmetros de seca. Sendo assim, devem ser capazes de quantificar a seca para diferentes escalas de tempo. Geralmente, as escalas mensais são utilizadas para monitorar efeitos de uma seca em situações relacionadas a agricultura, captação e abastecimento de água, por outro lado escalas anuais são usadas

para resumir informações sobre o comportamento regional das secas (MISHRA; SINGH, 2010).

Existem inúmeros índices de seca meteorológica, mas os mais frequentemente utilizados são: o *Standardized Precipitation Index* – SPI (Índice de precipitação padronizado) (MCKEE; DOESKEN E KLEIST 1993), *Palmer Drought Severity Index* – PDSI (Índice de Severidade de Seca de Palmer) (PALMER, 1965; ALLEY, 1984), e *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (Spe-I). Por outro lado, o *Standardized Soil Moisture Index* (SSMI) e o *Agricultural Standardised Precipitation Index* (aSPI) são usados para análise de secas agrícolas.

E quando se fala em índice de seca hidrológica no SWAT os índices mais comuns são: o *Índice de Standardized Streamflow Index* (SSI), *lowest 7-day low flow of each year with a 10-year return period* ($Q_{7,10}$), e *Streamflow Drought Index* – SDI (Índice de Seca de Vazões).

O índice SPI é comumente utilizado para análise de seca meteorológica (que também pode ser aplicado para outras avaliações, conforme já mencionado) e SDI para análise de seca hidrológica.

O SPI é um índice recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2009) e utilizado pela INPE para o monitoramento de seca e excesso de chuvas do Brasil. E o SDI Conforme Nalbantis e Tsakiris (2009) pode ser classificado conforme a método do SPI. Dessa forma a utilização desses dois índices atende um certo padrão, e além disso, são amplamente utilizados e de fácil aplicação. Para o cálculo do SPI é necessário apenas uma variável que é a precipitação e no caso do SDI ao invés da precipitação utiliza-se a vazão do rio.

McKee; Doesken e Kleist (1993) desenvolveram o SPI com o intuito de quantificar o déficit de precipitação para diferentes escalas de tempo. Para realizar o cálculo do SPI é necessário um registro de precipitação longo.

Este registro de longo prazo é ajustado a uma distribuição de probabilidade, que é então transformada em uma distribuição normal de modo que o SPI médio para a localização e período desejado seja zero (WMO, 2012 p.4).

Assim, quando SPI é positivo a precipitação está acima da média, e quando o valor é negativo a precipitação está abaixo da média. Deste modo os períodos com precipitação acima da média também podem ser monitorados com esse índice (WMO, 2012,

GARCIA; MIYAMOTO; MAIA, 2018). E esse fator vai ser o utilizado para análise dos excessos de precipitação.

A tabela 1 mostra a classificação elaborada por McKee; Doesken e Kleist (1993) para definir a intensidade dos eventos. Segundo esses autores um evento de seca ocorre quando o SPI fica continuamente abaixo de zero e atinge uma intensidade de pelo menos -1,0 e quando volta para o zero a seca cessa. Já os eventos chuvosos/úmidos ocorrem quando o SPI atinge pelo menos uma intensidade de +1,0.

De forma semelhante, os eventos de cheia ocorreram quando SDI for maior ou igual a +1,0 e os eventos de seca quando SDI for menor ou igual a -1,0.

Tabela 1 - Classificação da intensidade de seca e chuvosos com base no SPI e SDI.

VALOR DO SPI	INTENSIDADE
+ 2,0 ou mais	Extrema
1,5 a 1,99	Severa
1,0 a 1,49	Moderada
0,99 a -0,99	Normal
-1,0 a -1,49	Moderada
-1,5 a -1,99	Severa
-2,0 ou menos	Extrema

Fonte: Adaptado de McKee; Doesken e Kleist (1993); WMO (2012).

Juliani (2020) explica que a duração e a intensidade dos eventos extremos estão ligadas aos seus impactos. Esse autor relata que uma seca relativamente menos intensa, porém que ocorra em um período mais sensível de umidade do solo em uma lavoura, por exemplo, pode ter mais impacto do que uma seca severa que ocorra em um período menos crítico.

Kourgialas (2020) avaliou os efeitos das mudanças climáticas em eventos extremos com base no SPI na parte noroeste de Creta na Grécia e observou que os valores de SPI indicam períodos de secas mais intensas para próximas décadas. O SPI também foi um dos índices utilizados para identificar os eventos de seca e posteriormente desenvolver as curvas de risco de perdas de soja por seca na cidade de Bengbu (China) (WEI *et al.*, 2021).

No estado do Rio de Janeiro, Sobral *et al.* (2019) caracterizaram a seca a partir da variação do SPI e fizeram a relação entre essa variação com os eventos ENSO. Outros

estudos de seca foram realizados no Brasil usando o SPI como Brito *et al.* (2021), Oliveira-Júnior *et al.* (2018), e Souza, Neto e Souza (2021).

Fooladi *et al.* (2021) utilizaram o SDI para analisar para avaliar os regimes hidrológicos e detectar os padrões de secas da bacia do Rio Shahpour no sul do Irã. Também Noorisameleh *et al.* (2020) utilizaram para investigar as secas hidrológicas nas bacias Haraz e Qarah Su localizadas no Irã, período de 1989-2018, e observaram que a região experimentou secas hidrológicas severas.

Com o objetivo de descrever as mudanças climáticas projetadas sob o cenário RCP 8.5 em secas meteorológicas e hidrológicas extremas nas bacias hidrográficas da América do Norte Zhao *et al.* (2020) utilizaram o SPI e o SDI. Os autores constataram que as mudanças projetadas tanto para as secas meteorológicas quanto hidrológicas pioram consideravelmente nos períodos de retorno longos, com aumento na frequência de eventos de secas hidrológicas e meteorológicas extremas em até 27 vezes e 20 vezes, respectivamente (ZHAO *et al.*, 2020).

Neste contexto, Omer *et al.* (2020) projetaram a escassez futura de água considerando as atividades humanas e os impactos das mudanças climáticas em seis sub-bacias hidrográficas do Rio Amarelo sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, para isso, avaliaram o SPI e o SDI. Os autores concluíram que as razões entre o uso e a disponibilidade de água se correlacionam negativamente com o SDI nas sub-bacias a montante, sugerindo que a seca hidrológica provavelmente intensificará a escassez de água.

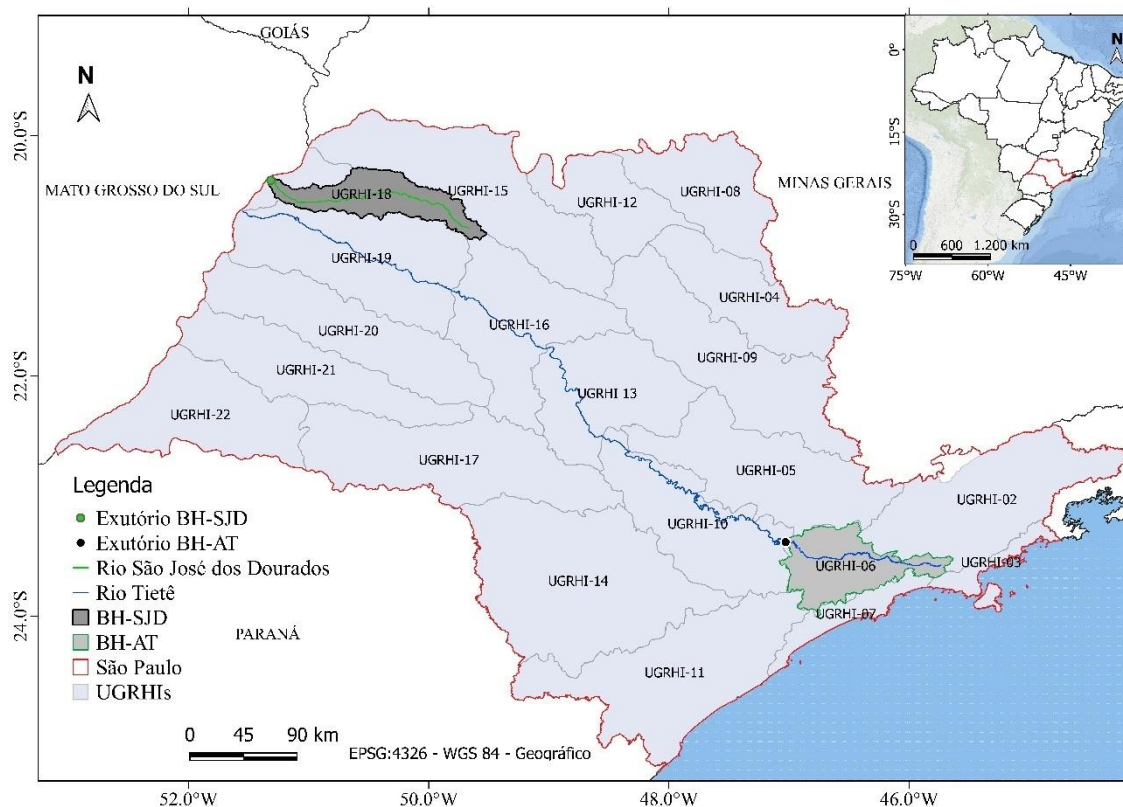
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREAS DE ESTUDO

As bacias hidrográficas do Alto Tietê (BH-AT) e do Rio São José dos Dourados (BH-SJD) estão localizadas no Estado de São Paulo, sudeste do Brasil. E pertencem a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 06 e 18, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 6. O Estado de São Paulo é dividido em 22 UGRHI) sendo que a BH-AT ocupa aproximadamente 99% da área da UGRHI 06 e a BH-SJD corresponde a cerca de 76% UGRHI 18.

A BH-AT é predominantemente urbanizada e, consequentemente, pode ser fortemente impactada tanto pelas cheias (possíveis inundações) quanto pelas secas (insuficiência de água para abastecimento público e geração de energia). Em contrapartida, a BH-SJD é rural, cuja principal fonte econômica é a agropecuária, sendo assim, episódios de seca podem afetar principalmente as culturas agrícolas.

Figura 6 - Mapa de localização da Bacia hidrográfica do Alto Tietê e do São José dos Dourados.



A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê tem uma área de 5777,57 km² e ocupa aproximadamente 70% da Região Metropolitana de São Paulo, o principal polo econômico do Brasil. Apesar de grande concentração populacional, a taxa geométrica de crescimento anual da Bacia é baixa (0,83% a.a.) (FABHAT, 2019)

O bioma da bacia é a Floresta Atlântica (Brasil, 2016) e conforme a classificação climática de Köppen o clima da região é Clima subtropical temperado, com inverno seco e verão ameno, e a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C (ROLIM *et al.*, 2007).

Em geral, a BH-AT apresenta índices pluviométricos altos devido à proximidade com a Serra do Mar. Por exemplo, nas regiões como Cabeceiras, Billings e Guarapiranga os índices pluviométricos anuais totais estão entre 1800 e 3000 mm, por outro lado nas regiões centrais da bacia os índices são menores (FABHAT, 2019). Conforme o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da BH-AT (FABHAT, 2020) a média anual de precipitação na BH-AT da série histórica de 1879 a 2018 foi de 1404 mm.

Em relação a disponibilidade hídrica, essa bacia em 2019 apresentou um indicador de disponibilidade per capita em relação ao Qmédio de 127,26 m³/hab. ano, bem menor do que o indicado pela Organização das Nações Unidas (2.500 m³/hab. ano) (FABHAT, 2020). Este indicador analisa a disponibilidade hídrica natural superficial (Qmédio) com relação à população da bacia hidrográfica (FABHAT, 2020).

Em contrapartida, a BH-SJD tem uma área de 5161,49km² e segundo a CETESB (2020) a intensidade pluviométrica total anual é em média de 1273mm. O bioma nesta bacia é a Mata Atlântica. E conforme a classificação climática de Köppen a região é composta por dois tipos climáticos, em que a maior parte da bacia pertence ao Clima tropical úmido com estiagem no inverno, temperatura média no mês mais quente superior a 22°C e no mês frio superior a 18°C e com total pluviométrico no período seco abaixo de 30mm (CBH-SJD, 2018). E as regiões do extremo leste da bacia o clima é quente e úmido, com inverno seco, temperatura média superior a 22°C no mês quente e menores que 18°C no mês frio e com total pluviométrico no mês seco também inferior a 30mm (CBH-SJD, 2018).

Conforme o Plano De Bacia Do Rio São José Dos Dourado (2016) a prática agrícola diversificada e pecuária extensiva são as principais atividades econômicas. Ademais, em 2013 o indicador de disponibilidade per capita em relação ao Qmédio era de 7.122,4

m³/hab. ano e a proporção de postos pluviométricos com o total do semestre seco abaixo da média era de 36,3% (CBH-SJD, 2016).

4.2 PROCESSOS METODOLÓGICOS

Para calcular os índices de seca e cheia para o período úmido, verão e ano hidrológico observado e projetados e, a fim de realizar as análises de tendência, intensidade e duração desses eventos, foram realizadas diversas etapas, que serão mencionadas ao longo desse tópico e estão resumidas através da Figura 7. Primeiramente saliento que a metodologia deste trabalho foi baseada nos trabalhos de Sun *et al.* (2019), Tan *et al.* (2020) e Jong *et al.* (2021).

Os períodos analisados foram escolhidos com base na disponibilidade de dados climáticos e fluviométricos das bacias hidrográficas. O período de base contém os dados históricos observados (2002-1999) e os horizontes de tempo de curto (2034-2051), médio (2058-2075) e longo prazo (2082-2099) são os dados futuros.

Para simular a vazão no exultório das bacias hidrográficas e nos períodos mencionados anteriormente foi preciso desenvolver um modelo hidrológico. Para isso foi desenvolvido um banco de dados com as informações de uso e cobertura do solo, tipo de solo, modelo digital de elevação e com os dados climáticos. Os dados de precipitação, velocidade do vento, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, umidade relativa do ar, foram obtidas de estações pluviométricas dentro de cada bacia. Os dados faltantes de precipitação foram preenchidos pelo método da Ponderação Regional e os outros pela estação mais próxima.

Por meio dos dados do clima observados foram geradas as estatísticas climáticas representativas das bacias com auxílio do SWAT Weather Database (WGN) para serem inseridas nos modelos hidrológicos. Assim, com esse banco de dados foram criados os modelos hidrológicos das bacias hidrográficas por meio do software ArcSWAT, que foram posteriormente calibrados e validados através do SWATCUP com o fluxo natural observado.

Com a vazão simulada pelos modelos hidrológicos e com a precipitação observada preenchida foram calculados o SDI e o SPI do período de base por meio do software DrinC.

4.3 SOFTWARE NECESSÁRIOS

O software SWAT foi escolhido para montagem do modelo hidrológico devido às suas características e por ser um dos modelos mais utilizados no mundo, conforme já dito na revisão bibliográfica. Com o SWAT definido, foi selecionado a interface ArcGis 10.3 para execução da extensão do SWAT denominada ArcSWAT 2012. Ademais, para entrada de informações meteorológicas nesse modelo, foi usado o Excel e blocos de notas.

Para o cálculo do SPI e SDI na escala mensal foi utilizado o modelo computacional Calculadora de Índices de Seca - DrinC desenvolvido por Tigkas, Vangelis, Tsakiris (2015). O DrinC é um pacote de software que fornece interface simples para o cálculo de índices de seca como o *Reconnaissance Drought Index* (RDI), *Streamflow Drought Index* (SDI), *Standardized Precipitation Index* (SPI) e os *Decis de Precipitation* (PD) (TIGKAS, VANGELIS, TSAKIRIS, 2015).

Por fim, a análise dos dados e cálculos estatísticos foram realizados por meio do Minitab19, escolhido por ser um modelo bastante robusto.

4.4 MODELO CLIMÁTICO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Os dados simulados pelos modelos climáticos Eta-MIROC5, Eta-HADGEM2, Eta-CANESM2, e Eta-BESM foram coletados através do link <<https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>> em frequência diária, formato CSV com localização pontual, próxima a estação climática da IAG/USP localizada na BH-AT e da estação climática de Marinópolis localizada na BH-SJD. Isso porque essas são as únicas estações que contêm todas as informações climáticas necessárias (precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura máxima e mínima do ar), para serem comparadas.

Vale ressaltar que os dados coletados do PROJETA/CPTEC entre 1999 e 2005 não têm influência dos cenários climáticos, porém a partir de dezembro de 2005, isso já ocorre.

Os dados sem pré-processamento passaram por uma análise, para verificar o comportamento dessas simulações, a média mensal do período de 1999-2019 das variáveis climáticas (precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação

solar) geradas pelos modelos climáticos foram comparadas com as médias dos dados observados nas bacias hidrográficas no mesmo período. Isso é pertinente para verificar a capacidade geral dos modelos climáticos em simular essas variáveis.

Sabe-se que os modelos climáticos regionais exibem vieses e têm falhas na reprodução minuciosa de séries históricas observadas (JONG *et al.*, 2021). Sendo assim, foram realizadas correções dos dados, por meio dos métodos descritos a seguir.

4.4.1 Ajuste dos Dados Simulados Pelos Modelos Climáticos

O *Approach Direct* (Aplicação Direta) foi o método remoção de viés utilizado neste trabalho, que, conforme justificado na revisão bibliográfica, conseguem representar adequadamente os eventos extremos, os quais são o foco dessa pesquisa.

Para realizar a correção das variáveis climáticas: radiação solar, precipitação e velocidade do vento, gerados pelos modelos climáticos regionais, foi utilizado o método de aplicação direta de Lenderink *et al.* (2007) adaptado para correção em escala diária, que é o formato de entrada no modelo SWAT (Equação 15). Por outro lado, a correção dos dados de temperatura e umidade do ar, foi realizada partir da Equação 16 apresentada por Oliveira; Pedrollo; Castro, (2015), que é baseada na técnica de Lenderink *et al.* (2007).

Os dois métodos promovem a alteração nas magnitudes com base nas diferenças verificadas entre o modelo Eta e observadas (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015).

Conforme demonstra a Equação 15, a variável corrigida no período de avaliação (1999-2019), no dia i , mês k , e no ano j , é igual a variável simulada no mesmo período, dia, mês e ano, multiplicada por um fator de correção, que corresponde à razão entre a média observada no período base (1999-2019), no mês k , e a média da variável simulada no período de avaliação e mês.

$$V_{cor_{i,k,j}} = V_{sim_{i,k,j}} \times \left[\frac{V_{obs_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})}{V_{sim_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})} \right] \quad \text{EQ.15}$$

Em que:

$V_{cor_{i,k,j}}$ = é a variável corrigida no período de avaliação, no dia i , mês k e no ano j ;

$V_{sim_{i,k,j}}$ = é a variável simulada no mesmo período, dia, mês e no ano;

$V_{obs_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})$ = é a média da variável observada no período base, no mês k ;

$\overline{V_{sim_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})}$ = é a média da variável simulada, no período base, no mês k.

EQ.16

$$Vz_{corr_{i,k,j}} = Vz_{sim_{i,k,j}} + \left[\overline{Vz_{obs_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})} - \overline{Vz_{sim_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})} \right]$$

Onde:

$Vz_{corr_{i,k,j}}$ = é o valor da variável climática z corrigida para o período de avaliação, no dia i, mês k, e ano j;

$Vz_{sim_{i,k,j}}$ = é o valor da variável climática z simulada no mesmo período, dia, mês, ano;

$\overline{Vz_{obs_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})}$ = é a média observada da variável climática z, no período base, no mês k;

$\overline{Vz_{sim_k}(1999_{ano} - 2019_{ano})}$ = é a média simulada da variável climática z, no período base, no mês k.

4.4.2 Critérios para Escolha do Modelo Climático

Diversos estudos deixam evidente o nível de incerteza quanto aos modelos climáticos. ADAM (2016) por exemplo, destacou que, entre os principais fatores que contribuem para essas incertezas estão os processos de parametrização, e ressalta que as diferenças na parametrização de um modelo para o outro são uma das razões, para que os resultados de modelos climáticos sejam diferentes. ADAM (2016) ainda pontua que as incertezas aumentam em análises regionais e para eventos extremos.

O uso de diferentes representações físicas de processos pelos modelos globais, ainda introduz incertezas em nos cenários futuros de mudanças do clima e, consequentemente, na avaliação de impactos e vulnerabilidade (BRASIL, 2016).

Esse trabalho foi realizado utilizando apenas um modelo climático, o qual se adequava melhor às condições de clima de cada bacia. Dado que, o intuito dessa pesquisa é de fornecer uma base para aplicações mais detalhadas das metodologias mostradas aqui, por órgãos de gestão dos recursos hídricos e demais interessados.

Recomento que a replicação dessa metodologia, seja realizada com as variáveis climáticas simuladas por pelo menos 7 modelos climáticos, conforme recomendado também por (DIAS; REBOITA, 2021), com o intuito de reduzir as incertezas e conduzir para uma melhor tomada de decisão.

Assim como Gondim *et al.*, (2018), o critério para escolha do modelo climático para cada bacia hidrográfica, foi pela avaliação do desempenho de representação da precipitação mensal. Visto que, a precipitação é usada para cálculo do SPI e tem influência significativa nas vazões das bacias hidrográficas, que serão utilizadas para o cálculo do SDI, para isso foi analisado a correlação (Correl).

Com o modelo escolhido, também foram utilizadas as variáveis climáticas que tiveram correlação maior ou igual a 0,5 com as variáveis observadas, enquanto as outras foram simuladas pelo modelo SWAT.

4.5 MODELOS HIDROLÓGICOS – ELABORAÇÃO

4.5.1 *Delimitação das Bacias Hidrográficas*

Os modelos digitais de elevação (MDE) foram obtidos do TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA, 2008). Posteriormente, por meio do ArcGis foram transformados em dados do tipo Número Inteiro Não Sinalizado de 16 bits e projetados para os sistemas de coordenadas planas de acordo com as localizações. Foram executadas a ferramentas *Sink* para identificar as depressões e áreas de drenagem interna e erros no MDE e também a ferramenta *Fill* com o intuito de corrigir as imperfeições e as depressões identificadas pelo *Sink*.

Com os MDEs preparados, foi possível delimitar as bacias hidrográficas e suas sub-bacias, por meio da extensão ArcSWAT. Nessa etapa o software fornece pontos de controle, que são gerados automaticamente dependendo do nível de detalhamento escolhido pelo usuário. Esses pontos serão os exutórios e terão saídas de informações do modelo após as simulações, como os dados de vazão e sedimentos. Sendo assim, optou-se por adicionar nessa etapa os pontos que serão utilizados para calibração e validação do modelo, para garantir que nesses locais terão saídas de informações e poderão assim ser comparadas com os dados observados com mais exatidão.

4.5.2 *Banco de Dados de Uso e Ocupação do Solo*

Os mapas de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas analisadas foram elaborados a partir do banco de dados disponibilizados no site do MapBiomas por meio

do ArcGis. O projeto MapBiomas é uma iniciativa que envolve uma rede multidisciplinar composta por especialistas em sensoriamento remoto e computação, ciência de dados e biomas, que fazem o mapeamento da cobertura e uso do solo do Brasil (SOUZA *et al.*, 2020).

Segundo Souza *et al.* (2020) no projeto MapBiomas o conjunto de dados de imagens de satélite foram obtidos pelos sensores *Thematic Mapper (TM)*, *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +)* e *Operational Land Imager (OLI) Landsat*, a bordo do *Landsat 5*, *Landsat 7* e *Landsat 8*, resultando no mapa de cobertura e uso do solo em formato matricial (pixel de 30x30m), considerados os mais abrangentes e detalhados do país. Por esse motivo foram utilizados nesse trabalho.

O processo de elaboração dos mapas de cobertura consistiu em diferentes etapas. Primeiro foi realizado o download do *raster* no site do MapBiomas da coleção 5.0 referentes ao ano de 2019 em formato GeoTiff (MAPBIOMAS, 2020). Concluído isto, o mapa foi recortado e projetado para os sistemas de coordenadas planas: SIRGAS 2000/ UTM zona 23s para BH-AT e SIRGAS 2000/ UTM zona 22s para BH-SJD.

A classificação do MapBiomas, não especifica exatamente qual o tipo de lavoura pertence à classe Lavoura Perene e Outras lavouras temporárias, sendo assim, considerou-as como sendo culturas de Laranja e milho, respectivamente, visto que, conforme os dados do IBGE (2016) as quantidades produzidas e área colhida dessas lavouras estão entre as principais do Estado de São Paulo.

Por fim, foi elaborada uma relação das coberturas e usos do solo com o banco de dados do SWAT, que está demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre os tipos de uso e ocupação encontrados nas bacias com os Dados do SWAT.

Identificação (ID)	Classificação do uso e cobertura	Identificação com os dados do SWAT
3	Formação florestal	FRSE - Forest Ever Green
9	Floresta plantada	EUCA - Eucalipto
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	WETN- Wetlands-Non-Forested
15	Pastagem	PAST - Pasture
20	Cana	SUGC - Sugar Cane
21	Mosaico de agricultura e pastagem	AGRL - Agricultura Genérica
24	Infraestrutura urbana	URHD - Residential- High Density
25	Outras áreas não vegetadas	RANGE - Range-Grasses
29	Afloramento rochoso	URBN – Urban
30	Mineração	UTRN - Transportation
33	Rio e lago	WATR - Water
36	Lavoura perene	ORAN - Orange
39	Soja	SOYB - Soybean
41	Outras lavouras temporárias	CORN

Fonte: Própria autora.

4.5.3 Banco de Dados Pedológicos

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) é o sistema oficial de classificação do solo do Brasil coordenado pela Embrapa Solos, e composto pelo Comitê-Executivo Nacional assessorado por colaboradores regionais e núcleos locais de discussão das áreas de gênese, morfologia e classificação de solos (SiBCS, 2018).

O SiBCS produziu o mapa pedológico do Estado de São Paulo na escala 1:500.000. A partir desse mapeamento, Rossi (2017) desenvolveu um novo mapa dos solos do Estado de São Paulo, objetivando oferecer maior detalhamento, atualização e revisão do mapa anterior, tornando-se um documento importante no planejamento e na gestão ambiental que necessitam de informações pedológicas.

Diante disso, os bancos de dados dos tipos de solo da BH-AT e da BH-SJD foram levantados a partir da classificação do solo do SiBCS (SiBCS, 2018) e de Rossi, (2017). Os dados foram disponibilizados em formato Shapefiles (.shp) e recortados para as áreas das bacias através do ArcGis e reprojetados para os sistemas de coordenadas planas.

Após esses processos as classes dos solos foram manuseadas em um arquivo de texto para inserir no SWAT. Esse arquivo possui código de identificação do polígono e o símbolo correspondente ao tipo de solo que ele pertence.

No banco de dados Microsoft Access do SWAT foram inseridos alguns parâmetros referentes a cada classe de solo (Quadro 2). Em virtude da inviabilidade de um estudo de solos ao longo das bacias hidrográficas, devido as suas extensões, os valores médios de cada parâmetro foram obtidos por meio de vasta revisão bibliográfica (BALDISSERA (2005); LIMA *et al.*, (2013); MOREIRA; SCHWAMBACK; RIGO (2019); MELO (2017); RIBEIRO (2019); SANTOS (2018)) e estão reunidos nos Apêndices A e B, para a BH-AT e BH-SJD, respectivamente.

É notória a grande incerteza em relação a esses parâmetros, principalmente devido as suas variabilidades espaciais.

Quadro 2 - Parâmetros pedológicos

Parâmetro	Descrição
SNAM	Classificação do solo (nome dado a cada classe)
NLAYERS	Grupo de <i>Layers</i> de informação (número de horizontes)
HYDGRP	Grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C e D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima do solo que a raiz alcança (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (fração)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade do solo (g/cm)
SOL_AWC	Capacidade de água no solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico no solo (% peso solo)
CLAY	Porcentagem de argila no solo (% peso solo)
SILT	Porcentagem de silte no solo (% peso solo)
SAND	Porcentagem de areia no solo (% peso solo)
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (% peso solo)
SOL_ALB	Albedo do solo (fração)
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo (0,013 t.m ² .h/m ³ .t.cm)

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2021).

4.5.4 Declividade do Relevo

Para a declividade do terreno foi utilizado os dados do SRTM do projeto TOPODATA, que foram classificadas em porcentagem, realizadas no ArcSWAT na etapa de desenvolvimentos das HRUs e classificadas conforme recomendado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Assim, o relevo foi classificado como plano quando os desnivelamentos são muitos pequenos, com declividade de 0 a 3%; suave ondulado quando a topografia é constituída por conjuntos de colinas e/ou outeiros, apresentando declives suaves de 3 a 8%; ondulado onde o terreno é constituídos por declives moderados de 8 a 20%; forte ondulado onde a topográfica é formada por outeiros e ou/morros e raramente colinas, com declives fortes de 20% a 45%; e por fim, as classes montanhoso e escarpado quando o declive da superfície vai de muito forte a escarpamentos, com declividade acima de 45% (SiBCS, 2018).

4.5.5 Unidades de Respostas Hidrológicas

As unidades de resposta hidrológica, conforme dito anteriormente são áreas com características hidrológicas semelhantes de tipo de solo, cobertura da terra e declividade. Assim, com essas informações o ArcSWAT permite a opção de definir as unidades de respostas, que são: por dominância de uso, solo e declividade; por dominância do próprio HRU; por um número específico; múltiplos e por área ou percentual. Neste trabalho a definição foi escolhido HRUs múltiplos com sobreposição de percentual 12% para uso da terra e 15% para solo e declividade.

4.5.6 Banco de Dados climáticos

As informações utilizadas para simulação do modelo no SWAT foram os dados diários de precipitação, temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. As séries históricas dos dados para entrada no SWAT têm que ser idênticas, ou seja, iniciar e finalizar na mesma data, sendo assim, para atender este requisito e por conter menor número de falhas, foi escolhido o período de 01/01/1999 a 31/12/2019, totalizando uma série histórica de 21 anos.

A maior parte dos dados de precipitação de ambas as bacias hidrográficas foram disponibilizados pelo DAEE (2022) em formato CSV. Para a bacia do Alto Tietê os dados climáticos completos foram coletados da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP, 2022). Já para a bacia do Rio São José dos Dourados foram utilizados dados da estação climática de Marinópolis (CLIMA FEIS, 2022).

As informações das estações meteorológicas da BH-SJD e BH-AT estão mostradas no Quadro 3 e Quadro 4, nessa ordem.

Quadro 3- Características das estações meteorológicas definitivas localizadas na BH-SJD

código	Município	Altitude	Latitude	Longitude	Fonte
Est. Marinópolis	Mariópolis	370	-20,45	-50,81	ClimaFeis
B6-036	Votuporanga	513	-20,44	-49,98	DAEE
B6-039	Monte Aprazível	490	-20,77	-49,7	DAEE
B6-048	Sebastianópolis do Sul	479	-20,66	-49,93	DAEE
B6-006	Urânia	450	-20,27	-50,65	DAEE
B6-008	Jales	440	-20,31	-50,55	DAEE
B6-011	Valentin Gentil	480	-20,44	-50,08	DAEE
B7-038	Pontalina	396	-20,44	-50,53	DAEE
B7-042	Palmeira D'Oeste	430	-20,41	-50,76	DAEE
B7-053	Guzolândia	450	-20,65	-50,66	DAEE
B7-055	Magda	420	-20,56	-50,22	DAEE

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Quadro 4- Características das estações meteorológicas definitivas localizadas na BH-AT

Código	Município	Altitude	Latitude	Longitude	Fonte
P01	São Paulo	804	-23,65	-46,62	IAG/USP
E2-054	Salinópolis	770	-23,53	-45,85	DAEE
E3-002	Guarulhos	770	-23,42	-46,41	DAEE
E3-003	São Paulo	730	-23,52	-46,68	DAEE
E3-014	Itapeceira Da Serra	860	-23,78	-46,91	DAEE
E3-027	Cotia	930	-23,72	-46,96	DAEE
E3-034	Cotia	880	-23,65	-46,96	DAEE
E3-035	São Paulo	800	-23,65	-46,62	DAEE
E3-091	Itaquaquecetuba	790	-23,48	-46,37	DAEE
E3-243	São Paulo	800	-23,83	-46,73	DAEE
E3-245	Suzano	770	-23,64	-46,34	DAEE
E3-254	São Paulo	770	-23,88	-46,75	DAEE
E3-262	São Paulo	840	-23,44	-46,65	DAEE
E2-112	Salinópolis	800	-23,57	-45,97	DAEE
E3-006	São Paulo	780	-23,64	-46,69	DAEE
E3-085	São Caetano Do Sul	740	-23,61	-46,56	DAEE

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os dados pluviométricos passaram por preenchimento de falhas, para aumentar a confiabilidade dos resultados, conforme descrito abaixo.

4.5.7 Dados Meteorológicos e Preenchimento de Falhas

Por meio do preenchimento de falhas, series históricas longas que seriam descartadas, são reaproveitadas (BRUBACHER; OLIVEIRA; GUASSELLI, 2020). Neste contexto, inúmeros são os métodos para realizar o preenchimento das falhas, desde os mais simples aos mais complexos que envolvem diferentes parâmetros, porém a complexidade não torna necessariamente um método melhor que outro. Assim, metodologias simplistas podem apresentar resultados satisfatórios e facilitar a interpretação dos resultados (COSTA; BECKER; BRITO, 2013).

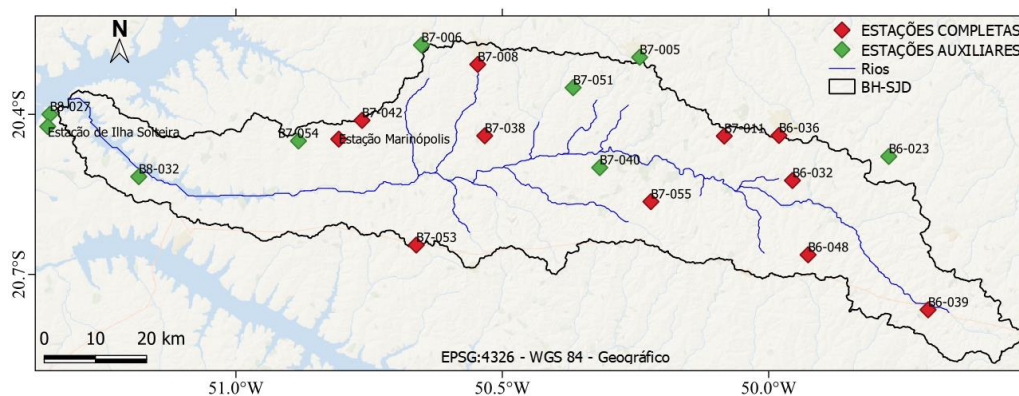
O Método da Ponderação Regional é o mais utilizado para o preenchimento de lacunas quando há a necessidade de se trabalhar com séries históricas extensas (OLIVEIRA-JÚNIOR, 2018). É um método simples e visa a homogeneização do período de informação (TUCCI, 2012). Utiliza ao menos três postos pluviométricos vizinhos ao do dado ausente, com no mínimo dez anos de dados e regiões climáticas semelhantes (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Sendo assim, a correção dos dados foi feita por meio da Ponderação Regional proposta por Tucci (2012). Para isso foi usada uma macro na planilha de cálculos Excel contendo os algoritmos necessários para tal.

Primeiramente foi feito um levantamento para escolher as estações que seriam utilizadas neste trabalho. Essa escolha consistiu em utilizar postos com as seguintes características: que abrangessem toda a série histórica e contivessem poucas falhas a serem preenchidas. As outras estações que não atenderam esses requisitos foram utilizadas como auxiliares (aux), ou seja, somente para ajudar a preencher as falhas das estações escolhidas. Foram utilizadas para essa finalidade dados de 50 postos pluviométricos da DAEE localizados na BH-AT, e para a BH-SJD foram utilizados dados de 09 estações, as informações adicionais dessas estações estão detalhadas no Anexo (C)

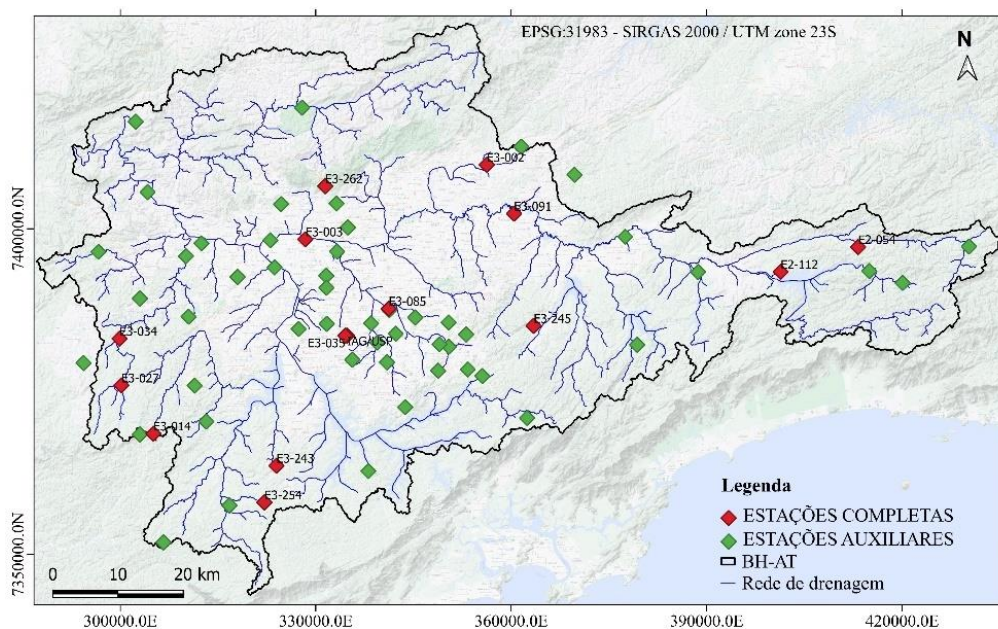
As Figuras 8 (BH-SJD) e 9 (BH-AT) mostram a localização tanto das estações utilizadas como auxiliares, quanto das que foram corrigidas (Estações Completas).

Figura 8 - Mapa de Localização das estações pluviométricas auxiliares e completas da BH-SJD.



Fonte: Elabora pela autora

Figura 9 - Mapa de Localização das estações pluviométricas auxiliares e completas da BH-AT



Fonte: Elabora pela autora

A partir daí, a macro por meio das coordenadas geográficas encontra três estações mais próximas do posto com falha e inicia o preenchimento das lacunas pluviométricas pela Ponderação Regional (EQ.11) conforme Tucci, 2012:

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad \text{EQ.11}$$

Onde

P_x : Precipitação anual da estação a ter falha na série preenchida (mm);

P_i : Precipitação anual da estação vizinha de ordem i para o ano em que se verificou a falha (mm);

N_i e N_x : precipitações médias anuais das estações a ter a falha na série preenchida e da vizinha de ordem "i", respectivamente (mm);

N_i : número de estações vizinhas.

4.5.8 Gerador Climático

O gerador climático (WGN – SWAT Weather Database) é uma macro para armazenar e processar dados meteorológicos que serão usados em projetos do SWAT (ESSENFELDER, 2016). É necessário executar o WGN para gerar as estatísticas climáticas representativas da região de interesse e sub-bacias (ARNOLD *et al.*, 2012; ESSENFELDER, 2016).

Segundo SANTOS (2015) é possível estimar os dados climáticos e elaborar cenários futuros pelo SWAT, mas para isso é preciso ter valores médios e desvios mensais de variáveis climáticas históricas do local, que são geradas pelo WGN. Sendo assim, o modelo SWAT requer que ao menos uma estação execute o gerador (ARNOLD *et al.*, 2012).

Previamente a execução do gerador climático foi preparado um banco de dados contendo informações de Umidade Relativa (HMD), Precipitação (PCP), Radiação Solar (SLR), Temperatura Máxima e Mínima do ar (TMP), e Velocidade do vento (WND). ARNOLD *et al.* (2012) e ESSENFELDER (2016) recomendam que esse banco de dados possua no mínimo 20 anos de dados.

O WGN foi executado com as séries históricas observadas (1999-2019) e assim foram calculados os parâmetros estatísticos, que estão ilustrados no Quadro 5. O método de cálculo deles pode ser encontrado no próprio manual do SWAT (ARNOLD *et al.*, 2012)

Quadro 5- Parâmetros do gerador climático WGN

Parâmetros	Descrição
TMPMX	Temperatura máxima média mensal (°C)
TMPMN	Temperatura mínima média mensal (°C)
TMPSTDMX	Desvio Parão da temperatura máxima no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio Parão da temperatura mínima no mês (°C)
PCPMM	Total médio de chuva no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para o total médio de chuva (mm)
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia seco no mês
PR_W2	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês
PCPD	Média mensal de dias com chuva
RAINHHMX	Chuva máxima mensal em 0,5h (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ m^{-2})
DEWPT	Umidade relativa média no mês (decimal)
WNDDAV	Velocidade média diária do vento no mês (ms^{-1})

Fonte: (ARNOLD *et al.*, 2012).

4.5.9 Dados dos Reservatórios Localizados na BH-AT

Os dados de volume e área inundada dos principais reservatórios localizados na BH-AT (Quadro 4) foram obtidos do Relatório final do Plano de Bacias Hidrográficas do Alto Tietê (PBHAT) de 2018. Essas informações foram implementadas através da opção *Edit SWAT Input/Reservoir* no ArcSWAT.

Quadro 6 - Dados relativos aos principais Reservatórios localizados na BH-AT

Reservatórios	Área (ha)	Volume (10⁶ m³)	Município
Pirapora	271,03	50,16	Pirapora do Bom Jesus
Pedro Beicht	302,86	16,50	Cotia
Guarapiranga	2688,10	171,19	Embu-Guaçu, Itapeverica da Serra, São Paulo
Billings	10559,86	1131,67	Diadema, Ribeirão Pires, Rio Grande Da Serra, Santo André, São Bernardo Do Campo, São Paulo
Taiacupeba	967,14	85,29	Mogi das cruces, Suzano
Jundiaí	1168,51	74,1	Mogi das Cruzes
Biritiba-Mirim	474,07	34,8	Biritiba-Mirim, Mogi das Cruzes
Paraitinga	531,09	36,98	Salesópolis
Ponte Nova	2511,88	288,39	Biritiba-Mirim, Salesópolis
Ribeirão do Campo	170,43	13,67	São Paulo, Salesópolis
Águas Claras	16,39	0,76	Caieiras, Mairiporã
Paiva Castro	308,31	7,61	Caieiras, Franco da Rocha, Mairiporã
PCH Edgard de Souza	93,02	7,77	Barueri, Santana de Parnaíba

Fonte: (Adaptado do PBHAT, 2018)

4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Os dados climáticos das bacias hidrográficas foram inseridos no SWAT. Nessa etapa é necessário informar para o software quantos anos, a partir do início da série histórica, será considerado de aquecimento do modelo (Aquecimento). É importante ressaltar que nesse período não são gerados resultados finais, por exemplo de vazão. Nessa etapa foi utilizado um período de aquecimento de 3 anos em ambas as bacias. Segundo JAFARI *et al.* (2021) o período de aquecimento é importante para que o modelo se estabilize para futuras simulações.

Posteriormente a primeira simulação, os dados de vazão observados foram divididos em períodos destinados a calibração e validação do modelo. Essa etapa depende muito da disponibilidade de dados fluviométricos observados nas bacias. A divisão está mostrada na Tabela 2. A fase nomeada como Simulação II foi o período em que foram gerados os resultados de vazão pelo SWAT.

Tabela 2 - Períodos destinados a cada fase de execução do modelo SWAT

FASES	Período (BH-AT)	Período (BH-SJD)
Total de dados	1/1/1999 a 31/12/2019	1/1/1999 a 31/12/2019
Aquecimento	1/1/1999 a 31/12/2002	1/1/1999 a 31/12/2002
Calibração	01/2002 a 12/2006	01/2002 a 12/2007
Validação	01/2007 a 6/2015	01/2008 a 12/2016
Simulação II	1/1/2002 a 31/12/2019	1/1/2002 a 31/12/2019

Fonte: Elaborado pela autora

Tan *et al.* (2020) relatam que em geral a calibração e validação dos modelos hidrológicos no SWAT, para estudos de seca, são realizadas em escala mensal, pois a maioria dos cálculos dos índices de seca precisam de dados mensais. Diante disso, também nesse trabalho a calibração e validação foram realizadas em escala mensal.

A calibração e validação da BH-AT foi realizada com os dados observados na estação fluviométrica 62335000 da Agência Nacional de águas (ANA) que está localizada nas coordenadas -23,44 Latitude e -46,9089 Longitude, no Rio Tiete, que coincide com o exutório da sub-bacia 21. Na BH-SJD esses processos ocorreram com os dados do posto 6B-012 da DAEE localizado a -20,52 Latitude e -50,00 Longitude, em um afluente do Rio São Jose dos Dourados, que se situa no exutório da sub-bacia 30.

As calibrações foram realizadas com o apoio do SWAT-CUP utilizando o Algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2). Através de revisão bibliográfica (SANTOS, 2018; RIBEIRO, 2021; JAFARI, 2021; RAJAT, 2021; ARNOLD *et al.* 2012) foram escolhidos 15 parâmetros que são amplamente recomendados para calibração da vazão no SWAT, a descrição deles está no Quadro 5. Verificado por meio da análise de sensibilidade realizada com o SWAT-CUP, os parâmetros mais sensíveis em cada bacia hidrográfica foram selecionados para realizar a calibração.

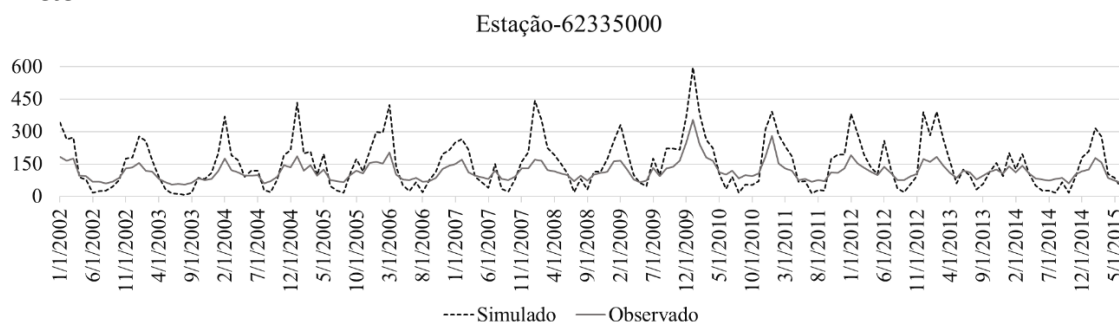
Quadro 7 - Parâmetros submetidos a análise de sensibilidade

Parâmetro	Descrição
CN 2	Número da curva de escoamento inicial SCS para condição de umidade II
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada de solo
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
SURLAG	Parâmetro de retardamento do escoamento superficial
GWQMN	Profundidade mínima do aquífero pouco profundo para ocorrer o escoamento subterrâneo
ALPHA_BF	Fator alpha do fluxo de base
REVAPMN	Profundidade liminar da água no aquífero pouco profundo exigido para Revap
GW_REVAP	Coeficiente Revap
RCHRG_DP	Fração de percolação do aquífero profundo
GW_DELAY	Tempo de retardo das águas subterrâneas
CANMX	Armazenamento máximo no dossel das plantas
SLSOIL	Inclinação para o fluxo lateral subsuperficial
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo
FFCB	Armazenamento inicial de água no solo expresso como uma fração do conteúdo de água da capacidade de campo
CNCOEF	Coeficiente CN para evapotranspiração das plantas

Fonte: Elabora pela autora.

Antes da calibração e validação foi realizada uma simulação preliminar, tanto na BH-AT quanto na BH-SJD, com o intuito de verificar os ajustes necessários.

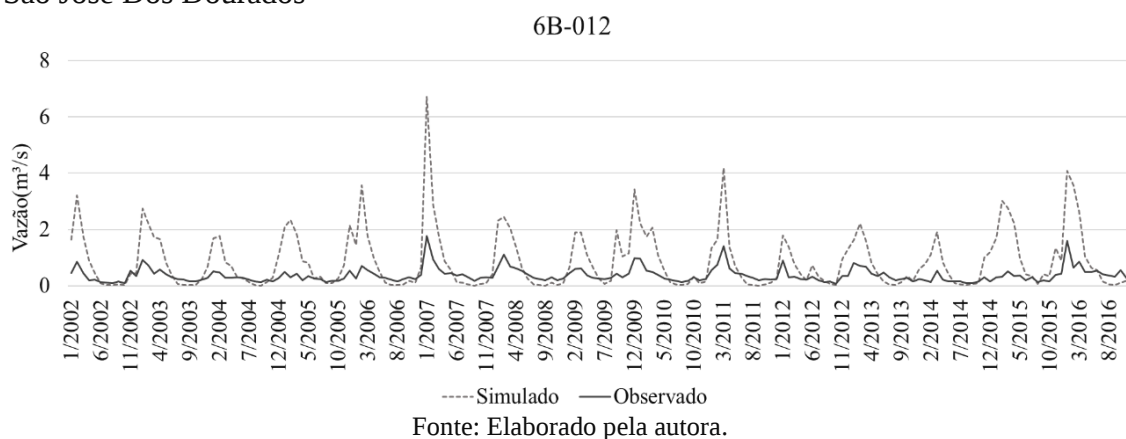
Os resultados da simulação preliminar mostram que o modelo da BH-AT (Figura10) é muito sensível aos eventos extremos, acompanhando os eventos de altas e baixas vazões, porém com uma amplitude maior.

Figura 10 - Simulação preliminar do modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

Fonte: Elaborado pela autora

Na BH-SJD os dados da estação fluviométrica B6-012 foram comparados com os dados simulados no exutório da sub-bacia 30, pois estão localizadas no mesmo ponto, mostraram que o modelo hidrológico superestimou a vazão (Figura 11).

Figura 11 - Simulação preliminar do modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados



Deste modo, a calibração dos parâmetros necessários foi realizada para o ajuste dessas discrepâncias observadas em cada bacia.

Os parâmetros modificados no modelo da BH-AT estão ilustrados na Tabela 3. Nessa bacia os valores do CN2 e do SOL_AWC de cada sub-bacia foram multiplicados 0,60 e 0,85, respectivamente, para manter as características das mesmas.

Assim como realizado por Santos (2018) o ESCO foi reduzido para 0,4 com o intuito de promover a demanda evaporativa das camadas do inferior do solo. O ALPHA_BF foi alterado para 0,002, segundo Santos (2018) esse parâmetro altera a forma do hidrograma. O FFCB foi modificado de 0 para 1, o CNCOEF de 1 para 1,49, e o comprimento da encosta para o escoamento subsuperficial lateral (SLSOIL) de 0 para 87m.

Com o intuito de aumentar a disponibilidade de água para a descarga do fluxo de base (SANTOS, 2018), o parâmetro REVAP foi alterado de 0,02 para 0,07. Ademais, o Tempo de retardo de escoamento superficial (SURLAG) foi aumentado para 0,7, através disso ocorre ajuste do atraso no tempo de concentração da bacia hidrográfica (RAJAT, 2021)

Tabela 3 - Parâmetros do SWAT calibrados para a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

Parâmetros	Intervalo	Valores originais	Valores calibrados
CN2	0-100	-	x 0,6
SOL_AWC	0-1	-	x 0,85
ALPHA_BF	0-1	0,048	0,002
ESCO	0,01-1	0,95	0,40
FFCB	0-1	0	1
CANMX	0-100	0	25
SURLAG	0,05-24	0	0,7
CNCOEF	0,5-2	1	1,49
SLSOIL	0-150	0	87
REVAP	0,02-0,2	0,02	0,07

Fonte: Elaborado pela autora.

Na BH-SJD valor de CN2 foi multiplicado uniformemente por 0,60, conforme RAJAT (2021) esse parâmetro está diretamente relacionado a geração de escoamento superficial da bacia e depende do uso da terra, solo e declive. Também se multiplicou o SOL_AWC por 0,8. Tanto o FFCB quanto o SURLAG tiveram que ser aumentados, já o NCOEF foi reduzido de 2 para 1,27. Foi necessário também modificar o coeficiente de fluxo de base para 0,0001. O tempo que a água no solo leva para chegar no aquífero pouco profundo (GW_DELAY) foi reduzido de 31 para 15 dias. O parâmetro ESCO foi reduzido para 0,65 e o SURLAG teve um pequeno aumento de 0 para 0,1.

As alterações realizadas na calibração dos parâmetros mais sensíveis BH-SJD estão apresentadas Tabela 04.

Tabela 4 - Parâmetros do SWAT calibrados na Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados

Parâmetros	Intervalo	valores originais	valores calibrados
CN2	0-100	-	x 0,6
SOL_AWC	0-1	-	x 0,8
ALPHA_BF	0-1	0,048	0,0001
ESCO	0,01-1	0,95	0,65
FFCB	0-1	0	1
CANMX	0-100	0	11
GW_DELAY	0-500	31	15
SURLAG	0,05-24	0	0,1
NCOEF	0,5-2	2	1,27

Fonte: Elaborado pela autora.

4.6.1 Indicadores de Desempenho dos Modelos Hidrológicos

A avaliação dos modelos hidrológicos é necessária para verificar se o mesmo está reproduzindo adequadamente as respostas das bacias. Em suma, esse processo consiste em comparar a série história de vazão observada com as simuladas no modelo, a fim de verificar a proximidade desses dados.

Tan *et al.* (2020) relatam que muitas medidas estatísticas são utilizadas para avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT, mas que os índices mais utilizados são o Coeficiente de Determinação (R^2) e a eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE). Esses e outros índices estão disponíveis no SWAT-CUP para a avaliação da performance do modelo. Deste modo, foi analisado esses dois índices e também o Pbias (Tendência dos resultados em porcentagem) para poder identificar possíveis tendências de subestimação ou superestimação do fluxo dos rios.

Moriasi *et al.* (2007) e Moriasi *et al.* (2015) estabeleceram diretrizes para a avaliação de modelos hidrológicos no que se refere a calibração, validação, análise de incerteza e aplicação, concentrando-se em vazão e transporte de sedimentos e nutrientes. Os critérios sugeridos por eles são os mais usados para interpretar os valores desses índices (TAN *et al.*, 2020).

O R^2 apesar de ser bastante utilizado para a avaliação do desempenho do modelo, é hipersensível a valores extremos e insensível a diferenças aditivas e proporcionais entre as simuladas pelos modelos hidrológicos e os dados observados (MORIASI *et al.*, 2007). Sendo assim, para avaliação dos modelos hidrológicos os valores de R^2 superiores a 0,5 foram considerados como satisfatórios, conforme recomendado por Moriasi *et al.* (2007).

Conforme Serrão *et al.* (2021), o valor de NSE pode variar de $-\infty$ a 1, e os valores próximos de 1 indicam melhor desempenho. Entre 0,0 e 1 geralmente indicam níveis aceitáveis de desempenho, e os valores negativos são inaceitáveis (MORIASI *et al.*, 2007).

O Pbias é a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados. Os valores de Pbias podem ser negativos e positivos, indicando superestimação e subestimação do modelo, respectivamente. Deste modo, em uma simulação precisa o valor de Pbias se aproximar de 0 (MORIASI *et al.*, 2007).

O cálculo do NSE é realizado pela Equação 12, o PBIAS pela Equação 13 e o R^2 pela Equação 14. Em que Q^{sim} é a vazão simulada, Q^{obs} é a vazão observada, $\overline{Q^{obs}}$ é

a média dos valores de vazão observada, $\overline{Q^{sim}}$ é a média dos valores simulados e n é o número de registros.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum (Q^{obs} - Q^{sim})^2}{\sum (Q^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} \right) \quad \text{EQ.12}$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q^{obs} - Q^{sim})_i}{\sum_{i=1}^n Q^{obs,i}} \quad \text{EQ.13}$$

$$R^2 = \frac{\{\sum_{i=1}^n [(Q^{sim} - \overline{Q^{sim}})(Q^{obs} - \overline{Q^{obs}})]\}^2}{\sum_{i=1}^n [(Q^{sim} - \overline{Q^{sim}})^2 \sum_{i=1}^n (Q^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2]} \quad \text{EQ.14}$$

Os valores de NSE e PBIAS foram classificados conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação do desempenho do modelo baseado na NSE e PBIAS

Performance	NSE	PBIAS
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,0$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,5$	$PBIAS \geq \pm 25$

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

4.7 MÉTODO DE CÁLCULO DOS ÍNDICES DE SECA

No cálculo dos índices de seca meteorológica (SPI) e hidrológica (SDI) foram utilizadas as escalas de tempo de 3, 6 e 12 meses. Pois Sun *et al.* (2019) relatam que essas são as escalas de tempo mais usadas. Ainda segundo Sun *et al.* (2019) as escalas de curto prazo, abrangendo alguns meses, são importantes para estudos meteorológicos e agrícolas, enquanto as escalas de longo prazo são mais relevantes para estudos de gestão do abastecimento de água.

Este trabalho tem como foco a análise da estação verão (janeiro-março), período úmido (outubro-março) e do ano hidrológico. Em que o verão, nessas regiões, é um período específico do período úmido caracterizado por ter mais ocorrência de precipitação intensas. No Estado de São Paulo o ano hidrológico inicia em outubro e termina em setembro, com chuvas concentradas entre outubro e março e estiagem entre abril e setembro (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2019).

Como mencionado, além do ano hidrológico foram analisados o verão e o período úmido, pois, conforme Knutson e Ploshay (2016) existem evidências de aumento do estresse térmico durante o verão de grande parte do sudeste da América do Sul.

O período úmido foi escolhido pois é nele que é esperado que ocorra a reposição dos volumes de água consumidos no período seco, sendo assim, qualquer anomalia na precipitação pode afetar esse processo (Neves e Vilanova 2021).

Em particular para o cálculo do SPI, foram utilizadas as precipitações mensais médias das bacias hidrográficas, obtidas pelo método de Thiessen (EQ.17). Deste modo, a precipitação de cada estação pluviométrica dentro da bacia de interesse foi ponderada pela área de influência da mesma. Sendo assim, este método considera que a precipitação que ocorre em qualquer ponto da área de influência é igual ao que existe no posto de medição mais próximo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_{inf}}{A} \quad \text{EQ.17}$$

Onde:

- Pm é a precipitação média da bacia;
- A_{inf} é a área de influência da estação pluviométrica na bacia hidrográfica;
- P_i é a precipitação na estação i ;
- A é área total da bacia hidrográfica.

Através do ArcGis foi possível criar os polígonos de Thiessen de forma automatizada e calcular as áreas de influência de cada posto, viabilizando o desenvolvimento das precipitações mensais médias da BH-AT e BH-SJD.

Diante dos dados da precipitação mensal das bacias, foi utilizado o software DrinC para calcular os SPI e os SDI. Conforme Tigkas, Vangelis, Tsakiris (2015) para elaborar os SPIs, o software baseia-se na metodologia de McKee; Doesken e Kleist (1993) em que a distribuição gama é definida por sua função de frequência ou densidade de probabilidade (Equação 18).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \text{ para } x > 0 \quad \text{EQ.18}$$

Onde:

- α e β são parâmetros de forma e escala, respectivamente, estimados para cada escala de tempo de interesse (1, 3, 6, 9, 12 meses, etc.);

- x é a quantidade de precipitação (mm);
- $T(\alpha)$ é a função gama.

A estimativa de verossimilhança máxima de α e β é expressa pela Equação 19

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \beta = \frac{\bar{x}}{a} \quad \text{EQ.19}$$

Onde $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln x}{n}$ e n é o número de observações.

Então, calcula-se a probabilidade cumulativa do evento de precipitação observado para o mês e escala de tempo fornecido para o local de interesse, por meio dos parâmetros resultantes. Como os dados de precipitação podem conter zeros e a função gama é indefinida para $x=0$ a probabilidade cumulativa é expressa pela Equação 20.

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{EQ.20}$$

Onde q é a probabilidade de precipitação igual a zero e $G(x)$ é a probabilidade cumulativa da função gama incompleta. Em que q pode ser estimado como sendo o número de zeros em uma série temporal de chuva pelo número de observações, assim a probabilidade cumulativa $H(x)$ é transformada para a variável aleatória padrão normal como média 0 e variância de 1 que é o valor do SPI (TIGKAS, VANGELIS e TSAKIRIS, 2015).

Conforme Tigkas, Vangelis, Tsakiris (2015) o SDI é calculado no DrinC por meio da metodologia de Nalbantis e Tsakiris (2009). Sendo assim é feita a seguinte consideração: se uma série temporal de vazão mensal $Q_{i,j}$ estiver disponível, o volume de fluxo cumulativo pode ser encontrado com base na Equação 21.

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad \text{EQ.21}$$

Onde: i é o ano hidrológico e j é o mês dentro dele ($j=1$ para outubro e $j=12$ para setembro). $V_{i,k}$ é o volume de fluxo cumulativo para o i -ésimo ano hidrológico e o k -ésimo período de referência, para outubro-dezembro $k=1$, outubro-março $k=2$, outubro-junho $k=3$, e outubro-setembro $k=4$ (TIGKAS, VANGELIS, TSAKIRIS, 2015).

Ainda segundo TIGKAS, VANGELIS, TSAKIRIS, (2015) com os fluxos cumulativos definidos, pode ser então calculado o SDI conforme Nalbantis e Tsakiris (2009) (EQ.22) para cada período de referência.

$$SDI_{i,j} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \quad \text{EQ.22}$$

Onde $\bar{V}_k$ e S_k são a média e o desvio padrão dos volumes de fluxos cumulativos do período de referencia k, nesta ordem.

As intensidades desses eventos foram classificadas conforme Mckee; Doesken e Kleist, (1993); WMO, (2012).

4.8 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

O teste de tendência Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi realizado para detectar tendências significativas das séries temporais das intensidades dos eventos extremos. Ele é um teste não paramétrico amplamente utilizado para essa finalidade, por ser o mais adequado para detectar tendências de variáveis climáticas (HAMED, 2008; DAD *et al.*, 2021).

Conforme DAD *et al.* (2021), a estatística S de Mann-Kendall da série x é dada pela Equação 23.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{EQ.23}$$

Em que *sgn* é a função *signum*.

A aplicação do teste de tendência é feita para temporal x_i , que é classificada de $i=1, 2, 3 \dots n-1$ e x_j , que é classificada de $j=1+1, 2 \dots -n$. Cada um dos pontos de dado x_i é um ponto de referência que é comparado com o resto do ponto de dados x_j de forma que:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

Em que x_i e x_j dão os valores anuais nos anos i e j ($j > i$), respectivamente.

Por meio da Equação 24 calcula-se a variação associada a S.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1) \times (2n+5) - \sum_{k=1}^m tk(tk-1) \times (2tk+5)}{18} \quad \text{EQ.24}$$

Onde:

n é o tamanho da amostra;

m é o número de grupos empatados ou empates da série temporal da amostra;

tk é o número de pontos de dados no grupo k .

Em casos em que n é maior que 10 a estatística do teste $Z(S)$ é calculada da seguinte forma:

$$Z(S) = \begin{cases} Se\ S > 0, & S - \frac{1}{\sqrt{V(S)}} \\ Se\ S = 0, & 0 \\ Se\ S < 0, & S + \frac{1}{\sqrt{V(S)}} \end{cases}$$

Assim, tendências decrecentes são indicadas por valores de $Z(S)$ negativos e os valores positivos sugerem tendências crescentes. O nível de significância adotado é de $\alpha = 0,05 = 5\%$. Conforme Santos *et al.* (2016) se $p\text{-valor} < \alpha$ existe tendência estatisticamente significativa, em contrapartida se o $p\text{-valor} > \alpha$, a tendência é insignificante estatisticamente. Conforme JULIANI (2020) para o nível de significância de 5% confirma-se tendências significativas para valores $|Z| > 1,96$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELOS HIDROLÓGICOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Neste tópico será apresentado os resultados da caracterização das bacias hidrográficas elaboradas para desenvolvimento dos modelos hidrológicos, assim como os resultados da calibração e validação desses modelos.

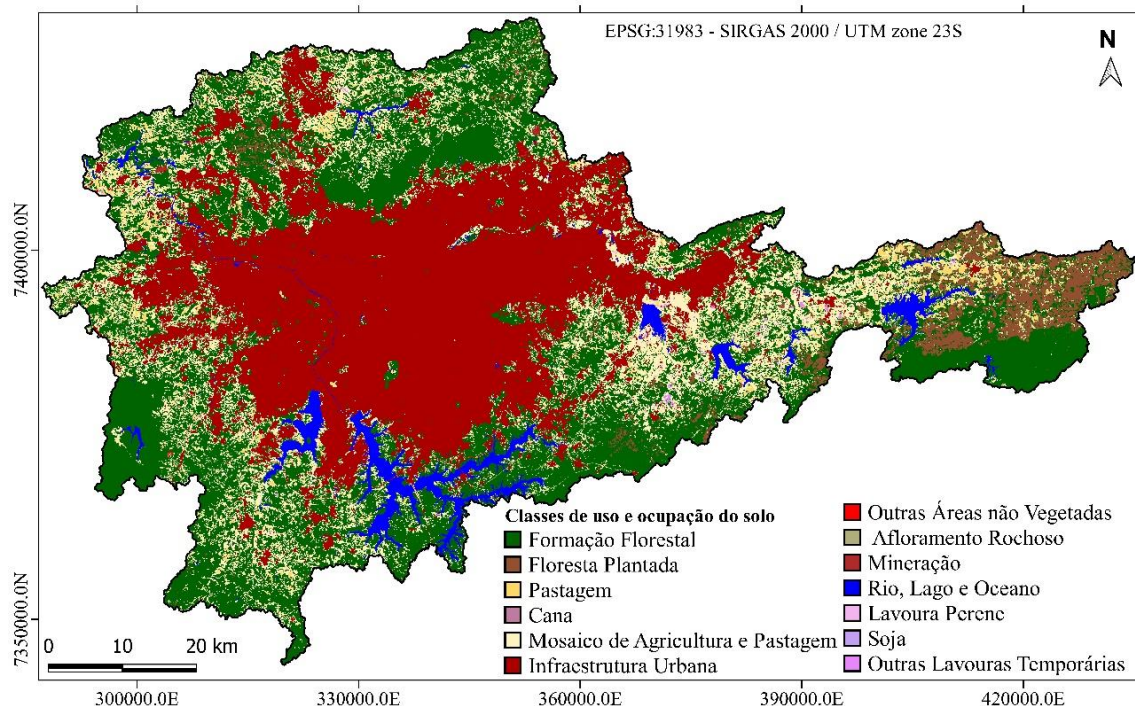
5.1.1 *Uso e Ocupação do Solo*

Os usos e cobertura da BH-AT estão ilustrados na Figura 12 e as porcentagens de área ocupada por cada classe podem ser observados pela Tabela 6. Observa-se que apesar da BH-AT ser extremamente urbanizada, principalmente na região central, ela possui aproximadamente 38% da sua área constituída por formação florestal, que segundo TUCCI (2012) tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração. Observa-se também que essas áreas florestais estão predominantemente localizadas nas periferias da bacia, coincidindo com áreas de mananciais e outras áreas de reservas legais relatadas no CBH-AT.

Tabela 6 - Porcentagem de área ocupada por cada classe de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Tietê.

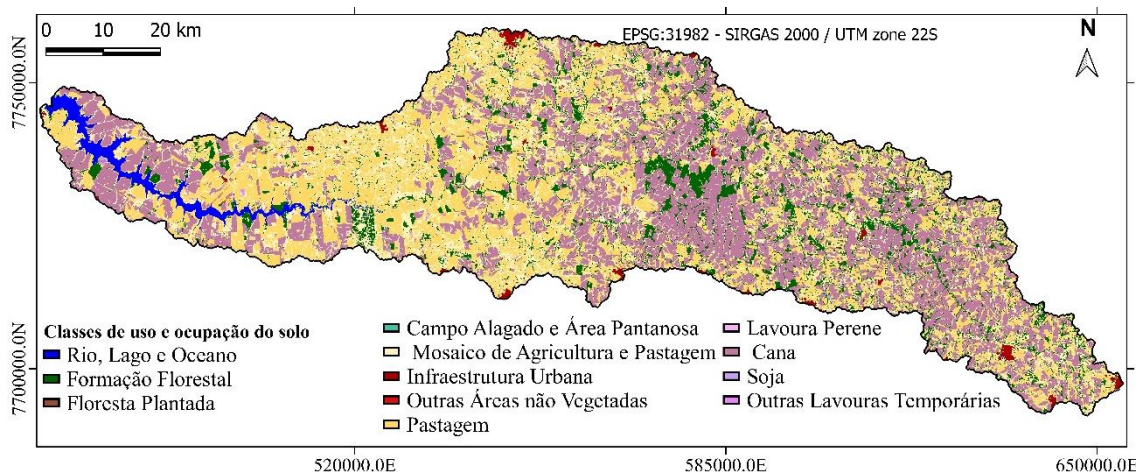
Classe de cobertura do solo	Área (km ²)	Área (%)
Formação Florestal	2200,13	38,08
Infraestrutura Urbana	1991,92	34,48
Mosaico de Agricultura e Pastagem	966,84	16,73
Floresta Plantada	237,05	4,10
Rio, Lago e Oceano	200,54	3,47
Pastagem	154,86	2,68
Outras Lavouras Temporárias	14,14	0,24
Outras Áreas não vegetadas	7,65	0,13
Mineração	3,32	0,06
Afloramento Rochoso	0,73	0,01
Soja	0,25	0,004
Cana	0,15	0,003
Lavoura Perene	0,01	0,0001
TOTAL	5777,57	100,00

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 12 - Mapa de uso e ocupação da bacia hidrográfica do Alto Tietê

Fonte: Elaborada pela autora

Através da Figura 13 pode ser observado o mapa de uso e ocupação do solo da BH-SJD e na Tabela 7 a área da bacia ocupada por cada classe. Essa bacia é predominantemente voltada a agricultura, em que, aproximadamente, 56% da área é ocupada por culturas e 31% por pastagem.

Figura 13 - Mapa de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 7 - Classificação do uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Rio São José Dos Dourados

Classe de cobertura do solo	Área (km ²)	Área (%)
Cultura Semi-Perene	1712,67	33,18
Pastagem	1591,70	30,84
Mosaico de Agricultura e Pastagem	1155,41	22,39
Formação Florestal	535,80	10,38
Rios e Lagos	98,06	1,90
Infraestrutura Urbana	34,65	0,67
Outras Lavouras Temporárias	17,44	0,34
Floresta Plantada	9,85	0,19
Soja	2,47	0,05
Outras Áreas não vegetadas	1,94	0,04
Lavoura Perene	1,29	0,02
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,22	0,00
TOTAL	5161,49	100,00

Fonte: Elaborado pela autora

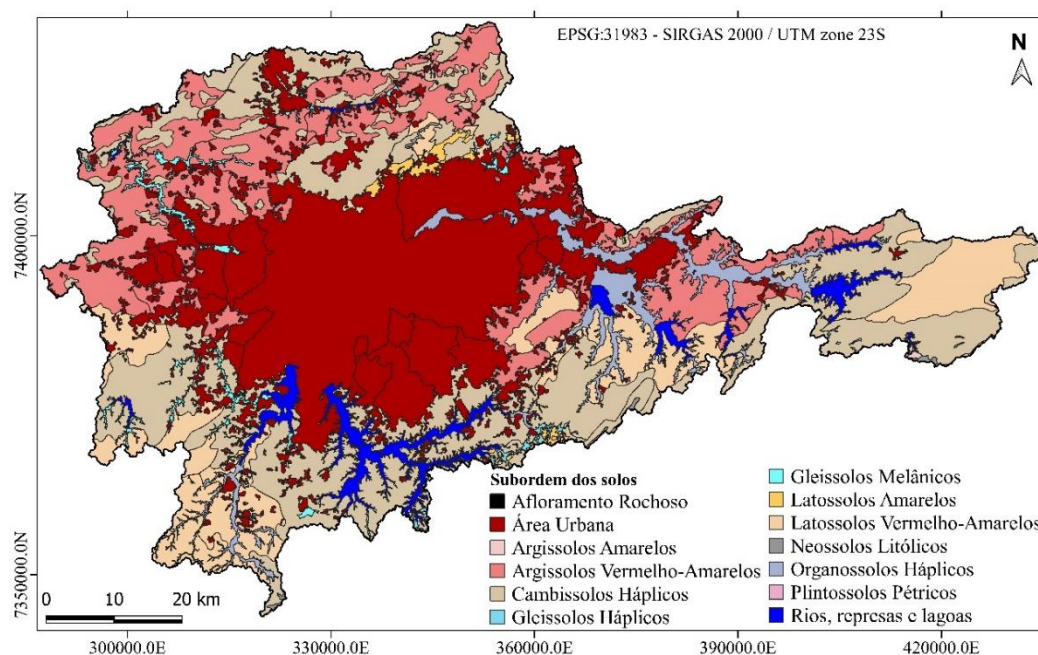
5.1.1.1 Aspectos Pedológicos

A área da BH-AT é ocupada pelos seguintes tipos de solos: Cambissolos Háplicos (27,2%), seguindo dos Argissolos Vermelho Amarelo (17,53%), Latossolo Vermelho Amarelo (11,35%), Organossolos Háplicos (3,92%), Gleissolos Háplicos (1,35%), Latossolo amarelo (0,54), Neossolos Litóficos (0,11%), Argissolos Amarelos (0,03%), Plintossolos Pétricos (0,001%). O restante da área é ocupado pela infraestrutura urbana, afloramento rochoso e pelas águas superficiais. A Figura 14 mostra a disposição desses solos ao longo da BH-AT.

Os solos predominantes da área (Cambissolos) são caracterizadores por constituírem material mineral e comportarem desde solo fortemente drenados até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de alta a baixa saturação por bases e atividades químicas de fração de argila (SANTOS *et al.*, 2018).

Como falado anteriormente, o segundo tipo de solo mais presente na bacia são os Argissolos. Geralmente eles são constituídos por material mineral, com textura de argila de baixa atividade ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com carácter aluminico (SANTOS *et al.*, 2018). Esse solo possui características de profundidade, drenagem e textura altamente variáveis de uma região para outra (SANTOS *et al.*, 2018).

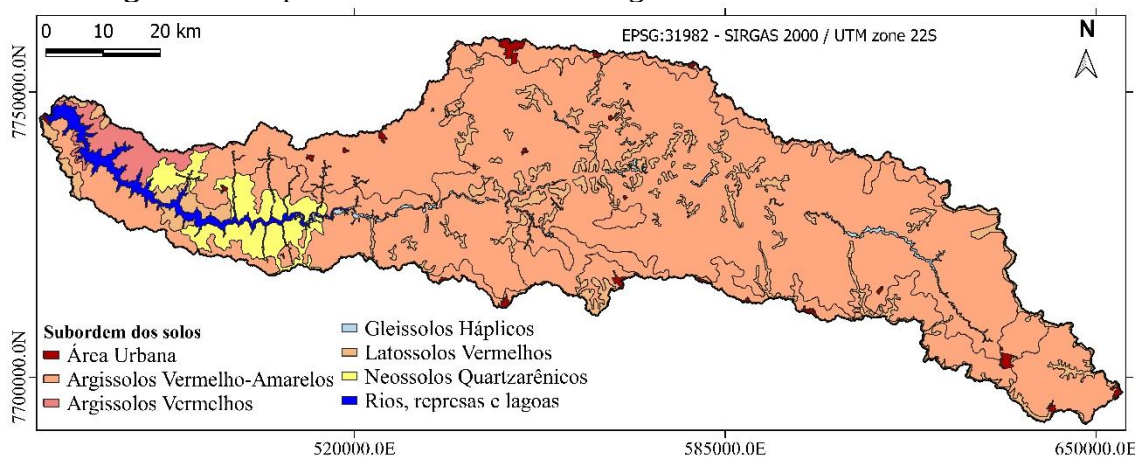
Figura 14 - Mapa Pedológico da bacia hidrográfica do Alto Tietê



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 14 mostra o mapa de classificação do solo da bacia hidrográfica do Rio São José dos Dourados. Em suma, a maior parte da área dessa bacia pertence aos solos da subordem Argissolos Vermelhos-Amarelos (83,02 %), seguindo dos Latossolos Vermelhos (6,994%), Neossolos Quartzarênicos (4,12%), Argissolos Vermelho (2,18%) e Gleissolos Hápicos (1,14%). As demais áreas são ocupadas por Rios, represas e lagoas e pela Infraestrutura Urbana.

Figura 15 - Tipos de solo da Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados



Fonte: Elaborado pela autora.

O solo predominante possui grande fragilidade em desagregação quando submetido a fatores climáticos e topográficos desfavoráveis (RIBEIRO, 2021), isso porque são solos que sua camada superior possui aproximadamente 70% de areia (BALDISSERA, 2005). Ademais, solos arenosos têm maior condutividade hidráulica do que solos argilosos, devido ao tamanho das partículas e poros existentes no primeiro serem maiores. Conforme GEOINFO (2020) existe alta capacidade de erodibilidade dos solos na área coincidente com tipo Argissolos Vermelhos.

Como visto, os Latossolos são o segundo tipo mais presente na BH-SJD, eles são solos muito evoluídos, que variam de fortemente a bem drenados, normalmente muito profundos, em geral são fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos (SANTOS *et al.*, 2018).

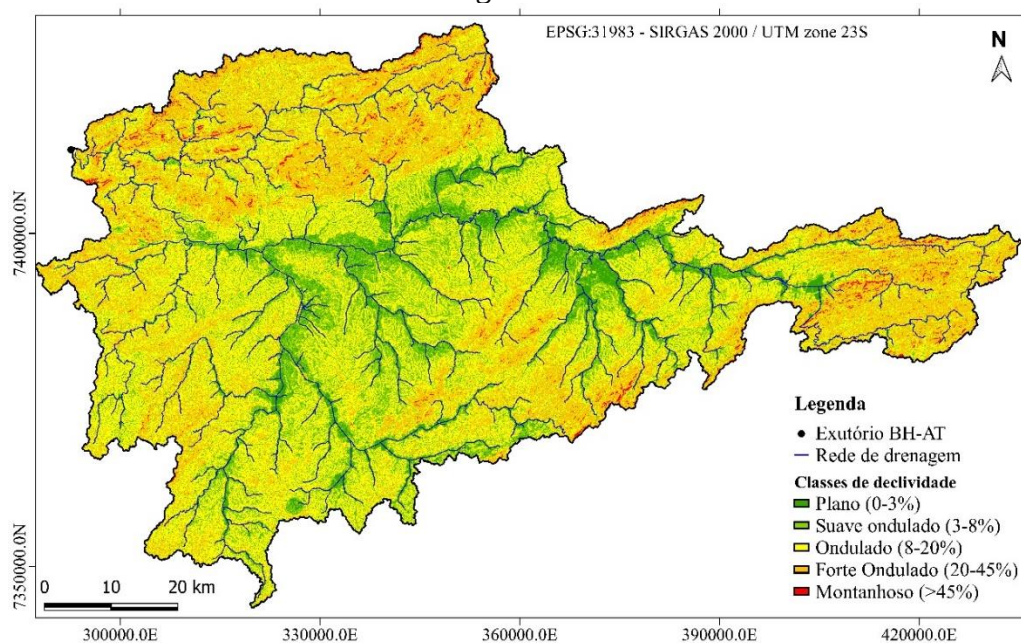
5.1.1.2 Declividade do Relevo e Sub-Bacias Hidrográficas

Através do MDE foi realizada a classificação das declividades do relevo, delimitação e divisão das bacias hidrográficas em sub-bacias.

O resultado da classificação da declividade do relevo da BH-AT, Figura 16, mostra que 44,10% da área dessa bacia tem o relevo ondulado, 23,03% forte ondulado, 22,10% suave ondulado, 9,81% plano e 1,05% Montanhoso. As áreas suavemente onduladas estão distribuídas em toda bacia, e as planas concentram-se próximas aos canais hidrográficos, já as classes fortemente onduladas e montanhosa localizam-se nas áreas periféricas da bacia, conforme ilustrado.

Sendo assim, essas características podem influenciar na ocorrência de inundações e cheias, visto que, a parte central onde é plana está impermeabilizada, como também possui diversos canais impermeabilizados. Isso é comprovado por (ANA, 2021a) no qual observa-se que esses locais (principalmente o Rio Tietê e afluentes) são altamente vulneráveis e ocorrem com bastante frequência além de gerar grandes impactos.

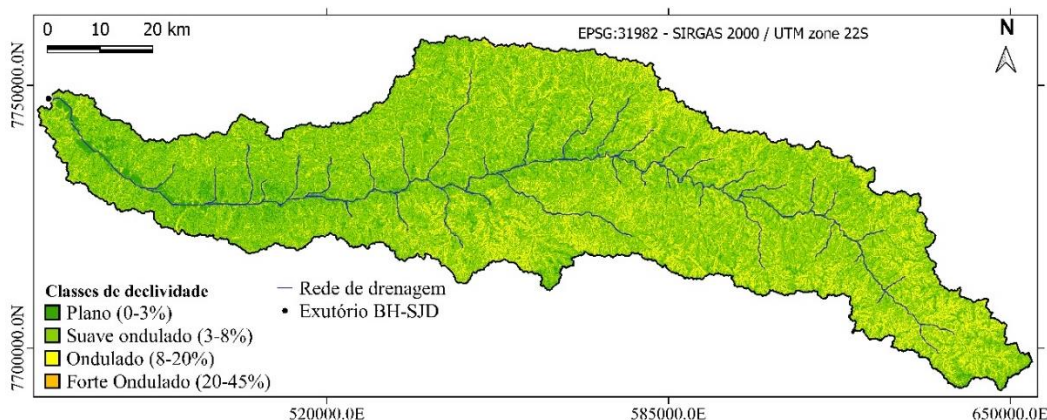
Figura 16 - Classificação do relevo quanto a declividade expressa em porcentagem para a bacia hidrográfica do Alto Tietê



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da classificação mostram que o relevo da BH-SJD (Figura 17) é predominantemente suave ondulado (63,07%), seguido de ondulado (20,35%), plano (16,48%) e Forte Ondulado (0,1%).

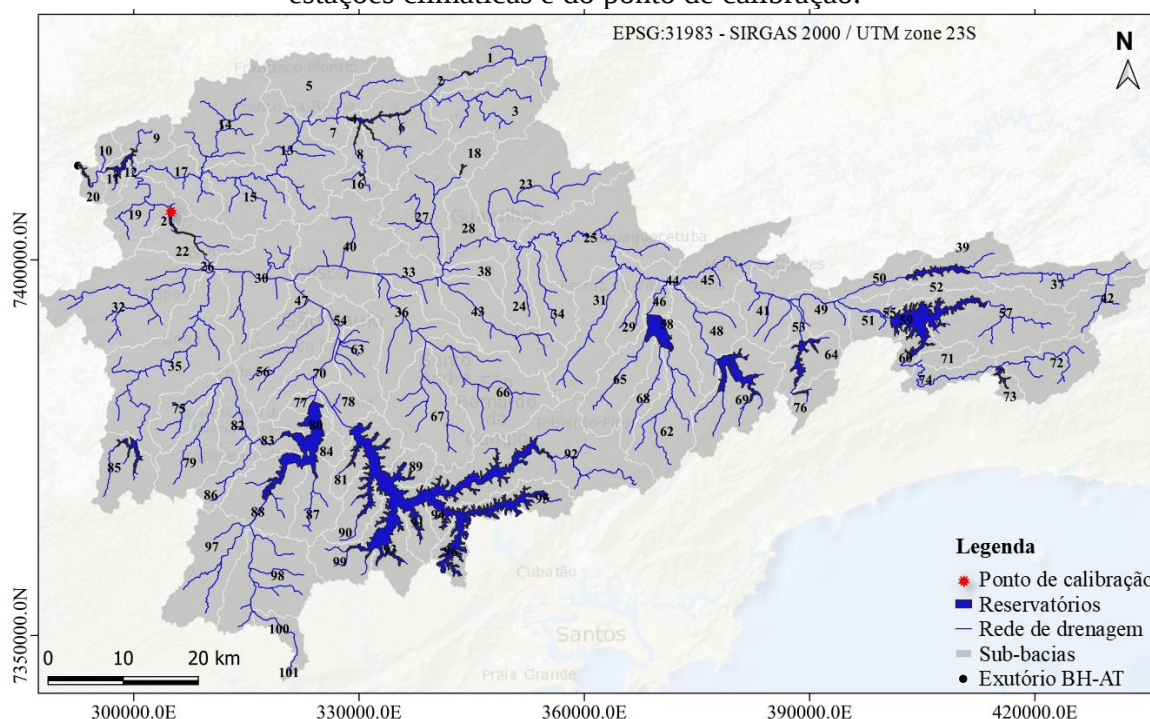
Figura 17 - Classes de declividade expressa em porcentagem para a Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados



Fonte: Elaborado pela autora.

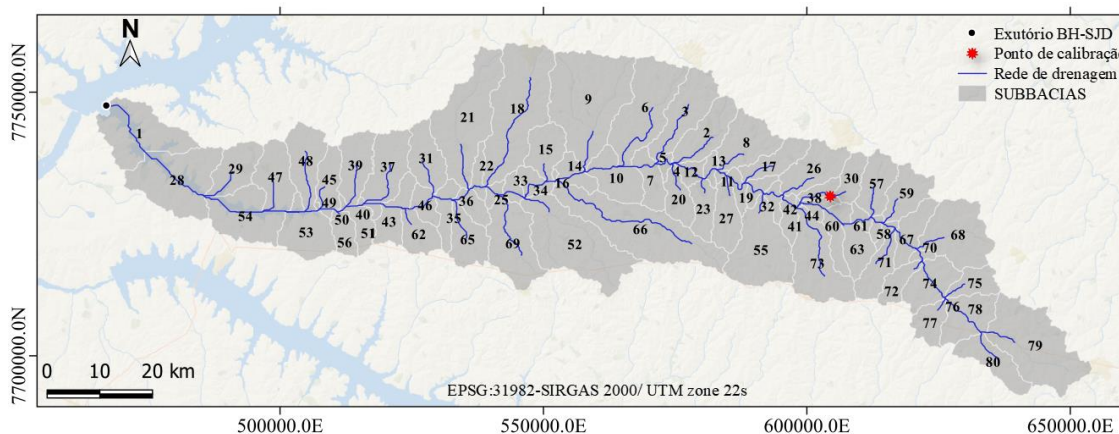
Nas Figuras 18 e 19 estão ilustrados a delimitação das bacias hidrográficas e sub-bacias, assim como, a o ponto de calibração e corpos hídricos das bacias hidrográficas do BH-AT e BH-SJD, respectivamente.

Figura 18 - Localização das sub-bacias hidrográficas do Alto Tietê, localização das estações climáticas e do ponto de calibração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Localização das sub-bacias da Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.1.3 Estatísticas Climáticas Geradas Pelo WGN

As estatísticas foram geradas para todas as estações localizadas em cada bacia hidrográfica, porém por questões práticas foram apresentados apenas os dados da estação da IAG/USP e de Marinópolis. É importante ressaltar que os dados relacionados a precipitação foram os únicos que variaram de uma estação para a outra, em cada bacia,

visto que, apenas uma estação (IAG/USP e de Marinópolis) possuía dados completos de temperatura do ar, umidade, velocidade do vento e radiação solar, que foram então atribuídas para os demais postos.

Na Tabela 8 e 9 estão as estatísticas climáticas geradas pelo WGN através dos dados da estação climática da IAG/USP e de Marinópolis, nessa ordem. E os parâmetros dessas tabelas estão descritos no Quadro 5.

Tabela 8 - Parâmetros climáticos obtidos na Estação Climática da IAG/USP

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	28,15	29,08	28,05	26,63	23,38	22,80	22,73	23,97	24,72	25,97	26,09	27,93
TMPMN	18,59	18,70	18,13	16,43	13,50	12,14	11,27	12,03	13,68	15,49	16,15	17,67
TMPSTDMX	3,65	3,35	3,35	3,49	3,51	3,63	4,38	4,97	5,26	5,04	4,23	3,82
TMPSTDMN	1,68	1,51	1,59	2,33	2,45	2,80	2,54	2,37	2,40	2,26	2,35	2,05
PCPMM	281,16	238,12	179,81	90,03	65,47	58,90	64,56	32,69	77,77	112,27	172,49	184,99
PCPSTD	14,91	15,76	13,42	8,78	7,21	6,64	7,64	3,70	7,92	8,93	12,07	12,87
PCPSKW	2,54	2,86	4,71	4,57	6,61	4,95	5,75	5,40	5,55	4,92	2,98	3,82
PR_W1	0,56	0,42	0,43	0,28	0,29	0,22	0,22	0,20	0,30	0,39	0,43	0,45
PR_W2	0,77	0,77	0,73	0,59	0,59	0,56	0,56	0,56	0,63	0,67	0,69	0,70
PCPD	22,00	18,10	19,05	12,29	12,90	10,14	10,33	9,71	13,29	16,95	17,43	18,67
RAINHHMX	18,28	20,20	18,17	11,70	9,20	7,91	9,79	4,27	10,19	11,49	15,66	17,35
SOLARRAV	18,47	18,95	16,90	15,16	12,46	11,51	12,20	14,72	15,81	17,34	18,75	19,57
DEWPT	81,50	80,19	81,64	80,87	80,96	80,77	78,56	76,04	77,90	80,31	80,66	80,19
WNSDAV	1,64	1,56	1,51	1,44	1,47	1,35	1,41	1,57	1,74	1,73	1,83	1,74

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 - Parâmetros climáticos obtidos para a estação de Marinópolis

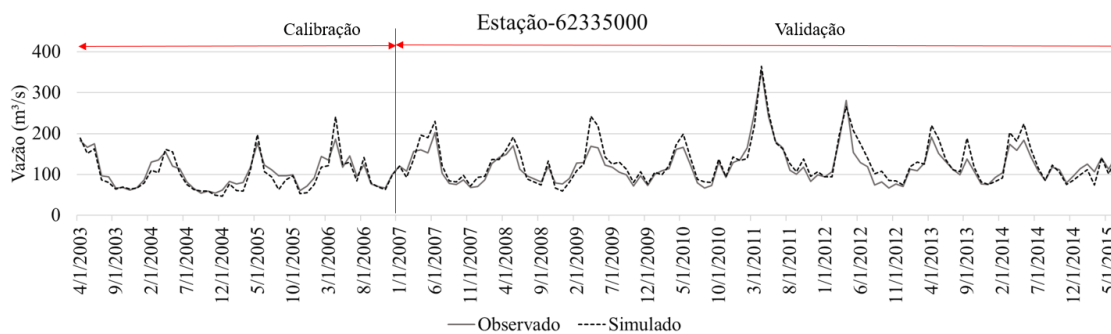
Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	32,45	32,82	32,51	32,07	28,98	28,72	29,13	31,28	32,60	33,42	32,48	32,65
TMPMN	21,64	21,47	21,11	19,00	15,37	14,47	13,52	14,93	17,67	19,94	20,55	21,59
TMPSTDMX	2,70	2,37	2,53	3,07	3,63	3,43	3,96	4,12	4,63	3,86	2,98	2,68
TMPSTDMN	1,29	1,29	1,51	2,54	3,30	3,02	3,27	3,32	2,86	2,35	1,95	1,38
PCPMM	224,23	148,23	136,21	49,70	62,39	26,54	19,64	21,73	59,31	79,64	130,34	173,63
PCPSTD	13,64	12,57	10,74	6,27	7,15	4,71	3,32	3,55	6,80	7,90	9,97	11,41
PCPSKW	3,52	3,79	4,40	5,37	5,14	7,94	7,35	8,80	4,86	4,40	3,54	2,91
PR_W1	0,40	0,30	0,25	0,13	0,13	0,07	0,06	0,06	0,12	0,18	0,28	0,36
PR_W2	0,72	0,62	0,63	0,52	0,50	0,48	0,45	0,51	0,54	0,50	0,58	0,63
PCPD	18,29	12,29	12,52	6,24	6,33	3,76	3,05	3,19	6,29	8,14	12,00	15,24
RAINHHMX	17,21	15,17	12,27	8,04	10,20	4,23	3,80	3,85	8,00	10,44	12,21	13,42
SOLARRAV	18,79	19,76	18,81	16,96	14,47	13,06	14,34	17,06	17,74	18,97	19,87	19,77
DEWPT	81,67	79,93	81,21	77,07	76,44	72,92	65,27	56,99	59,59	67,61	74,96	78,20
WNSDAV	1,43	1,27	1,15	1,06	1,09	1,14	1,41	1,63	1,79	1,65	1,59	1,47

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.1.4 Calibração e Validação dos Modelos Hidrológicos

Conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007) e Coutinho *et al.* (2012) o desempenho do modelo SWAT da BH-AT foi muito bom tanto na calibração quanto na validação, pois as vazões simuladas ajustaram-se as vazões observados na estação fluviométrica, conforme mostra os resultados e a Figura 20. Na calibração os valores de NSE, R^2 e Pbias obtidos foram, respectivamente, de 0,80, 0,87 e +1,37. Ainda nessa ordem, e na validação, os resultados foram de 0,79, 0,86 e -3,00.

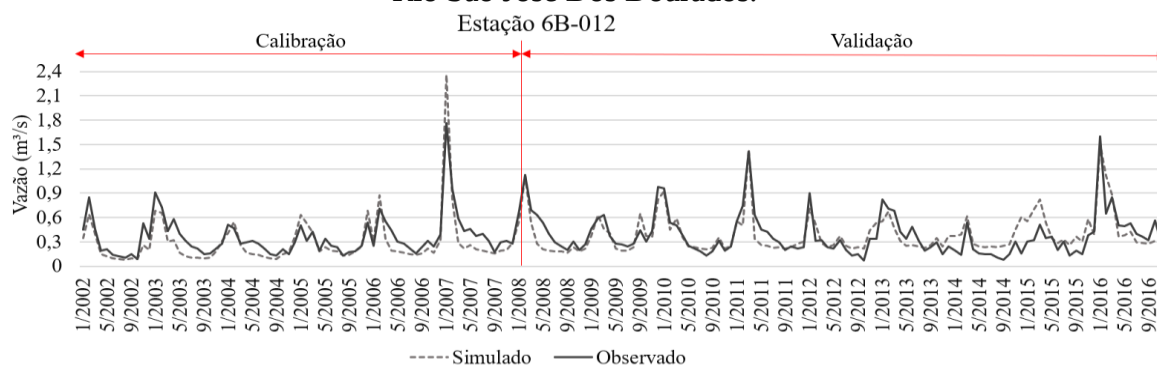
Figura 20 - Vazão simulada e a observada na estação 62335000 da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.



Fonte: Elaborado pela autora.

Também na BH-SJD os resultados foram muito bons, mostrando o adequado desempenho do modelo em simular as condições hidrológicas da bacia. Os valores de R^2 apresentaram uma precisão fortíssima no período de calibração (0,84) e no período de validação (0,68), segundo a classificação de Coutinho *et al.* (2012). E conforme as especificações de Moriasi *et al.* (2007) a NSE mostrou um bom desempenho no período de calibração com valor de 0,70 e validação com valor de 0,66. O PBIAS teve um resultado satisfatório de +19,28 na calibração, e na validação o resultado obtido foi muito bom de -3,49. O R^2 total da série é de 0,73. A Figura 21 compara as vazões mensais simuladas e observadas na estação 6B-012. Observa-se por essa Figura e pela análise dos dados que SWAT é capaz de reproduzir os eventos extremos de vazão, salvo em alguns eventos específicos.

Figura 21 - Vazão simulada e a observada na estação 6B-012 na Bacia Hidrográfica Do Rio São José Dos Dourados.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO

Neste tópico será apresentado as análises do comportamento das médias mensais do período Base (1999-2019) de cada variável climática simulada pelos modelos climáticos.

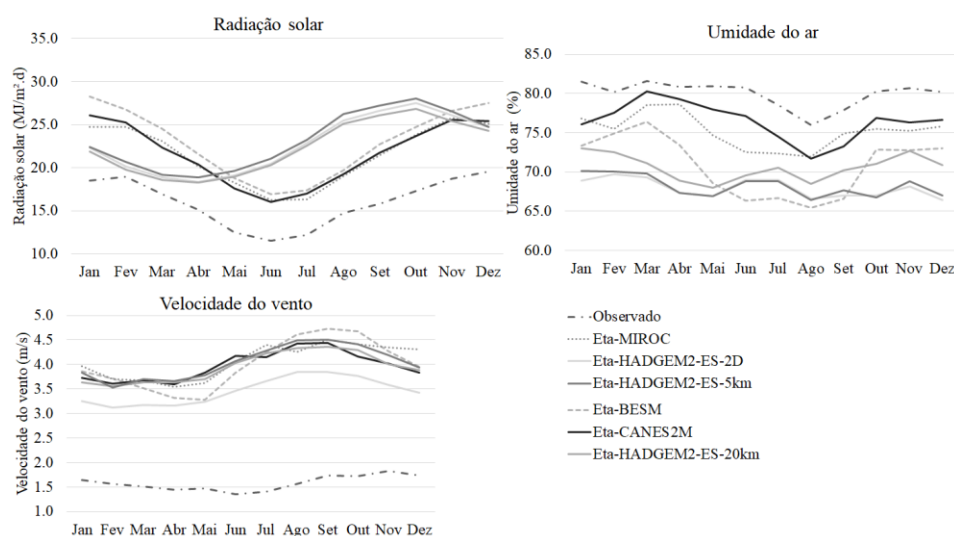
5.2.1 *Comportamentos Gerais das Simulações Climáticas*

As projeções de diferentes modelos podem variar significativamente (JONG *et al.*, 2021). Sendo assim, foi realizada uma comparação entre as médias mensais simuladas pelos modelos climáticos (Eta-MIROC, Eta-BESM, Eta-HADGEM2 e Eta-CANESM2) sob influência da RCP8.5 e RCP4.5 com as observadas na estação da IAG/USP e de Marinópolis no período de 1999 a 2019, para verificar o comportamento das simulações.

Como as médias dos dados climáticos gerados pelos modelos climáticos citados acima sob influência dos cenários com RCP4.5 e 8.5 não apresentaram diferenças significativas (verificado por meio do Teste-t student, $p - valor > \alpha$, $\alpha = 0,05$) e apresentam o mesmo comportamento isso no período (1999-2019) e em relação aos dados das áreas de estudo, sendo assim, será mostrado apenas as informações do RCP8.5.

Na BH-AT (estação IAG/USP) verificou que a radiação solar e velocidade do vento são superestimadas por todos os modelos e em contrapartida, a umidade relativa do ar é subestimada, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Comparação da radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação da IAG/USP no período de 1999 a 2019.

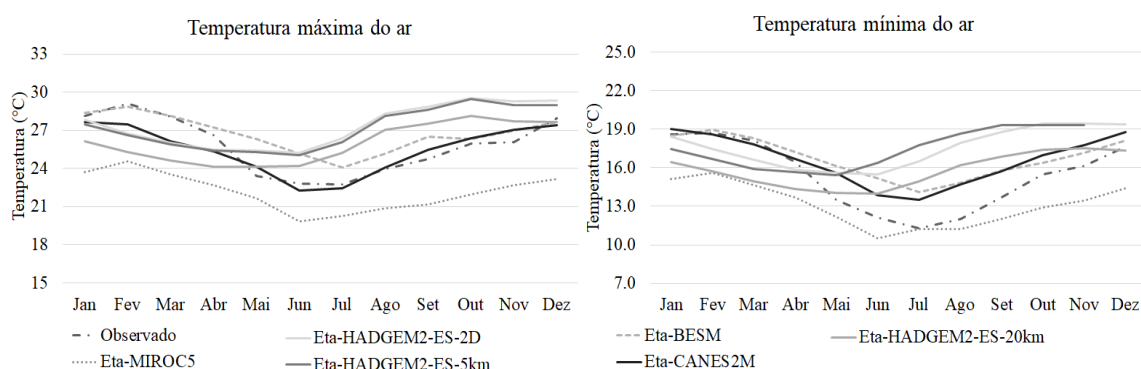


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23 mostra a comparação de temperatura máxima e mínima do ar média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação da IAG/USP no período de 1999 a 2019.

No geral o modelo Eta-MIROC5 subestimou a temperatura máxima e mínima média mensal com PBIAS de +14 e +14,60, respectivamente. Também o Eta-CANESM2 subestimou a temperatura máxima do ar (PBIAS = +1,0). Por outro lado, essas variáveis foram superestimadas pelos demais modelos, o PBIAS variou entre -0,71 e -6,0 para a temperatura máxima e entre -3,0 e -14 com a temperatura mínima.

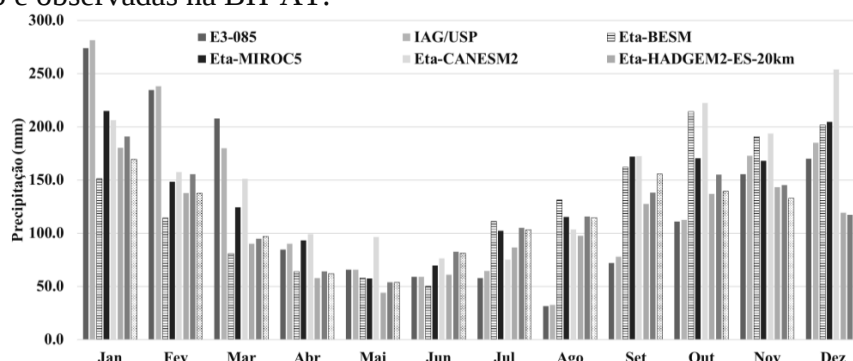
Figura 23 - Comparação temperatura máxima e mínima do ar média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação da IAG/USP no período de 1999 a 2019.



Fonte: Elaborado pela autora.

A precipitação média mensal para o período analisado na BH-AT (Figura 24), foi superestimada pelos modelos Eta-CANESM2 (PBIAS= -18,80), Eta-MIROC5 (PBIAS= -7,70), Eta-BESM (PBIAS= -0,5), em ordem decrescente e subestimada pelos modelos Eta-HADGEM2-ES-20km (PBIAS= +15,80), Eta-HADGEM2-ES-5km (PBIAS= +6,90) e Eta-HADGEM2-ES-2D (+9,60), na mesma ordem.

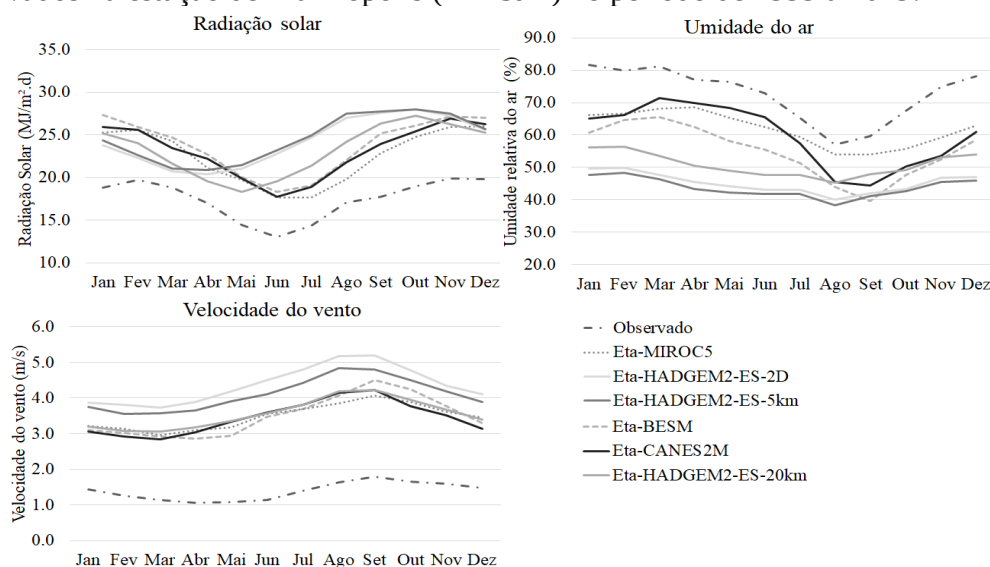
Figura 24 - Comparação entre a precipitação média mensal do período de 1999-2019 simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observadas na BH-AT.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na BH-SJD o comportamento das variáveis climáticas analisado antes do ajuste dos dados mostram que, assim como na BH-AT, a radiação solar e velocidade do vento são superestimadas pelos modelos e a umidade relativa do ar subestimada, isso pode ser observado pela Figura 25.

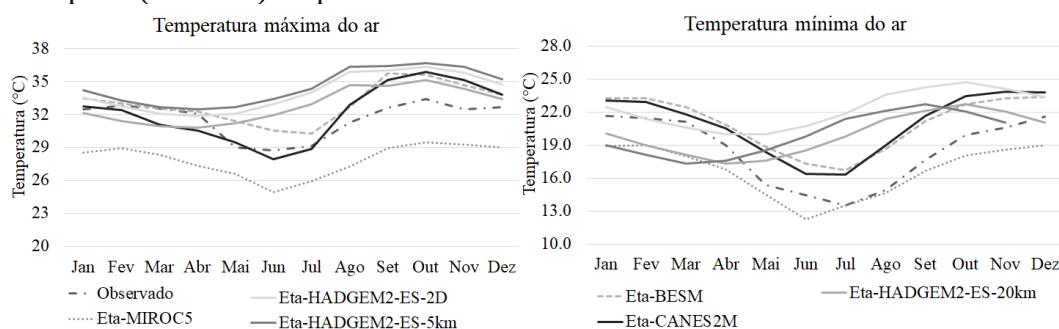
Figura 25 - Comparação da radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação de Marinópolis (BH-SJD) no período de 1999 a 2019.



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 26 está a comparação entre a temperatura do ar simulada pelos modelos e observadas na BH-SJD. O Eta-MIROC5 subestima a temperatura máxima (PBIAS = +11,8) e mínima do ar (PBIAS= +9,70), em contra partida são superestimadas pelos outros modelos, sendo que todos os modelos na temperatura mínima tiveram o PBIAS entre -1,7 e -9,78, e na temperatura mínima entre -8,0 e -21,0.

Figura 26 - Comparação temperatura máxima e mínima do ar média mensal simuladas pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observados na estação de Marinópolis (BH-SJD) no período de 1999 a 2019.

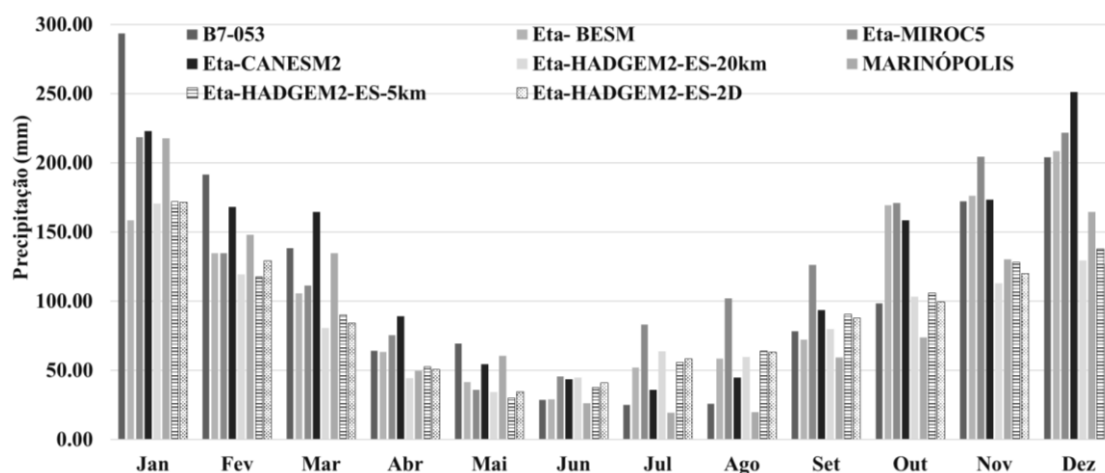


Fonte: Elaborado pela autora

As precipitações médias mensais do período de 1999-2019, Figura 27, mostram que os modelos Eta-MIROC5 e Eta-CANESM2 superestimam a precipitação (PBIAS de aproximadamente -10 e -8,0, respectivamente). Por outro lado, o Eta-HADGEM2-ES-20km, Eta-HADGEM2-ES-5km, Eta-HADGEM2-ES-2D e Eta-BESM subestimam, o PBIAS é de aproximadamente, +25, +1,9, +1,4 e +8.7, nessa ordem.

Assim como nesse trabalho, Jong *et al.* (2021) relataram que o modelo Eta-HADGEM2-ES subestimou precipitação média no período de 1961-1990 nas bacias do Uruguai, Paraná, Parnaíba e do Tocantins localizadas na América do Sul. No Rio de Janeiro, São Paulo e em Santos, Lyra *et al.*, (2018) também observaram tal característica dos modelos HADGEM2-ES.

Figura 27 - Comparação entre a precipitação média mensal do período 1999-2019 simulada pelos modelos climáticos com influência da RCP 8.5 e observada na BH-SJD.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.1.1 Comportamento das projeções da Temperatura Média do Ar

Por meio da temperatura mínima e máxima do ar foi calculada a temperatura média simulada e observada nas respectivas bacias. A temperatura média do ar observada na Bacia Hidrográfica do São José dos Dourados é de 25°C no período de 1999-2019, e na BH-AT é de 20,6°C no mesmo período.

O aumento da temperatura do ar projetada em relação ao observado nas BH-AT e BH-SJD estão demonstrados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente. Os resultados mostram que todos os modelos climáticos projetam incrementos maiores na BH-SJD do que na BH-AT.

Tabela 10 - Aumento projetado da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT

Modelo climático	Período/cenário					
	2034-2045		2058-2075		2082-2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Eta-BESM	1,0	0,9	1,5	2,8	1,4	3,8
Eta-CANESM2	1,3	1,8	2,6	3,8	2,7	5,9
Eta-MIROC5	0,4	0,7	1,0	1,6	1,3	2,6
Eta-HADGEM2-ES-2D	0,3	1,7	2,0	3,8	2,1	5,4
Eta-HADGEM2-ES-5km	0,3	1,8	1,9	3,7	1,9	5,3
Eta-HADGEM2-ES-20km	0,3	1,6	1,8	3,7	1,8	5,2

Fonte: Elaborado pela autora.

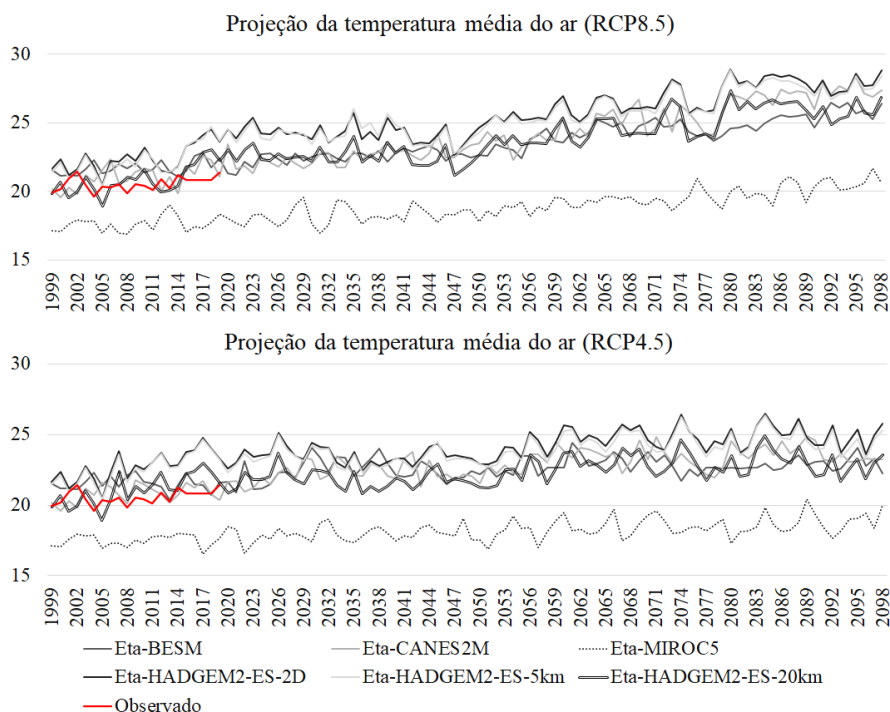
Tabela 11 - Aumento projetado da temperatura sob os cenários climáticos RCP4.5 e RCP8.5 na BH-SJD.

Modelos climáticos	Períodos / cenários					
	2034-2051		2058-2075		2082-2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Eta-BESM	1,2	1,3	1,7	3,3	1,9	4,8
Eta-CANESM2	1,8	2,1	3,1	4,7	3,4	7,4
Eta-MIROC5	0,7	1,0	1,4	2,4	2,0	3,6
Eta-HADGEM2-ES-2D	0,8	2,3	2,5	4,7	2,9	6,9
Eta-HADGEM2-ES-5km	0,8	2,4	2,4	4,7	2,6	6,7
Eta-HADGEM2-ES-20km	0,7	2,0	2,3	4,5	2,5	6,6

Fonte: Elaborado pela autora.

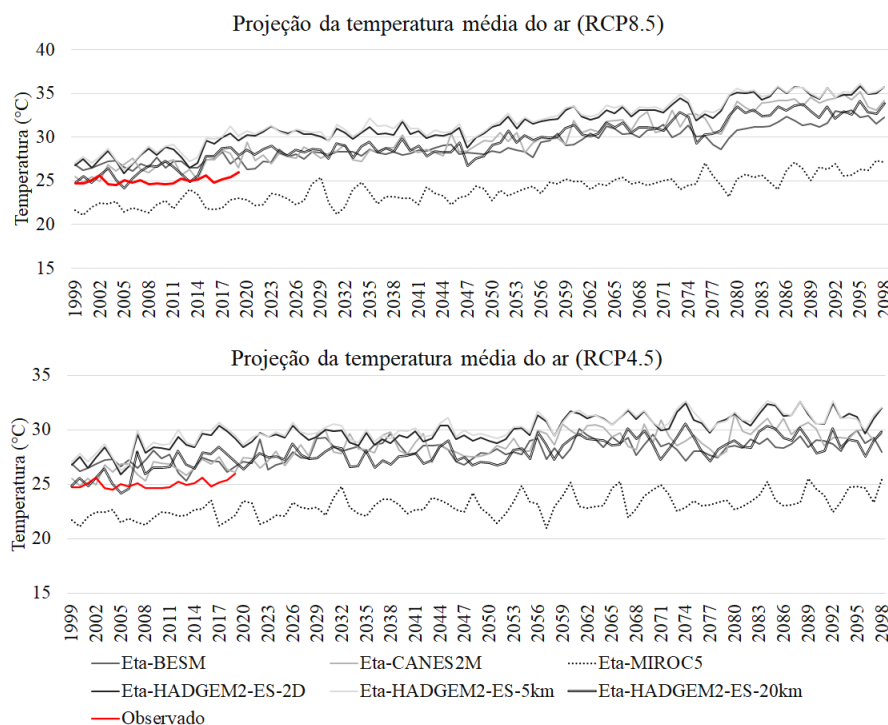
Através da Figura 28 (BH-AT) e Figura 29 (BH-SJD) pode ser observado o comportamento anual dessas projeções antes de ser realizado o ajuste dos dados. Nota-se que o Eta-MIROC5 seguido do modelo Eta-BESM são os que projetam um aumento na temperatura média do ar menos intenso em ambas as bacias hidrográficas, ao contrário do que ocorre com os modelos Eta-CANESM2, seguido do Eta-HADGEM2.

Figura 28 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-SJD

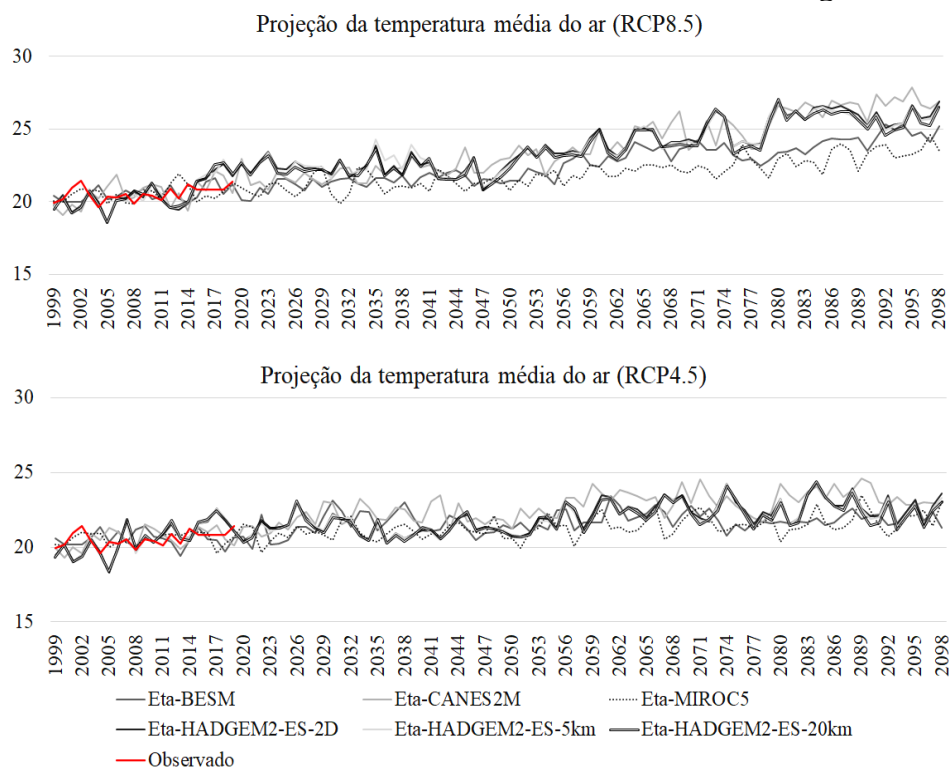


Fonte: Elaborado pela autora.

Os modelos climáticos podem apresentar grandes vieses quando comparados aos dados observados (JONG *et al.*, 2021). Segundo Jong *et al.* (2021) os modelos regionais exibem vieses e têm falhas na reprodução das variáveis interanuais detalhadas de observações históricas. Sendo assim, os dados climáticos diários passaram por um ajuste, conforme descrito na metodologia.

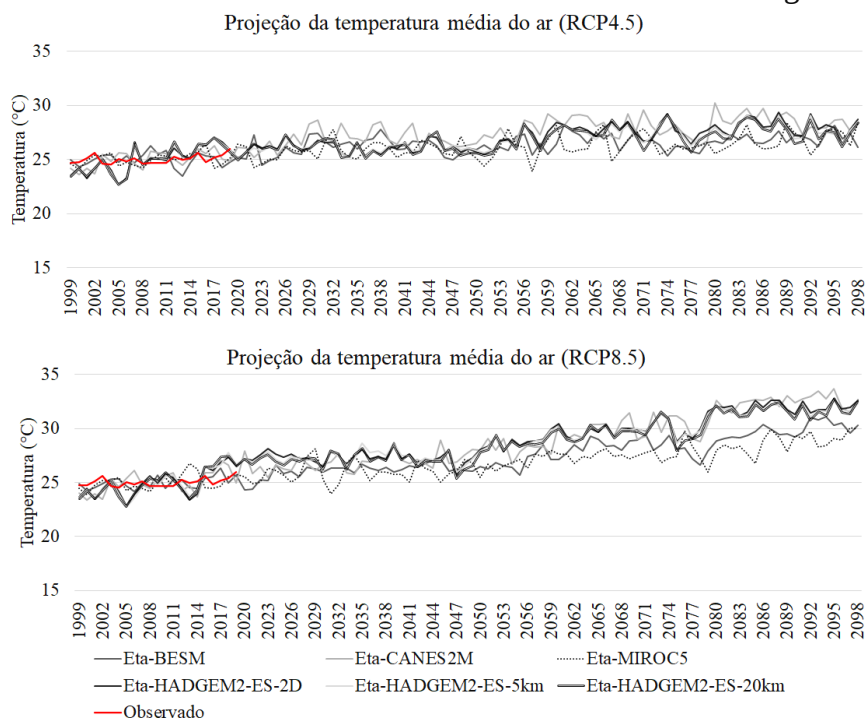
A Figura 30 mostra o resultado do ajuste das projeções da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos com os cenários de médio impacto (RCP4.5) e alto impacto (RCP8.5) comparadas com os dados observados na BH-AT. O mesmo, só que para a BH-SJD estão ilustrados na Figura 31.

Figura 30 - Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-AT corrigido.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31- Comportamento médio anual da temperatura média do ar simuladas pelos modelos climáticos sob os cenários RCP8.5 e RCP4.5 na BH-SJD corrigido.



Fonte: Elaborado pela autora.

O método de correção dos dados é fundamental para realizar o ajuste das médias mensais simuladas com as médias observadas nas bacias hidrográficas, e isso não faz alteração na projeção do aumento da temperatura média do ar. Esse comportamento também foi realizado nas demais variáveis (precipitação, umidade relativa do ar e radiação solar), sendo assim as principais características dos modelos são mantidas.

5.2.1.2 *Definição do Modelo Climático*

A correlação entre a precipitação mensal simulada por cada modelo climático e observada nas estações pluviométricas estão mostrados na Tabela 12 e 13 referentes a BH-AT e BH-SJD, respectivamente. Vale lembrar que esse indicador foi obtido a partir dos dados mensais do ponto simulado pelos modelos climáticos e do posto pluviométrico mais próximo.

Tabela 12 - Comparação entre a precipitação mensal simulada pelos modelos climáticos e observadas nas estações pluviométricas da IAG/USP e E3-085 localizadas na BH-AT

Modelos climáticos	Estação mais próxima	Correlação	
		Cenário I	Cenário II
Eta-BESM	E3-085	0,56	0,55
Eta- CANESM2	E3-085	0,65	0,67
Eta- HadGEM2-ES 20km	E3-085	0,47	0,49
Eta-MIROC5	E3-085	0,58	0,59
Eta- HadGEM2-ES D2	IAG/USP	0,50	0,47
Eta- HadGEM2-ES 5km	IAG/USP	0,49	0,47

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 - Comparação entre a precipitação mensal simulada pelos modelos climáticos e observadas nas estações pluviométricas de Marinópolis e B7-053 localizadas na BH-SJD

Modelos climáticos	Estação mais próxima	Correlação	
		Cenário I	Cenário II
Eta-BESM	B7-053	0,57	0,70
Eta- CANESM2	B7-053	0,59	0,59
Eta-MIROC5	B7-053	0,60	0,59
Eta- HadGEM2-ES - 20km	B7-053	0,58	0,58
Eta- HadGEM2-ES – D2	Marinópolis	0,51	0,45
Eta- HadGEM2-ES - 5km	Marinópolis	0,53	0,48

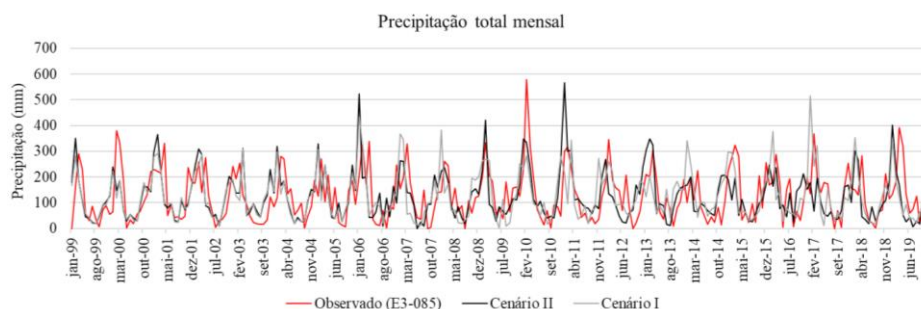
Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme mostra a Tabela 12 (referente a BH-AT) a precipitação obtida com o modelo Eta-CANESM2 e no Cenário II teve maior correlação com os dados observados (0,67), porém não difere muito do Cenário I (0,65). Por outro lado, na BH-SJD a precipitação mensal simulada pelo modelo Eta-BESM tem uma correlação de 0,7 com os dados observados na estação pluviométrica B7-053 no Cenário II, sendo a mais alta entre os modelos e cenários analisados.

Perante o exposto, essa metodologia foi aplicada utilizando os dados climáticos gerados pelos modelos regionais Eta-CANESM2 e Eta-BESM, para projeção climática na BH-AT e BH-SJD, nessa ordem.

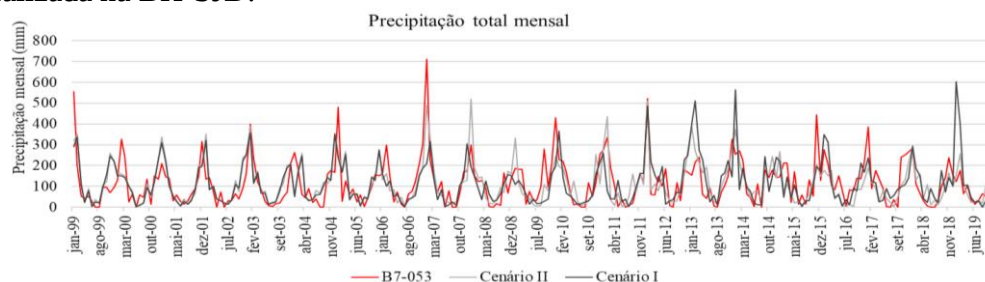
As variações mensais da precipitação simulada pelo modelo Eta-CANESM2 com influência do Cenário I e II, comparado com as variações mensais observada na estação E3-085 localizada na BH-AT, estão ilustradas na Figura 32. Por meio disso é possível ver que as precipitações simuladas acompanham bem as oscilações mensais observadas, e as médias são coincidentes devido aos ajustes dos dados. O mesmo pode ser observado na Figura 33, porém nessa é mostrado as variações mensais em relação aos dados observados na BH-SJD. Observe que os valores extremos nessa bacia hidrográfica são menos representados, do que na do Alto Tiete.

Figura 32 - Variação mensal da precipitação simulada pelo modelo Eta-CANESM2 com influência do Cenário I e II, comparado com a variação mensal observada na estação E3-085 localizada na BH-AT.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - Variação mensal da precipitação simulada pelo modelo Eta-BESM com influência do Cenário I e II, comparado com a variação mensal observada na estação E3-085 localizada na BH-SJD.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ademais, na Tabela 14 estão os valores das correlações entre as outras variáveis climáticas simuladas por esses modelos escolhidos e observadas na estação climática de cada bacia. A umidades relativa do ar e velocidade do vento tiveram correlação inferior a 0,50 em relação aos dados observados na BH-AT, então essas variáveis foram simuladas pelo modelo SWAT.

Tabela 14 - Correlação entre os dados mensais das variáveis climáticas observadas BH-AT e BH-SJD simuladas pelos modelos climáticos Eta-CANESM2 e Eta-BESM, respectivamente.

Variáveis climáticas	BH-AT		BH-SJD	
	Cenário I	Cenário II	Cenário I	Cenário II
Temperatura Máxima	0.73	0.69	0.50	0.56
Temperatura Mínima	0.89	0.87	0.88	0.89
Radiação Solar	0.81	0.82	0.69	0.70
Velocidade do Vento	0.42	0.39	0.69	0.69
Umidade do ar	0.27	0.25	0.66	0.60

Fonte: Elaborado pela autora.

Diante dos resultados mostrados, é possível notar que os mesmos não diferem demasiadamente e também lembrando que existem diversas incertezas em relação as projeções climáticas, recomendo que para aplicações mais detalhadas, ao invés de utilizar e analisar apenas um ponto das simulações dos modelos climáticos, sejam analisadas uma grade de dados, para verificar se o modelo se aplica a toda a variabilidade espacial da bacia.

5.3 RESULTADOS FINAIS

5.3.1 Eventos Extremos Meteorológicos no Período de Base

Neste tópico será discorrido sobre os resultados do Índice de Precipitação Padronizada no período base (observado). Conforme McKee; Doesken; Kleist (1993) uma seca é iniciada quando o valor do Índice de Precipitação Padronizada se torna negativo e termina quando esse valor se torna zero. Já quando se torna positivo ocorre eventos úmidos e termina quando o valor é zero. Porém valores entre -0,99 e 0,99 são considerados próximos a normalidade (MCKEE; DOESKEN; KLEIST (1993); NEVES; VILANOVA (2021)). Deste modo, nesse trabalho os eventos de seca são aqueles que estão abaixo de -0,99 e os episódios de chuvosos acima de 0,99.

Os Índice de Precipitação Padronizada calculados com base na precipitação média dos pluviômetros localizados na BH-AT no período de 2002-2019 estão ilustrados na Figura 34.

Figura 34 - Índice de seca padronizada (SPI) médio regional BH-AT para o período de 2002-2019.

Anos	V	PU	AH	Legenda
2002 - 2003	-0,8	-0,6	-1,5	■ Extremamente chuvoso
2003 - 2004	-0,7	-1,3	-0,9	■ Severamente chuvoso
2004 - 2005	-0,5	-0,2	0,0	■ Moderadamente chuvoso
2005 - 2006	1,1	0,6	-0,2	■ Normal
2006 - 2007	-1,1	-0,4	-0,7	■ Moderadamente seco
2007 - 2008	0,7	0,4	0,4	■ Severamente seco
2008 - 2009	-0,5	-0,8	0,3	■ Extremamente seco
2009 - 2010	1,3	1,9	1,5	V: Verão
2010 - 2011	0,4	0,3	-0,2	PU: Período Úmido
2011 - 2012	0,3	0,4	0,8	AH: Ano Hidrológico
2012 - 2013	0,1	0,7	0,7	
2013 - 2014	-1,7	-2,0	-2,0	
2014 - 2015	0,0	-0,9	-0,2	
2015 - 2016	0,7	1,4	1,3	
2016 - 2017	-0,1	-0,1	0,3	
2017 - 2018	-1,5	-0,8	-1,2	
2018 - 2019	2,2	1,4	1,6	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados do SPI mostram que os eventos de seca foram um pouco mais frequentes no verão e no ano hidrológico do que no período úmido (Figura 34). Também constatou, que na segunda metade da série (2010 a 2019), além de ter ocorrido o dobro de eventos de seca tanto no período úmido quanto no ano hidrológico, esses eventos também foram mais severos, comparado com a primeira metade (2002-2010).

Também, por meio da Figura 34, fica evidente a seca de 2013-2014, que ocorreu no Estado de São Paulo e, causou diversos impactos negativos no abastecimento de milhares de pessoas. Sendo o ano de 2014 o mais seco do período de 1961-2014 relatado por Garcia; Miyamoto; Maia (2018). Por outro lado, o ano de 2017, segundo os relatórios de conjuntura da ANA o norte do Estado de São Paulo também apresentou déficits de precipitação (ANA, 2018) e comportamento muito seco em 2018 nas bacias do Tietê e Grande (ANA, 2019). Apesar disso, esses episódios não atingiram a intensidade observada em 2013-2014 (Figura 34).

Por outro lado, altos níveis de chuvas podem ser observados principalmente em 2009-2010 e em 2018-2019. Também Garcia; Miyamoto; Maia (2018) relataram que o ano de 2009 foram bastante úmidos em São Paulo. Observou também, que os SPIs acima de 1 (chuvoso) dobrou no período úmido e ano hidrológico. Conforme FABHAT (2020) a média de água precipitada em 2019 foi 7,9% maior do que a média dos anos anteriores.

Assim como foram realizadas as análises dos índices na BH-AT, também foi elaborada na BH-SJD e os resultados serão mostrados a seguir. Dados os valores de SPI expostos na Figura 35, observou dois eventos de seca notáveis, o de 2003-2004 e de 2011-2012 a 2013-2014. Também, a seca severa de 2018-2019 (Figura 35), ao que tudo indica, pode ter sido o início do período de seca extrema enfrentada por essa região e que se estendeu até a Bacia do alto Tietê entre 2020 e 2021. Porém, como a série histórica desse estudo termina em dezembro de 2019, esses casos não estão mostrados.

Além disso, comparado com a primeira metade, na segunda metade da série os eventos de seca dobraram, tanto no verão dos três períodos analisados. E que os eventos chuvosos se mantiveram, salvo, no ano hidrológico que teve mais ocorrência.

Figura 35 - Índice de seca padronizada (SPI) médio regional na BH-SJD para o período de 2002-2019.

Anos	V	PU	AH	Legenda
2002 - 2003	0,4	-0,1	-0,5	■ Extremamente chuvoso
2003 - 2004	-1,0	-1,7	-2,3	■ Severamente chuvoso
2004 - 2005	0,6	0,5	0,6	■ Moderadamente chuvoso
2005 - 2006	0,5	0,4	-0,2	■ Normal
2006 - 2007	1,5	1,3	0,9	■ Moderadamente seco
2007 - 2008	0,6	-0,3	-0,9	■ Severamente seco
2008 - 2009	-0,5	-1,0	0,5	■ Extremamente seco
2009 - 2010	0,0	1,2	0,9	V: Verão
2010 - 2011	2,5	1,3	0,6	PU: Período Úmido
2011 - 2012	-1,3	-1,7	-0,4	AH: Ano Hidrológico
2012 - 2013	-0,7	-1,3	-1,2	
2013 - 2014	-0,4	-0,8	-1,0	
2014 - 2015	0,0	0,8	1,6	
2015 - 2016	-0,1	0,9	1,4	
2016 - 2017	0,1	0,0	0,2	
2017 - 2018	-0,4	1,2	0,6	
2018 - 2019	-1,8	-0,6	-0,8	

Fonte: Elaborado pela autora.

Um dos principais sistemas meteorológicos causadores de chuva durante o verão na região Sudeste do Brasil é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). Um fato importante ressaltado por Kayano *et al.* (2006) é que o El Niño pode causar alterações na intensidade da ZCAS durante o verão na região Sudeste da América do Sul. E conforme Lee e McPhaden (2010) a intensidade dos eventos El Niño no Pacífico Equatorial Central quase dobrou entre 1982 e 2010. O que é consistente com as mudanças na temperatura da superfície do mar prevista em cenários de aquecimento global (LEE; MCPHADEN, 2010).

Ao que tudo indica, esses fatores podem estar relacionados ao período moderadamente chuvoso no verão de 2009-2010, visto que, segundo Silva, Reboita, Escobar (2019), ocorreu chuvas significativas no estado de São Paulo na primeira quinzena de dezembro de 2009, que estão associadas a ZCAS. Assim, como em janeiro de 2010.

Ainda segundo Silva, Reboita, Escobar (2019) a segunda quinzena de dezembro de 2010 e meados de janeiro de 2011, ocorreram chuvas na região Sudeste do Brasil devido a ZCAS. Isso foi observado principalmente na região da BH-SJD, o que pode explicar o verão extremamente chuvoso de 2010-2011 nessa bacia hidrográfica. E por fim, Lee e McPhaden (2010) ainda relatam que o aquecimento mais forte, entre 1982-2019, no Pacífico Equatorial Central ocorreu em 2009-2010.

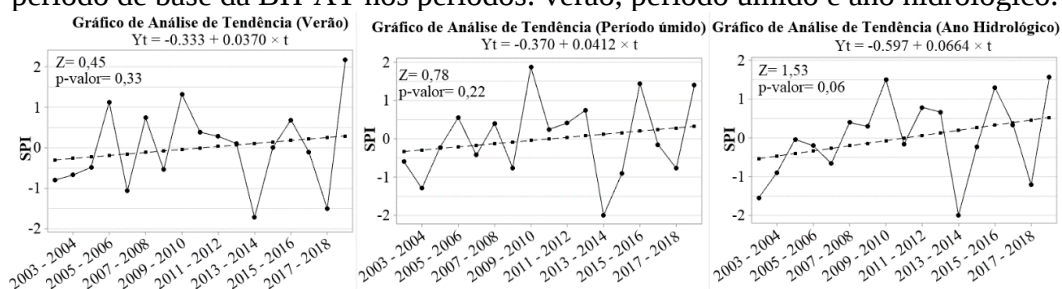
O *Oceanic Niño Index* (ONI) em 2009-2010 atingiu uma intensidade de +1,2 no verão (JFM), indicando El Niño muito forte. Que conforme os resultados na BH-AT foi um verão moderadamente chuvoso, enquanto na BH-SJD o verão encontrou-se dentro da normalidade.

Conforme exposto, a ocorrência e a intensidade dos eventos extremos estão ligadas à alteração dos fenômenos climáticos, que pode ter influência do aquecimento global. E diante do apresentado, o SPI é uma ferramenta que consegue representar tais eventos.

Outro ponto importante analisado foi as tendências do SPI. As Figura 36 e 37 mostram os gráficos de tendências do SPI na BH-AT e na BH-SJD, respectivamente, isso para os períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.

Apesar dos gráficos da BH-AT mostrarem tendência crescente nas séries de SPI, os resultados do teste de Mann Kendall na mostraram que nos três períodos não existe tendência significativa, visto que o valor de Z é menor que 1,96 e o p-valor > 0,05 (Figura 36).

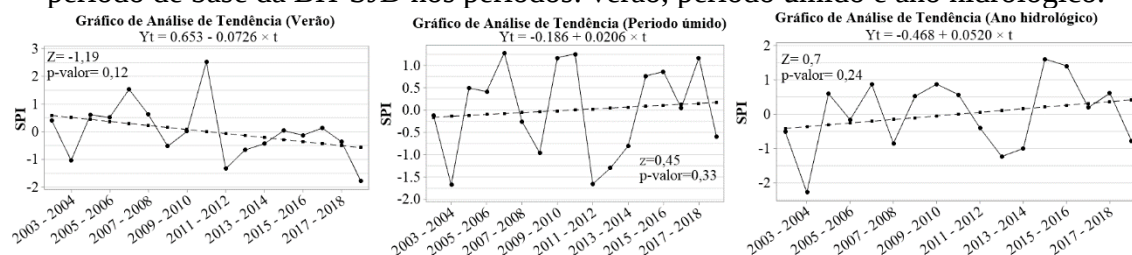
Figura 36 - Gráficos de análise de tendência do Índice de Precipitação Padronizado do período de base da BH-AT nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme a Figura 37 na BH-SJD a série do SPI-3 (verão), sugere tendência decrescente, enquanto os demais períodos indicam tendência crescente. Entretanto, não foi possível identificar tendências significativas, conforme pode ser observado pelos valores de Z e de p-valor mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Gráficos de análise de tendência do Índice de Precipitação Padronizado do período de base da BH-SJD nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante ressaltar que esse comportamento de estacionalidade provavelmente não poderá ser observado no futuro.

5.3.2 Eventos Extremos Hidrológicos no Período de Base

O SDI foi classificado conforme o SPI, sendo assim, SDI entre -0,99 e +0,99 são considerados eventos dentro da normalidade, por outro lado os episódios de seca vazões são representados por $SPI < -0,99$ e de cheia de vazões quando $SPI > +0,99$.

Na Figura 38 estão apresentados os SDIs calculados por meio da vazão do exultório da BH-AT no período de 2002-2019. Observou-se que os eventos extremos de precipitação, impactou na vazão observada. O R^2 entre os SPI e SDI da BH-AT foram superiores a 0,7 nos três períodos analisados (V, PU e AH).

Figura 38 - Índice de Seca de Vazões do exultório da BH-AT para o período de 2002-2019.

Anos	V	PU	AH	Legenda
2002 - 2003	-1,1	-0,9	-1,3	■ Extremamente Cheio
2003 - 2004	-1,4	-1,8	-1,5	■ Severamente Cheio
2004 - 2005	-0,6	-0,5	-0,4	■ Moderadamente Cheio
2005 - 2006	0,5	0,4	0,2	■ Normal
2006 - 2007	-0,3	0,0	-0,2	■ Moderadamente seco
2007 - 2008	0,5	0,3	0,4	■ Severamente seco
2008 - 2009	-0,4	-0,3	0,0	■ Extremamente seco
2009 - 2010	2,1	2,2	1,9	V: Verão
2010 - 2011	1,2	1,1	0,8	PU: Período Úmido
2011 - 2012	0,2	0,5	0,8	AH: Ano Hidrológico
2012 - 2013	0,5	0,7	0,7	
2013 - 2014	-1,5	-1,1	-1,5	
2014 - 2015	-1,0	-1,7	-1,6	
2015 - 2016	0,6	0,8	0,9	
2016 - 2017	0,4	0,2	0,6	
2017 - 2018	-1,1	-0,4	-0,5	
2018 - 2019	1,3	0,8	1,0	

Fonte: Elaborado pela autora.

Pela Figura 38 fica evidente não só a crise hídrica relatada por Coelho *et al.* (2016) no verão de 2014 na BH-AT, mas também nos demais períodos. Enquanto isso, nessa mesma bacia, aparentemente os eventos chuvosos, tem impacto quase que direto na cheia. Isso pode estar relacionado, principalmente, com o uso e a ocupação da mesma, pois essa bacia tem grandes áreas impermeabilizadas, o que reduz a infiltração e, consequentemente aumenta o escoamento superficial. Entretanto outros fatores possuem relação com a vazão do rio, por exemplo condição da vegetação de cobrir o solo, condição da calha do rio e a própria umidade do solo.

A Figura 39 mostra os SDIs calculados por meio da vazão do exultório da BH-SJD no período de 2002-2019. Nessa bacia hidrográfica o coeficiente de determinação entre SPI e SDI é menor que na BH-AT. No verão o R^2 foi de 0,5, já no período úmido e ano hidrológico de 0,7 e 0,4, nessa ordem. David e Davidová (2017) fizeram a comparação do SDI com o SPI em uma bacia cujo uso da terra era destinado principalmente para agricultura, assim como na BH-SJD, e também chegaram em resultados que indicam correlação maior entre esses dois índices para escalas de tempo de 3 e 6 meses.

Figura 39 - Índice de Seca de Vazões do exultório da BH-SJD para o período de 2002-2019.

Anos	V	PU	AH	Legenda
2002 - 2003	-1,0	-1,3	-1,7	■ Extremamente Cheio
2003 - 2004	-1,6	-2,0	-2,3	■ Severamente Cheio
2004 - 2005	0,3	-0,3	-0,7	■ Moderadamente Cheio
2005 - 2006	0,1	0,0	-0,5	■ Normal
2006 - 2007	1,4	0,7	0,2	■ Moderadamente seco
2007 - 2008	0,1	-0,5	-0,6	■ Severamente seco
2008 - 2009	-1,3	-1,4	-0,7	■ Extremamente seco
2009 - 2010	0,3	0,8	0,6	V: Verão
2010 - 2011	1,8	0,9	0,7	PU: Período Úmido
2011 - 2012	-1,2	-1,0	-0,2	AH: Ano Hidrológico
2012 - 2013	-1,0	-0,5	-0,2	
2013 - 2014	-0,2	-0,2	0,0	
2014 - 2015	0,0	0,8	0,9	
2015 - 2016	1,1	1,3	1,3	
2016 - 2017	0,5	0,5	0,9	
2017 - 2018	1,4	1,7	1,5	
2018 - 2019	-0,7	0,5	0,8	

Fonte: Elaborado pela autora.

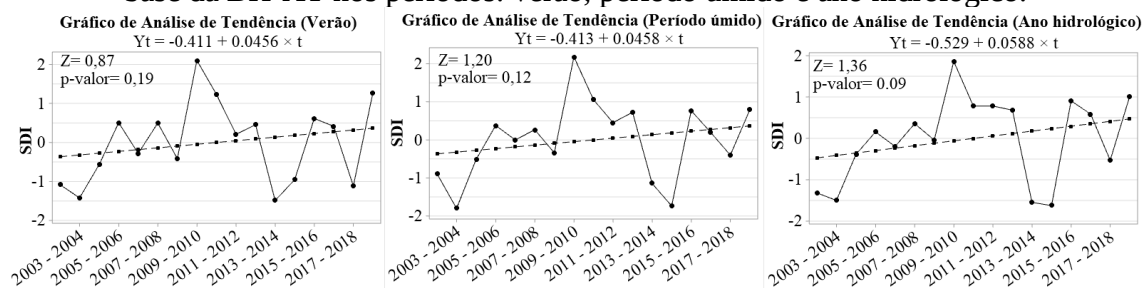
Como a BH-SJD é predominantemente rural, maior é a infiltração e interceptação da água precipitada, o que pode ter impactado diretamente no tempo de resposta da mesma, e consequentemente reduzir a correlação entre os índices SPI e SDI.

Os gráficos de tendência do Índice de Seca de Vazões e os resultados do teste de significância da BH-AT e BH-SJD estão ilustrados nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

O teste de Mann-Kendall não confirmou tendências significativas na BH-AT, isso nos três períodos analisados (verão, período úmido e ano hidrológico).

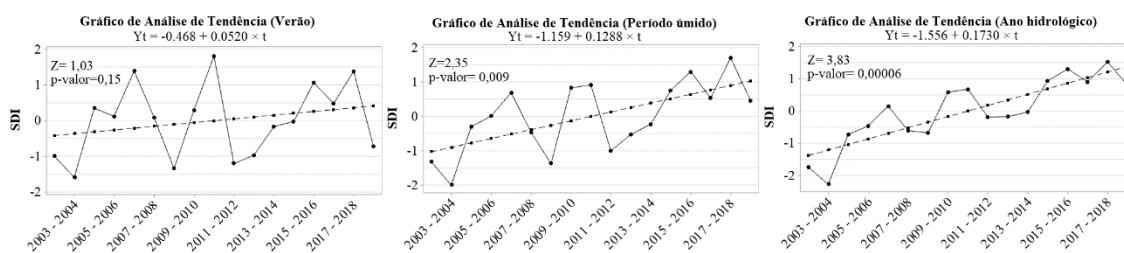
Entretanto, conforme ilustrado na Figura 41, na BH-SJD os resultados do teste provaram tendência crescente no período úmido (Z de 2,35 e p -valor de 0,009) e no ano hidrológico ($Z=3,83$ e p -valor= 0,00006).

Figura 40 – Gráficos de análise de tendência do índice de seca de vazões do período de base da BH-AT nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 - Gráficos de análise de tendência do índice de seca de vazões do período de base da BH-SJD nos períodos: verão, período úmido e ano hidrológico.



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante ressaltar que entre 2020 e 2021, principalmente a região da BH-SJD sofreu com períodos de secas extremas e causou crise hídrica na região. Fato que pode alterar significativamente essas tendências no SPI e SDI aqui mostradas.

5.3.3 Eventos Extremos em Cenários Futuros

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes aos eventos extremos nos cenários futuros. Vale ressaltar que devido a utilização de apenas um modelo climático os resultados podem não representar a realidade futura nas bacias hidrográficas. Deste modo, serviram de protótipo, o qual mostrará alguns tipos de análises, que podem ser realizadas com os resultados gerados a partir dessa metodologia.

Sabe-se que o foco foi a análise de ciclos predeterminados (verão, período úmido e ano hidrológico), que foram estrategicamente escolhidos, conforme mencionado na

metodologia. Cada um desses ciclos foi analisado separadamente, e comparado Cenário I (RCP4.5) com o Cenário II (RCP8.5). E as “janelas de tempo” ou também chamadas aqui de “horizontes de tempo” analisadas foram o Período base (B), Período de curto prazo (C), Período de médio prazo (M) e Período de longo prazo (L), conforme mostra o Quadro 8.

Quadro 8 - Descrição dos horizontes de tempo

Horizontes de tempo	Série	Abreviação
Período de Base	2002-2019	B
Curto prazo	2034-2051	C
Médio Prazo	2058-2075	M
Longo Prazo	2082-2099	L

Fonte: Elaborado pela autora.

Outro ponto analisado foram as tendências, para melhor visualização temporal dos dados e também para auxiliar na comparação entre os horizontes de tempo e também entre o Cenário I e II.

5.3.3.1 *Estudo de Caso da BH-AT*

5.3.3.1.1 *Eventos Extremos Meteorológicos*

A Figura 42 mostra os SPIs dos anos hidrológicos gerados com o Cenário I e II, para as quatro janelas de tempo: B, C, M e L. Por meio dessa figura pode ser realizada uma comparação visual instantânea entre os resultados de cada período. Nela o início de cada período começa em “início” e termina em “Fim”, conforme ilustrado.

Foi constatado que com o Cenário I a intensidade média dos eventos de seca moderada teve um pequeno aumento no C e L, comparado com o B. Ainda conforme a Figura 42 os eventos desse tipo de seca triplicaram no L.

Ainda analisando o Cenário I, notou eventos extremamente chuvosos no C e L, que não ocorreram no B. Os episódios moderadamente chuvosos tiveram uma pequena redução na intensidade nos três períodos futuros.

Figura 42 - Comparação entre o SPI no Ano Hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.

	B	Cenário I			Cenário II		
		C	M	L	C	M	L
Início	-1.5	-0.4	-1.7	-0.4	0.5	0.9	1.6
	-0.9	0.6	1.7	-0.3	0.5	-0.6	-0.6
	0.0	0.0	1.1	0.4	0.4	1.0	1.7
	-0.2	1.1	-0.9	0.2	0.1	0.2	-0.4
	-0.7	-0.8	0.6	-1.2	-0.9	1.2	-1.4
	0.4	0.2	-0.1	0.1	-1.0	0.2	0.9
	0.3	-1.4	-0.7	0.7	-0.2	-1.2	0.1
	1.5	0.0	-0.7	-0.9	1.5	-0.9	0.9
	-0.2	-1.6	1.1	-1.3	-0.4	0.3	-1.3
	0.8	-0.9	-0.3	-1.4	0.6	0.7	-0.5
	0.7	-1.5	-0.7	0.9	-2.4	-2.9	-0.3
	-2.0	0.6	-0.3	1.2	-0.1	-0.3	-1.2
	-0.2	2.1	-1.8	-0.3	1.9	0.9	0.0
	1.3	0.5	0.9	-0.6	0.8	1.0	0.3
	0.3	-0.1	0.2	-0.6	0.5	0.3	-1.3
	-1.2	1.0	0.3	1.1	-1.0	-0.2	-0.2
Fim	1.6	0.8	1.4	2.4	-0.7	-0.2	1.6

Legenda

B- Período base

C- Período de curto prazo

M-Período de médio prazo

L- Período de longo prazo

Extremamente chuvoso

Severamente chuvoso

Moderadamente chuvoso

Normal

Moderadamente seco

Severamente seco

Extremamente Seco

Fonte: Elaborado pela autora.

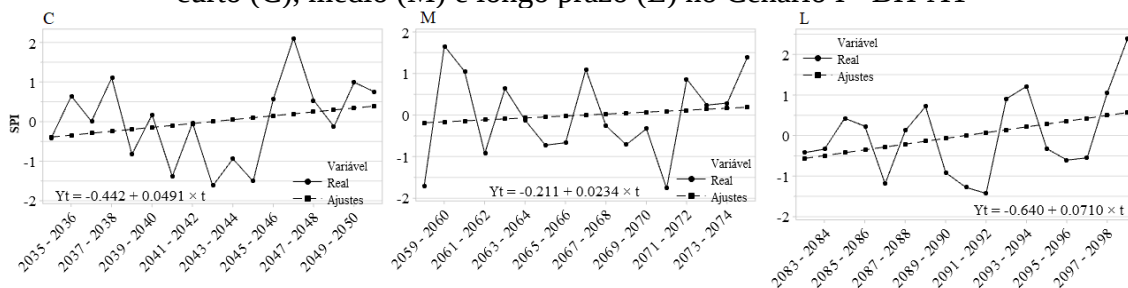
No Cenário II (Figura 42) os resultados mostraram ocorrência de eventos extremamente secos, tanto no C quanto no M, eventos esses não observados no B, tornando esses períodos bastante vulnerável, podendo vir a causar diversos tipos de danos para a sociedade.

Além disso, no L observou-se aumento na intensidade dos eventos de chuvosos, visto que, os eventos moderadamente chuvosos diminuíram, mas os episódios severamente chuvosos deram um leve aumento. Por outro lado, as secas moderadas quadruplicaram, e as intensidades tiveram um ligeiro acréscimo, o que indica aumento da frequência de secas moderadas e da ocorrência de eventos muito chuvosos no período de longo prazo.

Em suma, percebe-se maior presença de eventos moderadamente secos e muito chuvosos no Cenário II e no Cenário I severamente secos e moderadamente chuvosos.

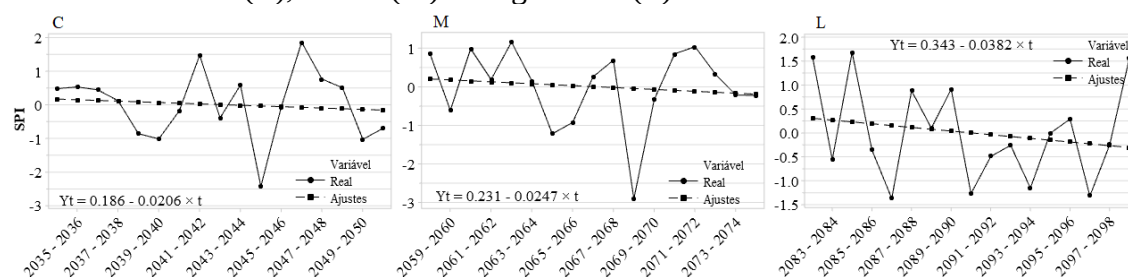
A Figura 43 mostra os gráficos de tendência do SPI nos anos hidrológicos dos períodos de curto, médio e longo prazo no Cenário I. E a Figura 44 ilustra os gráficos de tendência do Cenário II. A comparação entre os dois cenários mostrou que os mesmos, aparentemente, apresentam caminhos opostos. Entretanto, apesar das linhas de tendência estarem ascendente no Cenário I e decrescente no Cenário II nos três períodos, os resultados não confirmaram tendência significativa, ou seja, em todos os casos o p-valor é maior que 0,05.

Figura 43 - Gráficos de análise de tendência do SPI no ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 - Gráficos de análise de tendência do SPI no ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT

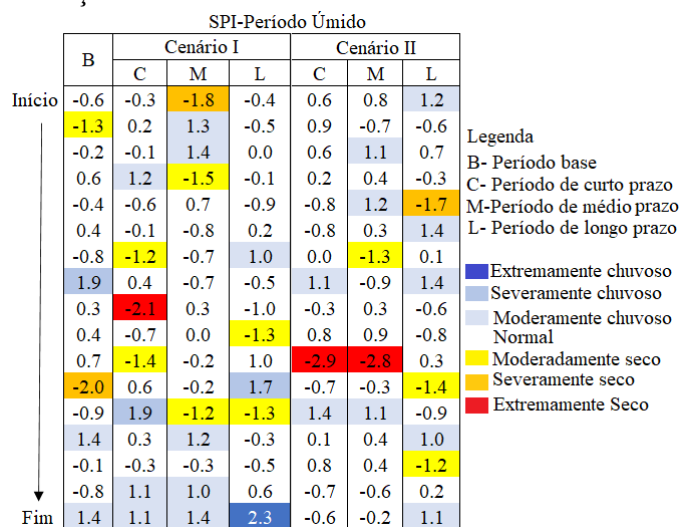


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 45 mostra os SPIs no período úmido gerados com o Cenário I e II, para as quatro janelas de tempo. No primeiro cenário os resultados mostraram aumento na ocorrência dos eventos moderadamente chuvosos, porém com uma menor intensidade (média) comparando o período base com os três horizontes de tempo futuros. O número de episódio severamente chuvoso manteve-se, assim como a intensidade média, salvo no M. No cenário I, não foi observado mudanças significativas na intensidade dos eventos moderadamente secos, mas sim na ocorrência.

No Cenário II, em geral, observou aumento dos eventos moderadamente chuvosos, principalmente no L (2,5vezes maior que no B). Tanto no Cenário I quanto no Cenário II observou a ocorrência de eventos extremamente secos no C, e no último também no M.

Figura 45 - Comparação entre o SPI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos de tendência do SPI dos períodos úmidos nos períodos de curto, médio e longo prazo no Cenário I e II estão ilustrados na Figura 46 e 47, respectivamente. Nos três períodos não foi constatado tendências significativas.

Figura 46 - Gráficos de análise de tendência do SPI no período úmido nos períodos de Curto (C), Médio (M) e Longo Prazo (L) no Cenário I - BH-AT

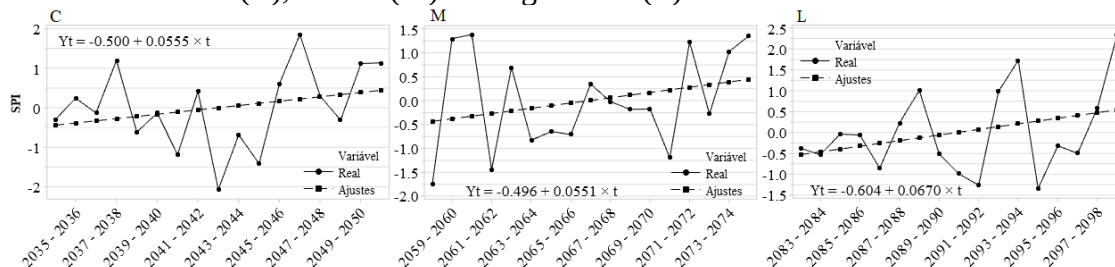
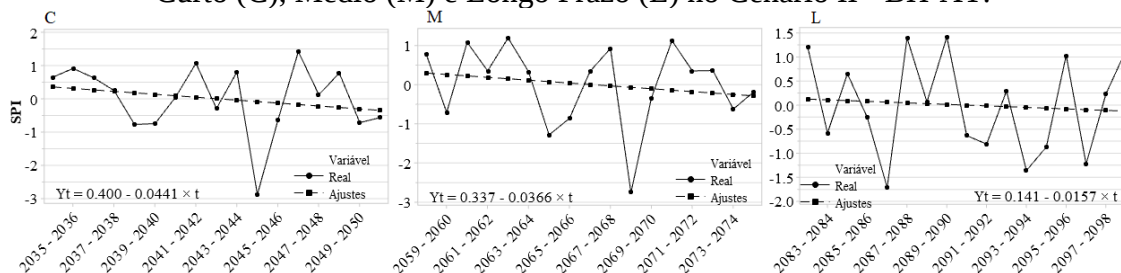


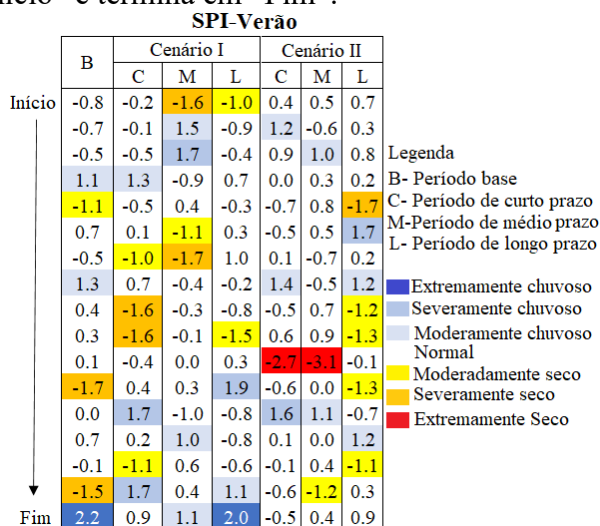
Figura 47 - Gráficos de análise de tendência do SPI no período úmido nos períodos de Curto (C), Médio (M) e Longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT.



A Figura 48 mostra os SPIs no verão do Cenário I e II, para as quatro janelas de tempo. No Cenário I observou-se verões severamente chuvosos, principalmente no C, não observados no Período de Base. Já os eventos extremamente chuvosos, no geral, ocorreram menos e com menor intensidade. Por outro lado, observou um pequeno aumento na ocorrência dos eventos de seca no C, e posteriormente redução até o longo prazo. A ocorrência de verões moderadamente secos duplicou no C e L, porém a intensidade média desses eventos manteve-se, salvo em L, que ocorreu um leve incremento.

No Cenário II, os eventos extremamente secos (no C e M) também estão presentes no verão, assim como esteve no período úmido e ano hidrológico já mostrado. Nesse cenário e no horizonte de tempo L, também foi observado que os eventos moderadamente secos quadruplicaram com relação ao B, e houve um ligeiro aumento na intensidade desses eventos nos C e L. Ademais, os resultados mostram maior ocorrência de eventos chuvosos no curto prazo, do que de secas. Já no L observe-se o oposto.

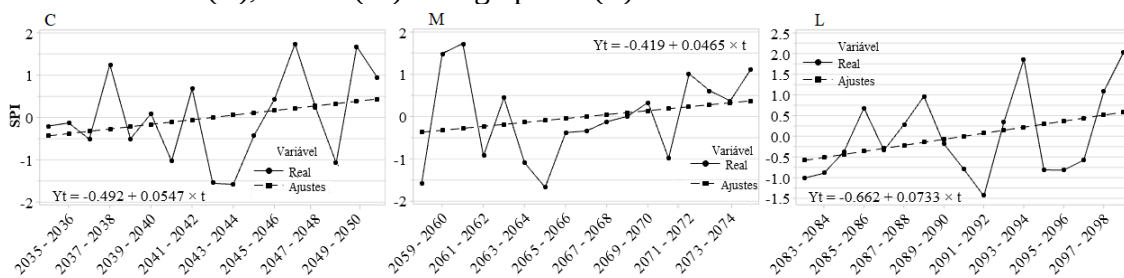
Figura 48 - Comparação entre o SPI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



Fonte: Elaborado pela autora.

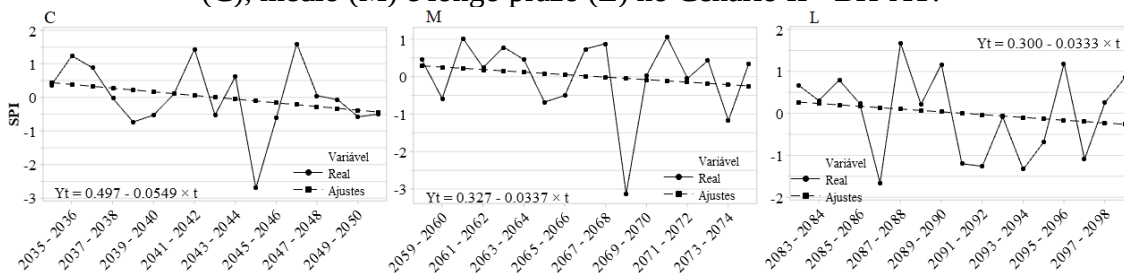
Os gráficos de tendência do SPI no verão do C, M e L no Cenário I e II estão ilustrados na Figura 49 e 50, respectivamente. Nos três períodos não foram constatadas tendências significativas, sendo as retas mais acentuadas no período de médio e longo prazo no Cenário I e no Cenário II no Curto Prazo.

Figura 49 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 50 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-AT.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3.1.2 Eventos extremos hidrológicos

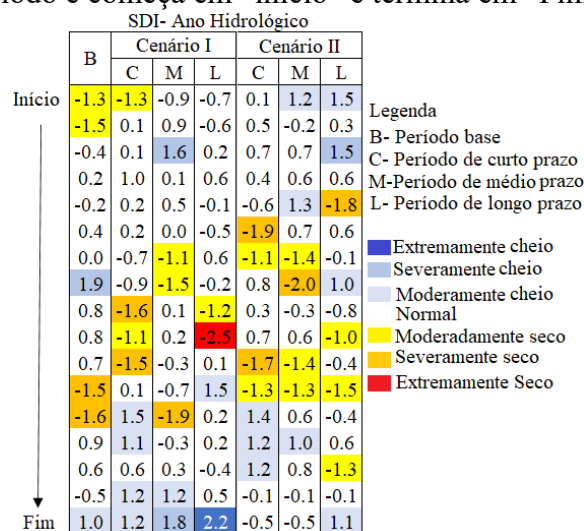
A comparação dos índices de seca no ano hidrológico gerado com o Cenário I e II, para os horizontes de tempo B, C, M e L está mostrada na Figura 51. No Cenário I a ocorrência de eventos moderadamente cheios quadruplicou no C comparado com o B, estando eles concentrados principalmente no final do período.

Também nota-se que as cheias moderadas foram mais intensas nas três janelas de tempo projetadas. Além disso, observa-se no período de longo prazo, que apesar da ocorrência dos eventos de seca e cheia ser menor, eles foram mais intensos, como não visto nos períodos anteriores (Figura 51). No geral, no cenário I observou aumento da ocorrência de cheia no C e M, e redução dos eventos de seca no M e L.

No Cenário II, a ocorrência de eventos moderadamente cheios triplicou nos três horizontes de tempo projetados comparados com o B, e também observou aumento na intensidade desses eventos. Ademais, notou-se aumentos sucessivos da ocorrência de eventos moderadamente secos no C, M e L, porém com menor intensidade, exceto no M, que observou a presença de um evento extremamente seco. Outro ponto importante

observado na Figura 51, é que os eventos severamente secos foram de maior intensidade nos períodos projetados do que no período base (aproximadamente 13% no C e 11% no L).

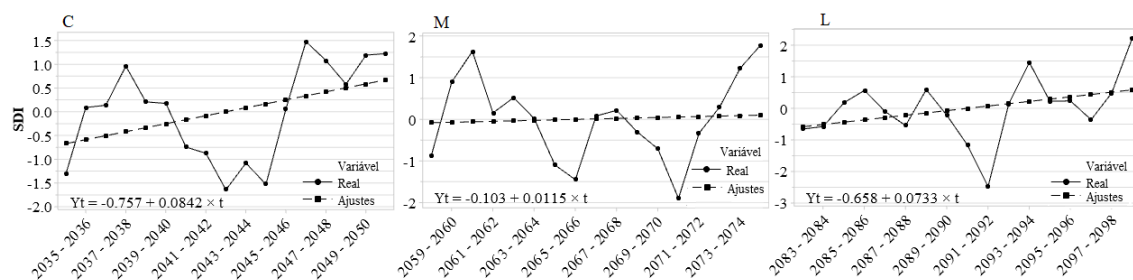
Figura 51 - Comparação entre o SDI no ano hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



Fonte: Elaborado pela autora.

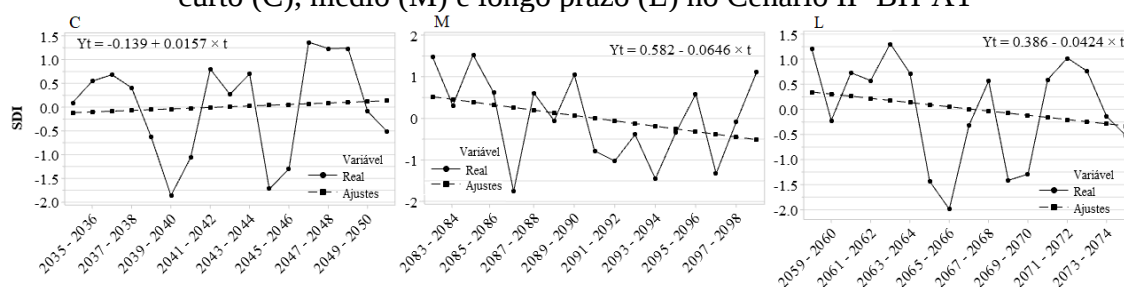
A Figura 52 ilustra os gráficos de tendência do SDI no ano hidrológico do período de curto, médio e longo prazo no Cenário I. E a Figura 53 mostra os gráficos de tendência do Cenário II. O método de Mann Kendall comprovou tendência crescente significativa (p-valor =0,045) somente no período de longo prazo no Cenário I, indicando possível tendência de cheias nos períodos úmidos à longo prazo.

Figura 52 - Gráficos de análise de tendência do SDI no ano hidrológico do período de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 53 - Gráficos de análise de tendência do SDI no ano hidrológico do período de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II- BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 54 mostra a comparação do SDI no período úmido gerados com o Cenário I e II, para os horizontes de tempo B, C, M e L.

No Cenário I e horizonte C os eventos de cheia moderada quadruplicaram e a intensidade foram um pouco maior do que no B. No médio prazo observou a ocorrência de eventos de cheias acentuadas (muito cheio) não observadas no B.

Ainda no Cenário I, porém analisando os eventos de seca, constatou-se aumento na intensidade dos episódios moderadamente secos no C (5%) e M (29%) em comparação com o B. Também observou diminuição sucessiva dos casos severamente secos nos três horizontes de tempo projetados. Ademais, no L os eventos de cheia e secas foram os mais intensos, porém com ocorrência menor dos quatro períodos analisados.

Por outro lado, no Cenário II os resultados (Figura 54) indicaram acréscimo da ocorrência e intensidade média das cheias moderadas no C, M e L. A maior intensidade foi observada em M, que resultou num aumento de aproximadamente 24% na intensidade média comparado com o B. Por outro lado, o pico de ocorrência desses eventos foi no L (3 vezes maior que no B).

Ainda no Cenário II, percebeu-se que os eventos moderadamente secos aumentaram, principalmente no L (3 vezes mais que no B), como também as suas intensidades, porém o pico de intensidade ocorreu em M (11% maior que no B). E no curto prazo a ocorrência predominante foi de casos severamente secos. Em resumo, foi observado mais ocorrência de eventos de seca nos períodos projetados, do que de cheias.

Figura 54 - Comparação entre o SDI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.

SDI - Período úmido

	B	Cenário I			Cenário II		
		C	M	L	C	M	L
Início	-0.9	-1.4	-0.7	-0.7	0.2	1.3	1.2
	-1.8	0.1	0.5	-0.7	0.8	-0.2	0.4
	-0.5	0.1	1.8	-0.2	0.8	0.8	0.3
	0.4	0.9	-0.1	0.3	0.4	0.7	0.7
	0.0	0.3	0.7	0.2	-0.7	1.4	-1.8
	0.3	0.1	-0.3	-0.5	-1.7	0.7	1.1
	-0.3	-0.6	-0.9	0.7	-1.0	-1.3	0.1
	2.2	-0.8	-1.5	0.0	0.5	-2.0	1.5
	1.1	-1.7	-0.5	-1.0	0.4	-0.2	-0.3
	0.5	-1.0	0.1	-2.4	0.8	0.6	-1.1
	0.7	-1.6	-0.1	0.1	-1.7	-1.6	0.1
	-1.1	0.1	-0.4	1.8	-1.7	-1.2	-1.5
	-1.7	1.3	-1.8	-0.2	1.2	0.8	-1.1
	0.8	1.0	-0.2	0.4	0.9	0.4	1.0
	0.2	0.4	-0.2	-0.4	1.4	0.7	-1.4
	-0.4	1.3	1.6	0.2	-0.1	-0.4	0.3
Fim	0.8	1.4	1.8	2.2	-0.4	-0.5	0.7

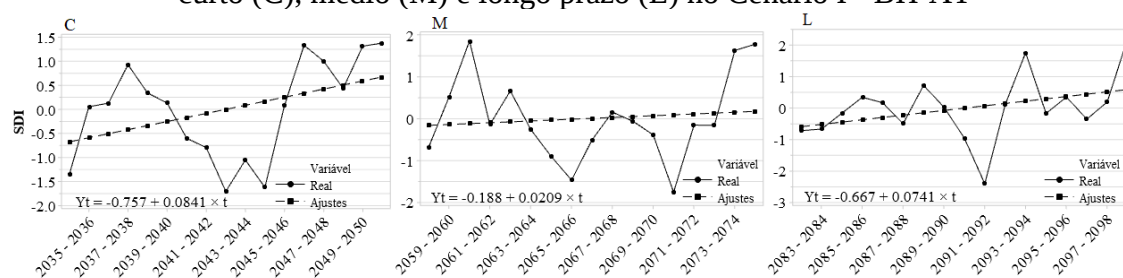
Legenda
 B- Período base
 C- Período de curto prazo
 M- Período de médio prazo
 L- Período de longo prazo

Extremamente cheio
 Severamente cheio
 Moderadamente cheio
 Normal
 Moderadamente seco
 Severamente seco
 Extremamente Seco

Fonte: Elaborado pela autora.

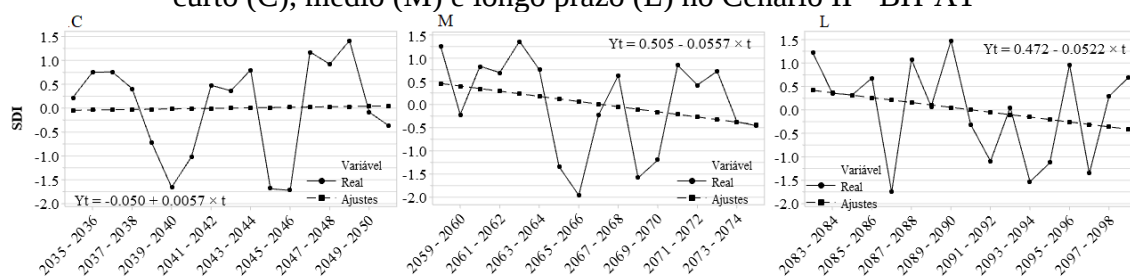
Os gráficos de tendência do SDI do período úmido no C, M e L do Cenário I e II estão ilustrados na Figura 55 e 56, respectivamente. O Cenário I apresenta tendências crescente significativa no C, que indica início seco e fim chuvoso nesse período. Por outro lado, nos demais períodos e no Cenário II não houve inclinações significativas comprovadas.

Figura 55 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 56 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 57 mostra a comparação do SDI no verão gerado com o Cenário I e II, para os horizontes de tempo B, C, M e L. No cenário I os resultados sugerem ligeira redução na intensidade dos eventos de cheias extremas e moderadas, assim como na ocorrência e intensidade das secas moderada. Notou-se presença de eventos de seca extrema no L e severa no C e M, não observadas no período base.

No Cenário II os eventos moderadamente cheios aumentaram no M e L, porém com menos intensidade que no B. No geral as intensidades médias dos eventos de moderadamente secos oscilaram entre os horizontes de tempo analisados, mas o pico foi observado no curto prazo. Também pode ser observado pela Figura 57 a ocorrência de eventos extremamente secos no C e L.

Figura 57 - Comparação entre o SDI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-AT. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.

		SDI - Verão						
		B	Cenário I			Cenário II		
			C	M	L	C	M	L
Início ↓ <								

Legenda

B- Período base

C- Período de curto prazo

M-Período de médio prazo

L- Período de longo prazo

Extremamente cheio

Severamente cheio

Moderadamente cheio

Normal

Moderadamente seco

Severamente seco

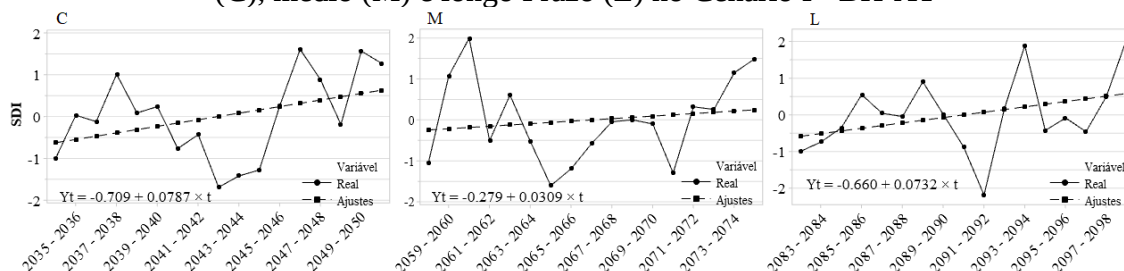
Extremamente Seco

Fonte: Elaborado pela autora.

Em geral a quantidade de eventos de cheia e seca não mudou, o que alterou foi a classificação desses eventos que dependem da intensidade.

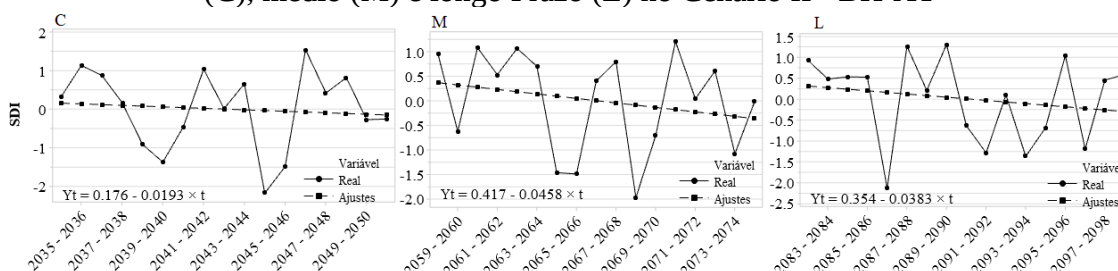
Os gráficos de tendência do SDI do verão nos três horizontes de tempo, do Cenário I e II estão ilustrados na Figura 58 e 59, nessa ordem. Não foram comprovadas tendências significativas no SDI dos verões nos dois cenários.

Figura 58 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário I - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo Prazo (L) no Cenário II - BH-AT



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3.2 Estudo de Caso da BH-SJD

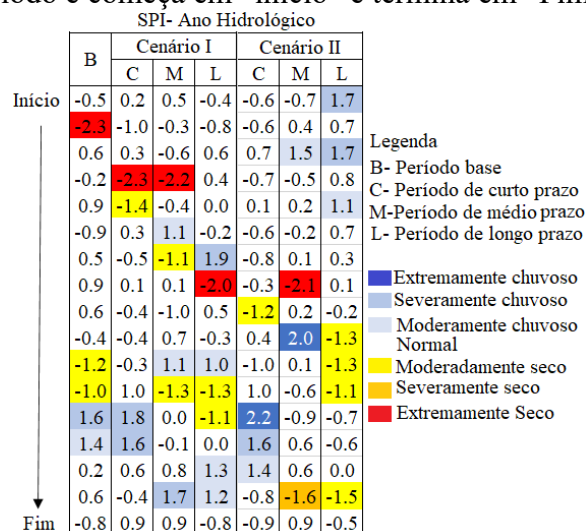
5.3.3.2.1 *Eventos extremos meteorológicos*

A comparação do SPI no ano hidrológico gerada com o Cenário I e II, para os horizontes de tempo B, C, M e L, está ilustrada na Figura 60.

Os resultados mostraram que houveram mudanças principalmente na intensidade dos eventos no Cenário I. Nesse cenário a intensidade dos eventos extremamente secos reduziram nos três períodos projetados, sendo maior no L (13%). Por outro lado, a intensidade dos eventos moderadamente secos aumentou no C 27% com parado com o B, e voltou a reduzir no M. A intensidade dos eventos severamente chuvosos aumentou

gradativamente pelas janelas de tempo com o máximo no L (18%), e a ocorrência triplicou nesse mesmo período. No geral os eventos de cheia aumentaram no horizonte de tempo de longo prazo.

Figura 60 - Comparação entre o SPI no Ano Hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



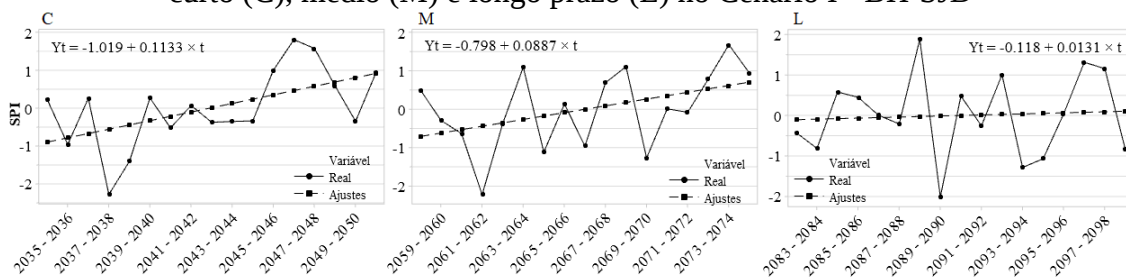
Fonte: Elaborado pela autora.

No Cenário II a ocorrência das secas está majoritariamente localizada no fim dos períodos analisados, assim como os eventos chuvosos de maior intensidade, conforme mostra a Figura 60. Nesse cenário observou-se redução da ocorrência e intensidade dos casos extremamente secos nos períodos futuros, comparados com o período base. Entretanto, foi constatado o dobro de anos hidrológicos moderadamente secos e severamente chuvosos no L comparado com o B. Também a intensidade dos eventos moderadamente secos aumentou (18%) e a intensidade dos eventos modernamente chuvosos reduziu cerca de 21% no L.

As Figuras 61 e 62 mostram as tendências dos Índices de Precipitação Padronizada no ano hidrológico dos três horizontes de tempo futuros (curto, médio e longo prazo), gerados pelo Cenário I e II, respectivamente. Nos resultados do Cenário I foi confirmado tendência crescente significativa somente no curto prazo (p-valor =0,01). Já no Cenário II, as retas de tendencia mostram comportamentos diferentes entre os períodos, no C a tendência é crescente, no M de estabilização, e por fim, no L decrescente. Sendo

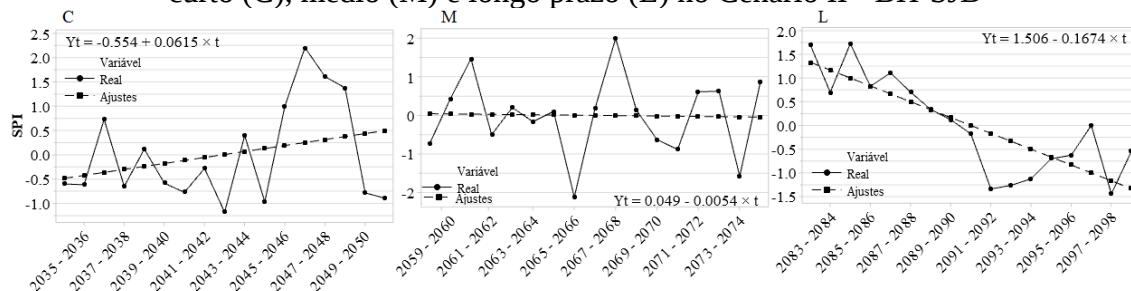
comprovada tendência significativo somente último período, em que o p-valor é de 0,001, o que prenuncia forte tendência de redução da precipitação.

Figura 61 - Gráficos de análise de tendência do SPI no hidrológico dos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 62 - Gráficos de análise de tendência do SPI no hidrológico dos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 63 apresenta a comparação do SPI no período úmido gerado com o Cenário I e II, para os horizontes de tempo B, C, M e L. Por meio dessa figura é possível observar que no Cenário I o número de eventos moderadamente chuvosos reduziu no C e L, porém a intensidade deles foram um pouco maiores do que B (cerca de 13%). Também observou a ocorrência de eventos severamente chuvosos tanto no C quanto no L, e por fim, um período úmido extremamente seco pode ser observado no curto prazo, tais eventos inexistentes no B.

No Cenário II nota-se a redução da ocorrência dos episódios moderadamente chuvosos nos três horizontes de tempo, entretanto, tais episódios foram ligeiramente mais intensos. Além disso, no C e M foram observados eventos extremamente chuvosos, e ainda casos muitos chuvosos no M e L, ausentes no B. Sugerindo aumento na intensidade dos eventos chuvosos. Também no médio e longo prazo, foi constatado também incremento nos eventos moderadamente secos e redução dos severamente secos. Em suma, os

resultados indicam redução na intensidade dos eventos de seca ao longo dos períodos de tempo estudados.

Figura 63 - Comparação entre o SPI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.

	B	Cenário I			Cenário II		
		C	M	L	C	M	L
Início	-0.1	0.5	1.2	0.8	-0.8	-0.9	1.4
	-1.7	-1.1	0.1	-1.2	-0.5	0.7	0.8
	0.5	-0.1	-0.6	-0.8	1.0	1.7	1.8
	0.4	-2.2	-2.0	0.3	-0.7	-0.6	0.6
	1.3	-1.4	-0.7	1.5	0.3	-0.8	1.0
	-0.3	0.1	0.4	0.2	-0.5	-0.5	1.2
	-1.0	-0.3	-1.7	0.6	-0.7	0.1	0.4
	1.2	-0.3	0.4	-1.4	0.1	-1.5	0.3
	1.3	-0.6	-1.0	1.3	-1.6	0.0	-0.8
	-1.7	-0.4	0.3	-0.4	0.2	2.2	-1.4
	-1.3	-0.3	1.3	1.6	-0.7	0.1	-1.2
	-0.8	0.6	-0.9	-1.1	0.6	-0.6	-1.3
	0.8	1.4	0.0	-1.7	2.3	-0.5	-0.7
	0.9	1.7	0.1	-0.8	1.4	1.3	-0.7
	0.0	0.8	0.3	0.4	1.2	0.0	0.1
	1.2	0.3	1.3	0.7	-1.2	-1.4	-0.9
Fim	-0.6	1.4	1.5	0.1	-0.4	0.7	-0.3

Legenda

B- Período base

C- Período de curto prazo

M- Período de médio prazo

L- Período de longo prazo

Extremamente chuvoso

Severamente chuvoso

Moderadamente chuvoso

Normal

Moderadamente seco

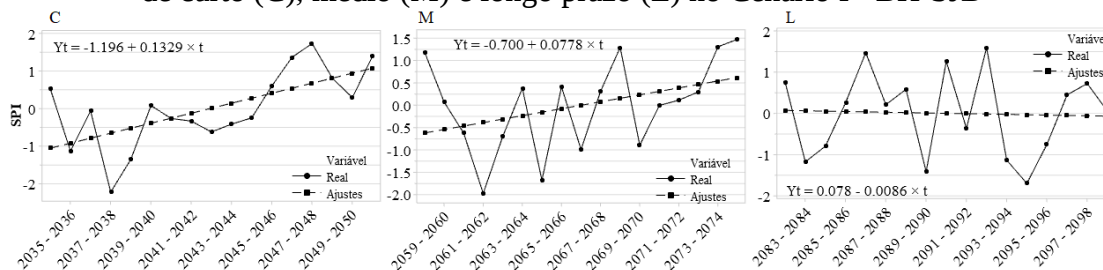
Severamente seco

Extremamente Seco

Fonte: Elaborado pela autora.

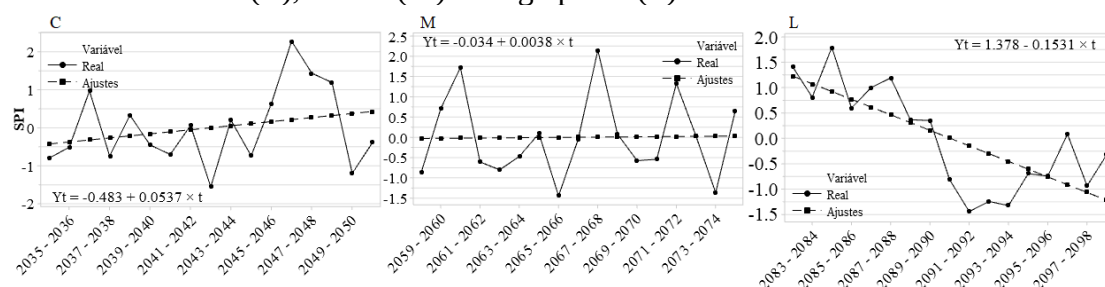
As Figuras 64 e 65 mostram as tendências do SPI no período úmido dos três horizontes de tempo futuros gerados pelo Cenário I e II, respectivamente. O mesmo comportamento observado nas tendências de SPI no ano hidrológico, também ocorreu no período úmido, com tendência crescente significativa no curto prazo do Cenário I e decrescente significativa no longo prazo do cenário II.

Figura 64 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 65 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação entre o SPI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II estão mostrados na Figura 66.

Figura 66 - Comparação entre o SPI no verão da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.

		Cenário I				Cenário II		
		B	C	M	L	C	M	L
Início ↓ Fim	0.4	0.9	1.2	0.9	-1.5	0.3	1.1	
	-1.0	-1.0	-1.5	-1.4	0.1	0.6	0.8	
	0.6	0.2	-1.7	-0.5	0.8	1.6	2.1	
	0.5	-2.1	-0.9	-0.6	-0.7	-1.4	-0.2	
	1.5	-1.3	-1.0	0.7	0.6	-0.5	1.2	
	0.6	-0.7	0.8	-1.0	0.4	0.0	1.4	
	-0.5	0.2	-1.3	0.6	0.0	-0.1	0.1	
	0.0	0.1	-0.2	-1.0	0.4	-0.6	0.4	
	2.5	-0.8	-0.5	1.1	-0.9	-0.5	-0.5	
	-1.3	-0.8	0.2	-0.6	-0.4	2.0	-1.4	
	-0.7	-0.1	0.9	1.1	-0.2	0.6	-0.8	
	-0.4	0.8	-0.3	-1.8	0.9	0.3	-1.6	
	0.0	1.3	1.2	0.2	2.0	-0.1	-0.8	
	-0.1	2.0	0.4	-0.8	0.4	0.8	-0.3	
	0.1	0.0	0.2	0.5	1.1	-1.2	-0.3	
	-0.4	0.3	1.2	1.6	-2.3	-2.1	-1.0	
	-1.8	0.9	1.4	1.0	-0.7	0.3	-0.3	

Legenda

B- Período base

C- Período de curto prazo

M-Período de médio prazo

L- Período de longo prazo

Extremamente chuvoso

Severamente chuvoso

Moderadamente chuvoso

Normal

Moderadamente seco

Severamente seco

Extremamente Seco

Fonte: Elaborado pela autora.

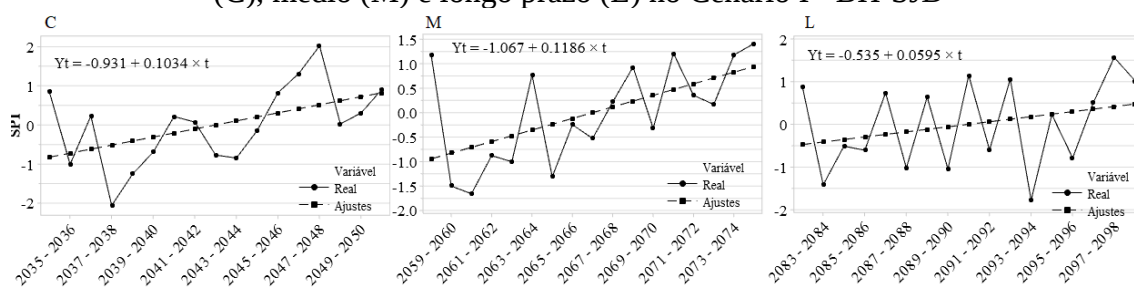
No Cenário I (Figura 66), notou-se que a ocorrência de verões extremamente chuvosos reduziu no M e L. Porém foi observado eventos moderadamente chuvosos, sendo maior no M, que estão concentrados principalmente no fim dos períodos analisados. Por outro lado, os eventos de seca estão em sua maioria situados no início das séries, no médio e longo prazo constatou-se aumento na ocorrência de eventos severamente e moderadamente secos, respectivamente.

Em resumo, no cenário I constatou-se o aumento tanto de secas quanto de cheias, particularmente nos horizontes de tempo de médio e longo prazo.

No Cenário II (Figura 66) constatou-se redução da intensidade dos eventos extremamente chuvosos nos três períodos futuros, com a maior redução no C, cerca de 20% menor que no B. No período de curto e médio prazo notou a ocorrência de eventos extremamente secos. Por outro lado, no horizonte de tempo de longo prazo os eventos chuvosos dobraram, mas com menor intensidade.

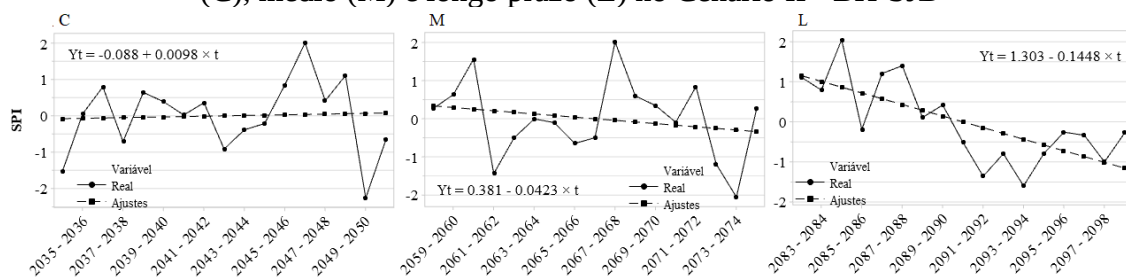
As Figuras 67 e 68 mostram as tendências do SPI para o verão nos três horizontes de tempo futuros (curto, médio e longo prazo), gerados pelo Cenário I e II, respectivamente. Embora as retas de tendência do Cenário I (Figura 67) serem crescentes nos três períodos tempo, o teste de Mann-Kendall conformou significância apenas no curto (0,02) e médio prazo (0,005). E no Cenário II (Figura 68) constatou-se tendência significativa apenas no longo prazo (0,004).

Figura 67 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 68 - Gráficos de análise de tendência do SPI para o verão nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD



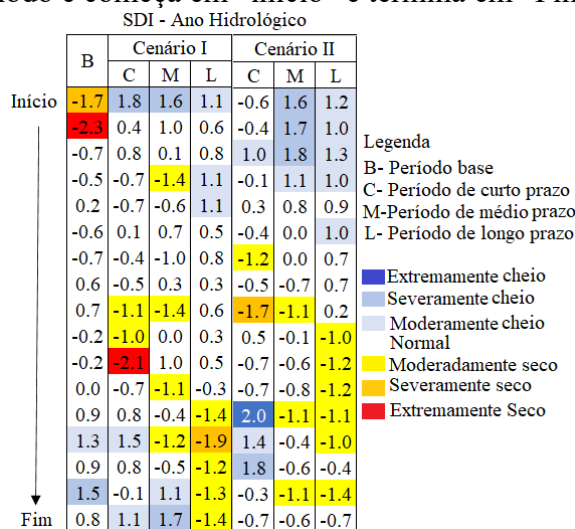
Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3.2.2 Eventos extremos hidrológicos

Na Figura 69 pode ser observada a comparação entre o SDI no ano hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II. Os resultados mostraram que a ocorrência dos eventos de seca de vazões aumentou 2,5vezes no longo prazo e 2vezes

no médio prazo, comparados com o período base. Por outro lado, os eventos de cheia foram iguais de nos três períodos projetados.

Figura 69 - Comparação entre o SDI no ano hidrológico da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se também que no Cenário I os resultados apontam aumento na intensidade e ocorrência dos eventos de seca severas e moderadas no longo prazo. Visto que, passaram a ocorrer anos hidrológicos moderadamente secos nos três horizontes de tempo, principalmente no M e L, e eles também foram mais intensos no L, cerca de 23% mais do que no C. Além disso as intensidades dos eventos severamente secos no L foram 8% maiores do que no B.

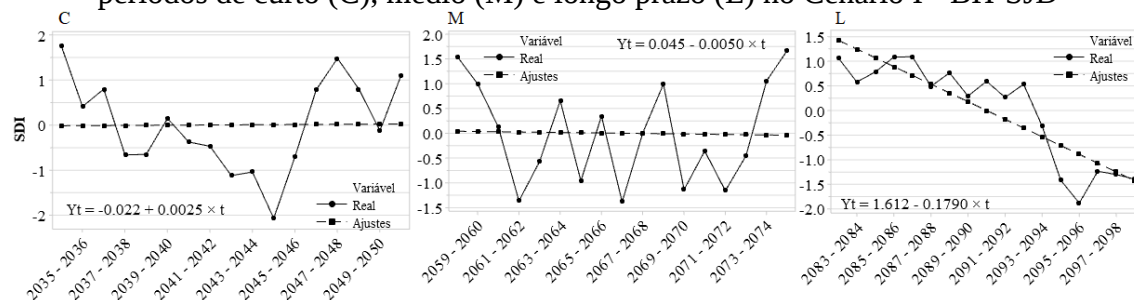
Ainda no Cenário I constatou aumento da ocorrência de anos hidrológicos moderadamente cheios no C e L, sendo que no último período esses eventos tiveram intensidades menores do que no B.

No cenário II os resultados mostraram que os eventos moderadamente cheios foram 5 vezes maiores ao longo prazo e os episódios severamente cheios foram 3 vezes maiores ao médio prazo comparados com o período base. Também reduziram 15% das intensidades dos eventos moderadamente cheios e aumentaram 13% dos severamente cheios nesses períodos. No L ainda observou a ocorrência continua de casos moderadamente secos no fim desse horizonte de tempo inexistentes no B. Conclui-se que

no cenário II o número de eventos de seca de vazões aumentou, principalmente no longo prazo, da mesma maneira, ocorre com as cheias.

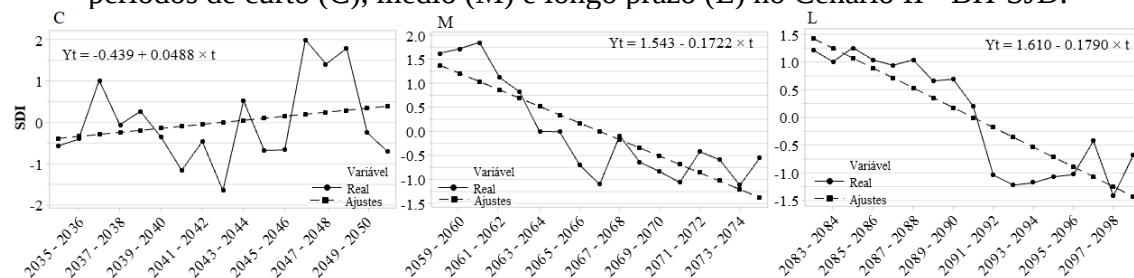
Os gráficos de tendência do SDI para o ano hidrológico nos três horizontes de tempo futuros (curto, médio e longo prazo), gerados pelo Cenário I e II, estão ilustrados nas Figuras 70 e 71, respectivamente. No Cenário I foi verificada tendência decrescente somente no longo prazo, já no Cenário II foi confirmada também no médio prazo.

Figura 70 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

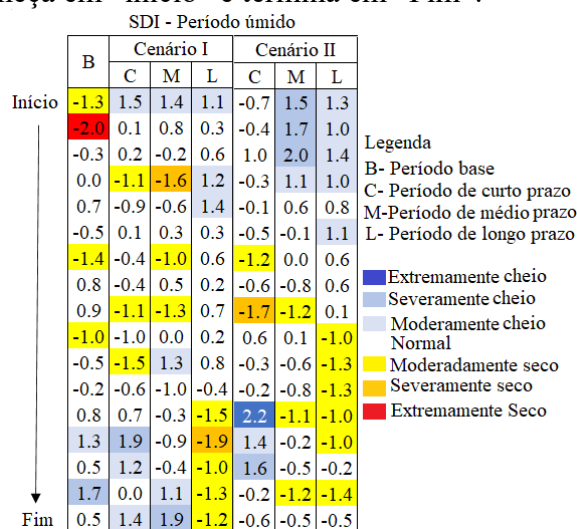
Figura 71 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o ano hidrológico nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD.



Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação entre o SDI no período úmido da série base e dos períodos futuros no Cenário I e Cenário II, está ilustrada na Figura 72. Observou-se que no Cenário I os eventos de cheia aumentaram nos três períodos futuros em relação ao B, especialmente no curto e médio prazo. Por meio da Figura 72 também é possível notar que os eventos de cheia estão concentrados nas extremidades desses períodos, exceto no longo prazo onde os eventos de seca predominam no final desse período.

Figura 72 - Comparação entre o SDI no período úmido da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



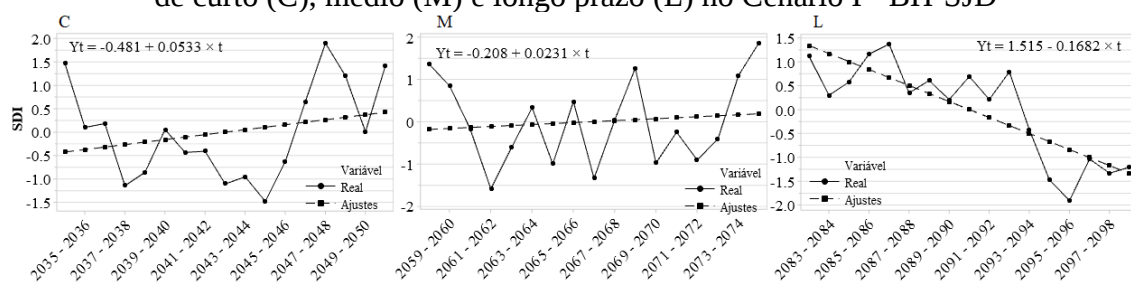
Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda no Cenário I notou-se aumento na intensidade dos eventos severamente cheios até o M, e redução da intensidade dos eventos moderadamente cheios, mas foi observado também incremento na ocorrência desses eventos (moderadamente cheios) nos três períodos futuros (cerca de 3 vezes mais que no B). Em contrapartida, a intensidade e ocorrência dos eventos moderadamente e severamente secos também subiram, especialmente no longo prazo.

Por outro lado, no Cenário II foi constatado aumento tanto do número de cheia quanto de secas, sobretudo no longo prazo. Os eventos severamente cheios triplicaram no M e os moderadamente cheios quintuplicaram no L em relação ao B. Já os episódios moderadamente secos foram o dobro no longo prazo, porém com intensidades menores, cerca de 12% menor que no B.

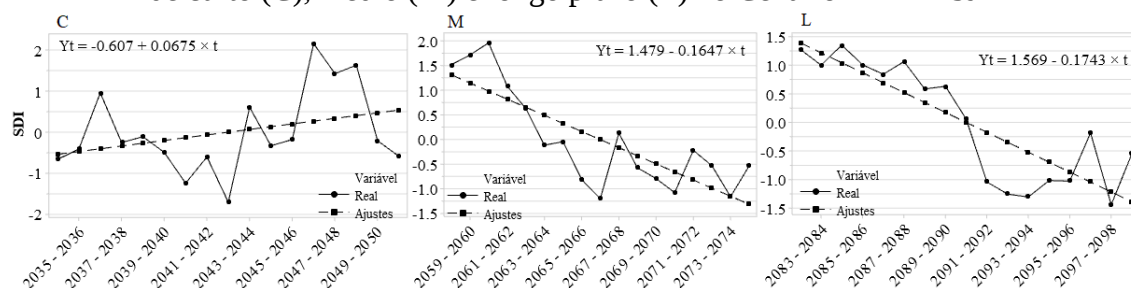
Os gráficos de tendência do SDI para o período úmido nos três horizontes de tempo futuros (curto, médio e longo prazo), gerados pelo Cenário I e II, estão ilustrados nas Figuras 73 e 74, respectivamente. No Cenário I foi comprovada tendências decrescentes estatisticamente significativas no longo prazo, já no Cenário II foi constatado tanto no médio quanto no longo prazo tendências significativas decrescentes.

Figura 73 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 74 - Gráficos de análise de tendência do SDI para o período úmido nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD

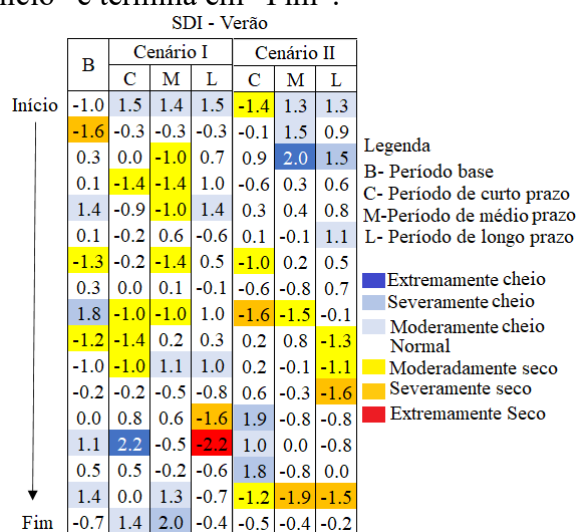


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 75 mostra a comparação entre o SDI no verão da série base e dos períodos futuros com o Cenário I e Cenário II. Foi constatado no Cenário I aumento na ocorrência dos eventos de seca no curto e médio prazo e de redução dos eventos de cheia no curto e longo prazo em relação ao período de base. Os eventos moderadamente secos foram os que mais aumentaram no C e M, entretanto as intensidades reduziram. Ademais, observou a ocorrência de um evento extremamente seco no longo prazo, também de menor intensidade do que no B. Outro ponto, foi a intensificação do evento severamente cheio no M.

No cenário II não foi observada grandes diferenças na ocorrência dos eventos de seca e cheia, mas verificou-se que os eventos moderadamente secos e severamente secos tiveram aumento nas suas intensidades no médio prazo, de 14% e 20% respectivamente.

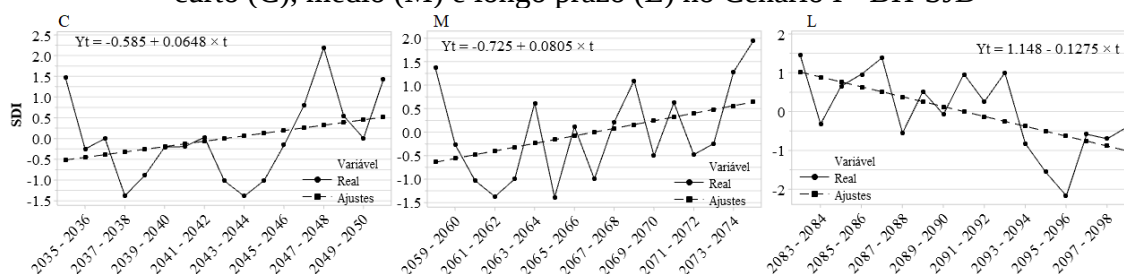
Figura 75 - Comparação entre o SDI nos verões da série base e os períodos futuros do Cenário I e Cenário II na BH-SJD. A série de cada período é começa em “início” e termina em “Fim”.



Fonte: Elaborado pela autora.

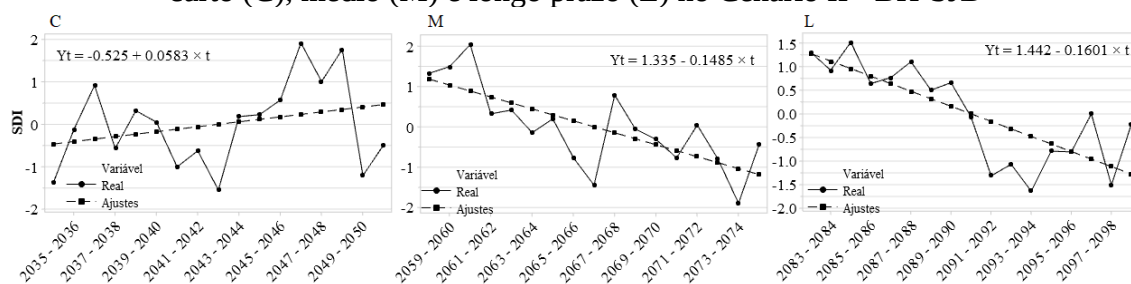
A Figuras 76 e 77 mostram as tendências do SDI para o verão no período de curto, médio e longo prazo, gerados pelo Cenário I e II, nessa ordem. Nos dois Cenários foram verificadas tendências decrescentes significativas no longo prazo, indicando propensão a secas nesse período.

Figura 76 - Gráficos de análise de tendência do SDI para os verões nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário I - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 77 - Gráficos de análise de tendência do SDI para os verões nos períodos de curto (C), médio (M) e longo prazo (L) no Cenário II - BH-SJD



Fonte: Elaborado pela autora.

No médio prazo também foi identificada tendência significativa, porém oposta, no cenário I a tendência é crescente e no cenário II decrescente. O que deixa mais evidente a diferença entre os cenários e projeções.

5.4 ESQUEMA METODOLÓGICO PROPOSTO

O esquema metodológico mostrado no Quadro 9 detalha um conjunto de etapas utilizadas nesse trabalho para realizar a avaliação de eventos extremos meteorológicos e hidrológicos em períodos observados e futuros em bacias hidrográficas.

Esse esquema (Quadro 9) é uma ferramenta, que direciona gestores, pesquisadores e demais interessados na aplicação da metodologia mostrada nesse trabalho, tornando o planejamento dos processos a serem executados mais eficiente.

Ribeiro (2021) desenvolveu um Procedimento Operacional Padrão (POP) que apresenta os requisitos necessários para utilização do modelo hidrológico SWAT em bacias hidrográficas. A utilização do POP proposto por Ribeiro (2021) e do esquema metodológico do Quadro 9 podem ser utilizadas em conjunto.

Quadro 9-Esquema metodológico

ESQUEMA METODOLÓGICO	
1-	Modelo hidrológico
a.	Obtenção dos dados meteorológicos diários: precipitação, velocidade do vento, temperatura máxima e mínima do ar e radiação solar;
i.	Recomenda-se a utilização de séries históricas de 30 anos.
b.	Obtenção de dados fluviométricos para calibração: vazão mensal de um rio localizado dentro da bacia hidrográfica de interesse;
i.	Recomenda-se séries longas suficientes para abranger períodos úmidos e secos.
c.	Preenchimento de falhas pluviométricas: método da ponderação regional;
d.	Cálculo das estatísticas climáticas representativas da bacia hidrográfica através do gerador climático WGN;
e.	Levantamento dos dados pedológicos em formato Shapelifes ou Raster e de suas características conforme o Quadro 2;
f.	Processamento do uso e ocupação do solo em formato de Raster e reclassificação conforme o banco de dados do SWAT;
g.	Obtenção do Modelo digital de elevação (MDE);
h.	Delimitação da bacia hidrográfica, subdivisão em sub-bacias e HRUs pela interface ArcSWAT ou QSWAT;
i.	Inserção das características da bacia hidrográfica na interface utilizada (ArcSWAT ou QSWAT), por exemplo a presença de reservatórios de água;
j.	Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo hidrológico por meio do SWAT-CUP utilizando a vazão observada;
k.	Cálculo do SPI e SDI utilizando a precipitação e vazão mensal observada, respectivamente, com o auxílio do software Drinc.
2-	Variáveis climáticas projetadas
a.	Obtenção de dados projetados de precipitação, velocidade do vento, temperatura máxima e mínima do ar e radiação solar em escala diária, gerados a partir de modelos climáticos regionais;
b.	Remoção de vieses das variáveis do item 2.a por meio do método <i>Approach Direct</i> ;
c.	Verificação do desempenho dos modelos climáticos em simular as características da área de interesse e escolha de pelo menos 7 modelos mais consistentes;
d.	Cálculo do SPI com o Drinc por meio da precipitação mensal projetada.
3-	Simulação da vazão dos períodos futuros
a.	Inserção dos dados meteorológicos projetados no modelo hidrológico;
b.	Simulação da vazão projetada;
c.	Cálculo do SDI para dos períodos futuros de interesse por meio da vazão mensal projetada com o auxílio do Drinc;
4-	Análises dos índices
a.	Análise estatística dos índices SPI e SDI por meio do software Minitab e/ou Planilha Excel.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6 CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste estudo mostrou-se eficiente para estudo de cheias e secas meteorológicas e hidrológicas históricas e futuras, utilizando o Índice de Precipitação Padronizada e o Índice de Seca de Vazões podendo ser replicada em outras bacias hidrográficas semelhantes, desde que, sejam consideradas as particularidades de cada bacia.

Os processos de remoção de vieses das projeções climáticas conseguiram representar adequadamente as características climáticas da região. Nesse estudo a projeção climática foi realizada apenas com o que melhor representou as características climáticas em cada bacia, a título de exemplificação. Entretanto, para reduzir as incertezas das projeções climáticas, recomenda-se que sejam utilizadas as variáveis climáticas por pelo menos 7 (sete) modelos climáticos.

A análise dos índices sugere, aumento da ocorrência dos eventos extremos em ambas bacias hidrográficas. Na bacia hidrográfica do Rio São José dos Dourados as principais evidências são de tendências significativas crescente do SPI nas três escalas de tempo analisadas (verão, período úmido e ano hidrológico) no curto prazo, e também tendência crescente do SPI no verão a médio prazo com o Cenário I. Por outro lado, no Cenário I projeta-se tendências decrescente do SPI no longo prazo no verão, período úmido e ano hidrológico. Também, observou tendências significativas para secas de vazões nessas três escalas de tempo com o Cenário II e I no longo prazo, e no médio prazo do Cenário II.

Na bacia do Rio Alto Tietê os resultados mostraram tendência estatisticamente significativa apenas através do Cenário II, sendo de cheia de vazões no ano hidrológico no horizonte de longo prazo e no período úmido de curto prazo.

A projeção climática e hidrológica é de suma importância, pois através delas podem ser prevista alterações, que podem afetar diversos setores da sociedade. E o grande benefício de estudos com o SPI e o SDI é a possibilidade de analisar não apenas uma série continua, mas também períodos específicos, que sejam cruciais para determinada atividade, por exemplo, as secas de 3 meses que podem impactar o desenvolvimento das culturas, e de 6 e 12 meses para o abastecimento de água.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N. **Incertezas e impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do Rio Uruguai**. 2016. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019**: informe anual. Brasília, DF: ANA, 2019. 100 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília, DF: ANA, 2017. 169 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020**: informe anual. Brasília, DF: ANA, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos**: avaliações e diretrizes para adaptação. Brasília, DF: ANA, GGES, 2016. 93 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Mapa do Monitor de Secas**: monitor de secas julho/2021. Monitor de Secas Julho/2021b. Disponível em: <http://monitordesecas.ana.gov.br>. Acesso em: 01 set. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Vulnerabilidade a Inundações do Brasil**. 2021a. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/4b7b20091fb940d492a1ebc85dfa88bb_0/explore?location=-13.733534%2C-54.252900%2C4.78. Acesso em: 03 ago. 2022.
- AJAMI, H. Geohydrology: global hydrological cycle. **Encyclopedia of Geology**, London, p. 393-398, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12387-5>.
- ALLEY, W. M. O índice de gravidade da seca de Palmer: limitações e suposições. J. Appl. **Meteorol.**, [s. l.], v. 23, n. 23, p. 1100-1109, 1984.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; ROSOLEM, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 244, p. 105053, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105053>.
- ALMEIDA, A. T. **Impactos do fenômeno El Niño Oscilação Sul na variabilidade climática e seus efeitos na produtividade da cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões Brasileiras**. Piracicaba, 2014. 101 p.

- ARNOLD, J. G. *et al.* 2012. **Soil & Water Assessment**. Tool: Input/output documentation version 2012. Texas Water Resources Institute, TR-439. 662 p.
- ARNOLD, J.G. *at al.* Modelagem e avaliação hidrológica de grandes áreas parte I: desenvolvimento do modelo. **JAWRA**, [s. l.], v. 34, p. 73-89, 1998.
- AWANGE, J. L.; MPELASOKA, F.; GONCALVES, R. M. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 566–567, p. 1472-1488, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.031>.
- AZIMI, S. *et al.* 2020. Assimilation of Sentinel 1 and SMAP – based satellite soil moisture retrievals into SWAT hydrological model: the impact of satellite revisit time and product spatial resolution on flood simulations in small basins.: the impact of satellite revisit time and product spatial resolution on flood simulations in small basins. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 581, p. 124367-124367, fev. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124367>.
- BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 148 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BATES, B. C.; KUNDZEWICZ, Z. W.; WU, S.; PALUTIKOF, J. P. (ed.) **Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, IPCC Secretariat, Geneva, 2008. 210 p.
- BHATTA, B. *et al.* 2019. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. **Catena**, [s. l.], v. 181, p. 1-13, out. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Wea. and Forecasting**, v. 9, p. 265-278, 1994.
- BLAINSKI, É.; ACOSTA, E.; NOGUEIRA, P. C. do P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 1-12, mar. 2017. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/1980-993x>.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Capítulo I, Art. 1º, p1. Brasil.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 590 p.

BRAZIL. Ministry of Science, Technology and Innovation. Secretariat of Policies and Programs of Research and Development. General Coordination of Global Climate Change. **Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Ministry of Science, Technology and Innovation. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 229 p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Florianópolis, v. 1, n. 21, p. 53-64, mar. 2016.

BRITO, C. S. de; SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. Moura; COELHO, V. H. R. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: a case study of the Piranhas River Basin, northeastern Brazil. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 250, p. 105380, mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380>.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G.; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de Falhas em Séries Temporais de Precipitação Diária no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 35, p. 335-344, nov. 2020. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352035>.

CETESB (São Paulo). **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2020.

CHEN, Y. *et al.* Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 573, p. 486-500, jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.091>.

CHRISTOFOLETTI, A. L.H. *et al.* Análise da precipitação através do uso de técnicas multifractal em períodos chuvosos e secos no médio e baixo curso das bacias dos rios Tietê e Paranapanema (SP). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 196-211, 11 jun. 2019. Universidade Federal do Paraná. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.57491>.

CLIMA FEIS. Área de Hidráulica e Irrigação. **Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 03 ago. 2022.

COELHO, C. O. *et al.* 2014. A seca de verão austral de 2014 no sudeste do Brasil: mecanismos de escala regional e teleconexões. *Clim Dyn* 46, p. 3737–3752, 2016). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. 350 p.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS (CBH-SJD) (São Paulo). FUNDAMENTOS DA COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS DOS USUÁRIOS URBANOS E INDUSTRIAIS. 2018. Disponível em: https://comitesjd.sp.gov.br/site/wp-content/uploads/2020/04/FUNDAMENTACAO-DA-COBRANCA-ATUALIZADA-CTCOB_10-10-2018.pdf.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS (CBH-SJD). Atualização do Plano de Bacia da UGRHI-18 – São José dos Dourados”. Volume I – Agosto/2015, São Paulo, 2016.

COSTA, M.N. M.; BECKER, C.T.; BRITO, J.I.B. Análise das séries temporais de precipitação do semiárido paraibano em um período de 100 anos - 1911 a 2010. **Rev. Bras. Geogr. Física**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 680-696, 2013.

COUTINHO, L. S. A. L. et al. 2012. Modelagem do tempo de execução de obras civis: estudo de caso na Universidade Federal do Pará. **Revista Ambiente Construído**, [s. l.], v. 12, p. 243-256, 2012.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC-INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Plataforma PROJETA**: Projeções de mudança do clima para a América do Sul regionalizadas pelo Modelo Eta. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://projeta.cptec.inpe.br/> Acesso em: 06/04/2021.

CRAWFORD, H. H.; LINSLEY, R. K. **Digital Simulation in Hydrology**: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Dept. of Civil Eng., Stanford University, Stanford, CA, 1966.

CRED. **Natural Disasters 2019. Brussels**: CRED; 2020. This document is available at: <https://www.cred.be/publications>.

CUBASCH, U. *et al.*, Introduction. In: **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

CUNHA, A. P. *et al.* **Secas e seus Impactos no Brasil**. Número 1, janeiro 2019.

CEMADEN, Sao Jose dos Campos, SP, 2019. 19 p. Disponível em: http://www.cemaden.gov.br/wpcontent/uploads/2019/01/Boletim_Anual_SECAS_CEMADEN_MCTIC.pdf

DAD, J. M. et al. 2021. Time series analysis of climate variability and trends in Kashmir Himalaya. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 126, p. 107690, jul. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107690>.

DAEE. **Portal do Departamento de Águas e Energia Elétrica**: Banco de dados hidrológicos. Banco de Dados Hidrológicos. 2022. Disponível em: <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

DAVID, V.; DAVIDOVÁ, T. 2017. Relating Hydrological and Meteorological Drought Indices in Order to Identify Causes of low Flows in the Catchment of Blanice River. **Environmental Processes**, [s. l.], v. 1, p. 149-161, 19 abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s40710-017-0223-1>.

DEL-TORO-GUERRERO, F. J.; KRETZSCHMAR, T. Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. **Journal Of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 27, p.100653-12, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100653>, 2020.

DIAS, C. G.; REBOITA, M. S. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1282-1295, maio 2021. Semestral. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249703/38728>. Acesso em: 17 jan. 2022.

DUARTE, R. M; VAL, A. L. Water-related problem with special reference to global climate change in Brazil. **Water Conservation and Wastewater Treatment In Brics Nations**, [s. l.], p. 3-21, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818339-7.00001-1>.

ESSENFELDER, A. H. **SWAT Weather Database: A Quick Guide**. Version: v.0.16.07. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.4329.1927.

EVANS, B.M. *et al.* A comprehensive GIS-based modeling approach for predicting nutrient loads in watersheds. **J. Spat. Hydrol.**, v. 2, n. 2, p. 1-18, 2002.

FENG, H.; ZOU, B.; LUO, J. Coverage-dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 550, p. 220-229, jul. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.056>.

FLATO, G. J. *et al.* Rummukainen, 2013: Evaluation of climate models. In: Qin, G.-K. *et al.* (ed.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Cambridge University Press, p. 741-882, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.020.

FOOLADI, M. *et al.* 2021. Trend analysis of hydrological and water quality variables to detect anthropogenic effects and climate variability on a river basin scale: a case study of iran. **Journal Of Hydro-Environment Research**, [s. l.], v. 34, p. 11-23, jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.001>.

FRANCESCONI, W.*et al.* 2016. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: a systematic review. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 535, p. 625-636, abr. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (FABHAT) **Plano da Bacia Hidrográfica do Alto-Tietê**. São Paulo, 2016.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (FABHAT). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica 2020 (ano-base 2019)**. Comitê da bacia hidrográfica do Alto Tietê UGRHI-06, 2020.132 p.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (FABHAT). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica 2020 (ano-base 2019)**. Comitê da bacia hidrográfica do Alto Tietê UGRHI-06, 2020.132 p.

GARCIA, J. R.; MIYAMOTO, B. C.B.; MAIA, A. G. 2018. Eventos extremos de precipitação: identificação e análise da bacia hidrográfica do rio Jundiá, São Paulo. **Confins**, [s. l.], n. 37, 24 set. 2018. OpenEdition. <http://dx.doi.org/10.4000/confins.15586>.

GEOINFO. **Mapa de erodibilidade dos solos do hídrica Brasil (Primeira aproximação)**. 2020. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/?limit=100&offset=0&title__icontains=ERODIBILIDADE. Acesso em: 03 ago. 2022.

GIORGI, F. GUTOWSKI, W. J. Regional Dynamical Downscaling and the Cordex Initiative (November 2015). **Annual Review of Environment and Resources**, v. 40, p. 467-490, 2015, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2688529> or <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>.

GONDIM, R. *et al.* Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environ Earth Sci**, [s. l.], v. 77, p. 550, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7723-9>.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. 1911. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science, Cambridge**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

GRILLAKIS, M. G. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. **Science Of The Total Environment**, [s. l.], v. 660, p.1245-1255, abr. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>.

GUEDES, R.; MACEDO, M. J.; SOUSA, F. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, n. 23, p. 55-65, 2012. Retrieved from http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/332.

GUO, H. *et al.* 2016. Evaluation of PERSIANN-CDR for Meteorological Drought Monitoring over China. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 379, 4 maio 2016. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs8050379>.

HAJANI, E.; RAHMAN, A. 2018. Design rainfall estimation: comparison between gev and lp3 distributions and at-site and regional estimates. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 67-88, 29 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-018-3289-9>.

HAMED, Khaled H. Trend detection in hydrologic data: the mann kendall trend test under the scaling hypothesis. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 349, n. 3-4, p. 350-363, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 108, p. 225-230, 1982.

HOSSEINZADEHTALAEI, P. et al. 2021. Climate change impact assessment on pluvial flooding using a distribution-based bias correction of regional climate model simulations. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 598, p. 126239, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126239>.

IAG/USP. **Estação Meteorológica**. 2022. Disponível em: <http://www.estacao.iag.usp.br/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: agricultura, pecuária e outros. Agricultura, pecuária e outros**. 2016. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria>. Acesso em: 03 ago. 2022.

IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

IPCC. 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC. 2018: Resumo para formuladores de políticas. In: **Aquecimento Global de 1,5°C. Um relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e as vias de emissão global de gases de efeito estufa relacionadas, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça das mudanças climáticas, desenvolvimento sustentável e esforços para erradicar a pobreza**. Organização Meteorológica Mundial, Genebra, Suíça, 2018. 32 p.

IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

- JAFARI, T. et al. 2021. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. **Journal Of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 35, p. 100822, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>.
- JENKINS, K., WARREN, R. Quantificando o impacto das mudanças climáticas nos regimes de seca usando o Índice de Precipitação Padronizado. **Theor Appl Climatol**, v. 120, p. 41-54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1143-x>.
- JONG, P. et al. T. The Impact of Regional Climate Change on Hydroelectric Resources in South America. **Renewable Energy**, [s. l.], mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.077>.
- JULIANI, B. H. T. Tendências em índices de seca para a região sul do Brasil. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia, Curitiba, 2020.
- KAYANO, M. T. et al. 2006. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Climanálise**, [s. l.], v. 1, n. 0, p. 7-12, 2006.
- KIM, J. et al. Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 103, p.688-697, ago. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.052>.
- KNUTSON, T. R.; PLOSHAY, J.J. Detection of anthropogenic influence on a summertime heat stress index. **Climatic Change**, [s. l.], v. 138, n. 1-2, p. 25-39, 2 jun. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1708-z>.
- KOURGIALAS, N. N. Hydroclimatic impact on mediterranean tree crops area – Mapping hydrological extremes (drought/flood) prone parcels. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], p. 125684, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125684>.
- LEE, T.; MCPHADEN, M.J. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 37, n. 14, jul. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL044007>.
- LENDERINK, G. et al. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.
- LIMA, J. E. F. W. et al. Desenvolvimento De Base De Dados De Solos Para Aplicação Do Modelo SWAT Em Bacia Do Bioma Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2013. p. 1-8.
- LYRA, et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theor Appl Climatol**, v. 132, p. 663–682, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>.
- M.G. Kendall. 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London (1975).

MALAFIA F. M. **Aplicação do SWAT na modelagem hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2019. 53 p.

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, [s. l.], v. 13, p. 245-259, 1945.

MAPBIOMAS. **Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. acessado em 20 de novembro de 2020 através do link: [https://mapbiomas.org/].

MARENGO, J A. *et al.* 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**, [s. l.], v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 10 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>.

MARENGO, J. A. Impactos de extremos relacionados com o tempo e o clima – Impactos sociais e econmicos. **Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas**, INPE, n. 8, 2009.

MARIN, M *et al.* Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: a review. **Environmental Research**, [s. l.], v. 184, p. 109330, maio 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* 2019. MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012. Anual. Disponível em: <https://svr-net15.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268/761>. Acesso em: 20 jan. 2019.

MARTEL, J. *et al.* Role of Natural Climate Variability in the Detection of Anthropogenic Climate Change Signal for Mean and Extreme Precipitation at Local and Regional Scales. **Journal Of Climate**, [s. l.], v. 31, n. 11, p.4241-4263, jun. 2018. American Meteorological Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-17-0282.1>.

MCKEE. B., DOESKEN N. J. AND KLEIST J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *In*: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, Boston, 8., 1993, **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 1993. p. 179-184.

MELO, O. A G. **Modelagem hidrológica Aplicada a Análise do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Ivaí-PR**. 2017. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Centro de Ciências Humanas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

MENGISTU, A. G. *et al.* 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. **Journal Of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 25, p. 100621-100621, out. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621>.

MESINGER, F., Z. *et al.* 1988: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 391, n. 1-2, p. 202-216, set. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment: the state and movement of water in living organisms. **Symp. Soc. Exp. Biol.**, [s. l.], v. 19, p. 205-234, 1965.

MOREIRA, L. L; SHWAMBACK, D; RIGO, D. 2019. Parâmetros pedológicos para estimativa de vazões em bacias hidrográficas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Paraíba, v. 14, n. 1, p. 78-84, 2019.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, [s. l.], v. 50, p. 885-900, 2007.

MORIASI, D. N. *et al.* **Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria**. *Trans. ASABE*, [s. l.], v. 58, p. 1763-1785, 2015.

MOURA, C. N. 2017. Impactos hidrológicos de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Alto Canoas, SC / Carolina. Natel de Moura. - Lages, 2017. 124 p.

NALBANTIS, I., Tsakiris, G. 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited. **Water Resour Manage**, [s. l.], v. 23, p. 881-897, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.

NARASIMHAN, B.; SRINIVASAN, R. 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 133, n. 1-4, p. 69-88, nov. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>.

NEITSCH S. L. Soil & Water Assessment Tool (SWAT). **Texas**: Grassland Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service 808 East Blackland Road - Temple, Texas, 76502, 2011. 634 p. TR-406.

NEVES, A. O.; VILANOVA, NOGUEIRA M. R. Caracterização da seca histórica da década de 2010 na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 339-349, abr. 2021. *FapUNIFESP (SciELO)*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220190023>.

NOORISAMELEH, Z; GOUGH, W. A.; MIRZA, M. M. Q. Persistence and spatial-temporal variability of drought severity in Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 35, p. 48808-48822, 30 abr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-14100-4>.

OLIVEIRA J. V. *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**, [s. l.], v. 31, p.100579-89, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100579>.

OLIVEIRA L. F. C. *et al.* Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 14, p. 1186-1192, ago. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n11/v14n11a08.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C; CASTRO, N. M. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio ijuí, brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 101-121, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140041>.

OLIVEIRA, V. A. *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 133, p. 20-31, ago. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. *et al.* Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro - Brazil. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 212, p. 91-105, nov. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.022>.

OMER, A. *et al.* 2020. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities. **Science Of The Total Environment**, [s. l.], v. 749, p. 141446, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141446>.

PALMER, W. C. **Seca Meteorológica**. Departamento de Comércio dos EUA, Weather Bureau, Washington, 1965.

PLANO DE BACIA DO RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS – UGRHI-18. Comitê Da Bacia Hidrográfica Do São José Dos Dourados. São José do Rio Preto, 2016. 166 p. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/>. Acesso em: 30 mar. 2021.

POO, M. C. *et al.* Climate Change Risk Indicators (CCRI) for seaports in the United Kingdom. **Ocean & Coastal Management**, [S.L.], v. 205, p. 105580-0, maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105580>.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Madison, v.100, n.2, p.81-92, 1972.

QIN, P. *et al.* Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 580, p. 123922, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123922>.

RAJAT, A. P. Calibration of hydrological models considering process interdependence: a case study of swat model. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 144, p. 105131, out. 2021. DOI: [BV.http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105131](http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105131).

RAO, M. *et al.* Pest scenario of *Spodoptera litura* (Fab.) on groundnut under representative concentration pathways (RCPs) based climate change scenarios. **Journal Of Thermal Biology**, [s. l.], v. 94, p. 102749, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102749>.

REBELLO, V. P. A. *et al.* Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 18, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100294>.

RIBEIRO, D. R. **Apresentação do SWAT como ferramenta de gestão de recursos hídricos**: estudo de caso: Rio São José dos Dourados. Ilha Solteira: [s. n.], 2021. 107 p.

ROLIM, G. S. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052007000400022>.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v.1. 118 p.

SANTOS, C. A. *et al.* Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do Rio Pardo. **Holos**, [s. l.], v. 7, p. 179, 12 nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.4892>.

SANTOS, F. M. **Modelagem concentrada e semi-distribuída para simulação de vazão, produção de sedimentos e de contaminantes em bacias hidrográficas do interior de São Paulo**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. DOI: 10.11606/T.18.2018.tde-26112018-145857. Acesso em: 19 out. 2020.

SANTOS, J.Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil)**. 2015. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **RBGF-Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 1-19, dez. 2009.

SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCS. Soil Conservation Service Engineering Division. **Urban hydrology for small watersheds**. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55, 1986.

SERRÃO, E. A. O. *et al.* Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. **Ecohydrology & Hydrobiology**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 23-35, jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.09.002>.

SHARMA, S.; MUJUMDAR, P. 2019. On the relationship of daily rainfall extremes and local mean temperature. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 572, p.179-191, Maio 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.048>.

SILVA, J. G. *et al.* 2020. Avaliação e correção das simulações do modelo Eta/CPTEC – HADCM3 para o estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 350-363, mar. 2020.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. 2019. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 25, set. 2019. ISSN 2237-8642. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101>.

SILVA, W. L. *et al.* Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. **Theoretical And Applied Climatology**, [s. l.], v. 137, n. 1-2, p. 353-371, 23 ago. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2600-8>.

SOBRAL, B. S. *et al.* Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with enso. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 220, p. 141-154, maio 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.003>.

SOUZA, A G.S.S.; NETO, A. R.; SOUZA, L. L. 2021. Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: SMADI application in Pernambuco State-Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 252, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112124>.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstruindo Três Décadas de Mudanças de Uso e Cobertura do Solo em Biomas Brasileiros com Arquivo Landsat e Earth Engine. **Sensoriamento Remoto**, [s. l.], v. 12, n. 17, 2020.

SUN, F.; MEJIA, A.; ZENG, P.; CHE, Y. Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River basin. **Science Of The Total Environment**, [s. l.], v. 696, p. 134076, dez. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134076>.

TAN, M. L. *et al.* A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. **Advances In Water Resources**, [s. l.], v. 143, p. 103662-0, set. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>.

THAVHANA, M.P.; SAVAGE, M.J.; MOELETSI, M. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. **Physics And Chemistry Of The Earth**, Parts A/b/c, [s. l.], v. 105, p. 115-124, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.012>. The Global Risks Report 2019 (14th Edition), World Economic Forum, Davos, 2019.

TIGKAS, D. VANGELIS, H.; TSAKIRIS, G. DrinC: um software para análise de seca com base em índices de seca. **Earth Sci Inform**, [s. l.], v. 8, p. 697–709, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>.

TOPODATA (org.). **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ufrgs Abrh, 2012. 944 p.

USGS. **The water cycle**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese>. Acesso em: 24 jul. 2022.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1975. 245 p.

WALLEMACQ, P. **Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017**, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, CRED, 2018.

WEI, Y. *et al.* Quantitative assessment of soybean drought risk in Bengbu city based on disaster loss risk curve and DSSAT. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 56, p. 102126, abr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102126>.

WMO. Lincoln declaration on drought indices. World Meteorological Organization (WMO), 2009.

ZHAO, C. *et al.* Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. **Journal Of Hydrology**, [s. l.], v. 584, p. 124316, 2021.. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124316>.

APÊNDICE A

Parâmetros do solo utilizados no SWAT para a Bacia do Alto Tietê									
Classes de solo/ referências	Argissolos	Cambissolos	Plintossolos	Latossolos Vermelho- Amarelo	Gleissolo Háplico	Latossolos Amarelos	Neossolo Litólicos	Organossolos	
	BALDISSERA (2005)				LIMA <i>et al.</i> , (2013)		Moreira, Schwamback, Rigo (2019)	Melo (2017)	
PARÂMETROS ADOTADOS	HYDGRP	B	B	D	A	D	A	D	D
	NLAYERS	3	5	4	4	2	3	2	1
	SOL_ZMX	1300	1100	730	1500	300	300	0	200
	ANION_EXCL	0,32	0,47	0,34	0,38	0	0	0	0,4
	SOL_Z1	200	300	100	360	300	300	150	200
	SOL_BD1	1,7	1,6	1,69	1,5	0,87	0,86	1,7	1,6
	SOL_AWC1	0,4	0,15	0,18	0,3	0,13	0,15	0,12	0,13
	SOL_K1	90	12,5	90	12,5	494,44	2602,59	20	6,8
	SOL_CBN1	1,3	1,4	1,31	1,1	2,56	1,65	0	9,9
	CLAY1	11,7	36,3	18,2	30,3	51,59	58,81	17,86	36
	SILT1	18,1	18	27,6	16	28,54	21,75	20,68	42
	SAND1	70,2	93,4	54,2	53,7	19,86	19,44	55,46	22
	ROCK1	0	0	0	0	0	0	6	0
	SOL_ALB1	0,15	0,15	0,15	0,15	0	0	0	0,17
	USLE_K1	0,14	0,05	0,15	0,13	0,021	0,017	0	0,37
	SOL_Z2	550	600	270	760	1000	1000	700	
	SOL_BD2	1,7	1,4	1,51	1,7	0,87	0,94	1,7	
	SOL_AWC2	0,4	0,18	0,15	0,3	0,13	0,12	0,12	
	SOL_K2	90	12,5	12,5	12,5	494,44	505,5	20	
	SOL_CBN2	0,6	0,6	0,39	0,2	2,56	0,87	0	
	CLAY2	18,8	34	20,2	29,8	51,59	62,28	21,36	
	SILT2	17,2	35,7	27,8	14,3	28,54	19,89	23,14	
	SAND2	64	30,3	52	55,9	19,86	17,83	44,5	
	ROCK2	0	0	0	0	0	0	11	
	SOL_ALB2	0,15	0,15	0,15	0,15	0	0,94	0	
	USLE_K2	0,15	0,16	0,17	0,14	0,021	0,015	0	
	SOL_Z3	1300	800	520	1210	0	3500	0	
	SOL_BD3	1,7	1,4	1,4	1,7	0	0,94	0	
	SOL_AWC3	0,7	0,18	0,35	0,4	0	0,12	0	
	SOL_K3	12,5	12,5	12,5	12,5	0	186,92	0	
	SOL_CBN3	0,3	0,4	0,32	0,5	0	0,87	0	
	CLAY3	20,8	28,4	26,7	29,5	0	62,28	0	
	SILT3	18,3	37,7	27	13,8	0	19,89	0	
	SAND3	60,9	33,9	46,3	56,7	0	17,83	0	
	ROCK3	0	0	0	0	0	0	0	
	SOL_ALB3	0,15	0	0,15	0,15	0	0	0	
	USLE_K3	0,16	0,17	0,16	0,14	0	0,015	0	
	SOL_Z4	0	1100	730	1500	0	0	0	
	SOL_BD4	0	1,8	1,52	1,6	0	0	0	
	SOL_AWC4	0	0,18	0,27	0,4	0	0	0	
	SOL_K4	0	40	12,5	12,5	0	0	0	
	SOL_CBN4	0	0,4	0,21	0,4	0	0	0	
	CLAY4	0	26,8	32,7	35,6	0	0	0	
	SILT4	0	43,7	29,9	15,9	0	0	0	
	SAND4	0	29,5	37,4	48,5	0	0	0	
	ROCK4	0	0	0	0	0	0	0	
	SOL_ALB4	0	0,15	0,15	0,15	0	0	0	
	USLE_K4	0	0,18	0,16	0,14	0	0	0	
	SOL_Z5	0	1170	0	0	0	0	0	
	SOL_BD5	0	1,4	0	0	0	0	0	
	SOL_AWC5	0	0,18	0	0	0	0	0	
	SOL_K5	0	12,5	0	0	0	0	0	
	SOL_CBN5	0	0,3	0	0	0	0	0	
	CLAY5	0	27	0	0	0	0	0	
	SILT5	0	39,3	0	0	0	0	0	
	SAND5	0	33,7	0	0	0	0	0	

APÊNDICE B

Parâmetros do solo utilizados no SWAT para a bacia do Rio São José dos Dourados						
Classes de solo/ referências		Argissolo Vermelho- Amarelo	Argissolos vermelhos	Gleissolos Háplicos	Latossolo Vermelho	Neossolos Quartzarênicos
		BALDISSERA (2005)	MELO (2017)	LIMA <i>et al.</i> , (2013)		
PARÂMETROS ADOTADOS	HYDGRP	B	C	D	A	A
	NLAYERS	3	2	2	3	3
	SOL_ZMX	1300	900	300	300	300
	ANION_EXCL	0,32	0,32	0	0	0
	SOL_Z1	200	200	300	300	300
	SOL_BD1	1,7	1,7	0,87	0,9	1,3
	SOL_AWC1	0,4	0,4	0,13	0,12	0,08
	SOL_K1	90	110	494,44	612,2	281,26
	SOL_CBN1	1,3	0,74	2,56	1,67	0,6
	CLAY1	11,7	16	51,59	53,93	30,1
	SILT1	18,1	6	28,54	28,37	9,95
	SAND1	70,2	78	19,86	12,94	60,25
	ROCK1	0	0	0	0	0
	SOL_ALB1	0,15	0,17	0	0	0
	USLE_K1	0,14	0,36	0,021	0,018	0,031
	SOL_Z2	550	900	1000	1000	1000
	SOL_BD2	1,7	1,7	0,87	0,94	1,38
	SOL_AWC2	0,4	0,4	0,13	0,14	0,08
	SOL_K2	90	18	494,44	461,07	102,85
	SOL_CBN2	0,6	0,57	2,56	1,01	0,4
	CLAY2	18,8	45	51,59	66,28	34,35
	SILT2	17,2	4	28,54	22,93	9,58
	SAND2	64	51	19,86	10,79	42,9
	ROCK2	0	0	0	0	0
	SOL_ALB2	0,15	0,17	0	0	0
	USLE_K2	0,15	0,17	0,021	0,015	0,03
	SOL_Z3	1300	0	0	3500	3500
	SOL_BD3	1,7	0	0	0,94	1,38
	SOL_AWC3	0,7	0	0	0,14	0,08
	SOL_K3	12,5	0	0	142,32	102,85
	SOL_CBN3	0,3	0	0	1,01	0,4
	CLAY3	20,8	0	0	66,28	34,35
	SILT3	18,3	0	0	22,93	9,58
	SAND3	60,9	0	0	10,79	42,9
	ROCK3	0	0	0	0	0
	SOL_ALB3	0,15	0	0	0	0
	USLE_K3	0,16	0	0	0,015	0,032

APÊNDICE C

Localização das estações pluviométricas auxiliares utilizadas para o preenchimento de falhas das estações situadas na BH-AT.

Código	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Código	Nome	Altitude	Latitude	Longitude
E3-006	SANTO AMARO	780	-23,64	-46,69	E3-007	SANTANA	760	-23,50	-46,62
E2-130	ALEGRE	970	-23,53	-45,68	E3-010	LAPA	720	-23,52	-46,73
E2-131	USINA SALESOPOLIS	790	-23,57	-45,83	E3-022	SAO CAETANO DO SUL	740	-23,63	-46,58
E2-140	CARMELINA	920	-23,58	-45,78	E3-033	NOSSA SENHORA DO O	790	-23,47	-46,72
E3-013	ROSELANDIA	870	-23,60	-46,93	E3-036	LUZ	730	-23,53	-46,63
E3-016	ITAPECERICA DA SERRA	910	-23,72	-46,85	E3-052	CONGONHAS	800	-23,63	-46,65
E3-020	SANTANA DE PARNAIBA	760	-23,45	-46,92	E3-067	MORRO DO CHIQUEIRO	890	-23,78	-46,93
E3-031	BAIXO COTIA	730	-23,54	-46,86	E3-068	MOMBACA	790	-23,77	-46,83
E3-047	FRANCO DA ROCHA	740	-23,33	-46,68	E3-071	HORTO FLORESTAL	790	-23,47	-46,63
E3-050	BAIRRO FAZENDA VELHA	770	-23,39	-46,36	E3-090	INSTITUTO BIOLOGICO	760	-23,58	-46,65
E3-145	CIDADE UNIVERSITARIA (CTH)	730	-23,55	-46,73	E3-097	ESTALEIRO DAEE	730	-23,52	-46,20
E3-150	RUDGE RAMOS	760	-23,66	-46,57	E3-142	RECALQUE ABC	840	-23,75	-46,53
E3-155	RIBEIRAO PIRES	760	-23,71	-46,42	E3-148	MAUA	780	-23,66	-46,48
E3-156	NOEMIA	770	-23,67	-46,47	E3-149	CAMPO GRANDE	760	-23,77	-46,35
E3-157	ZAIRA	784	-23,65	-46,44	E3-233	PONUNDUVA	740	-23,35	-46,93
E3-158	DIADEMA	-	-23,68	-46,61	E3-237	SERTAOZINHO	790	-23,70	-46,48
E3-159	CAMPESTRE	-	-23,65	-46,55	E3-244	RIO ACIMA	760	-23,84	-46,59
E3-160	LUCINDA	-	-23,63	-46,52	E3-255	PARQUE SAO RAFAEL	780	-23,63	-46,47
E3-161	JARDIM DO MAR	-	-23,69	-46,56	E3-257	SANTA RITA	820	-23,93	-46,90
E3-163	BARCELONA	-	-23,62	-46,56	E3-259	CIPO	750	-23,88	-46,80
E3-223	TAIACUPEBA	790	-23,67	-46,18	E3-263	AMADOR BUENO	780	-23,53	-46,99
E3-232	CAPIXINGA	750	-23,57	-46,09	E3-265	CARAPICUIBA	740	-23,52	-46,84
E3-239	GUAPITUBA	800	-23,70	-46,44	E4-012	CAUCAIA DO ALTO	936	-23,68	-47,02
E3-253	PARAISO	800	-23,57	-46,65	E3-108	SAO BENTO	700	-23,43	-46,28
E3-270	PARQUE CHICO MENDES	778	-23,57	-46,78	E3-136	MOINHO VELHO	830	-23,62	-46,86

Localização das estações pluviométricas auxiliares utilizadas para o preenchimento de falhas das estações situadas na BH-SJD.

Código	Município	Altitude	Latitude	Longitude	Fonte
B7-006	URÂNIA	450	-20,27	-50,65	DAEE
B6-023	COSMORAMA	520	-20,48	-49,77	DAEE
B7-005	FERNANDÓPOLIS	545	-20,29	-50,24	DAEE
B7-040	SÃO JOÃO DE IRACEMA	370	-20,5	-50,32	DAEE
B7-051	SÃO JOÃO DAS DUAS PONTES	430	-20,35	-50,37	DAEE
B7-054	APARECIDA D'OESTE	420	-20,45	-50,88	DAEE
B8-027	ILHA SOLTEIRA	330	-20,4	-51,35	DAEE
B8-032	PEREIRA BARRETO	350	-20,52	-51,18	DAEE
-	ILHA SOLTEIRA	337	-20,42	-51,35	ClimaFeis