

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**SENSIBILIDADE DA VAZÃO MÉDIA ANUAL AO CLIMA
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

FABRICIO TADEU ALVES SIMÕES

**ORIENTADOR: PROF. DIRCEU SILVEIRA REIS JUNIOR,
PhD.**

COORIENTADOR: SAULO AIRES DE SOUZA, MSc.

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL II**

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**SENSIBILIDADE DA VAZÃO MÉDIA ANUAL AO CLIMA
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

FABRICIO TADEU ALVES SIMÕES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**DIRCEU SILVEIRA REIS JUNIOR, PhD. (ENC/UNB)
(ORIENTADOR)**

**RICARDO TEZINI MINOTI, DSc. (ENC/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ALEXANDRE ABDALLA ARAUJO, DSc. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 DE NOVEMBRO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

SIMÕES, FABRICIO TADEU ALVES

SENSIBILIDADE DA VAZÃO MÉDIA ANUAL AO CLIMA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

87 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SIMÕES, F. T. A. (2021) *SENSIBILIDADE DA VAZÃO MÉDIA ANUAL AO CLIMA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: FABRICIO TADEU ALVES SIMÕES

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: SENSIBILIDADE DA VAZÃO
MÉDIA ANUAL AO CLIMA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Fabricio Tadeu Alves SIMÕES

fsimoes.tadeu@gmail.com

RESUMO

As mudanças climáticas causam um impacto direto no comportamento das variáveis hidrológicas. A compreensão dos impactos que as mudanças climáticas causam na disponibilidade hídrica no Brasil é importante para que a gestão e o planejamento do recurso hídrico sejam feitos da melhor maneira. Para entender a relação entre clima e disponibilidade hídrica este trabalho aborda como a vazão no rio São Francisco variara em função da de dois cenários de emissão de gases do efeito estufa. A abordagem teórica foi feita utilizando-se às hipóteses de Budyko aplicadas juntamente com o conceito de elasticidade-clima. Utilizando 18 modelos climáticos globais foi possível estimar as variações das vazões médias de longo termo no Rio São Francisco para três horizontes temporais distintos (2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071- 2100). Concluiu-se que as regiões mais áridas sofrem maior efeito das mudanças climáticas na variação da precipitação, da evapotranspiração potencial e da vazão. Ainda, foi possível observar que os modelos, de maneira global, apontam para uma diminuição de vazão na bacia do Rio São Francisco, com variações negativas de vazões que podem chegar até 50 % da vazão média de longo termo presente.

ABSTRACT

Climate change has a direct impact on the behavior of hydrological variables. The understanding of the impacts that climate change cause on water availability in Brazil is important for implementing efficient water resource management and planning. In order to understand the relationship between climate and water availability, this work addresses how the flow of the São Francisco River will vary according to two scenarios of RCP induced by different levels of greenhouse gas emission. The theoretical approach was made using Budyko's hypothesis applied together with the concept of climate-elasticity. Using 18 global climate models it was possible to estimate the variations of the long term average flows in the São Francisco River for three distinct time horizons (2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071-2100). It was concluded that the more arid regions suffer greater effect of climate change on the variation of precipitation, potential evapotranspiration and flow. Furthermore, it was possible to observe that the models, in a global manner, point to a reduction in the flow of the São Francisco River basin, with negative variations in flow that can reach up to 50% of the present long-term average flow.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVO GERAL	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. INFLUÊNCIA DO CLIMA NO CICLO HIDROLÓGICO	6
3.2. CONCEITO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	8
3.2.1. Evaporação	8
3.2.2. Transpiração	8
3.2.3 Evapotranspiração.....	8
3.3. HIPÓTESE DE BUDYKO.....	9
3.3.1 Equação de Budyko	9
3.3.2 Equação de Fu.....	11
3.4. CONCEITO DE ELASTICIDADE-CLIMA	14
3.5. OUTROS FATORES INTERVENIENTES.....	16
3.5.1 Vegetação.....	16
3.5.2 Pedologia e efeitos do uso e ocupação do solo	17
3.6. APLICAÇÕES E TRABALHOS ANTERIORES.....	17
3.7. ZONA DE ESTUDO.....	19
4. METODOLOGIA	24
4.1. ESTRATÉGIA DE AÇÃO.....	24
4.2. DADOS HIDROLÓGICOS	25
4.2.1. Seleção das estações fluviométricas.....	25
4.3. ESTIMAÇÃO DO PARÂMETRO ω DA EQUAÇÃO DE FU	26
4.4. CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE ELASTICIDADE-CLIMA.....	27
4.5. CÁLCULO DAS VAZÕES MÉDIAS DE LONGO TERMO	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS	31

5.1.1 Caracterização das estações fluviométricas com relação às variáveis hidrológicas	32
5.1.2 Relações da hipótese de Budyko	36
5.2. ELASTICIDADES-CLIMA E O PARÂMETRO ω	39
5.3. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL POR MODELO.....	43
5.3.1 Variação da precipitação para o cenário de emissão de GEE RCP4.5....	43
5.3.2 Variação da precipitação para o cenário de emissão de GEE RCP8.5....	46
5.3.3 Variação da evapotranspiração potencial para o cenário de emissão de GEE RCP4.5.....	49
5.3.4 Variação da evapotranspiração potencial para o cenário de emissão de GEE RCP8.5.....	52
5.4. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL POR ESTAÇÃO.....	52
5.4.1 Variação da precipitação por estação para o cenário de emissão de GEE RCP4.5	52
5.4.2 Variação da precipitação por estação para o cenário de emissão de GEE RCP8.5	53
5.5. VARIAÇÃO DA VAZÃO POR MODELO	60
5.6. VARIAÇÃO DA VAZÃO POR ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	66
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	74
7. ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Classificação do Índice de Anomalia de Chuva do Submédio São Francisco respectivamente em 1985 e 2012. (SOBRAL. <i>et al</i> , 2018. Modificado)	7
Figura 3.2. Relações analisadas por Fu: (a) Aridez com E_0 constante. (b) Umidade abundante com P constante. (ZANG <i>et al.</i> ,2004).....	12
Figura 3.3 Curvas resultantes da aplicação de Fu (ZANG <i>et al.</i> , 2004).....	14
Figura 3.4. Comparação de resultados da sensibilidade da vazão de longo período obtidos pela metodologia baseada na hipótese de Budyko e por análises tradicionais de modelagem hidrológica. (REIS <i>et al.</i> , 2013).....	18
Figura 3.5. Regiões fisiográficas da bacia. (CBHSF, 2016).....	20
Figura 3.6 Evaporação na bacia do São Francisco.....	21
Figura 3.7 Precipitação na bacia do São Francisco.....	22
Figura 4.1. Fluxograma da estratégia de trabalho. Elaboração do autor.	24
Figura 4.2 Cálculo da variação da vazão média de longo termo para diversos modelos climáticos. Elaboração do autor.....	29
Figura 5.1 Estações fluviométricas selecionadas na Bacia do São Francisco. Elaboração do autor.....	31
Figura 5.2 Precipitação por estações fluviométricas. Elaboração do autor.....	32
Figura 5.3 Distribuição espacial da precipitação. Elaboração do autor.....	33
Figura 5.4 Evapotranspiração potencial por estações fluviométricas. Elaboração do autor.....	34
Figura 5.5 Distribuição espacial da evapotranspiração potencial.	34
Figura 5.6 Vazão por estações fluviométricas. Elaboração do autor.....	35
Figura 5.7. Distribuição espacial da vazão. Elaboração do autor.....	35
Figura 5.8 Razão E_0/P por estação fluviométrica. Elaboração do autor.....	36
Figura 5.9 Distribuição espacial da razão E_0/P . Elaboração do autor.....	37
Figura 5.10 Razão E/P por estação fluviométrica. Elaboração do autor.....	38
Figura 5.11 Distribuição espacial da razão E/P . Elaboração do autor.....	38
Figura 5.12 Valores do parâmetro ω da equação de Fu. Elaboração do autor.....	39
Figura 5.13 Distribuição espacial do parâmetro ω . Elaboração do autor.....	40
Figura 5.14 Valores das elasticidades-climas. Elaboração do autor.....	41

Figura 5.15 Variação dos Valores de ε_1 e ε_2 por estação fluviométrica na bacia do São Francisco.....	41
Figura 5.16 Distribuição espacial de ε_1 na bacia do São Francisco.....	42
Figura 5.17 Distribuição espacial de ε_2 na bacia do São Francisco.....	42
Figura 5.18 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2015 – 2040 e RCP4.5.....	44
Figura 5.19 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2041 – 2070 e RCP4.5.....	44
Figura 5.20 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2070 – 2100 e RCP4.5.....	45
Figura 5.21 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5.....	47
Figura 5.22 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2041 – 2070 e RCP8.5.....	47
Figura 5.23 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2070 – 2100 e RCP8.5.....	48
Figura 5.24 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP4.5.....	50
Figura 5.25 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2041 – 2070 e RCP4.5.....	50
Figura 5.26 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2070 – 2100 e RCP4.5.....	51
Figura 5.27 Estações fluviométricas que mais contribuem para que dP/P negativo.....	53
Figura 5.28 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5.....	54
Figura 5.29 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2041 – 2070 e RCP8.5.....	54
Figura 5.30 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2070 – 2100 e RCP8.5.....	55
Figura 5.31 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5.....	58

Figura 5.32 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2041 – 2070 e RCP8.5.....	58
Figura 5.33 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2070 – 2100 e RCP8.5.....	59
Figura 5.34 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040.....	61
Figura 5.35 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2041 – 2070.....	63
Figura 5.36 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2070 – 2100.....	65
Figura 5.37 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2015 – 2040.....	67
Figura 5.38 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2041 – 2070.....	68
Figura 5.39 Gráfico <i>boxplot</i> da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2070 – 2100.....	70
Figura 5.40 Curva empírica da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n°56.....	71
Figura 5.41 Curva suavizada da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n°56.....	72
Figura 5.42 Curva suavizada da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n°3.....	73

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 3.1. Artigos de aplicação da metodologia da elasticidade na variação das vazões de longo período. Elaboração do autor.	19
Quadro 3.2. Regiões fisiográficas da bacia. (NEXUS, 2016)	20

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1	Equação do balanço hídrico.....	9
Equação 3.2	Hipótese de Budyko para climas áridos.....	10
Equação 3.3	Hipótese de Budyko para climas úmidos.....	10
Equação 3.4	Equação genérica da Hipótese de Budyko.....	10
Equação 3.5	Equação de Budyko.....	11
Equação 3.6	Hipótese de F_u para aridez extrema.....	12
Equação 3.7	Hipótese de F_u para umidade extrema.....	12
Equação 3.8	Condição de contorno umidade extrema.....	13
Equação 3.9	Condição de contorno aridez extrema.....	13
Equação 3.10	Equação de F_u	13
Equação 3.11	Expansão de Taylor para a equação de F_u	15
Equação 3.12	Sensibilidade da vazão em função das mudanças climáticas.....	15
Equação 3.13	Sensibilidade da vazão em função das elasticidades climáticas.....	15
Equação 3.14	Derivada da equação de F_u em relação a precipitação.....	16
Equação 3.15	Derivada da equação de F_u em relação a evapotranspiração potencial.....	16
Equação 4.1	Porcentagem da Q_{mlt} que é reservada a estação fluviométrica.....	23
Equação 4.2	Média anual dos dados de precipitação.....	24
Equação 4.3	Média anual dos dados de vazão média de longo termo.....	24
Equação 4.4	Média anual dos dados de evapotranspiração potencial.....	24
Equação 4.5	Estimativa do parâmetro w da equação de F_u usando mínimos quadrados.....	25
Equação 4.6	Variação da vazão média de longo termo devido mudanças climáticas.....	26
Equação 4.7	Equação de Hargreaves e Samani.....	27

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional de Águas
AR5	<i>Assessment Report 5</i>
BM	Banco Mundial
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CEDEP	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EM-DAT	<i>Emergency Events Database</i>
GEE	Gases do Efeito estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
NLTA	<i>Non-Lending Technical Assistance</i>
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PRH-SF	Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco
RPC	<i>Representative Concentration Pathway</i>

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem natural basilar para a subsistência, bem-estar e desenvolvimento da humanidade. Trata-se de um recurso limitado, de importância econômica e sanitária e, devido à intrínseca relação do ciclo hidrológico com as mudanças climáticas e de uso e cobertura do solo que o planeta tem sofrido, tornou-se o escopo de estudos e pesquisas (Xu *et al* (2004), Huang *et al.* (2018),) que relacionam a disponibilidade hídrica com as mudanças climáticas.

Esse entendimento é de extrema importância visto que a existência humana é limitada ao acesso à água e um maior compromisso com planejamento e a gestão dos recursos hídricos (que é suficientemente complexo devido às dimensões continentais do país e a grande diversidade de biomas), que está diretamente relacionada à disponibilidade hídrica do país. Em contrapartida, o problema não é apenas relacionado com a escassez da água, pois eventos extremos de seu excesso podem causar inundações e, conseqüentemente, impactos devastadores no meio urbano.

O Brasil já sofreu diversas crises hídricas ao longo de sua história. Eventos hidrológicos extremos tem se tornado mais frequentes em escala mundial de acordo com a base de dados EM-DAT (Emergency Events Database em inglês). No Brasil os eventos de estiagens, secas, enxurradas e inundações se aproximam de 84% dos desastres naturais ocorridos em entre 1991 e 2012 (CEDEP/UFSC, 2013). Entre 2003 e 2016 cerca de 50 % dos municípios brasileiros decretaram situação de emergência ou estado de calamidade pública devido à seca ou estiagem. Essa estatística diminuiu para 47,5 % quanto a cheias para o mesmo período (ANA, 2017).

Embora um dos fatores das nomeadas crises hídricas seja devido à ação antrópica nas bacias, isto é, aumento de áreas urbanizadas e da população e, conseqüentemente, aumento da demanda de água, além das dificuldades no planejamento para situações críticas, outra perspectiva é constituída pelos impactos que as mudanças climáticas causam no ciclo hidrológico. Dessa forma, fica evidente a importância de compreender a variabilidade do ciclo da água com relação às mudanças climáticas nas diferentes regiões hidrológicas do Brasil.

O clima é definido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) como a síntese de condições meteorológicas de uma determinada região, caracterizado por seu longo histórico de dados sobre o estado da atmosfera. Sua caracterização é feita a partir de estatísticas anuais sobre diferentes informações atmosféricas locais: temperatura, evapotranspiração, precipitação, pressão, irradiância, entre outros. Uma vez caracterizado um clima em dada região cria-se uma perspectiva sobre os atuais e futuros cenários de temperatura média e regime de chuvas, por exemplo. O conceito de variabilidade hidroclimática concerne, justamente, à alteração que distintos fatores - antropológicos e físicos – podem gerar na precipitação, na evapotranspiração e na vazão de escoamento de uma bacia hidrográfica (LOPEZ, 2014).

Nesse contexto de mudanças climáticas, tem-se reportado uma maior incidência de eventos extremos hidrológicos (EM-DAT, 2016), implicando num eventual aumento da variabilidade hidroclimática, o que leva ao uso cada vez mais recorrente de modelos climáticos globais. Uma abordagem tradicional é o uso de modelagem hidrológica para analisar os impactos da variabilidade climática e os impactos antrópicos no escoamento superficial, simulando processos de escoamento a partir de dados hidrometeorológicos. Uma abordagem alternativa e que tem sido numerosamente explorada (Sankarasubramanian & Vogel (2001), Yang & Yang (2011)) interpela à noção de sensibilidade climática estimada a partir da Hipótese de Budyko, a qual propõe que o escoamento superficial é função principalmente da precipitação pluviométrica, da evapotranspiração e do armazenamento (superficial e/ou subterrâneo). Fu (1981, *apud* Zhang *et al.*, 2004), baseado na Hipótese de Budyko, relaciona em escalas temporais longas a razão entre a evapotranspiração real e a precipitação com a razão entre a evapotranspiração potencial e a precipitação com apenas um parâmetro w (dependente das características da bacia) a ser definido, permitindo a estimativa da vazão média de longo período (OTSUKI *et al.*, 2013). Diversos autores como Choudury (1999), Porporato *et al* (2004) e Yang *et al.* (2008) propuseram equações do tipo Budyko para a utilização em escala temporal média de longo período. Ainda que os modelos do tipo Budyko tenham sido inicialmente propostos para estimar a evapotranspiração real em função da precipitação e da evapotranspiração potencial, a combinação da Hipótese de Budyko com a teoria do balanço hídrico pode e vem sendo utilizada como uma abordagem para a estimativa da vazão média de longo termo, como feito por Reis *et al.* (2013) para a bacia do Rio Jaguaribe, no Ceará.

Conforme já apontado anteriormente, o Brasil vem sofrendo com diversos eventos extremos e, por ter dimensões continentais, suas diferentes regiões hidrográficas são impactadas de diferentes formas. Dentre essas regiões encontra-se a bacia do Rio São Francisco, que é a sexta maior bacia hidrográfica brasileira, tendo o Rio São Francisco como o principal curso d'água da bacia. Possui grande relevância social, econômica e política, percorre 505 municípios em 6 estados diferentes, além do Distrito Federal. A bacia possui em torno de 54 % de sua área no Semiárido Brasileiro, com diversos registros de períodos críticos de estiagem.

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2015) constata que desde 2013 a bacia enfrenta condições hidrometeorológicas adversas, com impactos consideráveis nos níveis de armazenamento dos principais reservatórios da bacia, devido as baixas vazões e precipitações que oscilam abaixo da média. A bacia do Rio São Francisco possui sua importância em distintos aspectos, em particular o abastecimento de inúmeras cidades, o que fundamenta a necessidade de fazer o monitoramento da vazão desse rio. Não apenas os efeitos hidroclimáticos afetam o regime de vazão do Rio São Francisco, pois existe uma forte interferência antrópica na bacia, alterando-se a ocupação do solo e, conseqüentemente, tendo reflexos em toda a área de drenagem.

O conhecimento sobre a disponibilidade hídrica considerando o impacto das projeções futuras das mudanças climáticas no ciclo da água invoca-se indispensável para o bom planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos e, por conseguinte, para garantir o bem-estar da população e os interesses socioeconômicos-ambientais nacionais.

Diante do cenário de mudanças no clima, a ANA tem implementado medidas para aumentar a segurança hídrica e a capacidade do país de se adaptar a novos cenários. Em 2010 a ANA criou o Grupo de Trabalho sobre Mudanças Climáticas, responsável pela elaboração de publicação do documento de diretriz chamado “Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos” (ANA, 2010). Em 2015, em conjunto com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, a ANA publicou o documento “Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes de adaptação” (ANA, 2016) e, juntamente com o CNPq e a CAPES, lança editais de pesquisas e projetos sobre os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos.

A iniciativa de construção de um Plano Nacional de Adaptação à Mudança Climática criou uma oportunidade única para avaliar o estado de preparação do sistema de gestão dos recursos hídricos no Brasil e permitiu identificar as principais medidas adaptativas a serem tomadas (ANA, 2016). Finalmente, em 2018, a agência incorpora de forma mais explícita o tema das mudanças climáticas em suas iniciativas de planejamento e gestão dos recursos hídricos e atualmente avalia o impacto das projeções climáticas futuras na disponibilidade hídrica na escala de mini bacias (denominadas na ANA de Ottobacias) em todo território nacional à partir de 20 modelos climáticos globais, dois cenários de emissão GEE (RCP4.5 e RCP8.5) e considerando três horizontes temporais. (Comunicação Pessoal, SOUZA).

A motivação desse trabalho são os esforços que a ANA tem feito para incorporação das mudanças climáticas na gestão dos recursos hídricos, de modo que os objetivos desse trabalho podem ser vistos como um primeiro passo para atingir-se objetivos visados pela Agência Nacional de Águas.

2. OBJETIVOS

Os objetivos propostos por esse trabalho serão repartidos entre objetivo geral e objetivos específicos a fim de tornar claro e conciso o propósito dessa monografia.

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta monografia é de quantificar o impacto das mudanças climáticas na vazão média de longo termo (Q_{mlt}) na bacia hidrográfica do Rio São Francisco para três horizontes temporais (2006-2040, 2041-2070 e 2071-2100) utilizando-se as estações fluviométricas contribuintes na bacia a partir de análises baseadas na hipótese de Budyko e no conceito de elasticidade climática.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a sensibilidade da vazão média de longo termo utilizando-se o conceito de elasticidade-clima associado às hipóteses de Budyko, modelando a componente de escoamento superficial do balanço hídrico em função da variabilidade hidroclimática resultante das mudanças climáticas e das características da bacia.
- Estimar o parâmetro w da equação de Fu para a bacia do São Francisco e os valores dos coeficientes de elasticidade das variáveis climáticas, (evapotranspiração potencial e precipitação);
- Estimar as variações das vazões médias de longo termo na bacia para períodos futuros com base nos cenários de projeção climática RCP4.5 e RCP8.5 (Representative Concentration Pathwat, para sua sigla em inglês) dos 20 modelos climáticos globais apresentados no quinto relatório do Painel Intergovernamental para a Mudança Climática (IPCC, por seu acrônimo em inglês).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. INFLUÊNCIA DO CLIMA NO CICLO HIDROLÓGICO

As condições climáticas e o ciclo hidrológico estão intrinsicamente relacionados por mecanismos dinâmicos de interação física. A dicotomia clima-hidrologia se mostra interdependente em diferentes aspectos, como por exemplo sua relação com a temperatura. No início dos anos 1970 a comunidade científica internacional começou a se interrogar sobre as consequências possíveis da modificação da composição química da atmosfera devido ao aumento de emissão de gases do efeito estufa (GEE) de origem antropológica (LESPINAS, 2008).

Segundo o quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas datado de 2014, a temperatura mundial média pode atingir o aumento de 1,5 °C se as tendências de emissão de GEE continuarem as mesmas, sendo que o aumento de 1,0 °C já foi atingido desde o início da revolução industrial. Diferentes modelos climáticos estimam os distintos efeitos das mudanças climáticas entre a situação atual (com aumento médio de 1,0 °C) e situações futuras nas quais o planeta teria se aquecido em 1,5 °C ou até mesmo 2,0 °C.

Alguns dos impactos mais graves são o aumento do nível do mar devido ao descongelamento das calotas glaciais (na verdade, um componente tão importante quanto o descongelamento é a expansão térmica dos oceanos); o impacto sobre os ecossistemas e a biodiversidade planetária, incluindo o risco de incêndios e a transformação total de ecossistemas. Além do risco à saúde pública e aos meios de subsistência, devido à problemas agrícolas e de abastecimento de água e que já são uma preocupação real em diversas localidades brasileiras (ANA, 2016), como na bacia do Rio São Francisco.

Ainda hoje não é totalmente conhecida e dominada a intervenção do clima na hidrologia em si, visto que muitas pesquisas estudam esses temas de forma dissociada. Entretanto, além do exposto acima, ainda existem outros mecanismos de impacto indireto que o clima possui sobre a hidrologia. A notar, por exemplo, a caracterização de biomas: um bioma é a caracterização de uma unidade biológica de ambiente uniforme definido em função da sua climatologia, fauna e fitofisionomia (COUTINHO, 2004). De maneira simplificada o clima influencia a formação da vegetação local que por sua vez, influenciará na dinâmica do solo

e na evapotranspiração; o solo intervém nas características de infiltração e consequentemente, no balanço hidrológico.

A mudança nos padrões de precipitações pluviométricas também está conexa às questões climáticas. Especificamente na bacia hidrográfica do Rio São Francisco foi constatada uma alteração no regime pluvial entre 1985 e os primeiros anos da década de 2010, que pode ser visualizada na Figura 3.1. Inicialmente a região fisiográfica Submédio São Francisco possuía índices de umidades elevados (extremamente úmido) e posteriormente, observou-se índices de umidade baixos (entre seco e extremamente seco), devido uma anomalia no regime de chuvas que se instalou na bacia desde 2012.

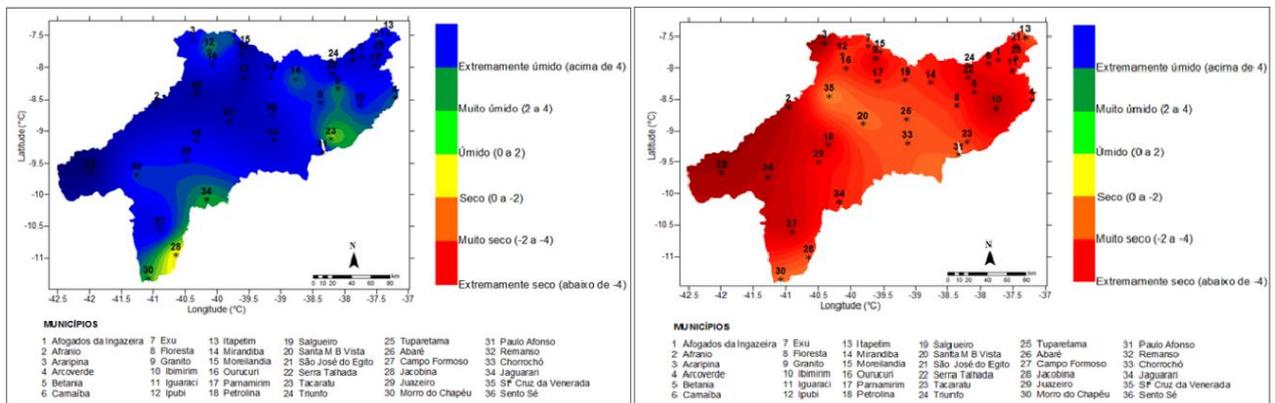


Figura 3.1. Classificação do Índice de Anomalia de Chuva do Submédio São Francisco respectivamente em 1985 e 2012. (SOBRAL. *et al*, 2018. Modificado)

Vale ressaltar que na década de 1990 se destacou como a mais seca de todo o período, com a ocorrência de dois El Niños de forte intensidade. O ano de 2012 marca o início de uma seca severa que atinge a região do Nordeste brasileiro e notavelmente na bacia do São Francisco (SOBRAL *et al*, 2018). De acordo com a ANA (2015), o triênio 2012 a 2014 caracterizou uma realidade extremamente caótica no semiárido brasileiro, cuja a maioria de suas estações pluviométricas classificaram esses anos como secos ou muito secos. O ciclo hidrológico está diretamente vinculado às mudanças de temperatura da atmosfera e ao balanço de radiação. Com o aquecimento global da atmosfera, espera-se mudanças nos padrões da precipitação, o que poderá afetar significativamente a disponibilidade e distribuição temporal da vazão nos rios, trazendo impactos nas disponibilidades médias. (ANA, 2016).

3.2. CONCEITO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

3.2.1. Evaporação

A evaporação é o processo natural de transformação física da água, em uma superfície livre, ao passar do estado líquido da matéria para o vapor em condições de temperatura inferiores a temperatura de ebulição.

3.2.2. Transpiração

A transpiração é um fenômeno biofísico pelo qual parte da água inserida no metabolismo das plantas é transferida para a atmosfera. A transpiração pode ser considerada como um processo de difusão, ou seja, sua intensidade é função da diferença entre a concentração de vapor d'água nas superfícies evaporantes e o conteúdo de vapor d'água da atmosfera, se intensificando com a diminuição da umidade relativa e com o aumento da temperatura do ar (LARCHER, 2006).

3.2.3 Evapotranspiração

Evapotranspiração é a associação dos fenômenos de transpiração e evaporação e pode ser compreendida como o processo de transferência de energia da superfície terrestre para a atmosfera em forma de calor latente.

Há dois conceitos importantes sob os quais é interessante fazer a distinção: a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial. A evapotranspiração potencial corresponde é uma das formas de expressar a perda de água para a atmosfera em um local coberto de forma natural e com potencial matricial próximo a capacidade de campo (CAMARGO *et al.*, 2000). Já a evapotranspiração real é a medida da perda de água em uma área nas condições climáticas e hídricas reinante (PEREIRA, 1997). Em outras palavras, a evapotranspiração potencial será sempre maior ou igual que a evapotranspiração real.

3.3. HIPÓTESE DE BUDYKO

3.3.1 Equação de Budyko

A alteração dos processos hidrológicos devido às mudanças climáticas foi percebida em diversas bacias ao redor do mundo, criando uma série de problemas que concernem principalmente a gestão dos recursos hídricos (STOCKER *et al.*, 2014). É notória a imensidade de grandezas que influenciam os processos hidrológicos dentro de uma bacia hidrográfica, sejam elas relacionadas ao clima, ao solo ou às características superficiais e subterrâneas da bacia, conquanto a hipótese de Budyko defende que, mesmo com todas essas características podem influenciar os processos hidrológicos, a precipitação e o a evapotranspiração potencial são as duas mais influentes variáveis no balanço hídrico médio a longo prazo (NING *et al.*, 2017, *apud* BUDYKO, 1974).

A abordagem de Budyko é considerada uma das mais consistentes que relacionam o clima com as condições de escoamento e evapotranspiração real de uma bacia, e tem sido utilizada com sucesso para a investigação de interações entre processos hidrológicos, variabilidade climática e uso e ocupação do solo (NING *et al.*, 2017).

Dessa forma, o balanço hídrico de uma bacia pode ser matematicamente simplificado à Equação 3.1,

$$P = E + Q + \Delta S \quad (3.1)$$

em que P representa a precipitação, Q representa o escoamento total, E representando a evapotranspiração e ΔS representando a variação do volume armazenado na bacia.

Para análises de longo tempo, nas quais as variações temporais dos volumes armazenados na bacia podem ser negligenciadas, a vazão média de longo prazo pode ser escrita apenas em função precipitação e da evapotranspiração. Existe uma associação clara entre o balanço hídrico e o balanço energético, sendo a evapotranspiração um dos principais fatores na equação de balanço energético, conjuntamente com o calor sensível. Ainda considerando-se

análises de longo prazo, é coerente dizer que a radiação líquida às proximidades da superfície é integralmente transformada em fluxos de calor sensível e calor latente (REIS *et al.*, 2013).

As hipóteses de Budyko são baseadas em dois cenários extremos. A primeira é caracterizada para condições climáticas muito áridas, com taxas de precipitação muito inferiores que a evapotranspiração potencial. Nesse tipo de situação pode-se escrever matematicamente, como explicitado na Equação 3.2, que a evapotranspiração real se tende ao valor da precipitação pluviométrica. A segunda situação, sob outra perspectiva, é a cenário de extrema umidade, isto é, a precipitação é muito maior que a evapotranspiração potencial e consequentemente a evapotranspiração real tende ao valor da evapotranspiração potencial, como indicado na Equação 3.3,

$$\lim_{\frac{R_n}{L_e P} \rightarrow \infty} \left(\frac{E}{P} \right) = 1 \quad (3.2)$$

$$\lim_{\frac{R_n}{L_e P} \rightarrow 0} \left(\frac{E}{P} \right) = \frac{E_0}{P} \quad (3.3)$$

em que, R_n representa a radiação solar às proximidades da superfície, L_e representa o calor latente de vaporização da água e E_0 representa a evapotranspiração potencial.

Fundamentado no exposto acima, Budyko (1974) propõe, como exposto na Equação 3.4, que a razão E/P pode deve ser escrita como uma função do fator E_0/P , componente tradicionalmente chamada de índice de aridez. Sendo Φ uma função a ser definida, Budyko (1974) baseou-se nas Equações 3.2 e 3.3 como condições de contorno aplicando-as ao balanço de massa hidrológico proposto na Equação 3.1 e dessa forma, definindo a função Φ conforme a Equação 3.5, onde tgh é a tangente hiperbólica.

$$\frac{E}{P} = \Phi \left(\frac{E_0}{P} \right) \quad (3.4)$$

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_0}{P} \left[1 - e^{-\frac{E_0}{P}} \right] \operatorname{tgh} \left(\frac{P}{E_0} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

3.3.2 Equação de Fu

Fu (1981), publicou um estudo sobre as relações entre a evapotranspiração e a precipitação de longo termo (ZHANG *et al.*, 2004). Zhang *et al.* (2004) reanalisaram o trabalho de Fu (1981) e apresentaram a análise adimensional e a manipulação matemática realizada no trabalho original de Fu (1981) para desenvolver uma solução analítica para o cálculo da evapotranspiração média anual. Fu (1981) iniciou suas análises a partir da observação e do entendimento de duas situações semelhantes às condições extremas avaliadas por Budyko. A primeira delas remete à condição de aridez extrema, na qual há energia em excesso e a disponibilidade de água é o fator limitante que define a taxa de evapotranspiração real (E). Seja E_0 a taxa de evapotranspiração potencial, a diferença ($E_0 - E$), chamada evapotranspiração residual, representa a quantia que poderia ser evaporada caso houvesse água suficiente (OTSUKI, 2015). Por outra forma, a evapotranspiração real possui uma relação com a evapotranspiração residual. Conforme a precipitação aumenta, a evapotranspiração residual diminui, visto que a disponibilidade hídrica se torna maior. Entretanto a evapotranspiração não varia linearmente com a precipitação. Isso implica dizer que a taxa de crescimento da evapotranspiração real em relação a precipitação ($\partial E / \partial P$) é menor com o aumento da precipitação e maior com o aumento da evapotranspiração residual.

Na segunda condição analisada por Fu, a condição de umidade extrema, é possível fazer um raciocínio análogo ao explicitado acima comparando-se a taxa de variação da evapotranspiração real em relação a evapotranspiração potencial ($\partial E / \partial E_0$) e concluir que, para um valor de precipitação bem definido, a taxa $\partial E / \partial E_0$ diminui com o aumento da evapotranspiração potencial e com a diminuição da parcela ($P - E$). Ambas situações podem ser melhor visualizadas na Figura 3.2, com a condição de aridez extrema representada na Figura 3.2 (a) e a condição de umidade extrema na Figura 3.2 (b).

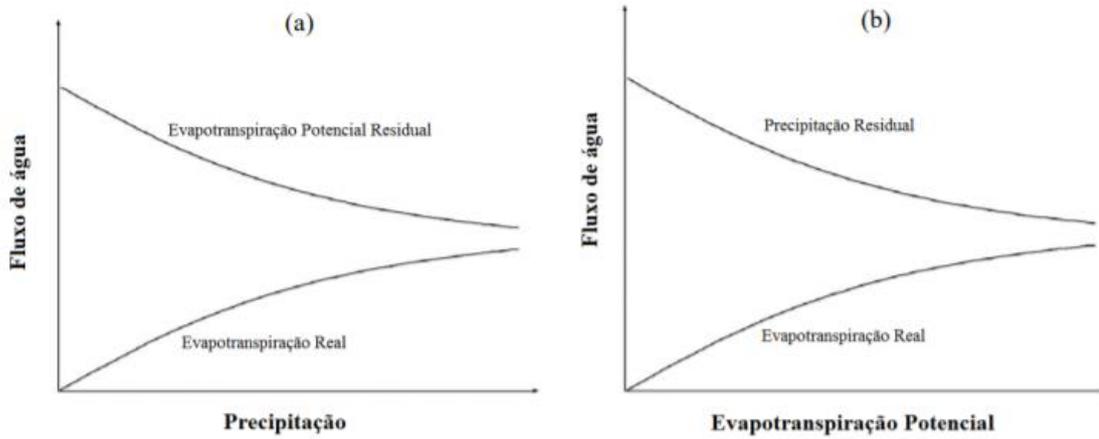


Figura 3.2. Relações analisadas por Fu: (a) Aridez com E_0 constante. (b) Umidade abundante com P constante. (ZHANG *et al.*, 2004. Modificado por OTSUKI (2015)).

Ambas relações explicitadas pela Figura 3.2 podem ser descritas matematicamente, como sugerido nas Equações 3.6 (aridez extrema) e 3.7 (umidade extrema),

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \varphi_1 \left(\frac{E_0 - E}{P} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial E_0} = \varphi_2 \left(\frac{P - E}{E_0} \right) \quad (3.7)$$

em que φ_1 e φ_2 são funções a serem definidas. Para poder definir-se as funções φ_1 e φ_2 é preciso instituir algumas condições de contorno. Sob condições de umidade extrema, o E se aproxima do E_0 e não aumentam com a precipitação (P) pois sob esta condição o valor de E é limitado pela evapotranspiração potencial E_0 . Já em condições de aridez extrema, E aproxima-se da precipitação P e não irá aumentar com a evapotranspiração potencial (ZANG *et al.*, 2004). Essas condições de contorno podem ser vistas matematicamente nas Equações 3.8 e 3.9.

$$\left. \frac{\partial E}{\partial P} \right|_{x=0} = 0, \text{ com } x = \left(\frac{E_0 - E}{P} \right) \quad (3.8)$$

$$\left. \frac{\partial E}{\partial E_0} \right|_{y=\infty} = 0, \text{ com } y = \left(\frac{P - E}{E_0} \right) \quad (3.9)$$

Aplicando-se as condições de contorno das Equações 3.8 e 3.9 nas Equações 3.6 e 3.7 respectivamente, Zhang *et al.* (2004) puderam introduzir uma nova equação, mas incorporando apenas um único parâmetro, que é relacionado às características da bacia hidrográfica que influenciam na precipitação, na evapotranspiração e no escoamento. Ela foi nomeada equação de Fu e é representada conforme pela Equação 3.10,

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} \quad (3.10)$$

em que w é o parâmetro que representa as características da bacia hidrográfica.

Sendo assim, é possível construir um gráfico que agrupa um conjunto de curvas correspondentes à distintos valores de w em função das frações E/P e E_0/P . Essa representação gráfica (Figura 3.3) é, na realidade, a aplicação da equação de Fu (Equação 3.10) para valores de E/P e E_0/P bem definidos.

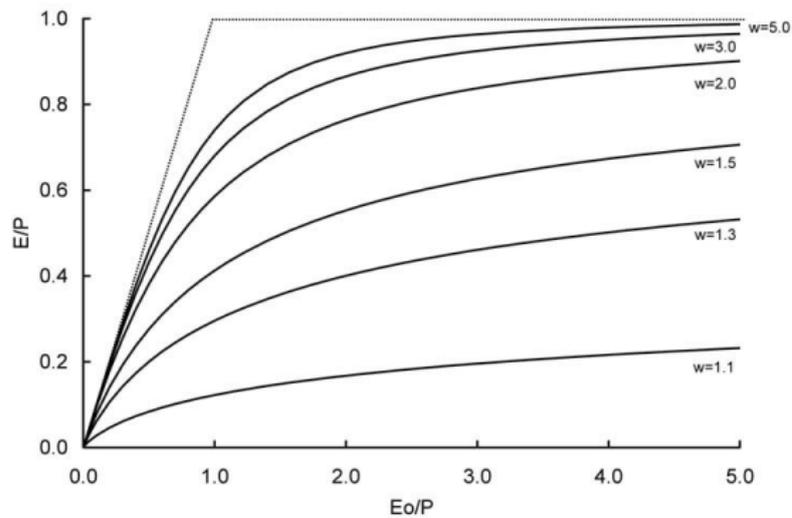


Figura 3.3 Curvas resultantes da aplicação de Fu (ZANG *et al.*, 2004)

O parâmetro w pode ser definido a partir de calibrações com dados históricos (LI, 2013). Visto que ele é um parâmetro intrinsecamente relacionados às características da bacia, se existirem variações de vazão na bacia hidrográfica e w tiver se mantido constante pode-se concluir que a mudança de vazão foi devida somente às mudanças climáticas. Para valores de w que variam temporalmente, pode-se inferir que as características distintivas da bacia foram alteradas.

3.4. CONCEITO DE ELASTICIDADE-CLIMA

O conceito de elasticidade-clima foi introduzido por Schaake (1990) como alternativa para avaliar a sensibilidade da parcela de escoamento dos processos hidrológicos em função de mudanças climáticas (FU *et al.*, 2007). A elasticidade-clima das vazões é definida como sendo uma mudança percentual das vazões médias de longo período de uma determinada bacia hidrográfica devido a uma mudança percentual em variáveis climáticas, tais como precipitação e evapotranspiração potencial (DORNELES, *et al.* 2017).

Yang *et al.* (2011) apresentaram equações analíticas para a obtenção dos coeficientes de elasticidade-clima das vazões. São utilizadas as variáveis climáticas precipitação e evapotranspiração potencial. Seus resultados analíticos foram baseados em uma expansão de série de Taylor da equação de Fu (Equação 3.10), visto que $E = f(E_0, P, w)$. Sendo assim, pode-se escrever a equação 3.11.

$$dE = \frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial f}{\partial w} dw \quad (3.11)$$

Utilizando-se a forma diferencial da Equação 3.1 para períodos de tempo nos quais a variação do volume de água armazenado na bacia seja desprezível e associando-a a Equação 3.11 pode-se obter a Equação 3.12.

$$dQ = \left(1 - \frac{\partial f}{\partial P}\right) dP + \frac{\partial f}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial f}{\partial w} dw \quad (3.12)$$

Finalmente, visto que w representa as características inerentes à bacia hidrográfica, para uma análise de sensibilidade de vazão proveniente unicamente das mudanças climáticas é possível propor que a variação de w é nula, ou seja, $dw = 0$. Portanto, Equação 3.12 pode ser rearranjada para obter-se a Equação 3.13,

$$\frac{dQ}{Q} = \underbrace{\left(1 - \frac{\partial f}{\partial P}\right) \left(\frac{P}{P-E}\right)}_{\varepsilon_1} \frac{dP}{P} + \underbrace{\left(-\frac{\partial f}{\partial E_0} \left(\frac{E_0}{P-E}\right)\right)}_{\varepsilon_2} \frac{dE_0}{E_0} \quad (3.13)$$

em que, ε_1 representa o coeficiente da elasticidade da precipitação com relação a vazão e ε_2 representa o coeficiente da elasticidade da evapotranspiração potencial com relação a vazão.

É possível demonstrar que a soma das elasticidades ε_1 e ε_2 é necessariamente unitária. A Equação 3.13 possibilita, em outras termos, estimar o percentual de mudanças na vazão média de longo período devido a alterações percentuais na precipitação e na evapotranspiração potencial.

Reis *et al.* (2013) propuseram obter as consequências destas variações na vazão, derivando a equação de Fu em relação a precipitação e em relação à evapotranspiração potencial e assim obtendo, respectivamente, as Equações 3.14 e 3.15.

$$\frac{\partial f}{\partial P} = 1 - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} + \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \right]^{\frac{1-w}{w}} \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial f}{\partial E_0} = 1 - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^w \right]^{\frac{1-w}{w}} \left(\frac{E_0}{P} \right)^{w-1} \quad (3.15)$$

3.5. OUTROS FATORES INTERVENIENTES

Embora Budyko defenda que, entre todas as variáveis climáticas intervenientes no ciclo hidrológico, a precipitação e a evapotranspiração potencial são as mais influentes para uma avaliação a longo prazo (NING *et al.*, 2017), estudos posteriores a Budyko (1974) procuraram reavaliar a teoria por ele proposta. Buscou-se compreender como demais fatores poderiam contribuir para uma melhor representatividade do modelo proposto. A seguir serão expostos, de maneira sucinta, alguns dos fatores recorrentes na literatura além da energia e da disponibilidade hídrica.

3.5.1 Vegetação

Quando se imagina o ciclo hidrológico na escala de uma bacia hidrográfica a influência da vegetação no regime hidrológico é presente. Li *et al.* (2013) avaliaram as vantagens de introduzir um parâmetro exclusivamente ligado às características da vegetação para a estimativa do parâmetro w da equação de Fu. Foram avaliadas 26 bacias de grande escala e os resultados obtidos apontam uma melhoria de 40% ao considerar o impacto da vegetação. Zang *et al.* (2011) também tentaram compreender e modelar a influência da vegetação e propuseram um modelo com dois parâmetros para a estimativa da evapotranspiração. O estudo apontou que bacias hidrográficas cobertas por florestas apresentaram uma

evapotranspiração mais importante que bacias com vegetação dispersa, ou seja, há uma relação intrínseca entre a vegetação e a evapotranspiração real e, conseqüentemente, nas outras variáveis hidrológicas.

3.5.2 Pedologia e efeitos do uso e ocupação do solo

O solo é um meio filtrante capaz de reabastecer lençóis freáticos e armazenar água com um funcionamento análogo ao de um reservatório da bacia hidrográfica. Quando o solo não está saturado e ocorre um evento de precipitação a água poderá se infiltrar em seus poros e futuramente será encaminhada para os corpos hídricos através do equilíbrio hídrico subterrâneo. Uma vez que o solo se satura em água durante um evento chuvoso ocorre o transbordo da água através de seus poros, dando origem ao escoamento superficial. A mudança no uso e ocupação do solo impacta diretamente nas características geológicas do solo, podendo alterar sua capacidade de armazenamento de água e, conseqüentemente, alterar o escoamento superficial e a evapotranspiração na bacia. Diante da importância da capacidade do solo em armazenar os volumes precipitados diversos trabalhos como (Cheng *et al.*, 2011), (Sankarasubramanian & Vogel, 2001) foram desenvolvidos apresentando parâmetros diretamente relacionados às características geológicas do solo.

3.6. APLICAÇÕES E TRABALHOS ANTERIORES

O conceito de elasticidade-clima e a aplicabilidade do cálculo da sensibilidade da vazão média de longo termo em função das variações climáticas vem sendo bastante explorado nos últimos anos, comparando o modelo hidrológico à hipótese de Budyko. Estudos como Yang & Yang (2011), Reis *et al.* (2013), Fernandez & Sayama (2015) e Dorneles *et al.* (2017) são exemplos da aplicação de ambas metodologias, apresentando significantes resultados para regiões semiáridas e áridas. Roderick & Farquhar (2011), Xu *et al.* (2014), Wang *et al.* (2016), Liu *et al.* (2017) são exemplos de estudos que aplicam o conceito de elasticidade-clima para o cálculo da variação da vazão média devido as mudanças climáticas.

Sankarasubramanian & Vogel (2001) utilizam diversos métodos não paramétricos para estimar a elasticidade da vazão em relação a precipitação em todo território estadunidense. Nesse estudo os autores propõem que a hipótese de Budyko apresenta melhores resultados

para bacias e sub-bacias aonde a umidade e o balanço energético estejam sincronizados, ou seja, os valores de precipitação e evapotranspiração potencial se aproximam, o que é uma característica de regiões semiáridas e áridas.

Yang & Yang (2011) obtiveram equações analíticas para a previsão da elasticidade-clima da vazão utilizando a precipitação e a evapotranspiração potencial, e deduziram equações analíticas que relacionam a evapotranspiração potencial e diversas variáveis climáticas como umidade, velocidade do vento, irradiância e temperatura.

Reis *et al.* (2013) desenvolveram um estudo da aplicação da hipótese de Budyko com objetivo de compreender os impactos das mudanças climáticas na vazão anual de longo período do Rio Jaguaribe (CE), obtendo bons resultados com relação à modelagem hidrológica. Foi utilizada a metodologia apresentada por Yang & Yang (2011) e posteriormente foram comparados os resultados obtidos por um estudo sobre impacto das mudanças climáticas (*Drought NLTA*) organizado pelo Banco Mundial (BM) e em parceria com a ANA para um estudo de políticas de preparação para as secas e medidas de adaptação e resiliência às mudanças climáticas no Brasil. Os resultados obtidos por Reis *et al.* (2013) possuem uma correlação de 0,99 com os resultados obtidos pelo estudo NLTA (Martins, 2011), como pode-se observar na Figura 3.4.

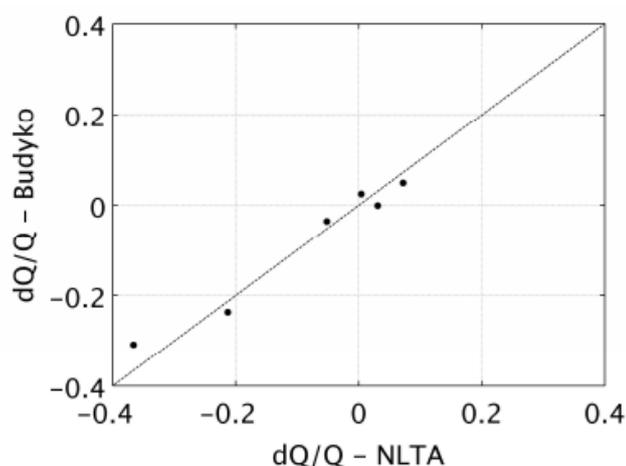


Figura 3.4. Comparação de resultados da sensibilidade da vazão de longo período obtidos pela metodologia baseada na hipótese de Budyko e por análises tradicionais de modelagem hidrológica. (REIS *et al.*, 2013).

Ainda é possível encontrar outros artigos e estudos importantes que se relacionam diretamente com a problemática deste trabalho e que não serão destrinchados nessa secção, mas que podem ser visualizados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Artigos de aplicação da metodologia da elasticidade na variação das vazões de longo período. Elaboração do autor.

Autor	Área de estudo	Metodologia
Zhang <i>et al.</i> , 2011	Hun-Tai, China	Budyko + Elasticidade-Clima
Ye <i>et al.</i> , 2013	Lago Poyang, China	Modelo conceitual + Elasticidade climática
Xu <i>et al.</i> , 2014	Cabia Heihe, China	Budyko Elasticidade-Clima
Y. Li <i>et al.</i> , 2016	Loess Plateau, China	Budyko + Elasticidade
Wu, 2017	Loess Plateau, China	Budyko + Elasticidade
Liu <i>et al.</i> , 2017	China	Budyko + Elasticidade
Li <i>et al.</i> , 2017	Jing river, Loess Plateau, China	Budyko + Elasticidade
Huang <i>et al.</i> , 2018	Hongshui, China	Budyko + Elasticidade e Modelagem hidrológica

3.7. ZONA DE ESTUDO

A bacia do rio São Francisco situa-se na região hidrográfica do São Francisco contando com aproximadamente 2.860 km de extensão, uma área de drenagem de mais de 639.000 km² e 168 afluentes. Ocupa 8% do território nacional e faz parte de uma das 12 regiões hidrográficas brasileiras. Possui elevada incidência solar, baixo potencial pluviométrico e grande potencial hidrelétrico, dispondo de nove hidrelétricas com capacidade instalada com mais de 10.000 MW, além de atender demandas domésticas, agroindustriais e conta com várias barragens que controlam os alagamentos na bacia. (AMORIM *et al.*, 2017).

Para fins de planejamento, a bacia do São Francisco foi dividida fisiograficamente em 4 unidades: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Figura 3.5), que foram caracterizadas baseadas em critérios de homogeneidade geológica, geomorfologia, hidrográficos e climáticos.

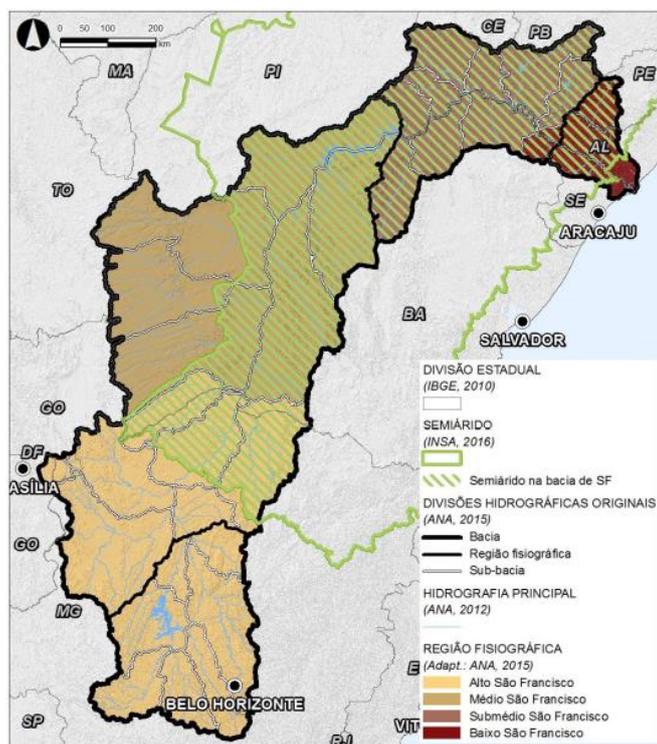


Figura 3.5. Regiões fisiográficas da bacia. (CBHSF, 2016)

O Quadro 3.2 representa numericamente a repartição superficial da bacia conforme sua região fisiográfica, assim como os dados de densidade populacional para cada região.

Quadro 3.2. Regiões fisiográficas da bacia. (NEXUS, 2016)

Região fisiográfica	Área		Unidades da Federação na região fisiográfica	População residente em 2010	N.º sub-bacias
	km ²	% da bacia			
Alto São Francisco	253.291,0	39,8	92,6% Minas Gerais 5,6% Bahia 1,2% Goiás 0,5% Distrito Federal	11.846.908	14
Médio São Francisco	247.518,8	38,9	100,0% Bahia	2.065.925	6
Submédio São Francisco	105.540,5	16,6	59,4% Pernambuco 39,5% Bahia 1,1% Alagoas	2.239.414	9
Baixo São Francisco	29.866,5	4,7	43,9% Alagoas 23,8% Sergipe 22,8% Pernambuco 9,5% Bahia	2.095.123	5

A bacia hidrográfica já sofreu diversas e intensas intervenções antrópicas. Os principais reservatórios construídos para a regularização de vazão ou geração de energia hidrelétrica

são o reservatório Três Marias, em Minas Gerais; os reservatórios Paulo Afonso e Itaparica, na Bahia; e o reservatório Xingo, situado entre Alagoas e Sergipe (ANA, 2016). A partir de 1950 o vale do São Francisco sofreu grandes transformações devido a construção do reservatório Três Marias. O Alto São Francisco começou a sofrer alterações no solo desde o final da década de 1960 e desde 1980 o Médio, Submédio e Baixo São Francisco são impactados devido os projetos de irrigação e de usinas hidrelétricas (HOLANDA *et al.*, 2011).

A bacia do São Francisco é composta por diferentes biomas e igualmente por diversos sistemas meteorológicos que se associam para formar os diferentes regimes de precipitação ao longo da bacia. Visto que a bacia possui uma área majoritariamente inserida em clima semiárido, apresenta grande variabilidade espaço-temporal no campo da precipitação, uma vez que essa região possui grande irregularidade temporal e espacial de chuva (MARENGO *et al.*, 2011). As Figuras 3.6 e 3.7 permitem visualizar a distribuição espacial das variáveis climáticas evapotranspiração e precipitação, respectivamente, na bacia do São Francisco.

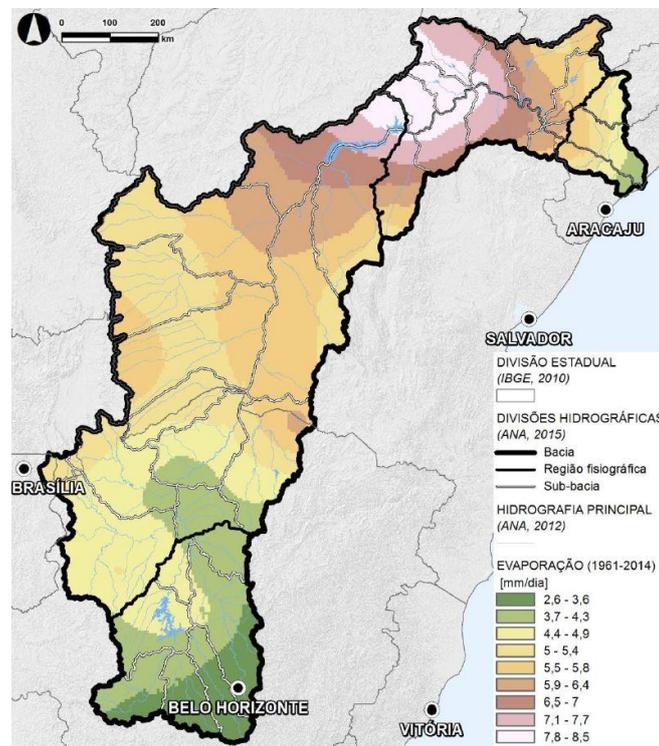


Figura 3.6. Evaporação na bacia do rio São Francisco. (CBHSF, 2016)

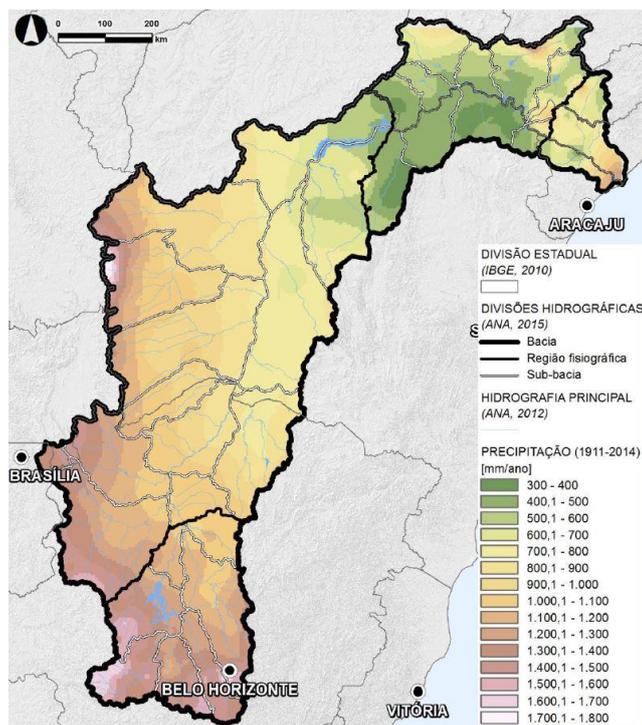


Figura 3.7. Precipitação na bacia do rio São Francisco. (CBHSF, 2016)

Observa-se maiores valores de precipitação na região do Alto e Médio São Francisco (entre 800 e 1700 mm/ano), enquanto a região do Submédio apresenta valores bem mais baixos (300 a 500 mm/ano). Com relação à evapotranspiração, observa-se que as regiões do norte e nordeste da bacia apresentam os maiores valores, devido aos valores históricos de temperatura serem relativamente maiores se comparados ao Alto e Médio São Francisco.

Segundo a ANA (2019) a disponibilidade hídrica superficial da bacia ($1.886 \text{ m}^3/\text{s}$) corresponde a 2,07% da disponibilidade superficial do país. A vazão média é de $2.846 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão de permanência Q_{95} vale $854 \text{ m}^3/\text{s}$ e a demanda total retirada da bacia equivale a uma vazão de $278,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (9,8 % da demanda nacional). A vazão de retirada é repartida para a irrigação ($213,7 \text{ m}^3/\text{s}$), abastecimento urbano ($31,3 \text{ m}^3/\text{s}$), uso industrial ($19,8 \text{ m}^3/\text{s}$), demanda animal ($10,2 \text{ m}^3/\text{s}$) e abastecimento de zonas rurais ($3,7 \text{ m}^3/\text{s}$).

As vazões máximas outorgadas em 2014 totalizavam $723,4 \text{ m}^3/\text{s}$, representando um acréscimo de 24% face às vazões máximas de captação apuradas pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2004-2013 (PRH-SF 2004-2013). A necessidade de reformular as condições de operação dos reservatórios da bacia face à sua importância para o atendimento dos usos múltiplos tem desde então levado a ações de

redução das vazões mínimas liberadas pelos reservatórios e tal reformulação tornou-se latente desde o início do processo de gestão da seca pela qual a bacia tem passado desde 2012.

4. METODOLOGIA

Nesse capítulo serão abordados os métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo, destacando como será efetuado o tratamento e a análise de dados, as hipóteses consideradas, o cálculo do coeficiente w da Equação de Fu e dos valores dos coeficientes de elasticidade-clima. Ainda será explicitada a metodologia para a determinação da vazão média de longos períodos utilizando-se diversos modelos climáticos para diferentes cenários de emissões de GEE.

4.1. ESTRATÉGIA DE AÇÃO

Visando avaliar o impacto das mudanças climáticas na vazão em diversas sub-bacias da bacia do Rio São Francisco, aplicar-se-á o conceito de elasticidade-clima em conjunto com as hipóteses de Budyko para estimar as futuras vazões médias de longo período na bacia. Para isto, foi definida uma estratégia de ação que contempla, em outras palavras, a abordagem que será efetuada para atingir-se os objetivos deste trabalho. A Figura 4.1 representa o fluxograma da estratégia de ação que tentará encaminhar este trabalho ao êxito de seus objetivos gerais e específicos listados nos itens 2.1 e 2.2.

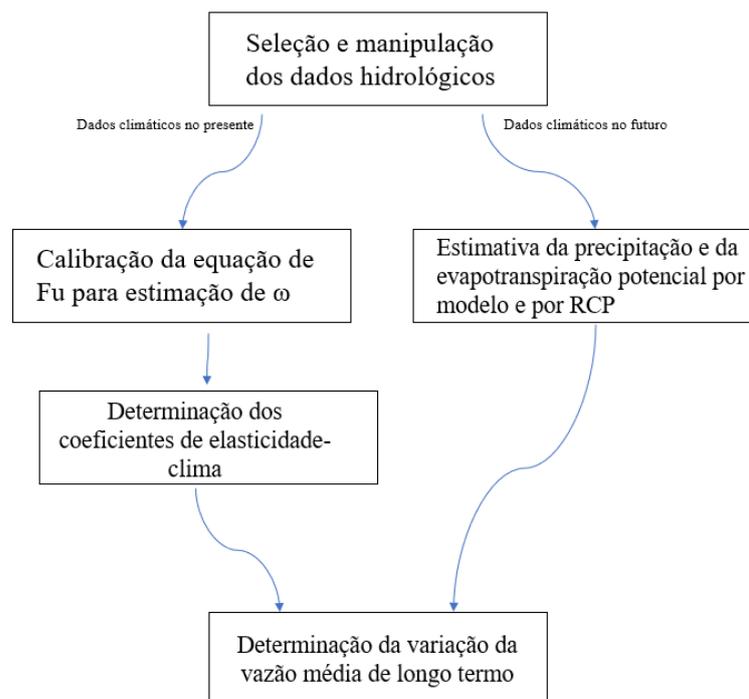


Figura 4.1. Fluxograma da estratégia de trabalho. Elaboração do autor.

4.2. DADOS HIDROLÓGICOS

As variáveis hidrológicas que serão analisadas neste trabalho são aquelas consideradas de extrema importância de acordo com as hipóteses de Budyko, isto é, a precipitação média, a vazão média e a evapotranspiração potencial média. Os dados de precipitação e vazão provêm da base de dados Hidroweb da ANA, que é composta pelos dados observados nas estações fluviométricas na bacia do São Francisco e que são operadas pela ANA. A evapotranspiração real será estimada com base no balanço hídrico utilizando os dados da ANA enquanto os dados de evapotranspiração potencial serão oriundos das séries de Xavier (2015). Xavier et al. (2015, 2017) desenvolveu uma grade de alta resolução ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) em todo o território brasileiro com dados de precipitação diária e mais seis variáveis climáticas que geralmente são necessárias para estimar a evapotranspiração potencial. No processo de definição dos dados em grade foram testados, para cada variável, seis diferentes esquemas de interpolação utilizando 9259 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas cobrindo todo o território brasileiro durante o período de 1980-2015. O conjunto de dados está disponível em : <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>. O tratamento dos dados e os resultados foram obtidos com auxílio da linguagem de programação Matlab.

4.2.1. Seleção das estações fluviométricas

As estações utilizadas foram apenas as estações sem influências de reservatório. A determinação de quais são as estações sem influência de reservatório será feita utilizando-se o mapeamento de massas de água e por conseguinte a análise da razão de volume acumulado pelo volume escoado na estação. Para cada estação fluviométrica a ANA estima diferentes parâmetros como a massa de água identificada na área de drenagem da estação, sua capacidade de armazenamento, vazão média de longo termo da estação, entre outros (Comunicação pessoal, SOUZA). A Equação 4.1 traz a razão (λ) entre o volume reservado na estação N e a vazão média de longo período da estação N ,

$$\lambda = \frac{V_{acumulado,N}}{Q_{mlt,N}} \quad (4.1)$$

Em que $V_{acumulado,N}$ representa o volume acumulado na estação N e $Q_{mlt,N}$ representa a vazão média de longo termo da estação N .

Para os valores de λ superiores à 5% foi considerado que há influência de reservatório na estação fluviométrica.

Para este estudo foram selecionadas apenas as estações com registros históricos de pelo menos 30 anos de extensão e sem influência de reservatório. Os dados de vazão e precipitação serão extraídos de séries históricas entre 1980 e a atualidade, considerando-se as condições impostas no item 4.2.1, enquanto as evapotranspirações potenciais de referência serão obtidas baseando-se na literatura de Xavier *et al.* (2015).

4.3. ESTIMAÇÃO DO PARÂMETRO ω DA EQUAÇÃO DE FU

O parâmetro w da equação de Fu tem um papel fundamental na abordagem deste trabalho visto que é o único parâmetro que relaciona as características da bacia hidrográfica com seus dados hidrológicos. Definidas as estações fluviométricas sem influência reservatório será possível estimar o valor de w . A partir dos valores de vazão, precipitação e evapotranspiração potencial mensais de cada estação fluviométrica foi possível calcular os valores médios anuais de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão de longo termo na bacia. Esse cálculo será realizado para todos os anos da série hidrológica, permitindo, conseqüentemente, o cálculo da evapotranspiração real utilizando-se a Equação 3.1 e considerando-se que o volume armazenado na bacia é desprezível. O cálculo dos valores anuais da precipitação, da evapotranspiração potencial assim como a valor médio da vazão na bacia para um ano genérico da série hidrológica pode ser traduzido matematicamente pelas Equações 4.2-4.4.

$$P_i = \sum_{a=1}^n P_{m,a} \quad (4.2)$$

$$(E_0)_i = \sum_{a=1}^n (E_0)_{m,a} \quad (4.3)$$

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n Q_{m,a} \quad (4.4)$$

em que $P_{m,a}$ é a precipitação média mensal na bacia no a-ésimo mês para o i-ésimo ano da série hidrológica, $(E_0)_{m,a}$ é a evapotranspiração potencial média mensal na bacia a-ésimo mês para o i-ésimo ano da série hidrológica, $Q_{m,a}$ é a vazão média mensal na bacia no a-ésimo mês para o i-ésimo ano da série hidrológica e \bar{Q}_i , P_i e $(E_0)_i$ são respectivamente a vazão média anual, a precipitação total anual e a evapotranspiração potencial total anual da bacia para o i-ésimo ano da série hidrológica.

Dessa forma, é possível deduzir a evapotranspiração real utilizando-se a Equação 3.1 se considerado que o volume armazenado na bacia para o período de estudo é desprezível.

Obtidos os valores de \bar{Q}_i , P_i , $(E_0)_i$ e da evapotranspiração real média anual (\bar{E}) para cada ano da série hidrológica, poderá se aferir o valor da estimativa $\hat{\omega}$ visto que $(\hat{E} / \hat{P}) = f[(\hat{E}_0 / \hat{P}), \omega]$ e $(\bar{E} / \bar{P}) = f[(\bar{E}_0 / \bar{P}), w]$ podem ser calculados. Dessa forma, a estimativa $\hat{\omega}$ pôde ser calculada utilizando-se um método numérico para determinar a raiz da função não-linear $(E / P) - f[(E_0 / P), w] = 0$ em que f é a equação de Fu (Equação 3.10) e $\hat{\omega}$ representa a estimativa do parâmetro da equação de Fu.

4.4. CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE ELASTICIDADE-CLIMA

O cálculo da elasticidade climática da vazão com relação à precipitação (ε_1) e da elasticidade climática da vazão com relação à evapotranspiração potencial (ε_2) se torna trivial uma vez calculado o valor do parâmetro w da equação de Fu. As Equações 3.14 e 3.15, combinadas com os valores de precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial

fornecerão os valores de ε_1 e ε_2 .

4.5. CÁLCULO DAS VAZÕES MÉDIAS DE LONGO TERMO

A base de dados NEXGDDP possui modelos climáticos que utilizaram as projeções RCP4.5 e RCP8.5 com discretização temporal diária para a avaliação do impacto das mudanças climáticas. Os modelos climáticos globais (MCG), de um modo geral, fornecem projeções de clima em escalas espaciais mundiais ou continentais com uma resolução não muito adequada às necessidades exigidas, por exemplo, no âmbito de planos de adaptação regional ou setorial. Devido às limitações computacionais e de dados, a resolução desses MCGs é normalmente maior que 100 km, o que limita consideravelmente a sua capacidade de capturar detalhes espaciais nos padrões climáticos necessários ou desejados nas análises regionais ou locais. Em resposta a essa necessidade, são utilizadas técnicas denominadas de "*downscaling*", aplicadas no sentido de preencher as lacunas entre o que os MCGs podem oferecer e a qualidade da informação que normalmente é exigida na tomada de decisão. As técnicas de *downscaling* consistem em transferir determinada informação climática obtida em uma escala espacial e/ou temporal menos refinada para uma escala mais refinada. A hipótese principal no qual os métodos de *downscaling* se baseiam consiste na ideia que o clima local é condicionado a partir de interação entre comportamentos atmosféricos de larga escala (padrões de circulação, temperatura, umidade *etc.*) e características locais (topografia, vegetação, corpos d'água, uso do solo *etc.*). Deste modo, são incorporadas informações locais aos resultados dos MCGs que possibilitam capturar de forma mais realista o comportamento da informação climática no local. (SOUZA, Comunicação Pessoal)

O objetivo proposto foi, entre outros, a determinação da vazão média de longo termo para 18 modelos expostos no AR5 para os dois diferentes cenários de emissão de GEE: RCP4.5 e RCP8.5. Oriunda da fundamentação teórica deste trabalho e da manipulação matemática das Equações 3.13-3.15 pode-se obter a Equação 4.5 que mostra como a variação da vazão média de longo termo pode ser calculada uma vez conhecida a variação da precipitação e da evapotranspiração potencial e os coeficientes de elasticidade-clima.

$$\frac{dQ}{Q} = \varepsilon_1 \frac{dP}{P} + \varepsilon_2 \frac{dE_0}{E_0} \quad (4.5)$$

A Figura 4.2 ilustra o processo que foi utilizado para a obtenção das vazões médias de longo termo na bacia do São Francisco para os 20 diferentes modelos e os horizontes temporais 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

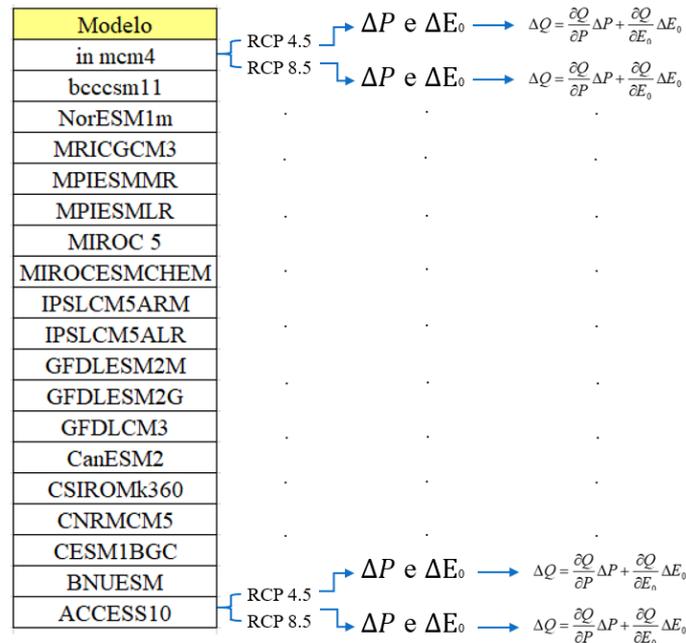


Figura 4.2 Cálculo da variação da vazão média de longo termo para diversos modelos climáticos. Elaboração do autor.

Existem diferentes métodos disponíveis na literatura para a estimativa da evapotranspiração potencial. A Agência Nacional de Águas já tinha estimado os valores de evapotranspiração potencial das projeções climáticas futuras oriundas dos modelos climáticos globais para os três horizontes temporais propostos considerando-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Comunicação Pessoal, SOUZA). Os cálculos foram embasados na metodologia de Hargreaves & Samani (1985), que propuseram a Equação 4.6,

$$E_0 = 0,0023R_a(T_m + 17,8)T_r^{0,50} \quad (4.6)$$

em que R_a representa a radiação solar extraterrestre, T_m representa a temperatura média em graus Celsius e T_r é a amplitude de temperatura em graus Celsius, ou seja, $T_r = T_{max} - T_{min}$.

Dessa forma, uma vez conhecida a vazão média de longo termo atual na bacia do São Francisco, a estimação das vazões médias de longo termo para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 dos modelos climáticos apresentados no AR5 do IPCC é facilmente obtida. Os resultados oriundos desse trabalho permitiram a compreensão dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia e proporcionarão cenários representativos, na escala da bacia, para a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão acerca dos resultados obtidos nesse trabalho será abordada em diferentes etapas, inicialmente caracterizando as estações fluviométricas selecionadas para este estudo com relação suas variáveis hidrológicas, passando pelos resultados para os valores de w e as elasticidades climáticas por estação. Discutir-se-á as variações de precipitação e de evapotranspiração potencial com relação aos cenários de emissão de GEE (RCP4.5 e RCO8.5), aos três horizontes temporais por modelo. Finalmente, abordar-se-á o impacto dessas variações de precipitação e evapotranspiração potencial na variação da vazão média de longo período futura.

5.1. ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

Na relação de critérios de seleção descritos na metodologia deste trabalho, foram consideradas apenas estações fluviométricas com mais de trinta anos consecutivos de dados hidrológicos e sem influência de reservatório (definida pela função Equação 4.1). Nesse contexto, a Figura 5.1 representa a distribuição espacial das estações selecionadas.

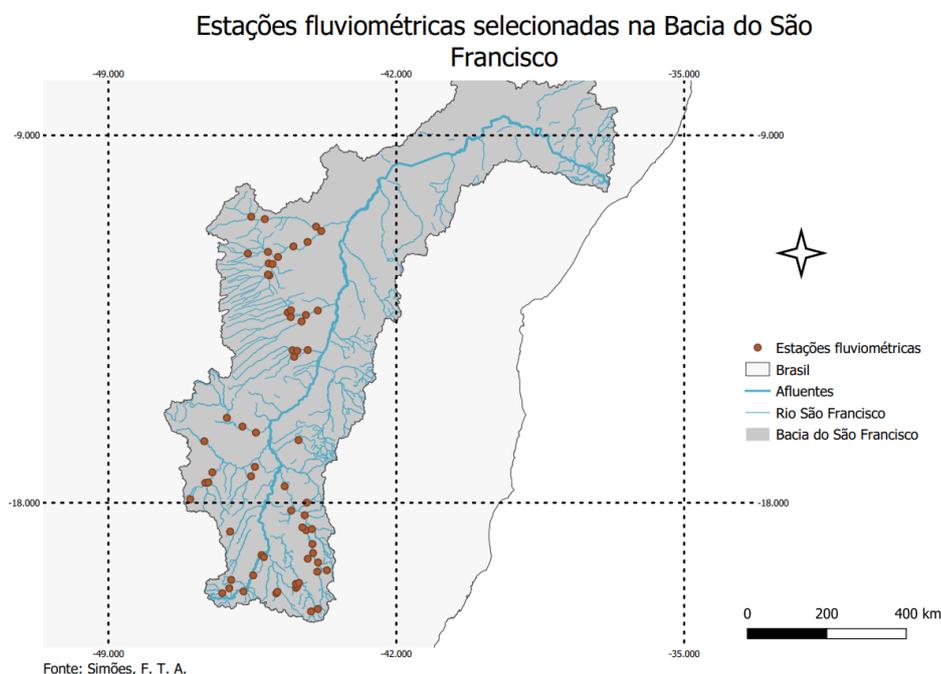


Figura 5.1 Estações fluviométricas selecionadas na Bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA.

Pode-se encontrar nos anexos desse trabalho um quadro com informações adicionais referente às estações fluviométricas selecionadas, tais como código da estação, latitude, longitude, entre outros.

5.1.1 Caracterização das estações fluviométricas com relação às variáveis hidrológicas

É importante para o entendimento deste trabalho compreender o comportamento da precipitação, da evapotranspiração potencial e da vazão nas estações fluviométricas selecionadas. A Figura 5.2 apresenta os valores de precipitação média por estação fluviométrica.

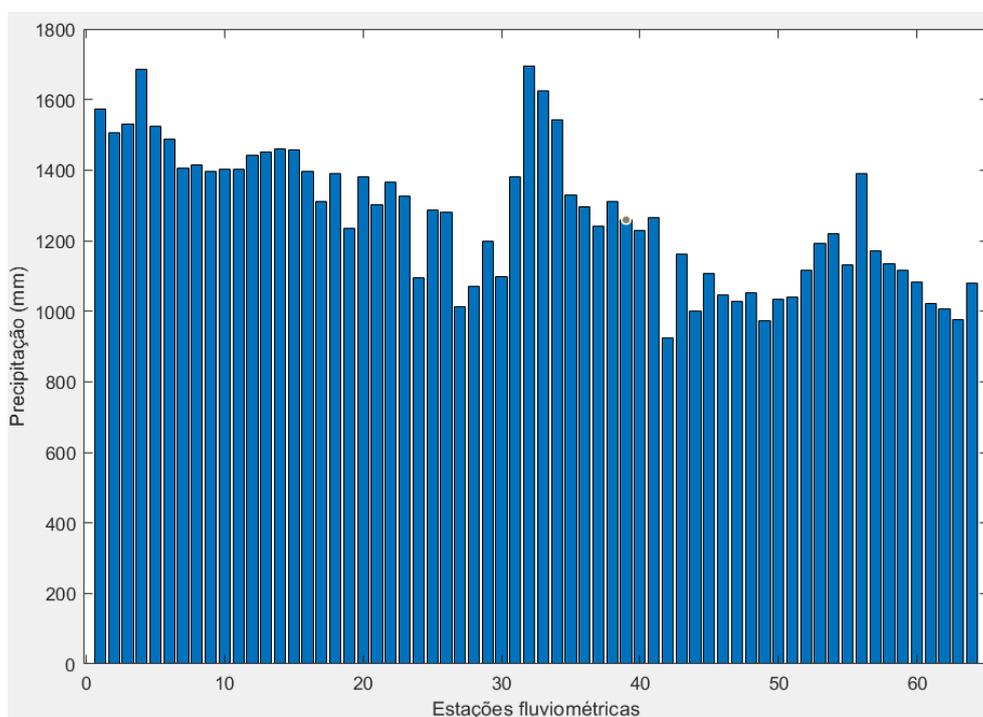


Figura 5.2 Precipitação por estações fluviométricas na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Com um valor médio no conjunto de estações de 1266,8 mm, as precipitações registradas nas estações fluviométricas variam entre 924 mm e 1695,8 mm. A distribuição espacial destes valores é representada na Figura 5.3. Observa-se uma maior precipitação no Alto e Médio São Francisco, o que é esperado visto que as regiões do Médio e Alto São Francisco contribuem com 97% da vazão do rio São Francisco (Almeida *et al.*, 2016), com precipitações anuais médias de 1052 mm e 1372 mm, respectivamente.

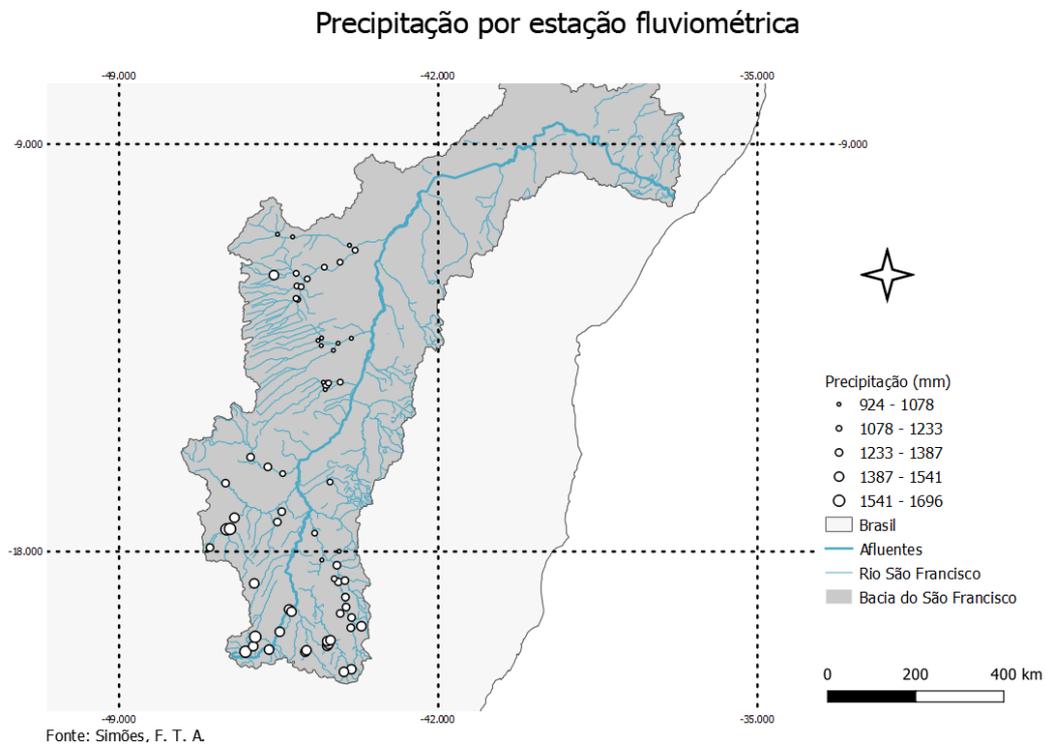


Figura 5.3 Distribuição espacial da precipitação na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Com relação a evapotranspiração potencial, a Figura 5.4 e a Figura 5.5 apresentam, respectivamente, os valores de evapotranspiração potencial média por estação e suas respectivas distribuições espaciais. Observa-se que os valores de evapotranspiração potencial são relativamente elevados se comparado às médias de precipitação, variando entre 1231,2 mm e 1613 mm, com valor médio de 1444,5 mm. Espera-se maiores valores de evapotranspiração potencial no ao norte e nordeste da bacia, devido os maiores valores de temperatura média com relação ao Alto e Médio São Francisco. Essa tendência pode ser observada na Figura 5.5. Finalmente, com relação a vazão, as Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os valores médios de vazão e sua distribuição espacial, respectivamente. Os valores de precipitação possuem um intervalo maior de variação, entre 107,2 mm/ano e 868,39 mm/ano, com média de 344,5 mm/ano. Para uma mesma área de drenagem, espera-se que os valores médios de longo período da vazão sejam superiores no Alto e Médio São Francisco e diminuam da nascente para sua foz (Pruski *et al.*, 2004), o que é confirmado na Figura 5.7.

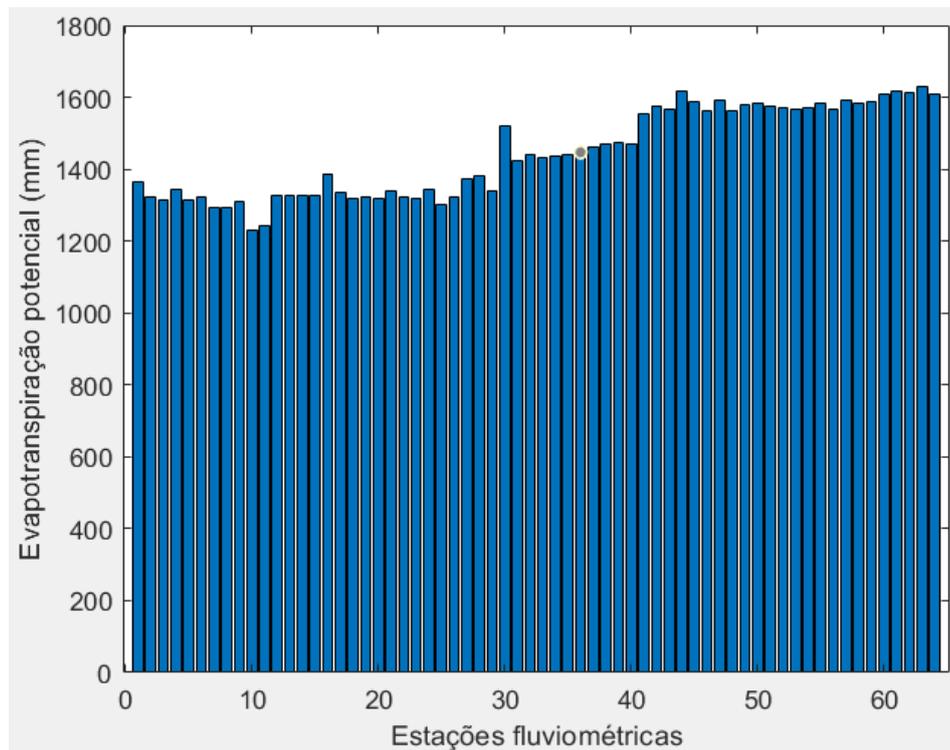


Figura 5.4 Evapotranspiração potencial por estações fluviométricas na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

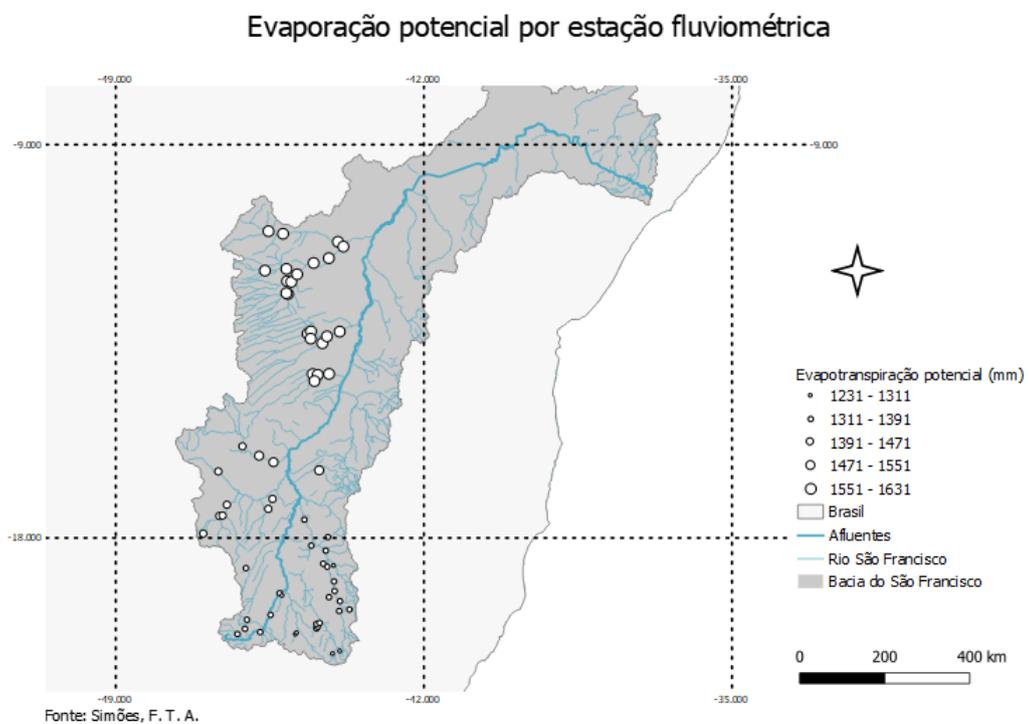


Figura 5.5 Distribuição espacial da evapotranspiração potencial na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

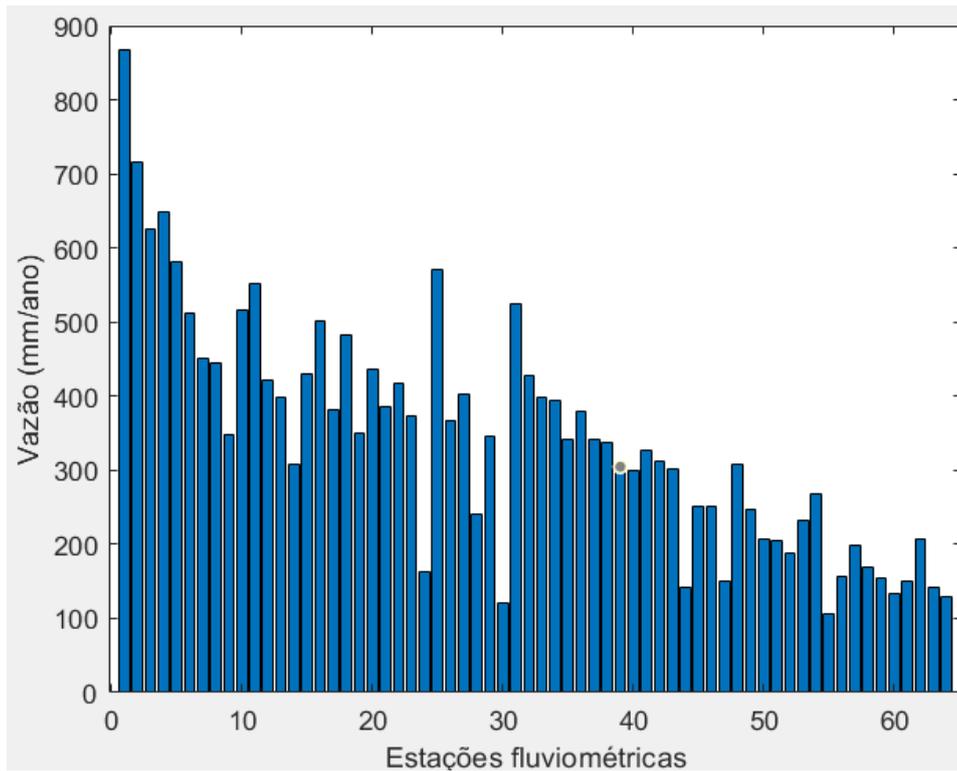


Figura 5.6 Vazão por estações fluviométricas na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

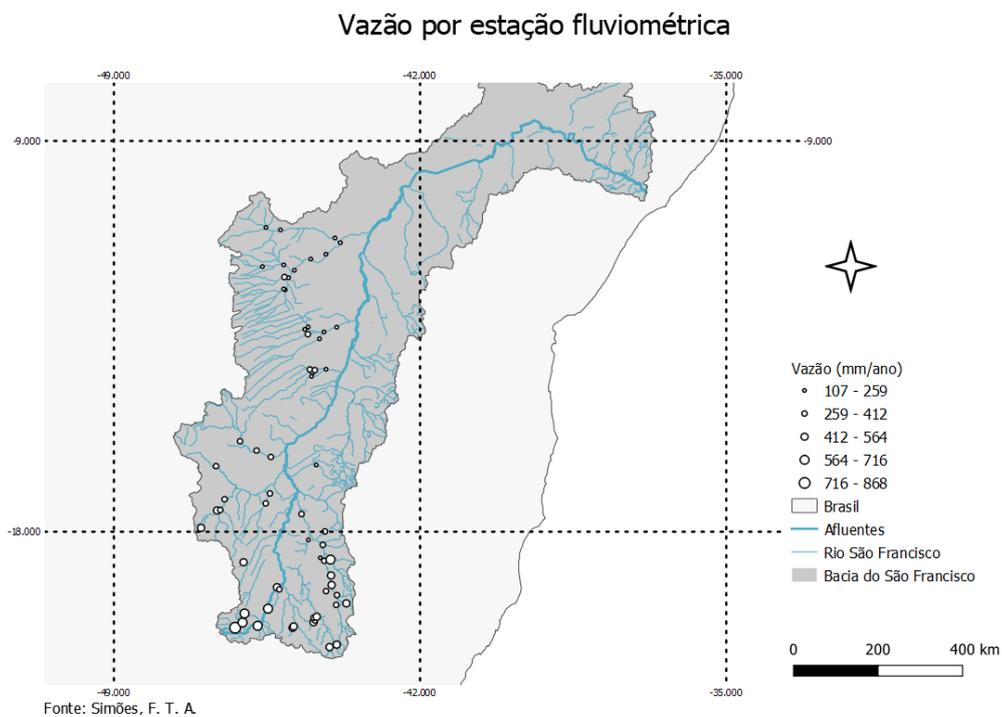


Figura 5.7. Distribuição espacial da vazão na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

5.1.2 Relações da hipótese de Budyko

As hipóteses de Budyko são descritas matematicamente pelas razões E/P e E_0/P , que são associadas por uma função ϕ . Essas razões são igualmente importantes na equação de Fu para estimar os valores do parâmetro ω para cada estação fluviométrica. Sendo assim, é interessante analisar essas razões para cada estação fluviométrica selecionada. Na Figura 5.8 podemos identificar a presença de inúmeras estações fluviométricas de características climáticas de aridez ($E_0/P > 1$).

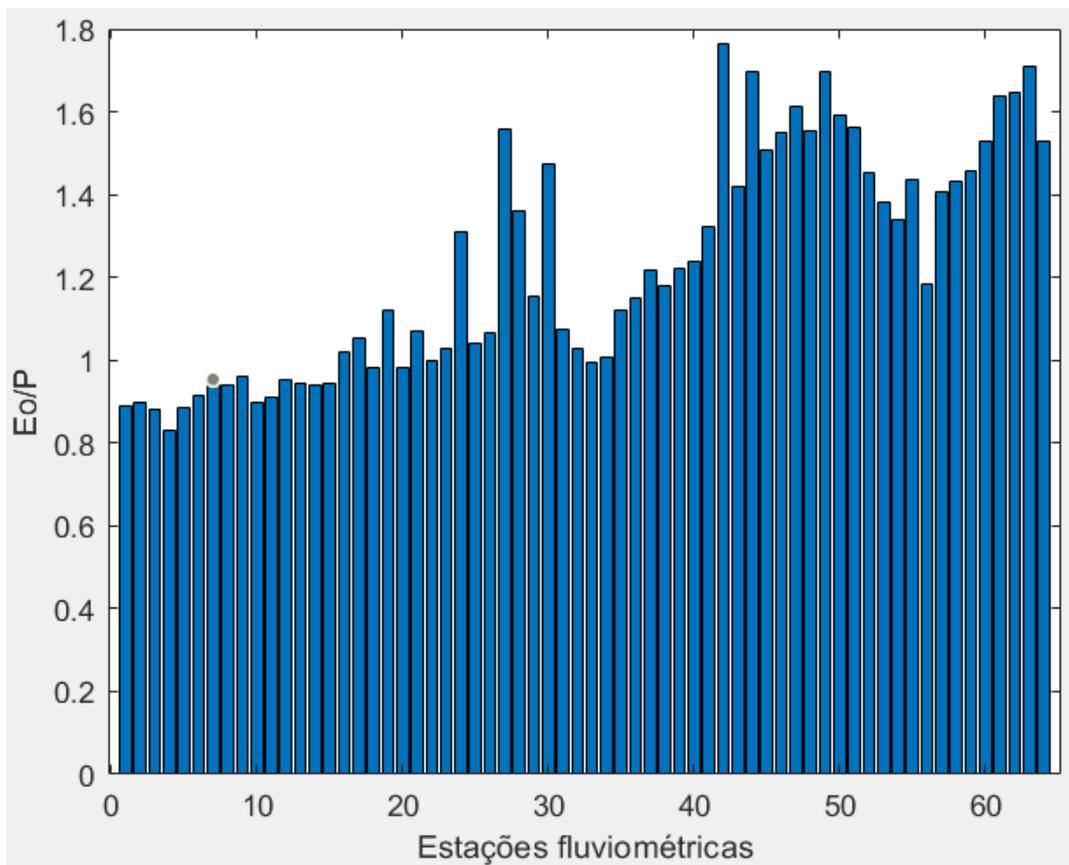


Figura 5.8 Razão E_0/P por estação fluviométrica na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Pode-se mesmo dizer que o conjunto de estações fluviométricas, na média, se traduz como um sistema árido, com uma média de $E_0/P = 1,23$. Para melhor entender quais as estações que apresentam esse comportamento, a Figura 5.9 traz a distribuição espacial da razão E_0/P .

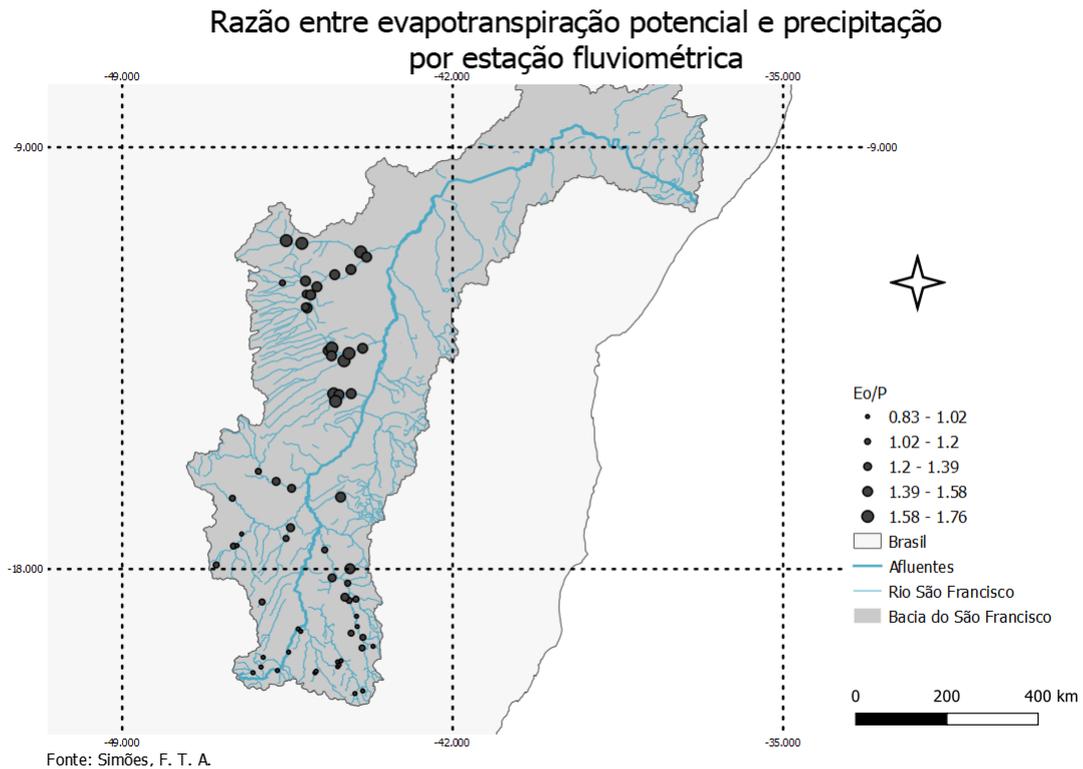


Figura 5.9 Distribuição espacial da razão E_0/P na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Logo, pode-se confirmar que a condição de aridez presente nas estações fluviométricas é bem característica nas estações mais ao norte da bacia, na região do Médio São Francisco, mesmo se há igualmente algumas estações na parte sul do Médio São Francisco aonde a razão E_0/P ultrapassa ligeiramente o valor unitário.

A razão E/P também é importante para entendermos o real comportamento da bacia hidrográfica. A evapotranspiração real pode ser obtida através do balanço hidrológico simplificado, considerando-se que, para o intervalo de tempo analisado, a variação do volume de armazenamento na bacia (ΔS) pode ser negligenciada. As figuras 5.10 e 5.11 trazem, respectivamente, os valores médios da razão E/P assim como a distribuição espacial desses valores.

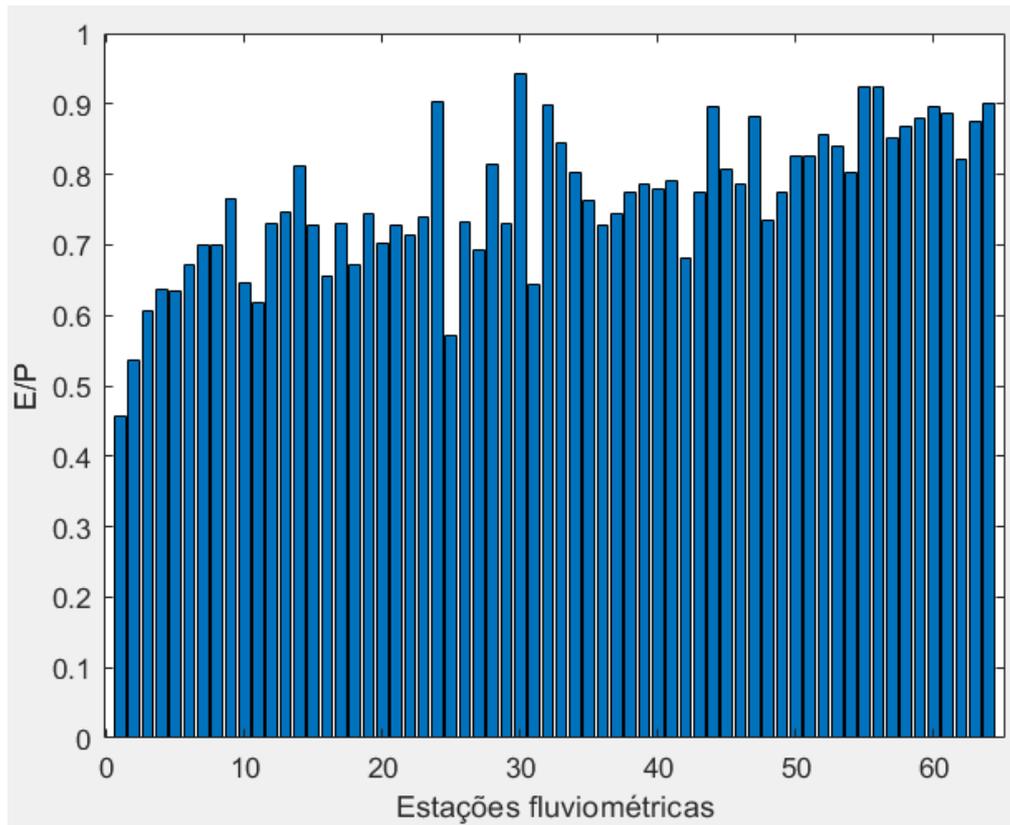


Figura 5.10 Razão E/P por estação fluviométrica na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

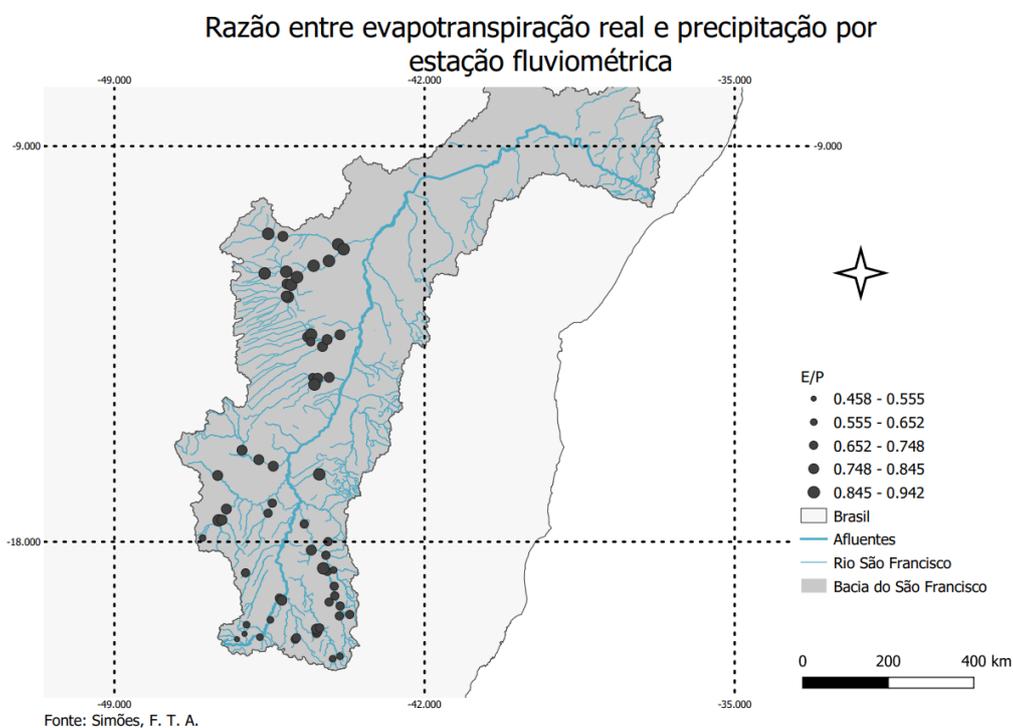


Figura 5.11 Distribuição espacial da razão E/P na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Sob outra perspectiva pode-se observar a característica árida (de maneira global) das estações fluviométricas selecionadas. Com uma média de E/P igual a 0,76, quanto mais próximo do valor unitário é a razão, mais a evapotranspiração é limitada pela precipitação. Essa característica terá impacto na estimativa do parâmetro ω , de modo que, quanto mais próximo da unidade seja a razão E/P , maior o valor de ω .

As figuras 5.10 e 5.11 ainda nos permitem extrair a razão Q/P , uma vez que a evapotranspiração foi calculada a partir do balanço hidrológico, ou seja, a soma de Q/P e E/P é unitária. Para facilitar a visualização, os valores médios por estação, da razão Q/P , assim como suas distribuições espaciais estão presentes nos anexos deste trabalho.

5.2. ELASTICIDADES-CLIMA E O PARÂMETRO ω

Definidas as razões E/P e E_0/P foi possível calcular o parâmetro ω da equação de Fu. Os valores de ω foram calculados com a abordagem numérica para descrita na metodologia, de modo que ω é a raiz da função não-linear descrita pela Equação 3.10. A Figura 5.12 traz os valores de ω por estação fluviométrica.

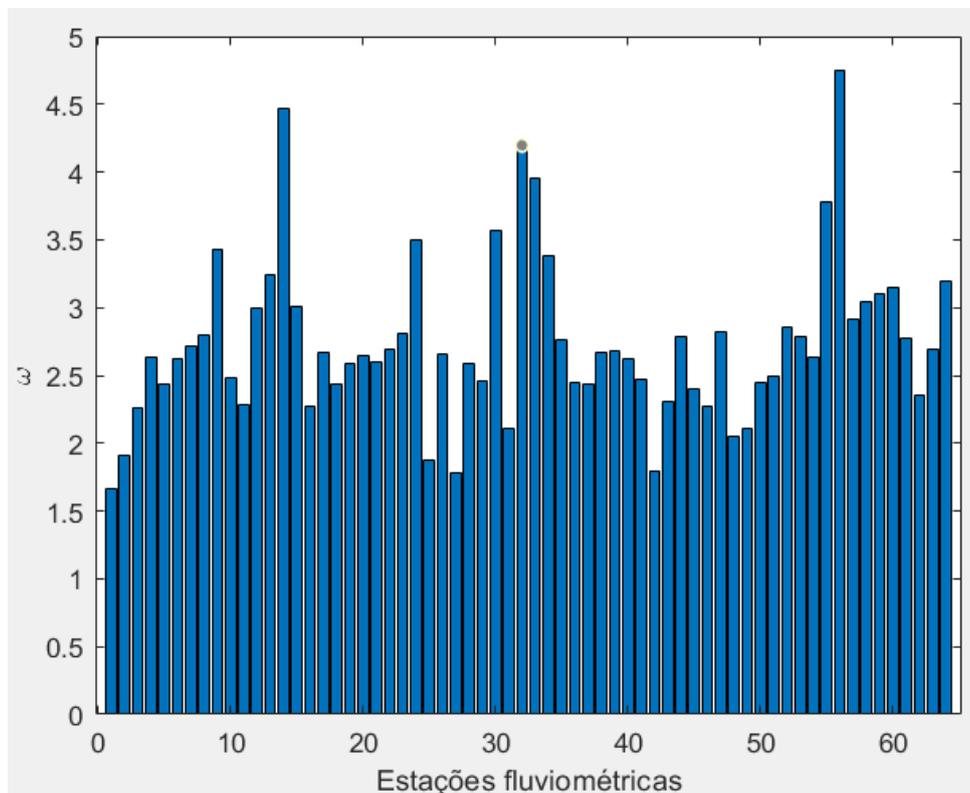


Figura 5.12 Valores do parâmetro ω da equação de Fu por estação fluviométrica na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

A Figura 5.12 nos permite observar a variação dos valores de ω , mas o interessante para esse parâmetro que depende das características da bacia hidrográfica é tentar compreender se existe alguma lógica espacial para esse parâmetro dentro do perímetro de estudo. Para isso, a Figura 5.13 apresenta a distribuição espacial dos valores apresentados na Figura 5.12.

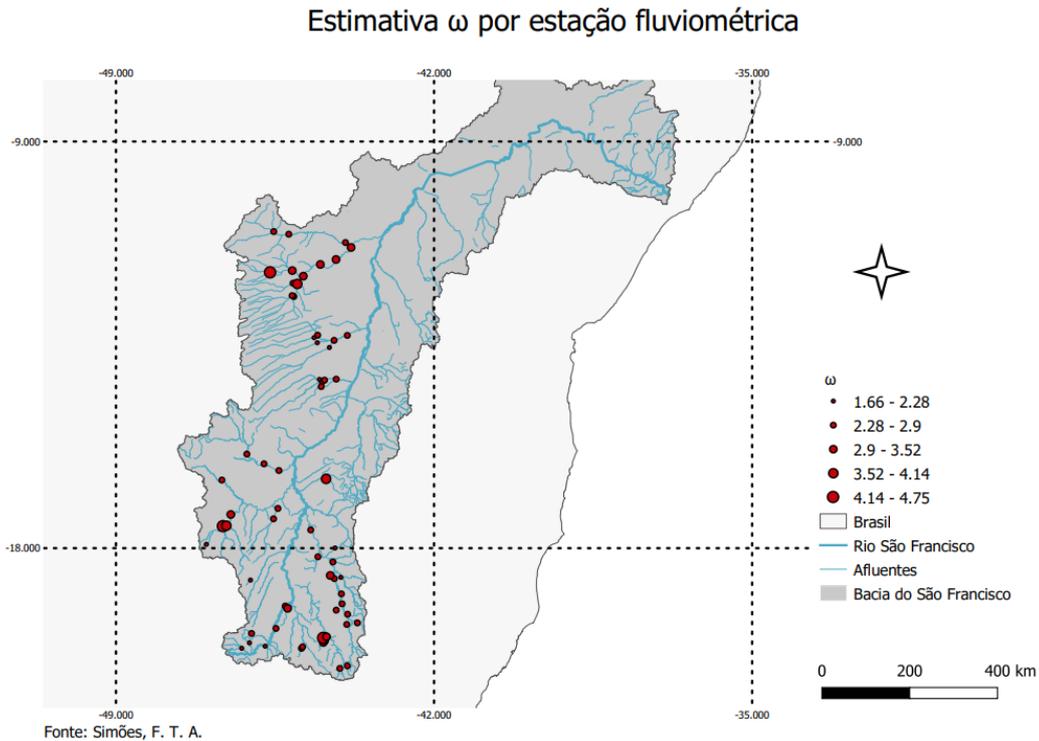


Figura 5.13 Distribuição espacial do parâmetro ω na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

A maior parte das estações fluviométricas, somando um total de 36 (56,25%) apresentou um valor de ω entre 2,28 e 2,9, enquanto apenas 6 bacias (9,38%) obtiveram valores entre 3,52 e 4,75. Embora seja esperado que elevados valores de ω sejam associados a valores elevados para a razão E/P , apenas 4 entre as 15 bacias com maior quociente E/P estão entre as bacias que possuem os maiores de ω . Entretanto, observa-se uma coerência para os pequenos valores de ω presentes no Alto e Médio São Francisco, aonde o montante precipitado é abundante e a limitação para a evapotranspiração é a energia disponível. Uma vez calculados os valores de ω , é possível definir os coeficientes de elasticidade-clima.

As elasticidades-clima da vazão ajudam a compreender como a vazão varia em função da mudança percentual da precipitação e da evapotranspiração potencial em uma determinada

bacia hidrológica. As equações 3.13 e 3.14 permitiram determinar os valores de ε_1 e ε_2 para cada estação fluviométrica. A Figura 5.14 apresenta os valores de ε_1 e ε_2 por estação.

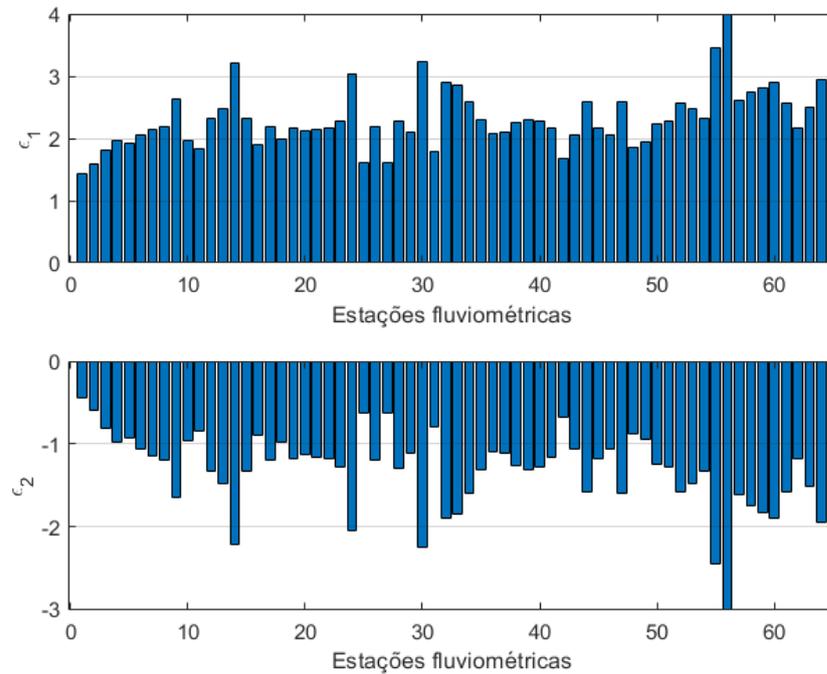


Figura 5.14 Valores de ε_1 e ε_2 por estação fluviométrica na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

A soma de ε_1 e ε_2 deve ser necessariamente igual à 1. A variabilidade dos coeficientes de elasticidades-clima pode ser observada no gráfico do tipo *boxplot* na Figura 5.15.

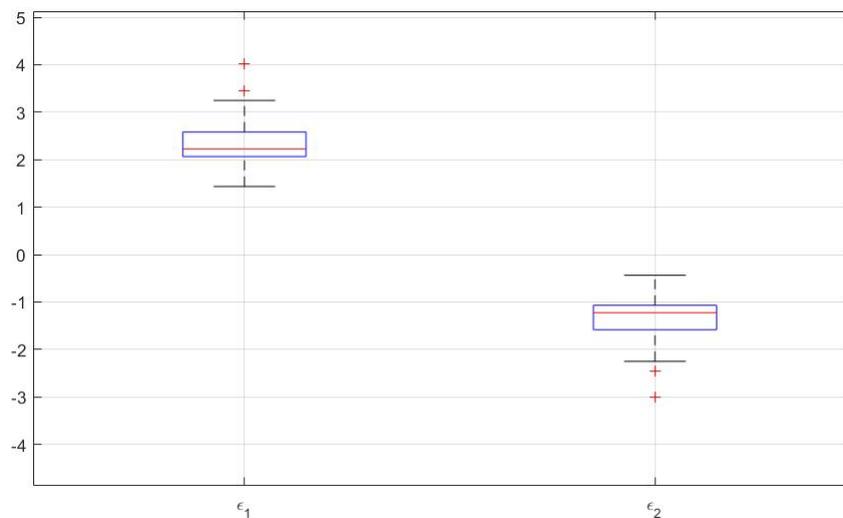


Figura 5.15 Variação dos Valores de ε_1 e ε_2 por estação fluviométrica na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

Com valores médios de 2,32 e -1,32 para ϵ_1 e ϵ_2 respectivamente, pode-se concluir que, na média, para o conjunto de estações fluviométricas estudadas, a vazão aumentaria de um fator 2,32 com relação a variação da precipitação e diminuiria de um fator de 1,32 com relação a variação da evapotranspiração potencial. A projeção da distribuição espacial dos coeficientes de elasticidade-clima para as estações fluviométricas, como exposto nas figuras 5.16 e 5.17.

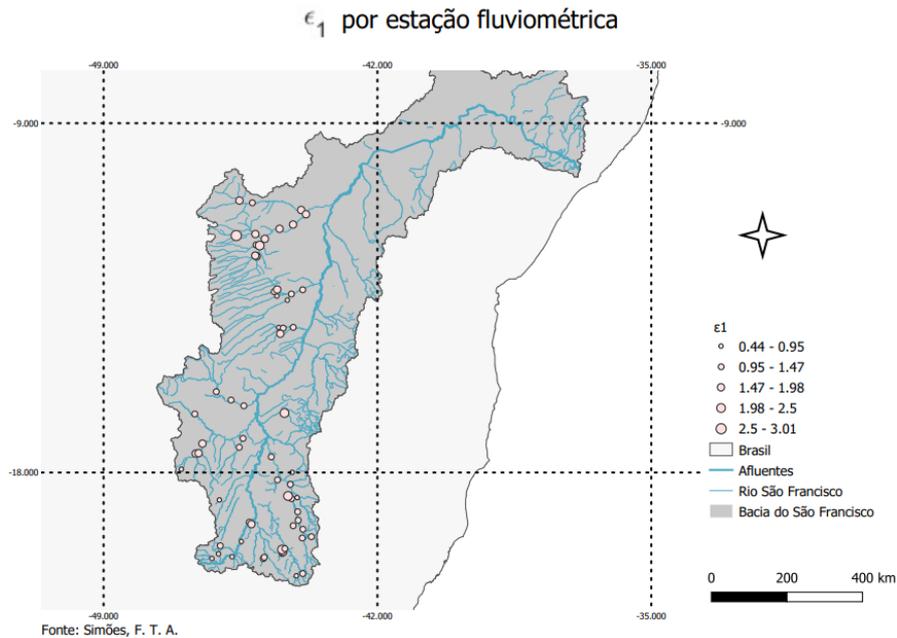


Figura 5.16 Distribuição espacial de ϵ_1 na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

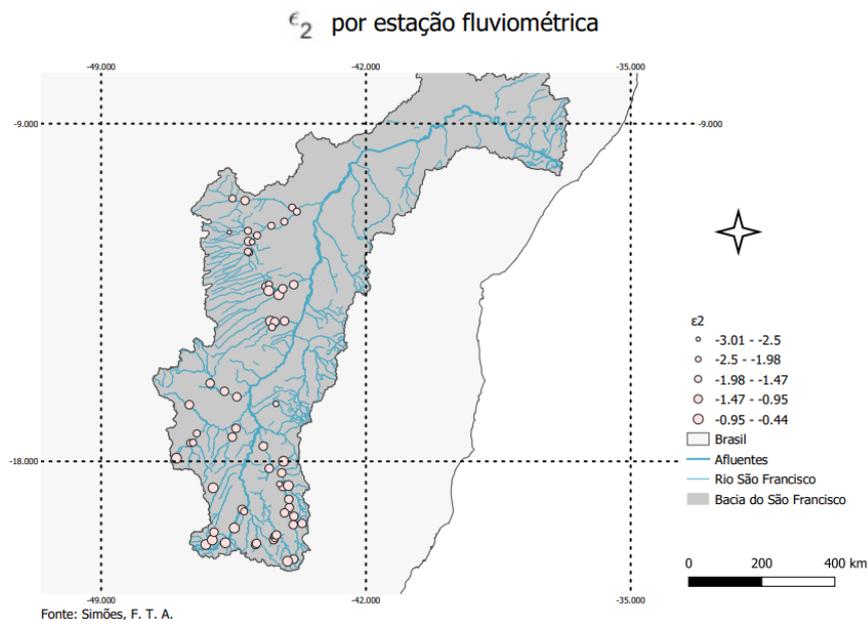


Figura 5.17 Distribuição espacial de ϵ_2 na bacia do São Francisco. Elaboração do autor. Fonte de dados: ANA (1980 - 2015).

A distribuição espacial de ε_1 e ε_2 permite a compreensão de como a variação da precipitação e da evapotranspiração potencial pode impactar na variação da vazão média de longo termo. Da Figura 5.16, observa-se que os maiores valores de ε_1 estão presentes no norte do Médio São Francisco, o que propõe que as bacias dessa região estejam mais susceptíveis a mudanças da vazão com relação à precipitação do que as estações no Alto São Francisco. Com relação a Figura 5.17, quanto maior o módulo de ε_2 , maior será a influência da variação da evapotranspiração potencial na variação da vazão, igualmente característica de bacias áridas, como as encontradas no norte do Médio São Francisco. Isso significa dizer que, nas estações ao norte do Médio São Francisco, as variações de vazão seriam mais susceptíveis às variações de precipitação e evapotranspiração que as estações do Alto e no sul do Médio São Francisco.

5.3. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL POR MODELO

Para entender como a vazão média de longo período vai variar é importante compreender como a precipitação e a evapotranspiração potencial vai ser afetada futuramente. Os modelos globais, baseados em dois cenários de emissão de GEE (RCP4.5 e RCP8.5) nos fornecem as estimativas de como essas variáveis climáticas serão afetadas pelas mudanças climáticas. Nesse contexto, será apresentado o comportamento dos modelos com relação a essas variáveis climáticas, para os três horizontes temporais definidos neste trabalho e para os dois cenários de emissão de GEE.

5.3.1 Variação da precipitação para o cenário de emissão de GEE RCP4.5

As Figuras 5.18 – 5.20 trazem as variações da precipitação para cada um dos 18 modelos analisados nesse trabalho para três horizontes temporais ((2015 - 2040), (2041 - 2070), (2071 - 2100)). Para o primeiro horizonte observa-se que os valores medianos de dP/P variam entre 0,11 e - 0,16. Entre os 18 modelos, 6 deles propõem uma variação de dP/P negativa, enquanto os demais apresentam valores de dP/P ligeiramente positivos. Os modelos MRICGCM3 e o modelo NorESM1M são os que apresentam maior variabilidade nos dados. De maneira global, considerando-se os valores medianos, os modelos globais sugerem uma leve diminuição na precipitação, com uma média das medianas de dP/P de - 0,015.

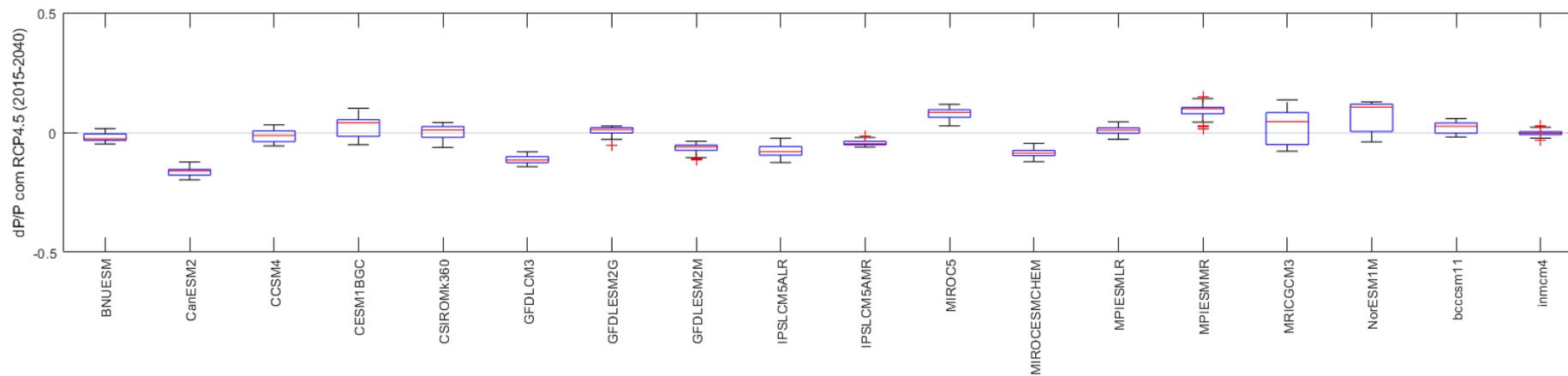


Figura 5.18 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2015 – 2040 e RCP4.5.

Elaboração do autor.

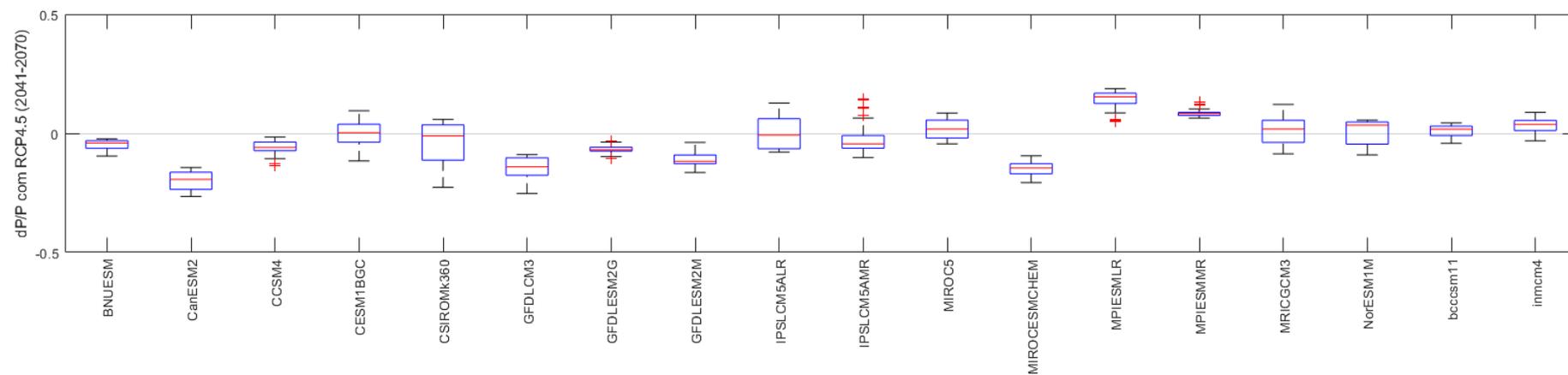


Figura 5.19 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2041- 2070 e RCP4.5.

Elaboração do autor.

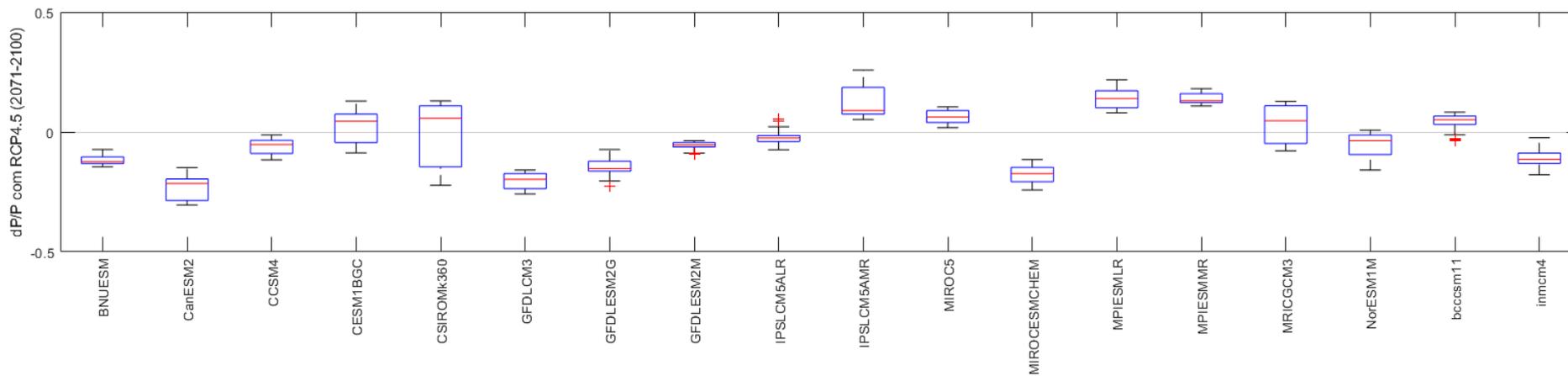


Figura 5.20 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2071- 2100 e RCP4.5.

Elaboração do autor.

No segundo horizonte temporal pode-se observar uma maior variabilidade da razão dP/P para diversos modelos, como no modelo CSIRO Mk360 e IPSLCM5ALR. Fica um pouco mais evidente que o conjunto de modelos, na média, propõem uma variação negativa da precipitação, com uma média de $dP/P = -0,030$, mesmo se alguns modelos apontam apenas valores positivos de dP/P no seu jogo de dados, como os modelos MPIESMLR e MPIESMMR. A Figura 5.20 permite observar 10 entre os 18 modelos com valores medianos negativos para a razão dP/P (com valor médio de $-0,034$), ainda que alguns modelos tenham mudado completamente suas tendências de variação da precipitação, como o modelo IPSLCM5AMR que apresentou valores medianos negativos de dP/P para os dois primeiros horizontes temporais, mas propõe valores positivos de variação de precipitação para o horizonte 2071 – 2100.

5.3.2 Variação da precipitação para o cenário de emissão de GEE RCP8.5

O cenário de emissões RCP8.5, por se tratar de um cenário de emissões pessimista, deveria apresentar maiores valores de variação da precipitação, uma vez que a relação entre a variável climática precipitação está intrinsecamente relacionada com a temperatura. As Figuras 5.21 – 5.23 representam a variação da precipitação para os três horizontes temporais de estudo deste trabalho para o cenário RCP8.5. No primeiro horizonte já é possível ver uma maior tendência de variação negativa da razão dP/P se comparado com o mesmo período para o cenário RCP4.5, efeito é nitidamente observado nos modelos GFDLESM2G e NorESM1M. Além disso, a média de dP/P , para o cenário RCP8.5 também já é maior em módulo, ainda no primeiro horizonte temporal, que a média de dP/P para o terceiro horizonte temporal do cenário RCP4.5, o que poderia sugerir que a variação da precipitação pode atingir valores ainda maiores para os horizontes 2041 - 2070 e 2071 - 2100 no cenário RCP8.5. Entretanto, a Figura 5.22 abaixo traz uma mudança no comportamento de alguns modelos de modo que, pela primeira vez, houve uma diminuição em módulo na variação da precipitação, ou seja, para o horizonte temporal 2041 – 2070 a precipitação diminuiria menos que em relação ao período 2015 – 2040. Nitidamente os modelos IPSLCM5AMR e IPSLCM5ALR exemplificam essa mudança de tendência em alguns modelos.

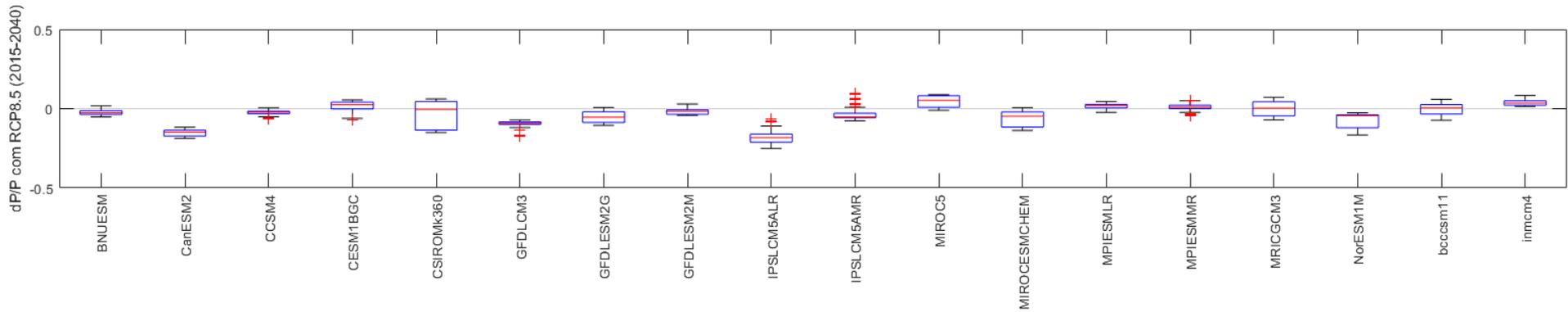


Figura 5.21 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5.

Elaboração do autor.

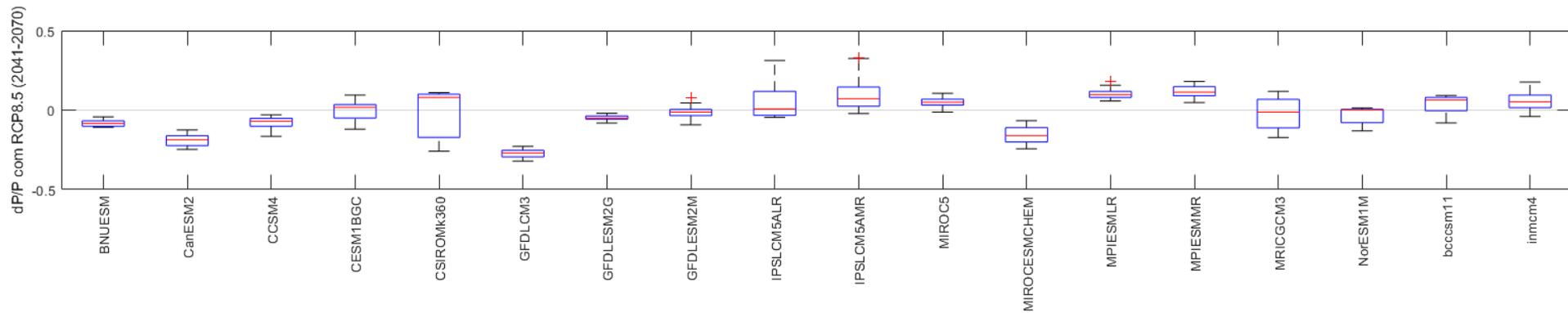


Figura 5.22 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2041 - 2070 e RCP8.5.

Elaboração do autor.

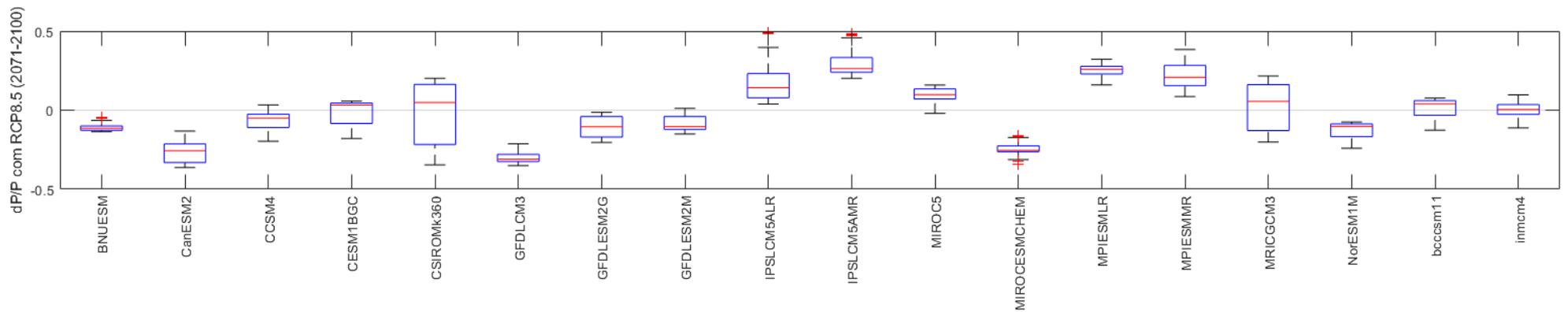


Figura 5.23 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por modelo para o horizonte temporal 2071 - 2100 e RCP8.5.

Elaboração do autor.

Para o terceiro horizonte temporal vê-se ainda de maneira mais evidente a mudança de tendência dos modelos destacada no período 2041 - 2070. A variabilidade da razão dP/P aumenta em diversos modelos assim como o valor médio de dP/P diminui em módulo, atingindo -0,014, caracterizando ligeiramente uma tendência global de diminuição da precipitação.

5.3.3 Variação da evapotranspiração potencial para o cenário de emissão de GEE RCP4.5

De maneira análoga à precipitação, a evapotranspiração potencial também vai variar em função dos cenários de emissão de GEE. Para o primeiro horizonte temporal, todos os modelos estão em sintonia numa tendência suave de aumento da evapotranspiração potencial, ou seja, $dE_0/E_0 > 0$. Em congruência com o comportamento dos modelos climáticos globais para com a evapotranspiração potencial no período de 2015 – 2040, é possível observar no horizonte temporal de 2041 – 2070 um pequeno aumento na variabilidade e na média da razão dE_0/E_0 . As Figuras 5.24 – 5.26 apresentam esse comportamento. Na Figura 5.26 tem-se uma continuação na tendência inicialmente observada, com todos os modelos globais climáticos indicando uma variação positiva da evapotranspiração potencial. Na média, essa variação é de um fator de 0,076, ou seja, a evapotranspiração potencial futura média seria, na média, 7,6 % mais importante que o valor atual de evapotranspiração média de longo termo.

Esse tipo de comportamento é esperado e foi bem representado pelos modelos globais climáticos uma vez que se sabe que a evapotranspiração potencial é função da temperatura. Diversos autores (Jensen & Haise (1963), Camargo & Camargo (1983), Hargreaves & Samani (1985)) propõem métodos de estimativa da evapotranspiração potencial que estão diretamente relacionados com a temperatura média. Sendo assim, uma vez que se espera o aumento da temperatura média global devido as mudanças climáticas, é esperado o aumento da evapotranspiração potencial, como observa-se abaixo.

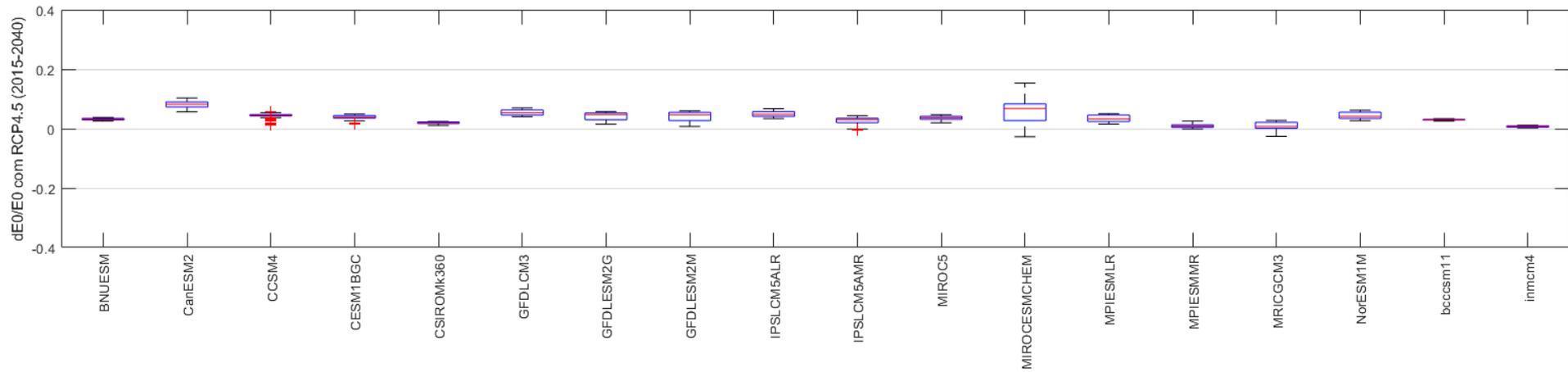


Figura 5.24 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP4.5. Elaboração do autor.

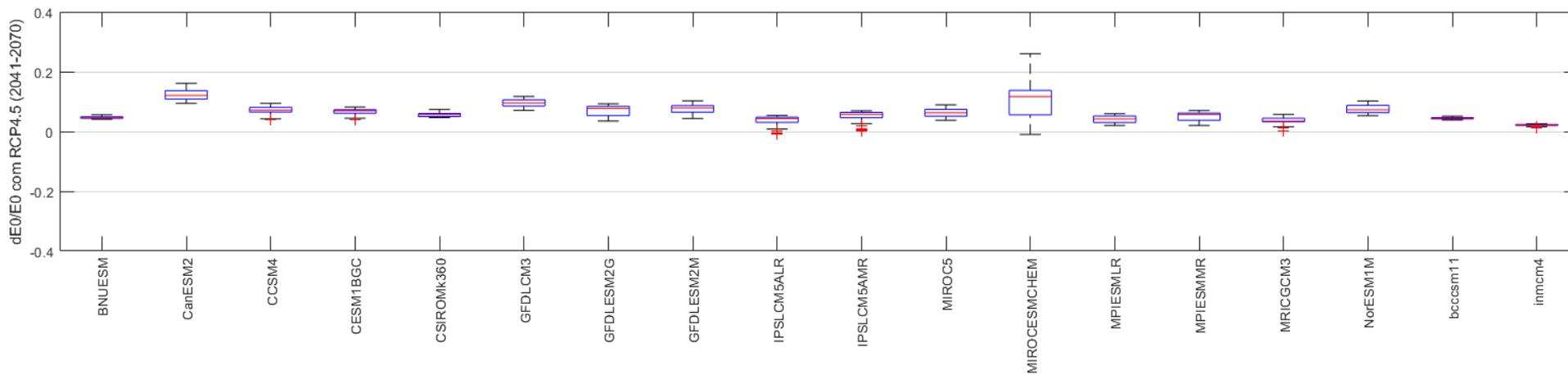


Figura 5.25 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2041 - 2071 e RCP4.5. Elaboração do autor.

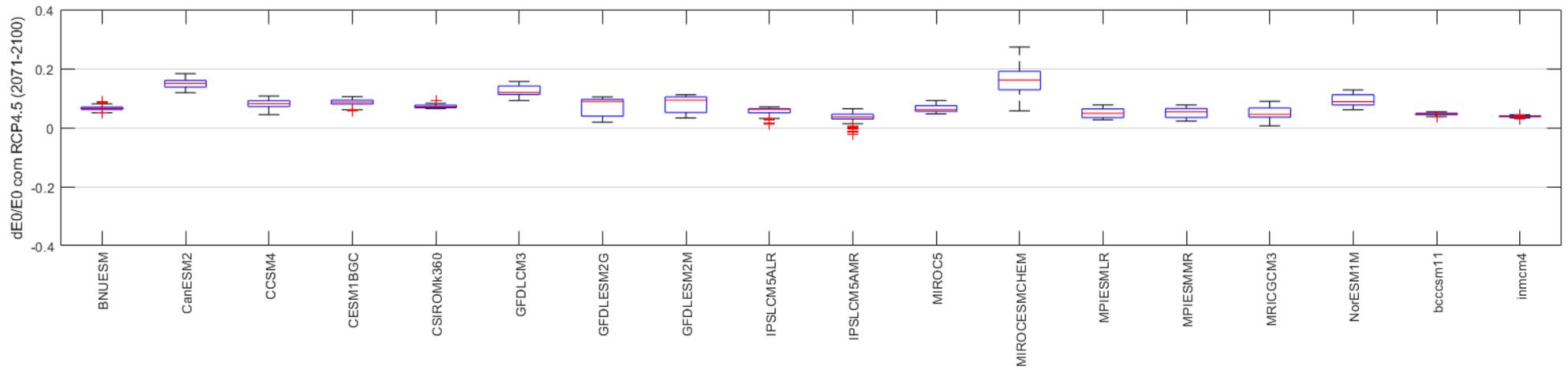


Figura 5.26 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por modelo para o horizonte temporal 2071 - 2100 e RCP4.5.
Elaboração do autor.

5.3.4 Variação da evapotranspiração potencial para o cenário de emissão de GEE RCP8.5

Com a variação da temperatura global variando provavelmente mais que 2°C até 2050 e podendo chegar até a 4° em 2100 (IPCC, 2013), é esperado que o comportamento da evapotranspiração potencial previsto pelos modelos globais climáticos seja no mínimo coerente com as tendências apresentadas pelos modelos no cenário de emissão de GEE RCP4.5. De fato, pode-se observar uma orientação dos modelos no sentido de que a variação da evapotranspiração potencial, ou seja, dE_0/E_0 , é positiva. No primeiro horizonte temporal essa tendência é suave, com um valor médio global de 3,51 % de aumento da evapotranspiração potencial. Já nos horizontes temporais 2041 – 2070 e 2071 – 2100 essa tendência é crescente, com valores médios respectivos de 6,67 % e 11,67 % respectivamente. Também foi possível observar uma menor variabilidade dos valores da razão dE_0/E_0 para os três horizontes temporais se comparados aos mesmos períodos no cenário RCP4.5. Os gráficos do tipo *boxplot* representando a variação de dE_0/E_0 para o cenário de emissão de GEE RCP 8.5 estão nos anexos deste trabalho.

5.4. VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL POR ESTAÇÃO

Outra abordagem interessante para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas no ciclo hidrológico é observar a variação da precipitação e da evapotranspiração potencial por estação fluviométrica, o que permite compreender quais as estações que apresentam variações de precipitação e evapotranspiração potencial mais acentuadas.

5.4.1 Variação da precipitação por estação para o cenário de emissão de GEE RCP4.5

Entre 2015 – 2040 as estações fluviométricas que mais contribuem para a tendência global de diminuição da precipitação são as estações fluviométricas no norte do Médio São Francisco (estações 40 a 64). As demais estações fluviométricas apresentam valores medianos muito próximo do valor nulo para as variações de dP/P . A variabilidade da razão dP/P é relativamente elevada, com valores entre [-0,2; 0,15]. A variabilidade de dP/P aumenta quando se passa de um horizonte temporal ao outro, com um grande aumento de pontos *outliers* no segundo horizonte temporal. Para o período 2070 – 2100 verifica-se que todas as estações possuem um valor mediano de dP/P menor que zero, comportamento

inicialmente constatado apenas nas estações do norte do Médio São Francisco. Entretanto, as estações que apresentam valores medianos mais negativos para dP/P ainda são as estações fluviométricas localizadas no mais ao norte da bacia do São Francisco. Os gráficos tipo *boxplot* para essa interpretação estão disponíveis no anexo deste trabalho.

5.4.2 Variação da precipitação por estação para o cenário de emissão de GEE RCP8.5

O comportamento de dP/P para o cenário de emissão de GEE RCP8.5, para o período entre 2015 – 2040, segue a mesma tendência constatada para o cenário RCP4.5, com todas as estações apresentando valores medianos de dP/P inferiores à zero, mas com uma variabilidade muito maior para as estações na parte norte do Médio São Francisco. A Figura 5.27 traz a distribuição espacial das estações fluviométricas que mais contribuem na tendência de diminuição da precipitação de maneira global (estações 40 a 64).

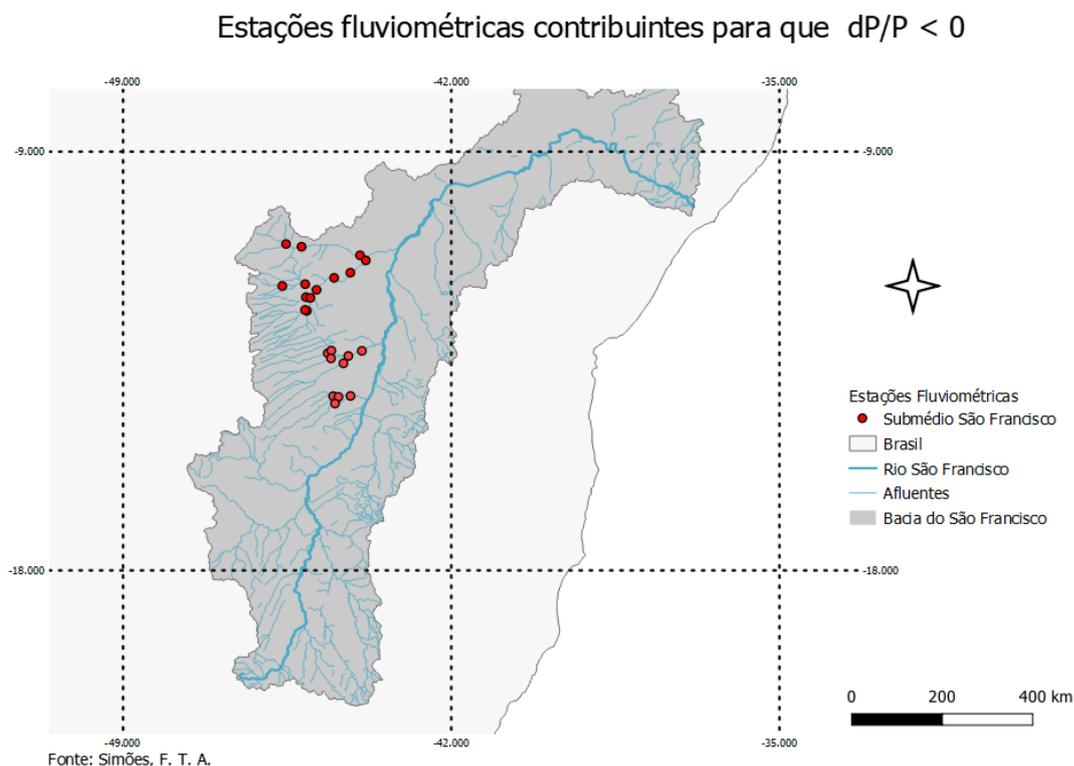


Figura 5.27 Estações fluviométricas que mais contribuem para que dP/P seja negativo. Elaboração do autor.

Para o próximo horizonte, percebeu-se a mudança de tendência de dP/P em algumas estações fluviométricas do Alto São Francisco, que passaram a apresentar valores medianos positivos para dP/P , com uma diminuição no módulo da média de dP/P de -3,52% para o valor de -2,24%. As figuras 5.28 – 5.30 trazem o comportamento de dP/P para o RCP8.5.

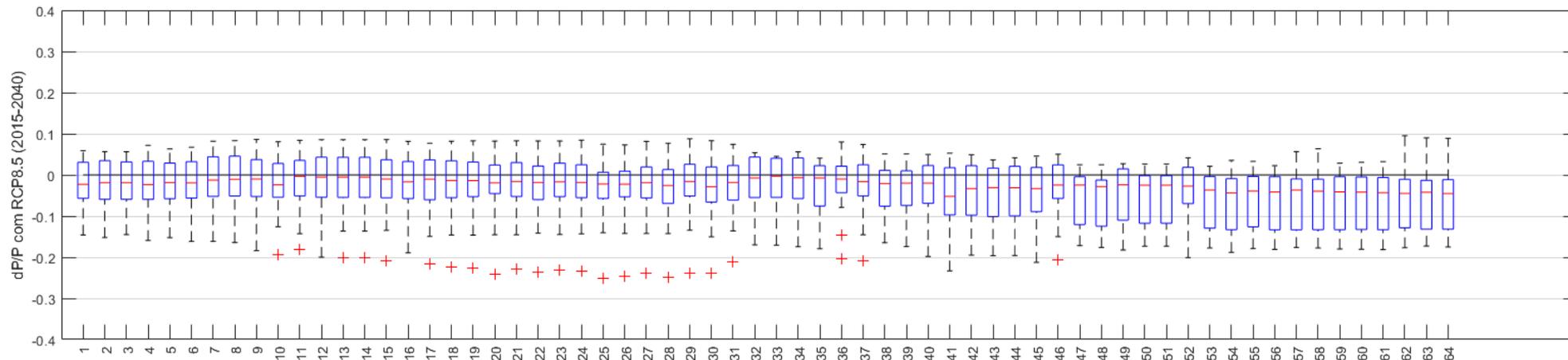


Figura 5.28 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5. Elaboração do autor.

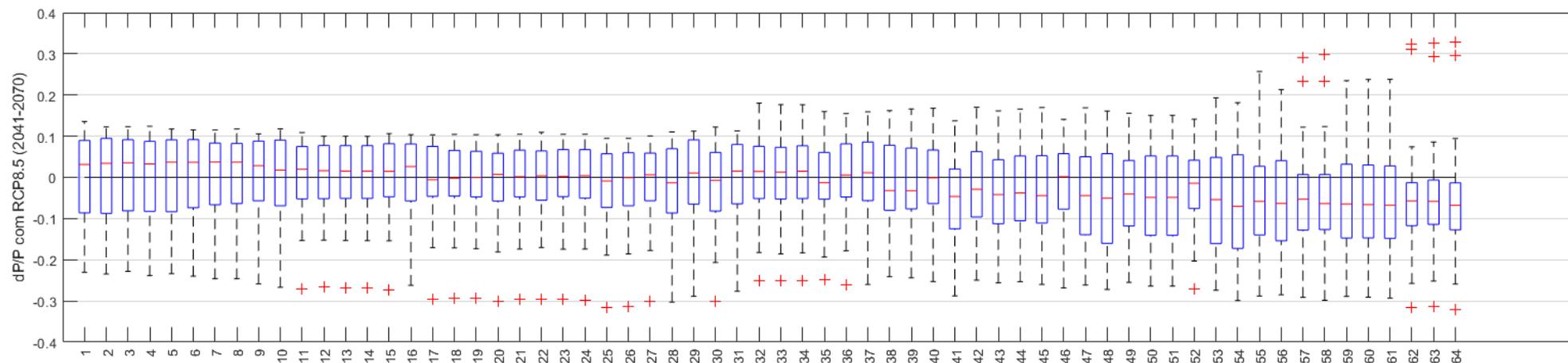


Figura 5.29 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2041 - 2070 e RCP8.5. Elaboração do autor.

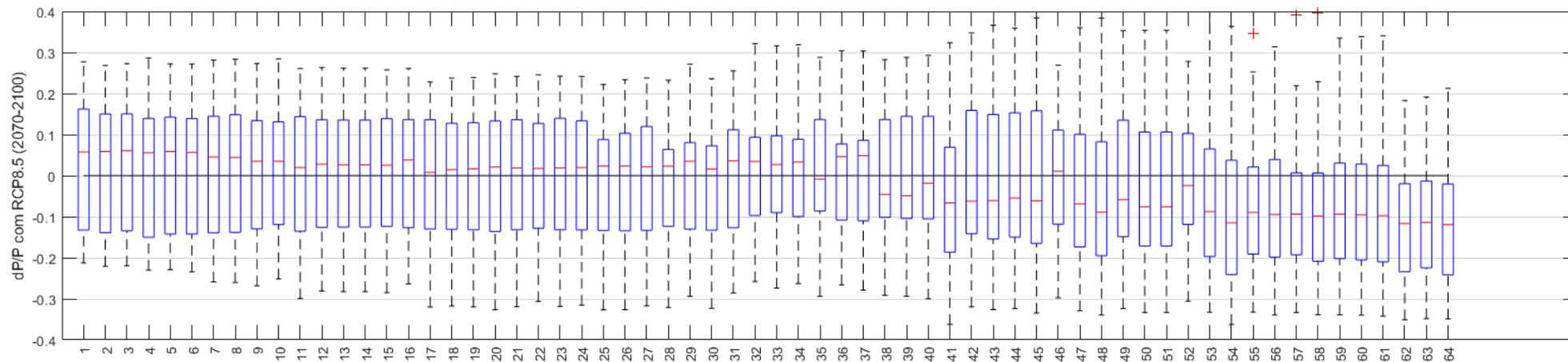


Figura 5.30 Gráfico *boxplot* da variação da precipitação por estação para o horizonte temporal 2071- 2100 e RCP8.5. Elaboração do autor.

Ainda para o segundo horizonte temporal observa-se que estações fluviométricas no Alto e na parte sul do Médio São Francisco (estações entre 1 e 25) apresentam uma congruência para um aumento de precipitação, enquanto as estações mais ao norte da bacia do São Francisco apresentam uma tendência negativa de dP/P . Com relação ao terceiro horizonte temporal, a variabilidade da razão dP/P é muito superior aos outros horizontes, tanto para o cenário RCP4.5 como para o RCP8.5, com valores de dP/P variando entre [-0,4; 0,4]. Observa-se uma grande coerência entre estações ao sul da bacia para um aumento de precipitação, diminuindo o comportamento geral de variação negativa na precipitação enquanto as variações de precipitação nas estações ao norte são ainda mais evidentes. É possível inferir que, na média, para o cenário de emissão de GEE RCP8.5, nos horizontes temporais 2041 – 2070 e 2070 – 2100 as estações fluviométricas no Alto e na parte sul do Médio São Francisco apresentarão variação de precipitação positiva, enquanto que para estações mais áridas (norte do Médio São Francisco), a razão dP/P é, na média, negativa.

5.4.3 Variação da evapotranspiração potencial por estação para o cenário de emissão de GEE RCP4.5

Assim como na análise da evapotranspiração potencial por modelos, a análise por estação fluviométrica da variação da evapotranspiração potencial mostra que a razão dE_0/E_0 é positiva em todas as estações, tanto na média, quanto em seus intervalos de variabilidade por estação. Nos horizontes 2040 – 2071 e 2071 – 2100 observa-se a presença de alguns *outliers* em intervalos de dE_0/E_0 negativos, mas a tendência da variação da evapotranspiração ainda continua a mesma, com valores crescentes conforme se avança nos horizontes temporais. Os valores medianos de dE_0/E_0 é relativamente constante para horizonte temporal, de modo que o que mais realmente muda de uma estação para outra é a variabilidade da razão dE_0/E_0 , sendo maior em estações em regiões mais áridas. A variação média da evapotranspiração potencial será, para cada horizonte temporal, respectivamente 3,64%, 6,28% e 7,60%, variando entre [-0,021; 0,164]. Os gráficos tipo *boxplot* para essa interpretação estão disponíveis no anexo deste trabalho.

5.4.4 Variação da evapotranspiração potencial por estação para o cenário de emissão de GEE RCP8.5

De maneira análoga à análise da variação da evapotranspiração potencial por modelo, espera-se que os valores medianos de dE_0/E_0 sejam maiores com relação ao cenário de emissão RCP4.5. Para o primeiro horizonte temporal o valor médio da variação da evapotranspiração potencial do cenário RCP8.5 é ligeiramente menor que para o cenário RCP4.5 no mesmo período, com uma diminuição percentual de 0,13% no valor de dE_0/E_0 e uma variância 28% menor. Para o horizonte temporal 2041 – 2070 observa-se o aumento esperado nos valores medianos de dE_0/E_0 tanto em relação ao cenário RCP4.5 (2041 – 2070) quanto com relação ao período 2015 – 2040 no cenário RCP8.5. As Figuras 5.31 – 5.33 trazem a tendência de aumento da evapotranspiração potencial entre os três horizontes temporais. A variabilidade da razão dE_0/E_0 aumenta entre os horizontes temporais e também entre estações, de forma que estações localizadas no Alto e na parte sul do Médio São Francisco possuem uma menor variabilidade se comparado a estações do norte do Médio São Francisco. Com relação a cenário RCP4.5 o valor médio de dE_0/E_0 são relativamente próximos para os dois primeiros horizontes temporais. Já para o período entre 2071 – 2100 houve um acréscimo significativo na média da variação da evapotranspiração potencial, subindo de 7,60% a 11,66% no cenário de emissão GEE RCP8.5. A presença de *outliers* é mais robusta também no cenário RCP8.5 que no RCP4.5, com maior incidência nas estações do Alto e na parte sul do Médio São Francisco para os horizontes temporais 1 e 2.

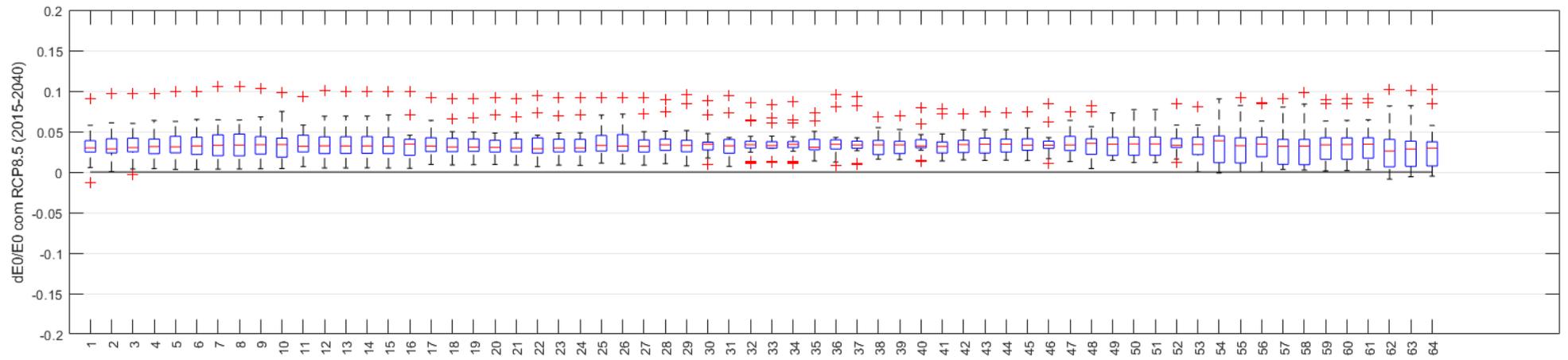


Figura 5.31 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2015 - 2040 e RCP8.5. Elaboração do autor.

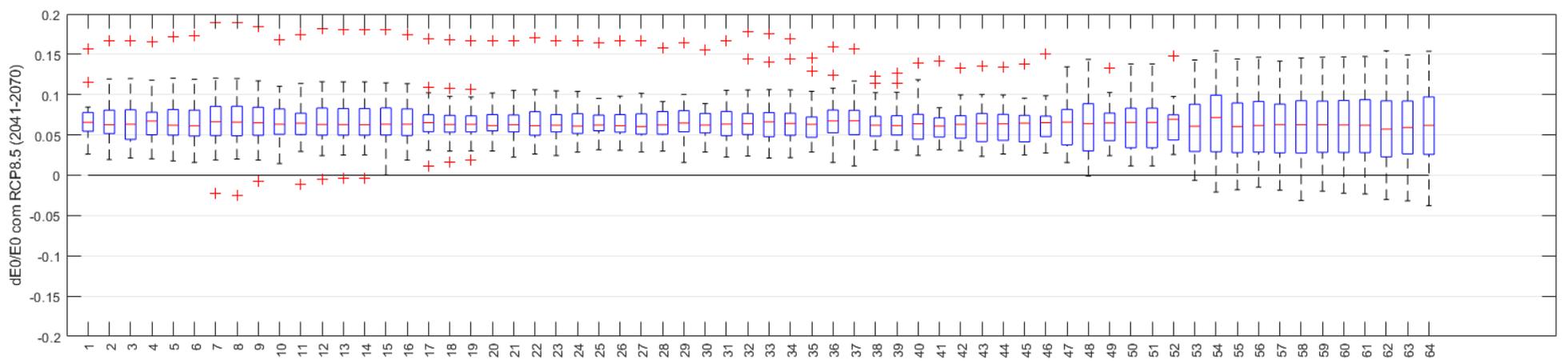


Figura 5.32 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2041 - 2070 e RCP8.5. Elaboração do autor.

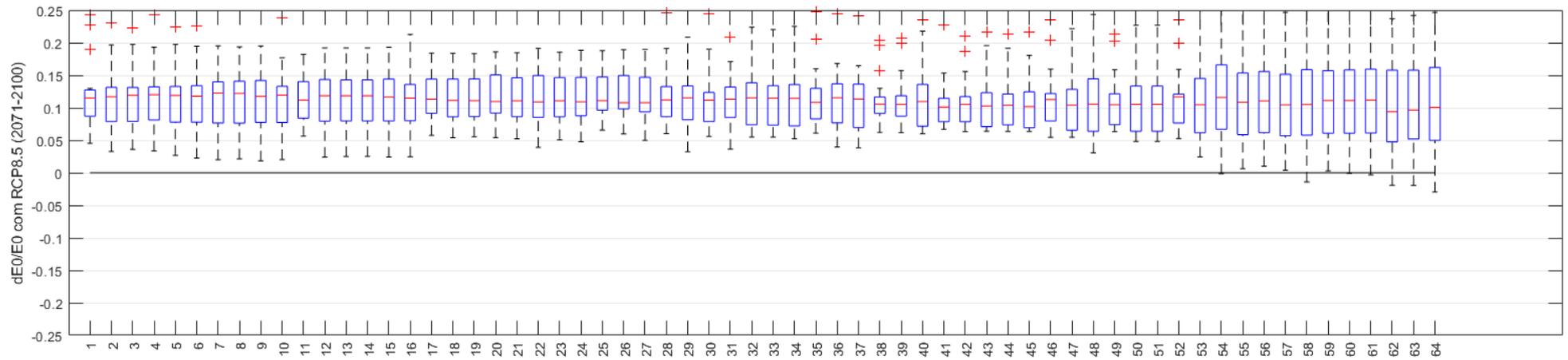


Figura 5.33 Gráfico *boxplot* da variação da evapotranspiração potencial por estação para o horizonte temporal 2071 - 2100 e RCP8.5.
Elaboração do autor.

5.5. VARIAÇÃO DA VAZÃO POR MODELO

Visto como os cenários RCP4.5 e RCP8.5 podem impactar a evapotranspiração potencial e a precipitação sob a perspectiva de diferentes modelos climáticos globais, é possível projetar o impacto que as mudanças climáticas terão na vazão média de longo prazo futura associando as variações da precipitação e da evapotranspiração às elasticidades-climas respectivas. Abordar-se-á nessa secção a variação da vazão com relação às variações de precipitação e evapotranspiração por modelo para os três horizontes temporais e os dois cenários de emissão de GEE.

5.5.1 Variação da vazão por modelo para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2015 – 2040

A variação da vazão para o cenário de emissão RCP4.5 é globalmente ligeiramente negativa considerando-se a média dos valores medianos de dQ/Q , com 12 modelos entre os 18 com as medianas de $dQ/Q < 0$ variando entre $[-0,477; -0,007]$. Ainda que a tendência global seja de diminuição da vazão futura, alguns modelos apresentam valores de dQ/Q positivos, tanto em *upper whiskers* como em valores medianos, notavelmente os modelos MIROC5 e MPIESMMR, que não apresentam nenhum valor negativo de dQ/Q . A maioria das dispersões são simétricas, com algumas poucas exceções de assimetria negativa, como bem evidente nos modelos MRICGCM3 e NorESM1M por exemplo. Analisando-se as medianas de cada modelo, pode-se dizer que o cenário mais pessimista de variação de vazão seria representado pelo modelo CanESM2, de distribuição simétrica, de forma que se pode aproximar a média do valor de mediana. Essa distribuição projeta um valor médio de dQ/Q de $-0,477$, o que implica dizer que a vazão média de longo termo futura seria 47,7% inferior à vazão média de longo termo presente. Já o modelo MPIESMMR apresenta um cenário totalmente contrário à tendência global dos modelos, propondo um aumento da vazão média de longo termo de 18,75%. A Figura 5.34 mostra o gráfico tipo *boxplot* para a variação da vazão por modelo para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

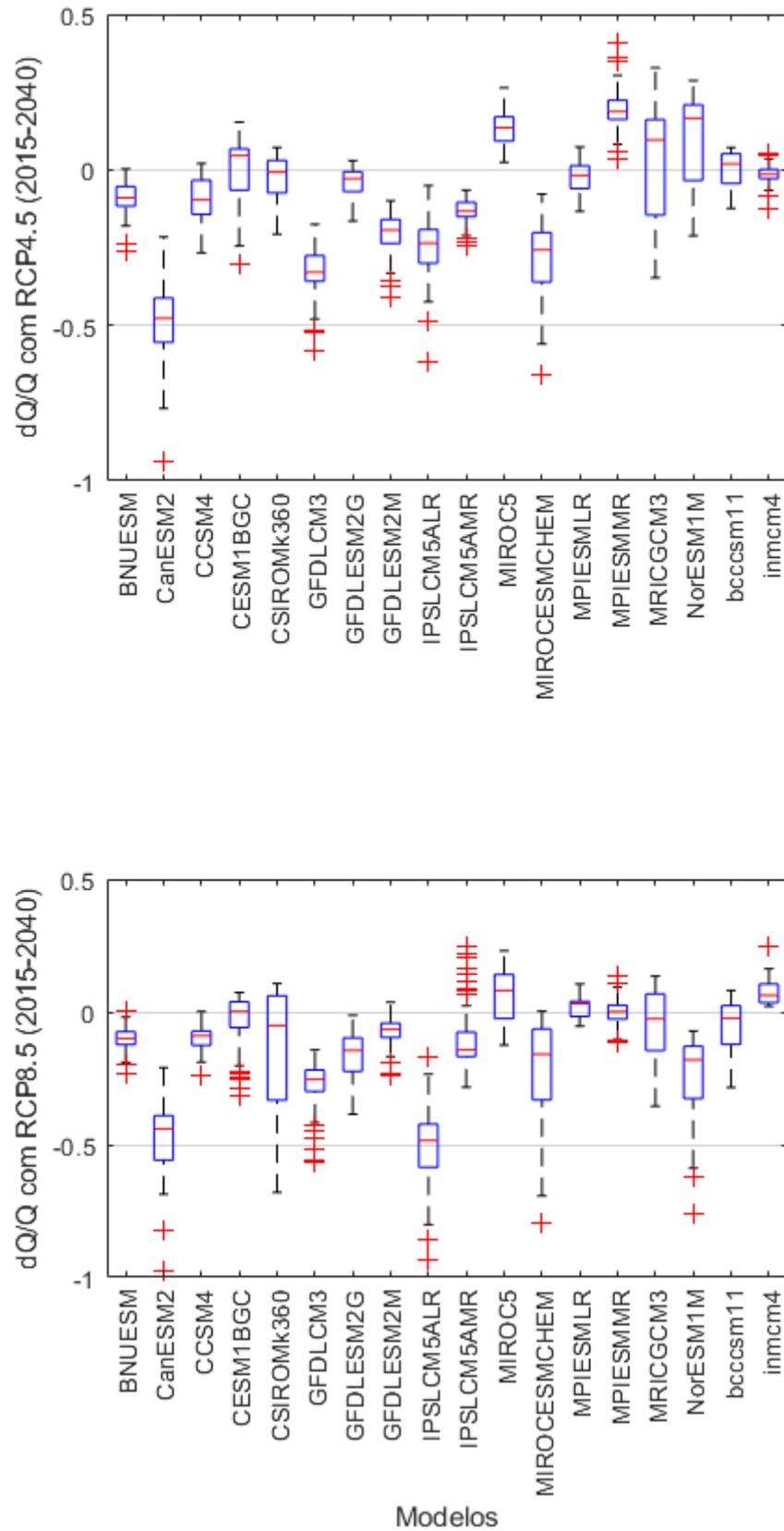


Figura 5.34 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2015 - 2040. Elaboração do autor.

No cenário RCP8.5 o comportamento de dQ/Q é similar ao cenário RCP4.5, com 13 modelos cujas medianas são negativas, contribuindo para uma média de valores medianos para dQ/Q igual a -13,07%. Os modelos MIROC5 e MPIESMMR tiveram sua dispersão alterada de modo que nesse cenário possuem estimativas negativas para a variação da vazão. Modelos como o IPSLCM5ALR e o NorESM1M mudaram drasticamente seus valores medianos assim como sua dispersão, estimando valores mais negativos de dQ/Q . Ainda se nota a mudança acentuada na dispersão de alguns modelos, seja com relação ao tamanho da caixa de dispersão, como no modelo CSIROmk360 ou com relação ao comportamento da variação da vazão, como no modelo inmcm4.

O cenário mais pessimista de variação de vazão, considerando-se os valores de mediana de cada distribuição, é representado pelo modelo IPSLCM5ALR, de distribuição suavemente negativamente assimétrica, com dQ/Q mediano de -0,485, o que implica dizer que a vazão média de longo termo futura seria 48,50 % inferior à vazão média de longo termo presente. O modelo MIROC5 apresenta estimativas otimistas, com um aumento da vazão média de longo termo de 8,03 %.

5.5.2 Variação da vazão por modelo para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2041 – 2070

A variação da vazão, sendo regida pela Equação 4.5, assumira valores mais negativos à medida que dP/P é mais negativo e dE_0/E_0 é mais positivo. Como visto nos subcapítulos 5.3 e 5.4, a tendência global por modelos ao longo dos horizontes temporais é justamente diminuição de dP/P e o aumento de dE_0/E_0 . Nesse contexto, pode-se observar na Figura 5.32 as consequências da variação da precipitação e da evapotranspiração potencial entre horizontes temporais na variação da vazão. Para o cenário de emissões de GEE RCP4.5 tem-se globalmente uma diminuição no centro das distribuições, salvo poucas exceções, como o modelo MPIESMLR, que passa a ter seu centro de distribuição positivo (negativo entre 2015 – 2040). O modelo MIROC5 passa de uma distribuição de estimativas totalmente positivas para uma distribuição mais equilibrada em torno de uma variação de vazão nula enquanto os modelos MRICGCM3 e NorESM1M apresentam distribuições menos assimétricas. O modelo CanESM2 ainda é o qual apresenta menor mediana para dQ/Q (-58,33%) enquanto o modelo MPIESMLR apresenta a maior mediana positiva (+27,45 %). A média de dQ/Q para o conjunto de modelos pode ser aproximada da média das medianas

uma vez que a maioria das distribuições são simétricas, e mostra a tendência de variação da vazão (positiva ou negativa) considerando todos os modelos usados.

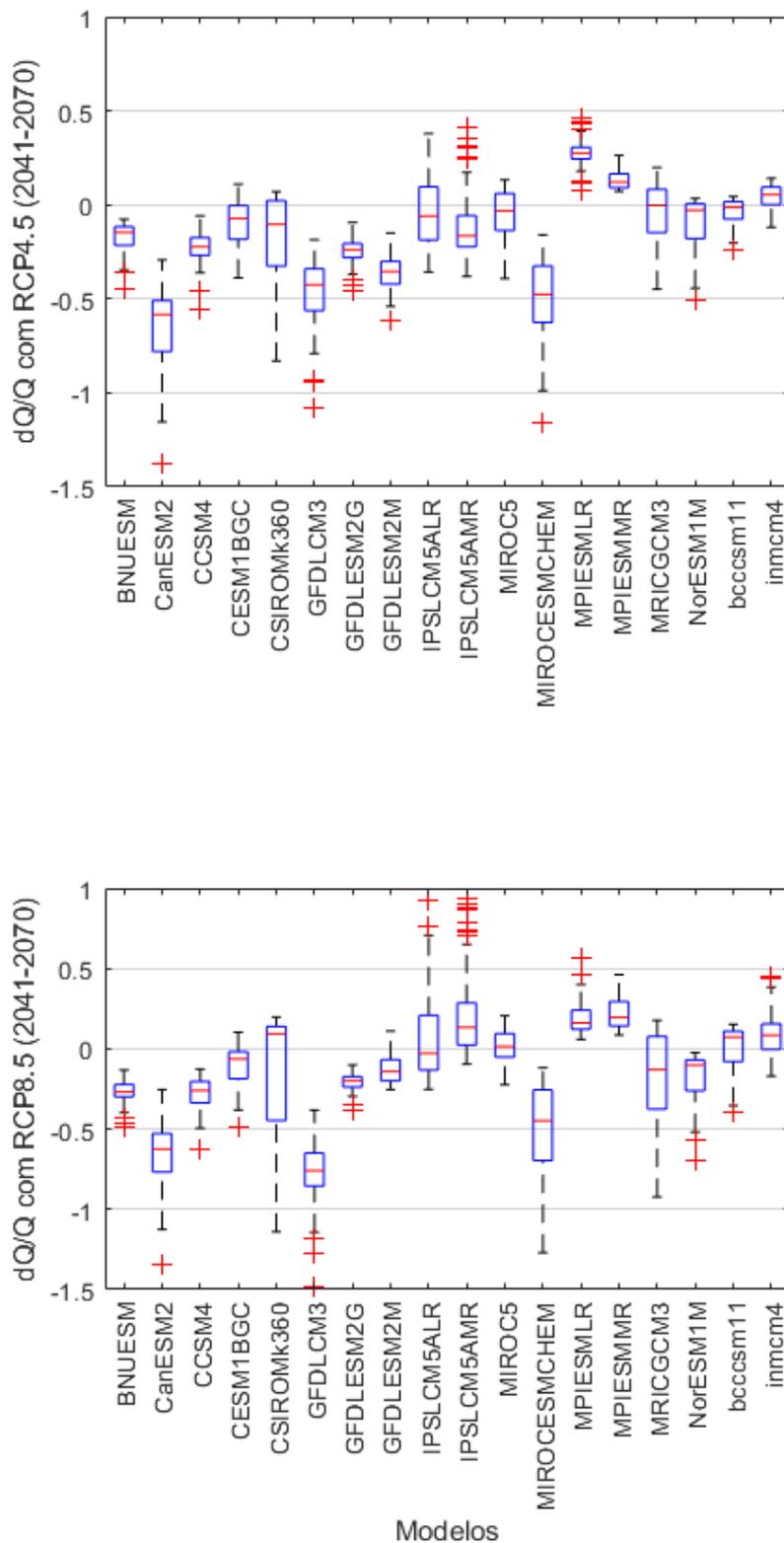


Figura 5.35 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2041 - 2070. Elaboração do autor.

Dessa forma, conclui-se que, globalmente, a tendência de variação da vazão para o período entre 2041 – 2070 é de diminuição da vazão, com dQ/Q médio de -15,54 %. Fazendo-se essa abordagem de maneira análoga às estimativas de dQ/Q para o cenário RCP8.5, obtêm-se que dQ/Q médio equivale a -14,28 %. Naturalmente esperava-se que os valores de dQ/Q fossem menores para o cenário RCP8.5 se comparado ao cenário RCP8.5 (2015 -2040), entretanto diversos modelos apresentam uma ligeira mudança de comportamento, aumentando os valores medianos de suas distribuições, com destaque para os modelos MPIESMLR e MPIESMMR, que apresentam distribuições totalmente positivas. Com relação às medianas extremas, temos o modelo GFDLCM3 que estima uma variação de -75,96% contra +19,62% proposto pelo modelo MPIESMMR.

5.5.3 Variação da vazão por modelo para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2071 – 2100

Para o terceiro horizonte temporal a influência da variação da precipitação e da evapotranspiração da vazão é ainda mais evidente. Para o cenário de emissão RCP4.5 observa-se na Figura 5.36 um total de 8 modelos majoritariamente assimétricos que apontam uma variação de vazão ligeiramente positiva, diferentemente do horizonte temporal anterior. Isso é justificado devido ao fato de a variação da precipitação entre 2071 e 2100 para o RCP4.5 ser positiva, diferentemente dos dois horizontes temporais anteriores. Contudo, a variação da evapotranspiração potencial continuou aumentando de um horizonte temporal ao outro, o que explica que alguns modelos apresentem valores ainda mais negativos para dQ/Q . A média dos centros das distribuições de variação de vazão é de -0,182, o que sugere que, considerando a estimativa de todos os modelos estudados, a vazão média de longo termo futura entre 2071 - 2100 seria na média 18,20% menor que a vazão média de longo termo presente. O modelo CanESM2 propõem a menor mediana para dQ/Q , igual a -0,693, enquanto o melhor cenário de aumento na vazão média de longo termo futura é proposto pelo modelo +0,265.

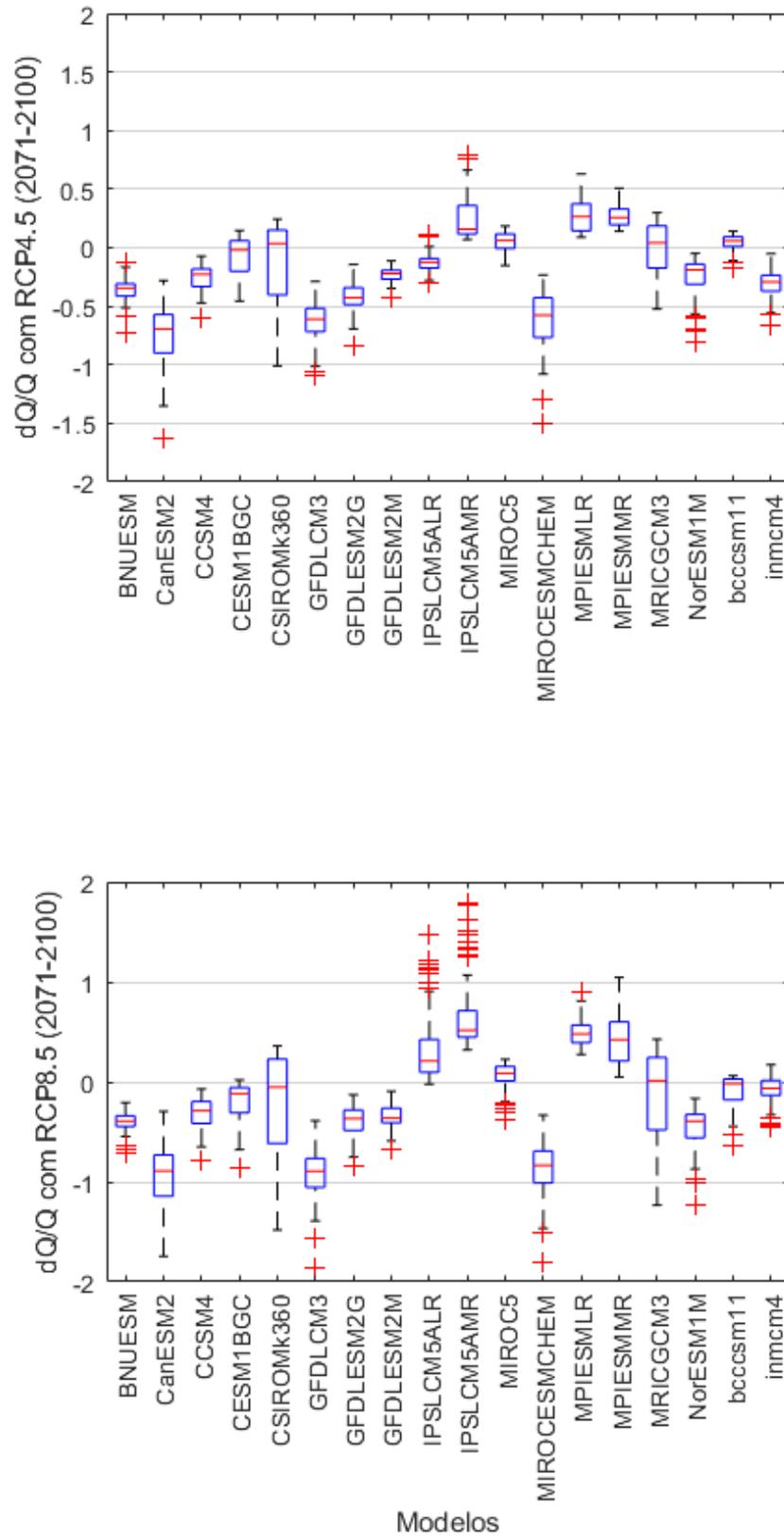


Figura 5.36 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por modelo para o horizonte temporal 2071 - 2100. Elaboração do autor.

No cenário de emissões RCP8.5 os modelos mantiveram em grande parte suas tendências apresentadas desde os primeiros horizontes temporais. A presença de modelos que apontam variações de vazão positivas acaba sendo inibida pelos valores fortemente negativos dos demais modelos, de modo que globalmente entende-se que esse horizonte temporal será, na média, mais susceptível à variações de vazão negativas, guardando a tendência esperada para um cenário de diminuição na precipitação futura e aumento da evapotranspiração potencial, eventos fortemente estimados nos subcapítulos 5.3 e 5.4. Numa comparação com o cenário de emissões RCP4.5 para o horizonte 2071 – 2100 observa-se uma maior presença de *outliers* para o cenário RCP8.5, mas coerência entre modelos para os dois cenários. Nota-se eventualmente uma diferença em nível de dispersão, como por exemplo para o modelo MRICGCM3, que apresenta uma caixa maior e uma dispersão mais assimétrica negativamente no cenário RCP8.5 com relação ao cenário RCP4.5. O modelo GFDLCM3 apresenta a maior variação negativa para dQ/Q , de 89,30% enquanto o modelo que propõem a maior variação positiva para dQ/Q é o IPSLCM5AMR com 51,52%.

5.6. VARIAÇÃO DA VAZÃO POR ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

5.6.1 Variação da vazão por estação fluviométrica para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2015 – 2040

Para o conjunto de estações fluviométricas que são escopo deste trabalho apresenta-se a Figura 5.37, que mostra como varia a razão dQ/Q por estação, para o primeiro horizonte temporal. Tanto para o cenário de emissão RCP4.5 quanto para o RCP8.5, os valores medianos de dQ/Q foram negativos. Uma análise por estação pode nos indicar quais estações fluviométricas sofrem mais os impactos das mudanças climáticas. Globalmente, observa-se um maior intervalo de variação de dQ/Q para estações no extremo norte do Médio São Francisco (estações 54 a 64), efeito mais facilmente visualizado no cenário RCP8.5. Ainda para este último cenário de emissão constata-se que os centros de distribuição de cada estação são mais negativos que no cenário RCP4.5, o que era esperado de acordo com a análise do item 5.5.1 deste trabalho. Finalmente, averigua-se uma forte presença de *outliers* para as bacias no Médio São Francisco, oriundos das estimativas discrepantes de evapotranspiração para as mesmas estações fluviométricas.

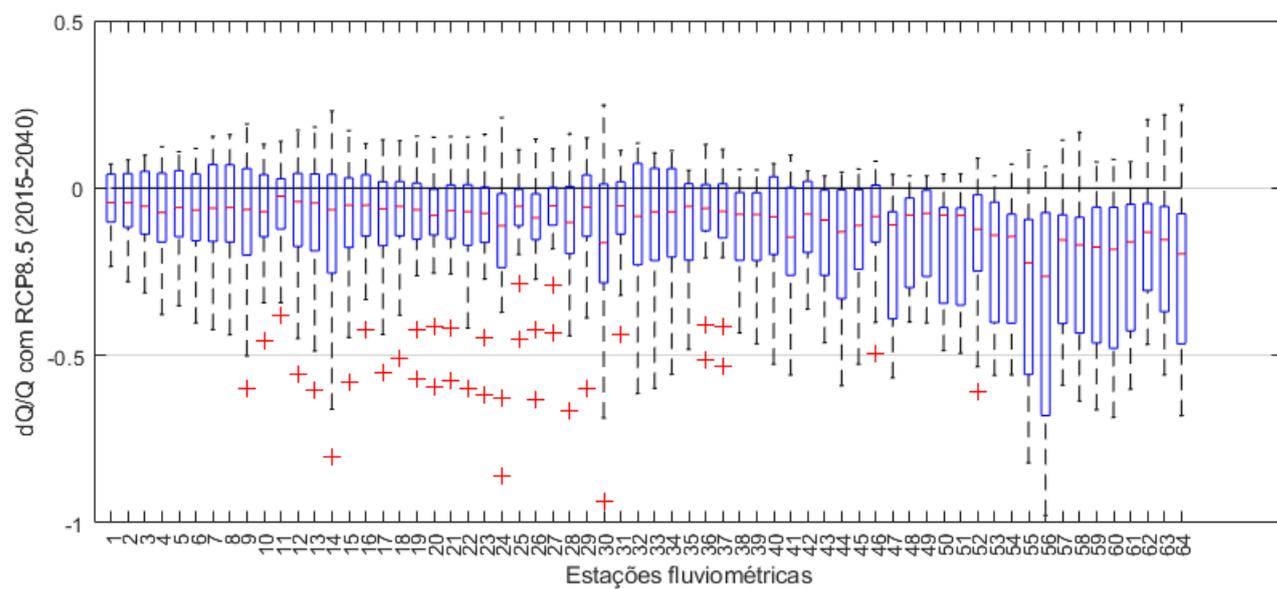
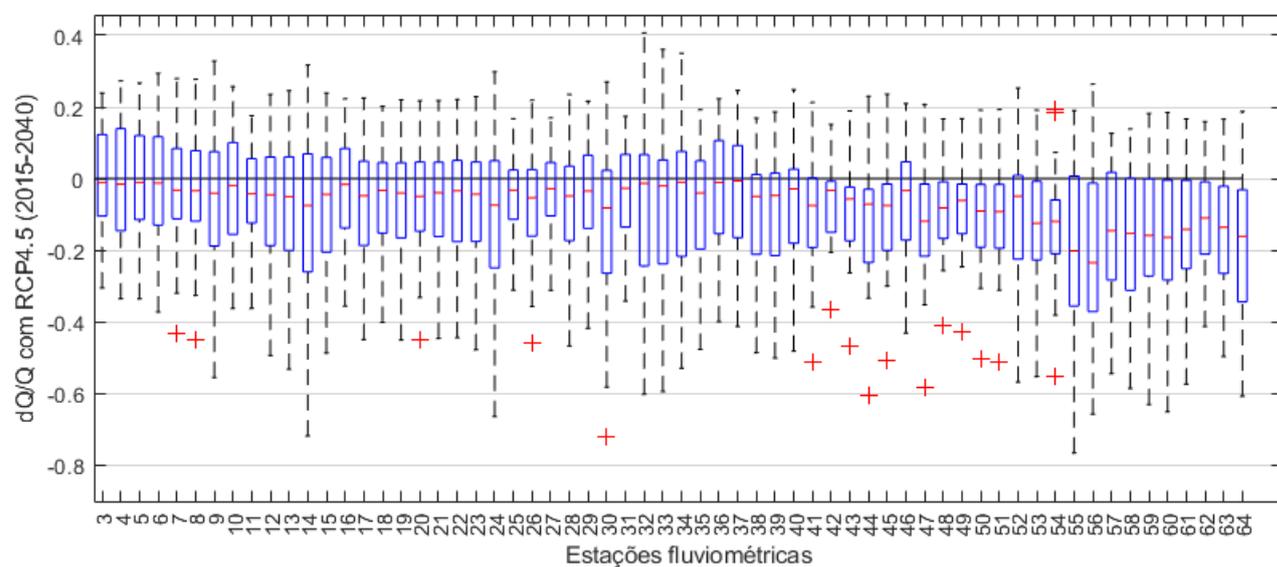


Figura 5.37 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2015 - 2040. Elaboração do autor.

5.6.2 Variação da vazão por estação fluviométrica para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2041 – 2070

O cenário de emissão RCP4.5 apresenta dispersões mais simétricas se comparado ao RCP8.5, principalmente comparando-se as estações do Alto e Médio São Francisco. Torna-se ainda mais evidente comparando-se a Figura 5.38 com a Figura 5.37 a tendência de diminuição dos valores medianos de dQ/Q para as estações em regiões mais áridas, com valores de dP/P negativos e dE_0/E_0 positivos, características clássicas das estações no norte do Médio São Francisco.

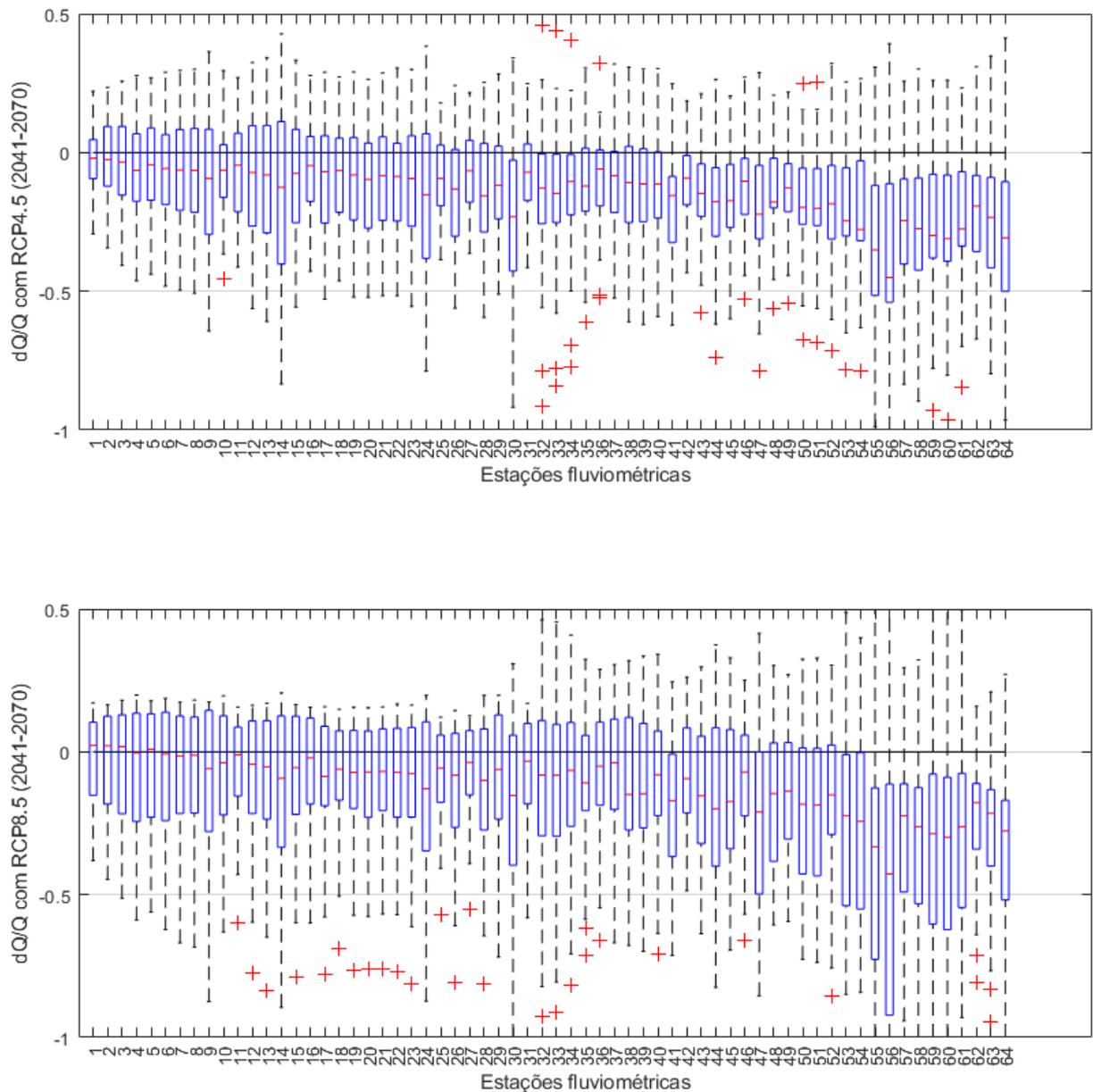


Figura 5.38 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2041 - 2070. Elaboração do autor.

A variabilidade das dispersões também aumenta tanto para comparações entre mesmos horizontes temporais e diferentes cenários RCPs assim como para diferentes horizontes temporais e o mesmo cenário de emissão de gases GEE. Para as estações no norte do Médio São Francisco a média dos valores medianos de dQ/Q está em torno de $-0,136$ para o cenário RCP4.5 e $-0,193$ para o cenário RCP8.5 enquanto que para as estações do Alto e da parte norte do Médio São Francisco esses valores são $-0,057$ e $-0,100$ respectivamente, deixando ainda mais evidente que o impacto na variação da vazão é mais pronunciado nas estações mais ao norte da bacia.

5.6.2 Variação da vazão por estação fluviométrica para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para o horizonte temporal 2071 – 2100

Uma drástica diminuição no intervalo das dispersões para as estações do Alto e Médio São Francisco é constatada para o terceiro horizonte temporal se comparado aos dois primeiros. Percebe-se na Figura 5.39 uma ligeira mudança na tendência das medianas, principalmente para as estações do Alto e Médio São Francisco, de modo que os valores medianos de dQ/Q ficam menos negativos, tendendo para uma média de dQ/Q nula. Já nas estações ao norte da região do Médio São Francisco permanece o comportamento de variação negativa para dQ/Q porém menos pronunciado que para os horizontes temporais anteriores, com diminuição das caixas de dispersão e nas caudas dessas estações. Além disso, ainda para as estações no norte do Médio São Francisco, há um aumento significativo de *outliers* no cenário RCP8.5 se comparados aos dois horizontes anteriores, o que pode ser justificado pela combinação de elevados valores de variação de evapotranspiração potencial com os altos valores (em módulo) de elasticidade-clima ε_2 para as estações mais áridas.

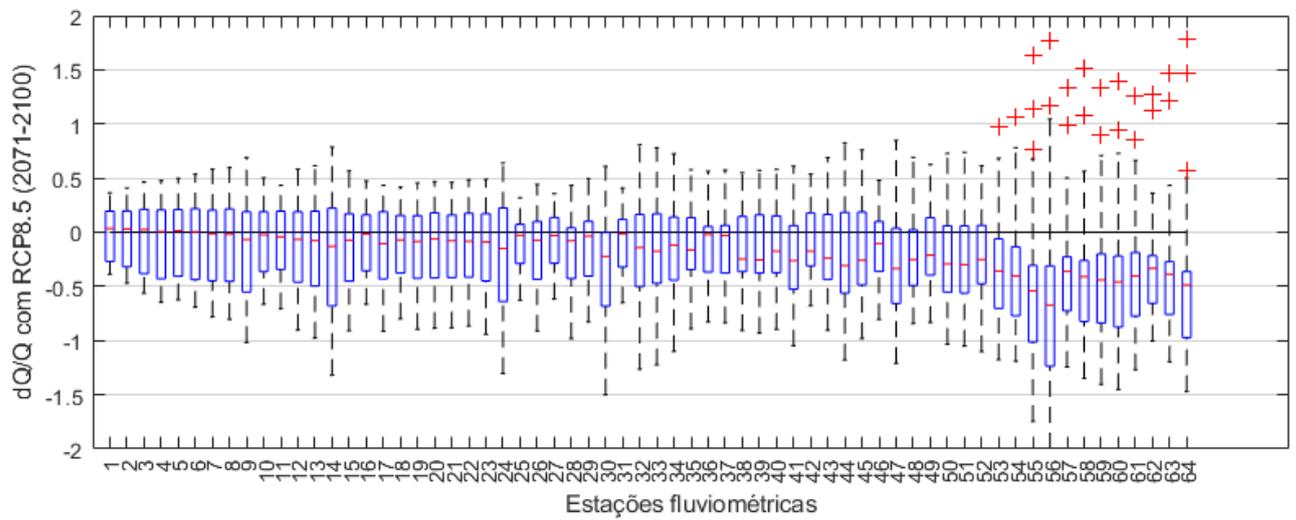
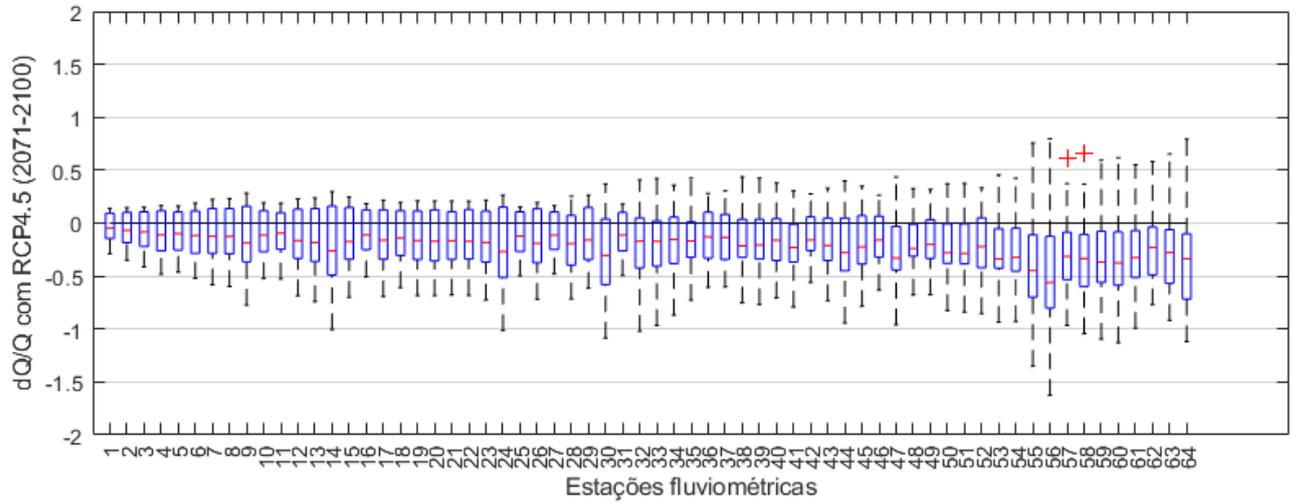


Figura 5.39 Gráfico *boxplot* da variação da vazão por estação fluviométrica para o horizonte temporal 2071 - 2100. Elaboração do autor.

5.6.2 Mudança relativa da vazão por estação para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5

Uma vez compreendidas as possíveis variações na vazão em função das mudanças climáticas, é interessante entender a probabilidade de ocorrência dessas variações, ou seja, analisar a mudança relativa de dQ/Q para os diferentes horizontes temporais. Para isso, analisar-se-á nesse subitem a função distribuição acumulada para uma estação fluviométrica. A Figura 5.40 apresenta a curva empírica da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica.

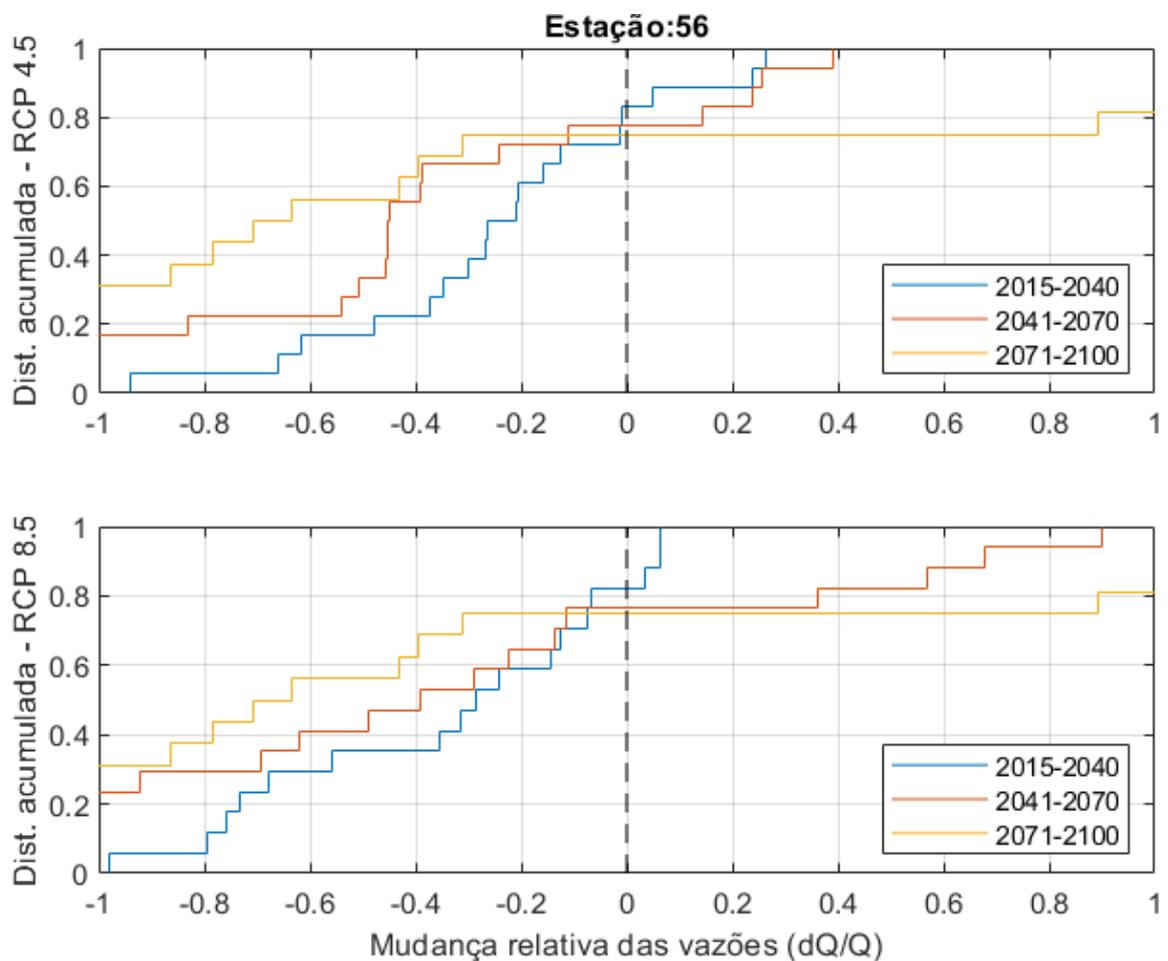


Figura 5.40 Curva empírica da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n° 56. Elaboração do autor.

Observa-se que, para o cenário RCP4.5, a probabilidade de que dQ/Q seja menor que 0, ou seja, a vazão média de longo termo futura seja menor que a vazão média de longo termo atual é de 76,5 % entre 2015 – 2040, 77 % entre 2041 – 2070 e 69 % entre 2071 – 2100.

Com relação ao cenário RCP8.5 essas probabilidades mudam para 78 %, 69% e 67,5% respectivamente. A Figura 5.41 facilita a visualização dessas probabilidades uma vez que a curva foi suavizada.

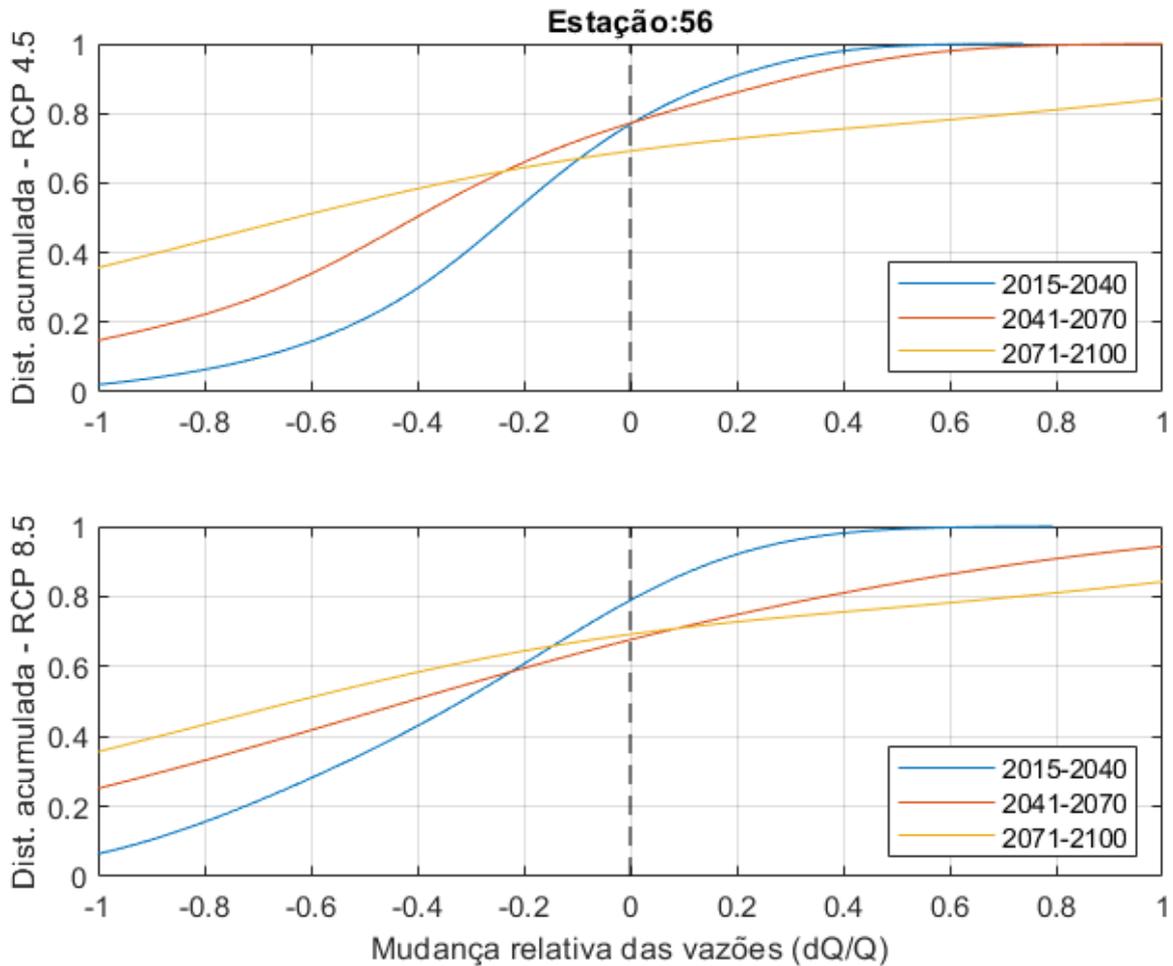


Figura 5.41 Curva suavizada da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n°56. Elaboração do autor.

Esse tipo de abordagem permite, em conjunto com os gráficos tipo *boxplot*, compreender a dinâmica dos impactos das mudanças climáticas na vazão, de modo que uma análise estatística aprofundada para o conjunto de estações fluviométricas selecionadas poderia acarretar em conclusões importantes para o conjunto de sub-bacias a fim de otimizar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos na bacia do São Francisco. Outra interpretação ainda é a comparação entre os diferentes níveis de variação de vazão. Observa-se que a probabilidade para variações de vazão em -20% é alta, em 50% e que variações de vazão na ordem de -50% podem acontecer numa probabilidade de 20%. Valores inferiores à -1 para dQ/Q são teoricamente impossíveis, o que faz com que as Figuras 5.40 e 5.41

apresentem uma incoerência teórica. Entretanto, esses erros são devidos à grandes variações de precipitação e evapotranspiração, o que aumenta o acúmulo de erros na expansão de Taylor utilizada para o cálculo da variação da vazão. A Figura 5.42 traz a mesma abordagem gráfica para a estação 3, situada no Alto São Francisco.

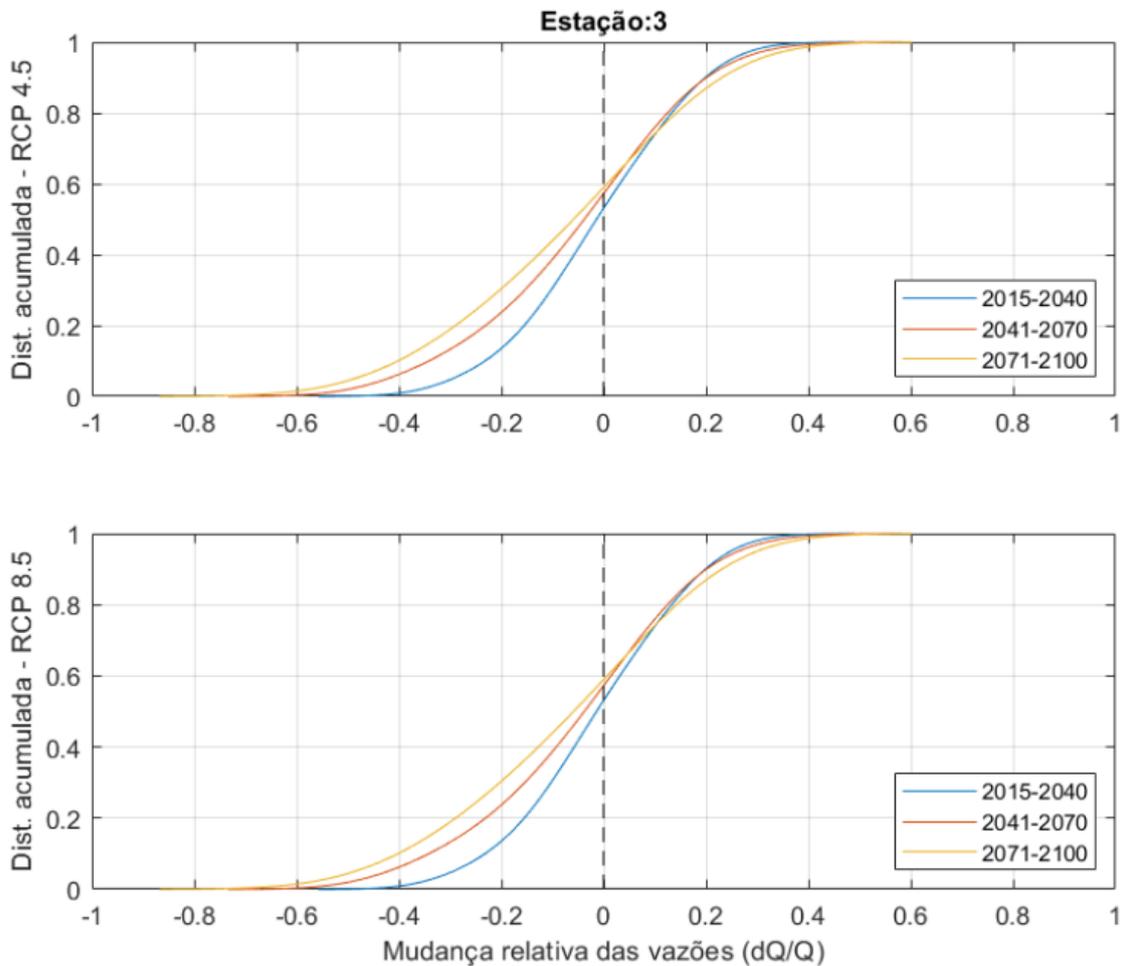


Figura 5.42 Curva suavizada da variação de vazão acumulada para a estação fluviométrica n°3. Elaboração do autor.

Observa-se na estação 3 uma variação de vazão mais conservadora, com uma probabilidade de variação negativa entre 50% e 60% para ambos os cenários de emissão de GEE. Portanto, para diferentes níveis de variações, como $dQ/Q = -20\%$, nota-se que esses valores de probabilidade são inferiores se comparados à estação 56, sendo uma probabilidade de apenas 10%. Isso demonstra igualmente a variação dos impactos das mudanças climáticas nas diferentes regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação das hipóteses de Budyko no balanço hidrológico é uma abordagem simples e eficiente para a estimativa de vazões médias de longo termo futuras, identificando rapidamente bacias hidrográficas que precisam de estudos mais aprofundados. Entretanto, propõe apenas estimativas à longo termo para valores médios presentes, não abordando a variabilidade interanual das bacias ou eventos extremos. É igualmente necessário considerar o parâmetro ω de cada sub-bacia, de modo que um estudo regionalização do parâmetro ω ajuda a melhor compreender como a vazão varia com as mudanças climáticas.

As elasticidades-clima de cada estação fluviométrica, obtidas a partir dos valores de ω , permitem entender e visualizar a variação percentual das variáveis climáticas precipitação e evapotranspiração por estação fluviométrica e apresentaram uma lógica espacial no sentido que, quanto mais árida a característica das estações fluviométricas maiores são os valores de ε_1 (o que contribui positivamente para a variação de vazão) e mais negativos serão os valores de ε_2 (contribuindo negativamente para a variação da vazão).

As variações de precipitação e evapotranspiração potencial possuem um largo intervalo de variabilidade, com diferentes tendências (dP/P e $dE0/E0$ positivos e/ou negativos) dependendo do modelo global climático utilizado. Seria interessante nesta questão aprofundar a análise estatísticas e determinar os intervalos de confiança dessas variações para apenas posteriormente passar a um estudo de variação da vazão em função da variação. De maneira global, tanto para o RCP4.5 quanto para o RCP8.5 observou-se que a maioria dos modelos climáticos globais apontam para um cenário de diminuição da precipitação e aumento na evapotranspiração, estes sendo mais acentuados em estações do norte Médio São Francisco. Os valores gerados pelos modelos para o cenário de emissão RCP8.5 também acabam sendo, de maneira global, mais acentuados se comparado aos valores estimados para o cenário RCP4.5. Pode-se justificar isso devido um maior delta de temperatura para o cenário RCP8.5.

Com relação à vazão, este trabalho pôde avaliar a variação da vazão para inferir a estimativa da vazão média de longo termo futura em relação à vazão média de longo termo

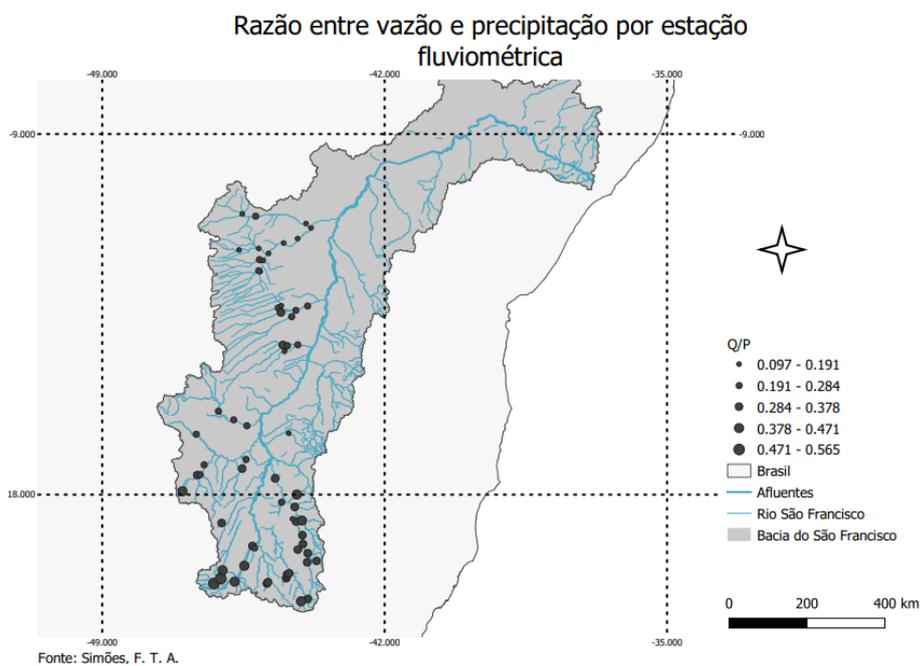
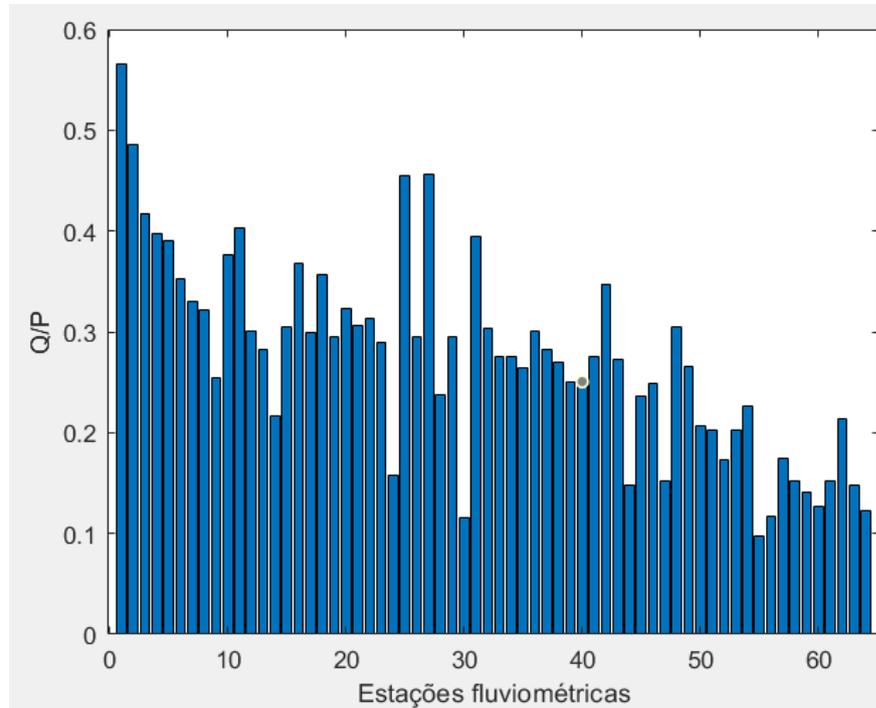
presente na bacia do Rio São Francisco. A análise da variação da vazão por estações fluviométricas permitiu concluir que as variações de vazão serão mais pronunciadas em sub-bacias de características áridas. Com relação aos modelos climáticos globais, embora alguns apontem a possibilidade de um aumento de vazão média de longo termo para as regiões do Alto e Médio São Francisco, o comportamento global, para o conjunto de todos os modelos é de que a vazão média de longo termo futura será menor que a vazão média de longo termo presente, ou seja, $dQ/Q < 0$.

Para este trabalho apenas estações fluviométricas com mais de 30 anos de dados consecutivos foram selecionadas, utilizando apenas um total de 64 das 151 estações com dados disponíveis. Seria interessante variar os critérios de seleção das estações fluviométricas para mapear a variação de dQ/Q em toda a bacia hidrográfica, visando a compreensão de uma dependência espacial para os valores de dQ/Q .

Com relação aos modelos climáticos globais utilizados, é importante guardar em mente que eles não foram avaliados, o que exige cuidado na discussão e na interpretação dos resultados.

7. ANEXOS

ANEXO A - Razão Q/P médio por estação fluviométrica e sua distribuição espacial



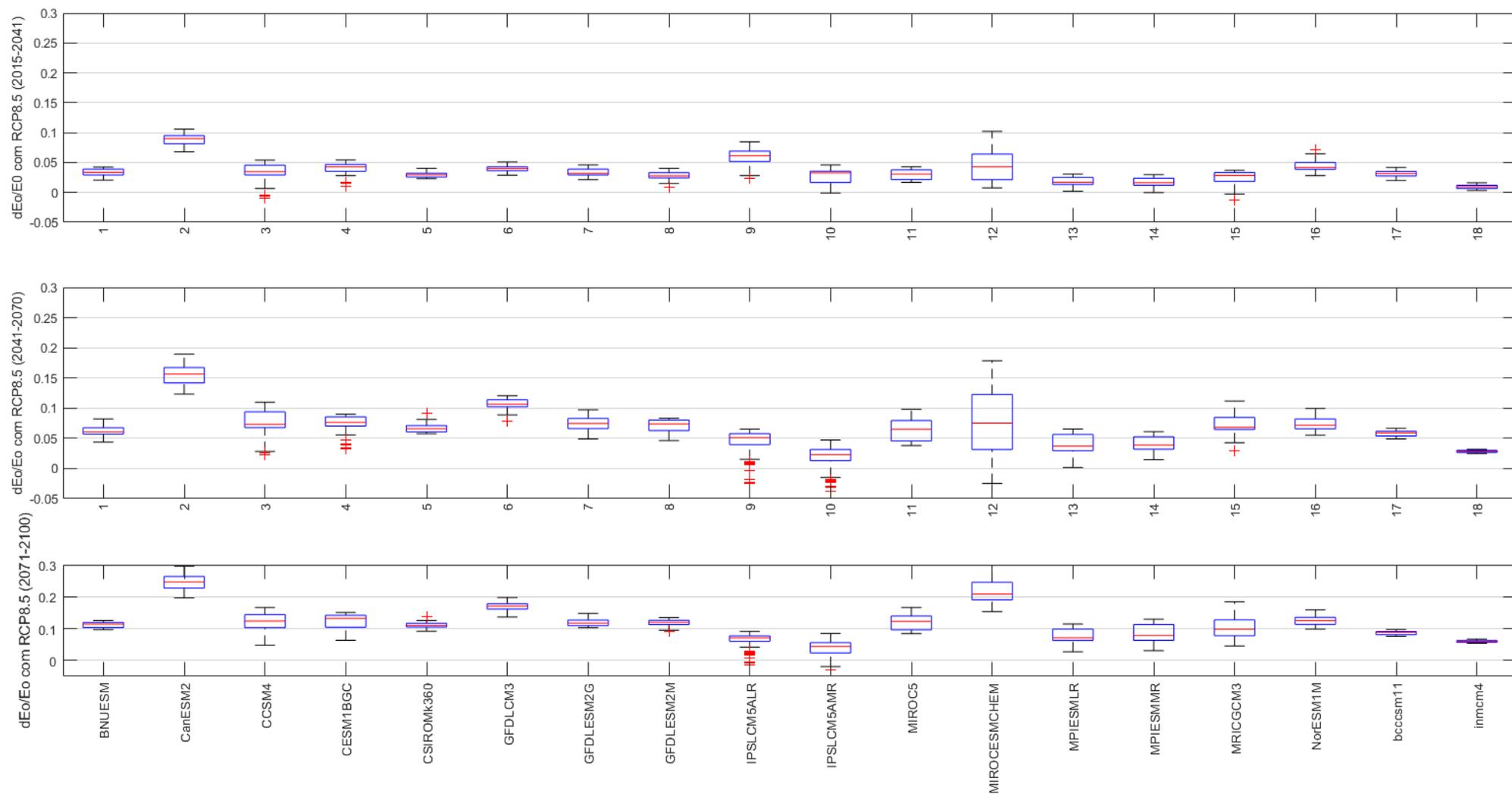
ANEXO B - Quadro de informações por estações fluviométricas

Estação	Código da estação	Latitude	Longitude	Área (km ²)	Evapotranspiração potencial (mm)	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ /s)	ω	eps1	eps2
1	40037000	-20.2156	-46.2322	757	1366.87	1580.33	869.91	1.66	1.44	-0.44
2	40040000	-20.0953	-46.0622	244	1317.21	1513.06	717.29	1.91	1.60	-0.60
3	40050000	-20.17	-45.7158	5560	1315.45	1531.91	624.87	2.27	1.82	-0.82
4	40060001	-19.8875	-46.0169	569	1343.74	1685.58	647.89	2.63	1.98	-0.98
5	40070000	-19.7761	-45.4792	10000	1313.45	1524.73	580.50	2.43	1.92	-0.92
6	40100000	-19.2814	-45.2753	14000	1323.11	1488.53	512.11	2.63	2.07	-1.07
7	40170000	-20.2169	-44.9181	1040	1292.19	1405.18	450.73	2.72	2.15	-1.15
8	40185000	-20.1847	-44.8933	1910	1289.35	1418.31	450.32	2.79	2.20	-1.20
9	40500000	-19.3317	-45.2214	769	1309.94	1396.55	348.32	3.43	2.64	-1.64
10	40549998	-20.6039	-43.9086	462	1231.16	1403.75	515.85	2.48	1.97	-0.97
11	40680000	-20.6611	-44.0722	487	1244.68	1401.72	552.65	2.28	1.85	-0.85
12	40810800	-20.0869	-44.4381	54.7	1325.78	1441.75	421.41	2.99	2.33	-1.33
13	40811100	-20.0475	-44.4089	113	1325.87	1452.59	398.19	3.24	2.48	-1.48
14	40822995	-19.985	-44.4389	113	1325.92	1460.74	307.95	4.47	3.22	-2.22
15	40823500	-19.9614	-44.3661	154	1325.43	1456.62	429.69	3.01	2.33	-1.33
16	41050000	-18.7064	-46.0397	1200	1387.09	1397.49	501.84	2.27	1.90	-0.90
17	41250000	-19.6875	-43.9206	709	1335.48	1311.43	381.05	2.67	2.20	-1.20
18	41300000	-19.6536	-43.6875	618	1319.24	1389.52	482.29	2.43	1.99	-0.99
19	41380000	-19.4619	-43.9036	564	1324.75	1234.36	350.26	2.58	2.17	-1.17
20	41410000	-19.2311	-44.0247	7080	1317.16	1381.31	435.95	2.65	2.14	-1.14
21	41440005	-19.3714	-44.1528	238	1338.31	1301.63	385.72	2.60	2.15	-1.15
22	41600000	-19.0111	-44.0383	8050	1322.66	1364.60	416.58	2.69	2.18	-1.18

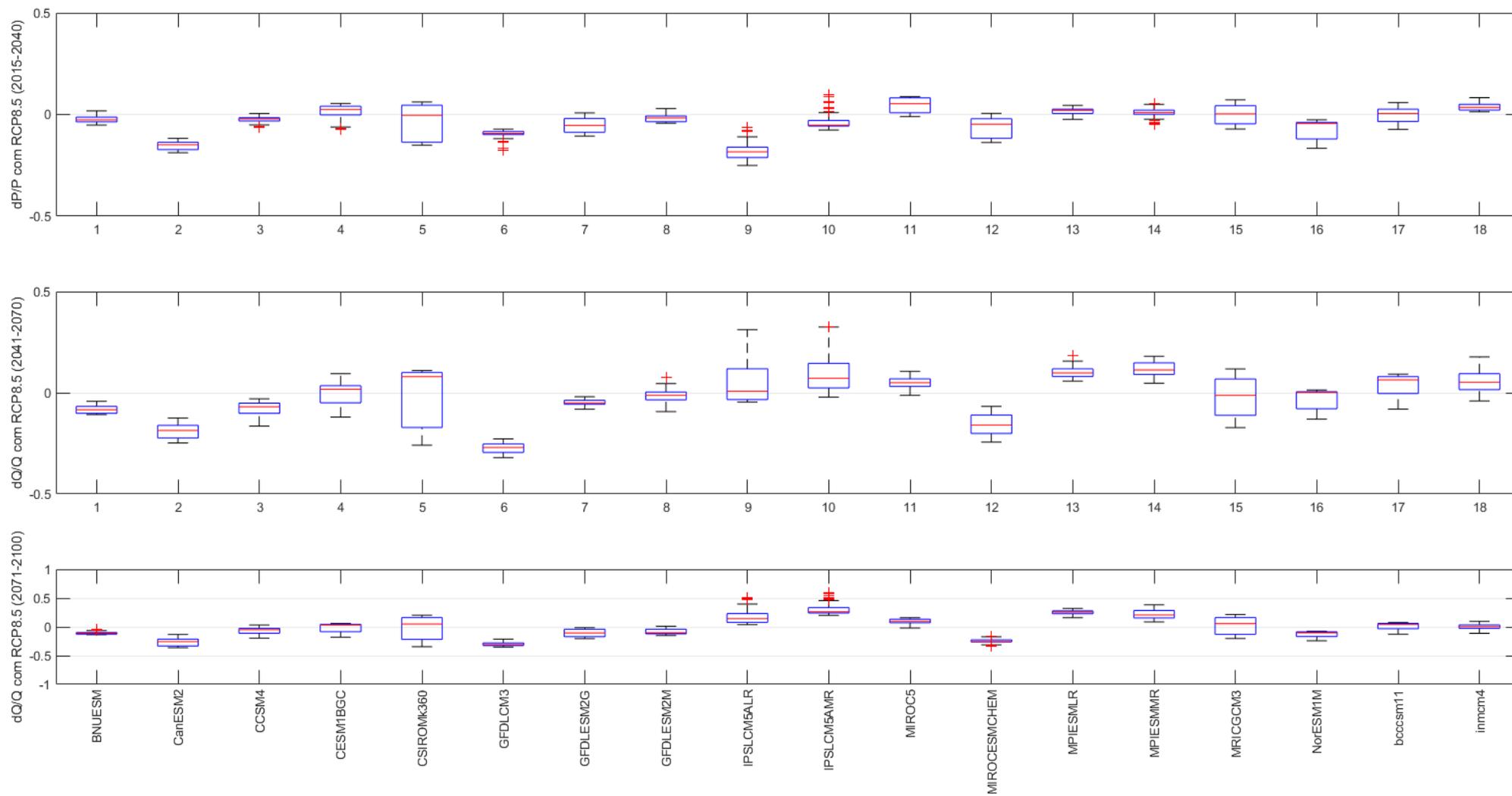
23	41650002	-18.6728	-44.1939	10700	1320.39	1326.92	373.58	2.81	2.28	-1.28
24	41685000	-18.6042	-44.2847	534	1342.68	1094.63	162.32	3.49	3.05	-2.05
25	41780002	-18.645	-44.0506	3980	1300.26	1286.16	570.87	1.88	1.62	-0.62
26	41818000	-18.3061	-44.2258	16600	1320.81	1280.49	367.87	2.66	2.20	-1.20
27	41890000	-17.9964	-44.1775	1420	1372.26	1013.80	402.55	1.78	1.62	-0.62
28	41940000	-18.1908	-44.5556	2070	1380.25	1069.84	241.57	2.59	2.29	-1.29
29	41990000	-17.5961	-44.7133	26500	1341.47	1199.37	345.77	2.46	2.11	-1.11
30	42187000	-16.4669	-44.3761	1310	1520.25	1098.45	120.40	3.57	3.25	-2.25
31	42250000	-17.915	-47.0108	464	1423.49	1381.08	524.14	2.11	1.80	-0.80
32	42257000	-17.5125	-46.6461	2000	1441.63	1695.80	427.91	4.20	2.90	-1.90
33	42290000	-17.5025	-46.5711	7750	1433.29	1623.85	398.66	3.95	2.85	-1.85
34	42395000	-17.255	-46.4728	12800	1432.15	1554.82	399.76	3.38	2.60	-1.60
35	42545500	-16.4925	-46.6686	680	1440.21	1328.39	341.85	2.76	2.32	-1.32
36	42850000	-17.3506	-45.5325	4390	1446.92	1296.73	379.05	2.44	2.09	-1.09
37	42860000	-17.1211	-45.4356	5700	1461.31	1239.96	341.71	2.44	2.12	-1.12
38	43429998	-15.9178	-46.1192	11800	1469.82	1311.92	338.18	2.67	2.27	-1.27
39	43670000	-16.1331	-45.7417	18600	1474.83	1259.04	304.69	2.68	2.31	-1.31
40	43880000	-16.2811	-45.4142	23800	1471.68	1229.42	299.24	2.62	2.27	-1.27
41	45131000	-14.3136	-44.4594	6020	1554.08	1266.46	327.28	2.47	2.16	-1.16
42	45170001	-14.2642	-44.5225	5850	1577.04	924.00	312.12	1.80	1.68	-0.68
43	45210000	-14.2808	-44.4097	12600	1566.29	1163.25	302.50	2.31	2.07	-1.07
44	45220000	-14.4236	-44.4831	2380	1615.18	999.76	141.26	2.78	2.59	-1.59
45	45260000	-14.26	-44.1522	16300	1587.51	1107.93	251.01	2.40	2.17	-1.17
46	45590000	-13.3406	-44.6386	3900	1562.21	1046.03	251.59	2.27	2.07	-1.07
47	45740001	-13.2853	-44.5617	7950	1591.94	1027.11	150.93	2.82	2.60	-1.60
48	45770000	-13.4528	-44.5689	5540	1563.22	1051.37	307.58	2.05	1.87	-0.87
49	45880000	-13.5586	-44.3031	9550	1579.63	971.64	248.13	2.11	1.95	-0.95

50	45910001	-13.4006	-44.1989	29600	1582.50	1033.90	207.34	2.45	2.25	-1.25
51	45960001	-13.2914	-43.9089	31000	1574.77	1041.49	205.72	2.49	2.28	-1.28
52	46415000	-12.4306	-45.0856	4950	1568.83	1117.02	187.50	2.85	2.58	-1.58
53	46455000	-12.4106	-45.1222	6350	1566.41	1192.27	231.57	2.78	2.47	-1.47
54	46543000	-12.1358	-45.1033	5380	1572.53	1220.06	267.75	2.63	2.33	-1.33
55	46550000	-12.1525	-45.0094	24400	1582.34	1130.18	107.17	3.78	3.46	-2.46
56	46570000	-11.8953	-45.6081	2710	1566.09	1391.44	155.87	4.75	4.01	-3.01
57	46590000	-11.8561	-45.12	7480	1591.81	1169.95	198.80	2.91	2.61	-1.61
58	46610000	-11.9794	-44.8772	33100	1583.91	1133.30	168.78	3.04	2.75	-1.75
59	46650000	-11.7208	-44.5022	36000	1588.82	1116.99	154.77	3.11	2.83	-1.83
60	46675000	-11.6106	-44.1567	39600	1608.60	1083.92	134.43	3.15	2.90	-1.90
61	46770000	-10.9936	-45.5278	6930	1616.05	1021.38	149.86	2.78	2.57	-1.57
62	46790000	-11.0514	-45.1969	14300	1611.20	1007.71	207.86	2.36	2.18	-1.18
63	46870000	-11.2356	-43.9494	22000	1630.98	975.54	141.68	2.69	2.51	-1.51
64	46902000	-11.345	-43.8261	65900	1607.01	1079.19	128.83	3.20	2.95	-1.95

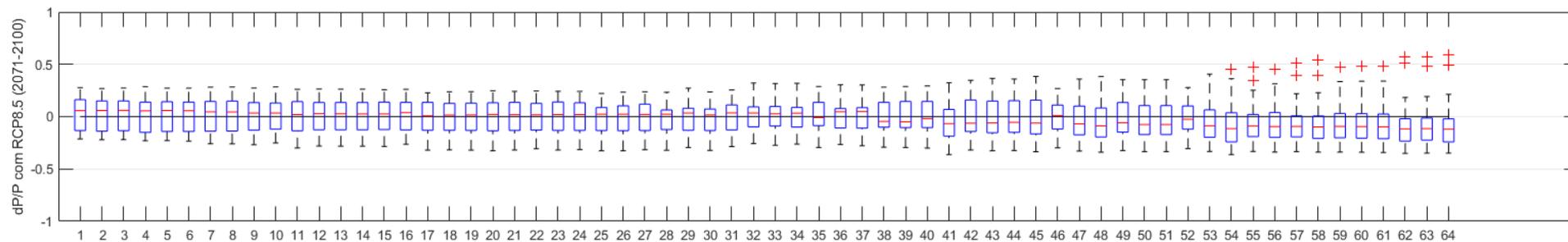
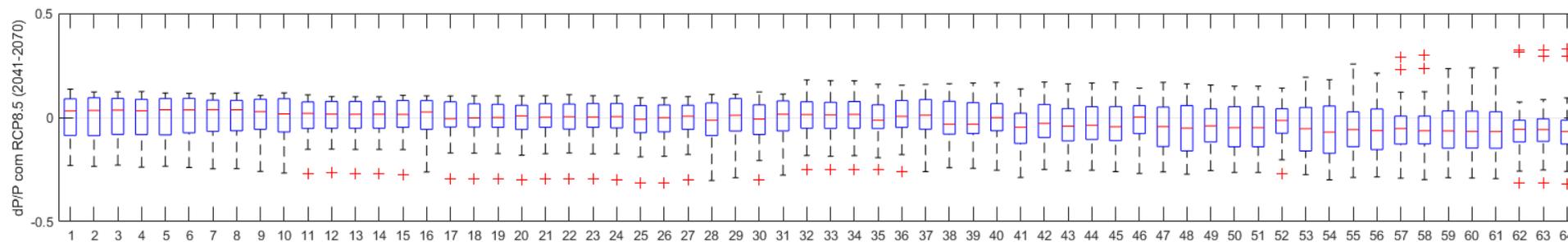
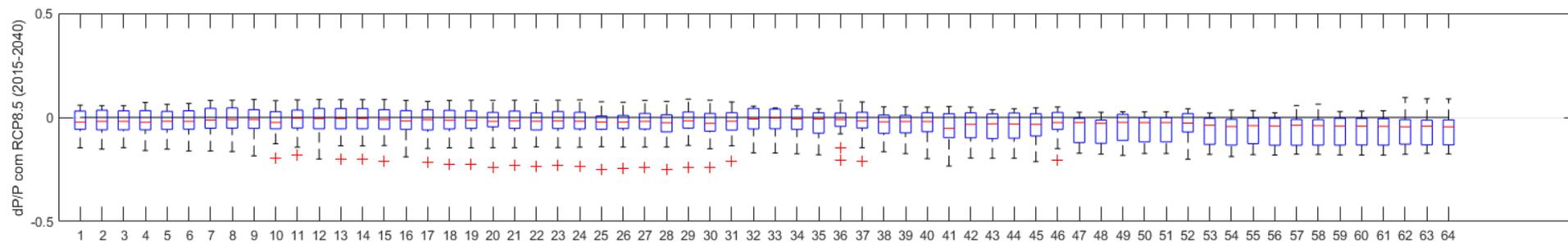
ANEXO C - Variação da evapotranspiração potencial por modelo para o cenário RCP8.5



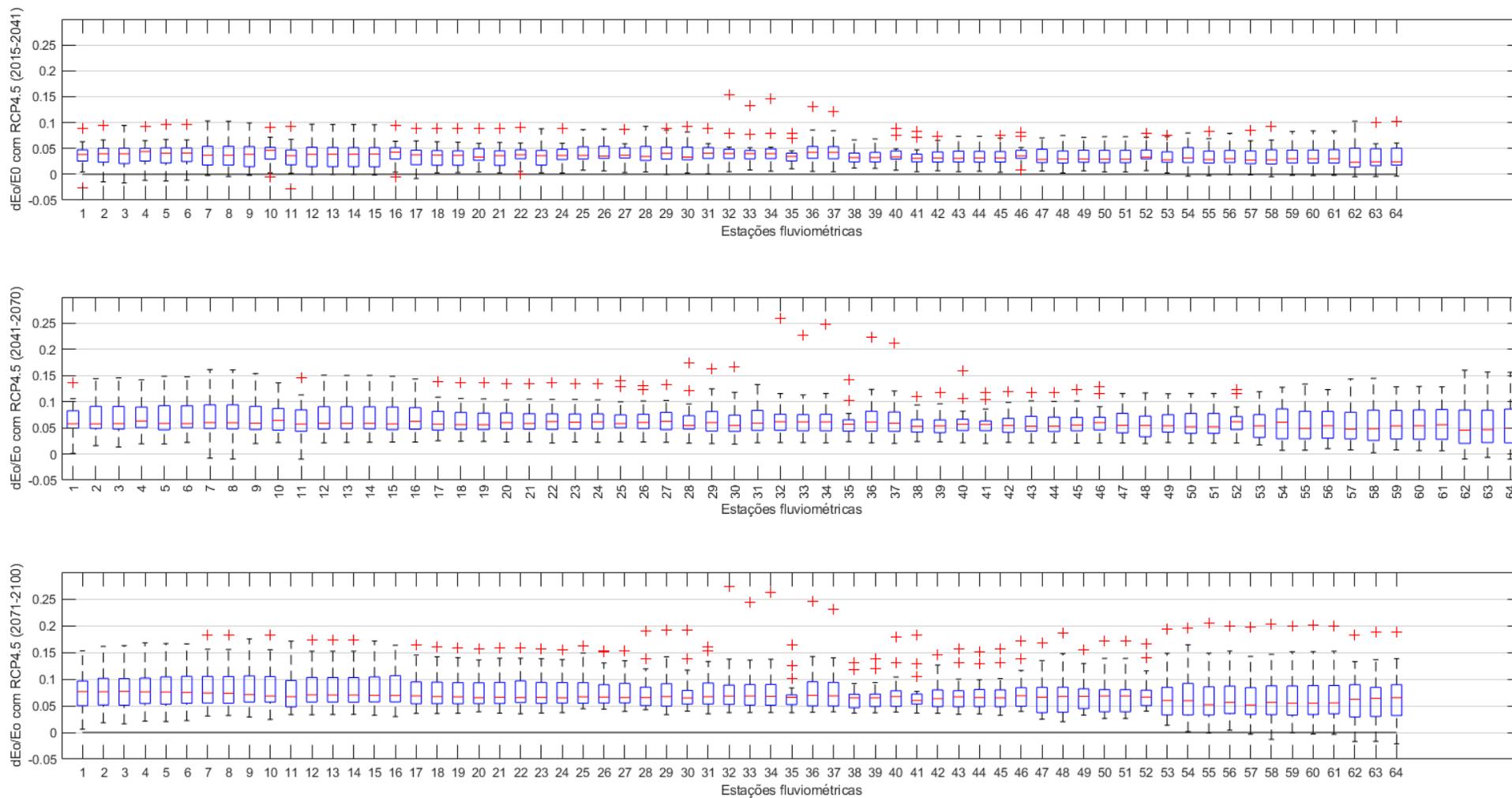
ANEXO D - Variação da precipitação (dP/P) por modelo climático global para o cenário RCP8.5



ANEXO E - Variação da evapotranspiração potencial (dP/P) por estação fluviométrica para cenário RCP8.5



ANEXO F - Variação da evapotranspiração potencial (dE_0/E_0) por estação fluviométrica para cenário RCP4.5



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (Brasil). (2016). Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: Avaliações e Diretrizes para Adaptação. Brasília, DF. 93 p. v. 1. ISBN 978-85-8210-033-2. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>. Acesso em : 10 maio 2021.
- Amorim, R.S., Souza, S.A. De & Reis, D.S. (2017). Autocorrelation and Multiple Testing Procedures in Trend Detection Analysis: The case study of Hydrologic Extremes in Sao Francisco River Basin, Brazil.
- Arora, V.K. (2002). “The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff” In : *Journal of Hydrology*, 265 (1): 164–177.
- Donohue, R.J., Roderick, M.L. & Mcvicar, T.R. (2007). On the importance of including vegetation dynamics in Budyko’s hydrological model. In : *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 11.
- Dorneles, G. *et al.* (2017). Sensibilidade das vazões médias de longo período em relação ao clima: um exame baseado em modelagem hidrológica e modelos do tipo Budyko. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, Brasil.
- Dorneles, Gabriela. (2021). Atribuição das mudanças na vazão média de longo período devido às atividades humanas e alterações no clima. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. Brasília.
- Camargo, A. P.; Camargo, M. B. P. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. In : *Bragantia*, Campinas, v.59, n.2, p.125-137.
- Cheng, L. ; Zongxue, X. ; Dingbao, W. ; Ximing, C. (2011). “Assessing interannual variability of evapotranspiration at the catchment scale using satellite-based evapotranspiration data sets.” In : *Water Resources Research*, 47 (9) : 1–11.
- Choudhury, B. J. (1999) “Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model” In : *Journal of Hydrology*, 216, 99 – 110.
- Coutinho, L. M. (2006). “O conceito de bioma.” In: *Acta Botânica Brasilica*, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 13-23.
- Fernandez, R. & Sayama, T. (2015). Comparison of future runoff projections using Budyko framework and global hydrologic model: conceptual simplicity vs process complexity. In : *Hydrological Research Letters*, 9(4), pp.75–83.

- Fu, G., Charles, S.P., Chiew, F.H.S. (2007). “A Two-Parameter Climate Elasticity of Streamflow Index to Assess Climate Change Effects on Annual Streamflow.” In : *Water Resources Research*, 43(11), pp.1–12.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. (1985). “Reference crop evapotranspiration from temperature.” In: *Appl. Eng. Agric.*, 1(2), 96-99.
- Holanda, F. S. R. *et al.* (2001). «Impacto ambiental promovido pela erosão na margem direita do Baixo São Francisco, no estado de Sergipe». In: *Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia (GO)*.
- Huang, Y. *et al.* (2018). Contributions of climate change and anthropogenic activities to runoff change in the Hongshui River, Southwest China. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191, p.012143.
- Larcher, W. (1980). “Physiological plant ecology.” Springer-Verlag, Berlin. 303 p.
- Larcher, W. (2006). “Ecofisiologia vegetal.” In: *RiMa*, São Carlos. 525-550.
- Lespinas, F. (2008). “Impacts du changement climatique sur l’hydrologie des fleuves”.
Dissertação (Doutorado) – Universidade de Perpignan.
- Li, D. *et al.* (2013). Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework. In : *Water Resources Research*, 49(2). pp 969-976.
- Li, S. *et al.* (2016). Attributing runoff changes to climate variability and human activities: uncertainty analysis using four monthly water balance models. In : *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(1), pp.251–269.
- Li, Y. *et al.* (2016). Reduced runoff due to anthropogenic intervention in the Loess Plateau, China. *Water (Switzerland)*, 8(10), pp.1–16.
- Li, Z. *et al.* (2017). Spatiotemporal variation in the attribution of streamflow changes in a catchment on China’s Loess Plateau. pp.1–8.
- Liu, J. *et al.* (2017). Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China. In: *Journal of Hydrology*, 545, pp.145–162.
- Liu, X., Peng, D. & Xu, Z. (2013). Identification of the Impacts of Climate Changes and Human Activities on Runoff in the Jinsha River Basin, China Xiaowan. In: *Hydrology Research*, 44(5), p.940.
- Lopes, Z. F. (2014). Detecção de Mudança Hidroclimática na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco. v. 1, p. 1–171

- Martins, E.S.P.R. (2011). Adapting water resources planning and operation to climate variability and climate change in selected river basins in northeast Brazil. In : *Desk Review : Climatic and Hydrologic Components, World Bank Report*.
- Ning, T. *et al.*, 2018. Comparison of the effectiveness of four Budyko-based methods in attributing long-term changes in actual evapotranspiration. In *Scientific Reports*, 8(1), pp.1–10.
- Otsuki, R.G. (2015). Estimativa de séries anuais de evapotranspiração real e vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico com base nas hipóteses de Budyko. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. Brasília.
- Pereira, S.B. & Silva, D.D., 2007. Study of the hydrological behavior of São Francisco River and its main tributaries / Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes.
- Porporato, A.; Daly, E.; Rodriguez-Iturbe, I. (2004) “Soil water balance and ecosystem response to climate change” In: *The American Naturalist*, 164, 625-632.
- Reis, D.S. *et al.* (2013). Budyko’s Framework and Climate Elasticity Concept in the Estimation of Climate Change Impacts on the Long-Term Mean Annual Streamflow. In : *World Environmental and Water Resources Congress 2013 : Showcasing the Future*. pp.1110–1120.
- Roderick, M. L. & Farquhar, G. D. (2011). A simple framework for relation variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. In : *Water Resources Research*, v. 47.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R.M. & Limbrunner, J.F., 2001. Climate elasticity of streamflow in the United States. In : *Water Resources Research*, 37(6), pp.1771–1781.
- Silva, J. R. I. *et al.* (2017). Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. In: *Scientia Plena*, v. 13, n. 10.
- Sobral, M. *et al.* (2018). Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos no submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. In: *REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA*. Fortaleza.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M. (2014). Climate change 2013 : The physical science basis. In : *Cambridge University Press Cambridge, UK*.
- Wang, C. *et al.* (2016). Advances in hydrological modelling with the Budyko framework: A review. In : *Progress in Physical Geography*, v. 40, n. 3, p. 409–430.

- Wu, J., Miao, C., Wang, Y., *et al.* (2017a). Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. In : *Journal of Hydrology*, 545, pp.263–275.
- Wu, J., Miao, C., Wang, Y., *et al.* (2017b). Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. In : *Journal of Hydrology*, 545, pp.263–275.
- Yang, H.; Yang D.; Zhidong, L.; Fubao, S. (2008) “New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation.” In : *Water Resources Research*, 44 (3) : 1–9.
- Yang, H. ; Yang, D. (2011). Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. In : *Water Resources Research*, v. 47, n. 7.
- Zhang, L.; Dawes, W.R.; Walker, G. R.; (2001) “Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale” In: *Water Resources Research*, 37 (3), 701-708.
- Zhang, L. *et al.* (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. In : *Water Resources Research*, v. 40.
- Zhang, L. *et al.* (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. In : *Journal of Hydrology*, 360(1–4), pp.117–131.
- Zhang, Y. *et al.* (2011). Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in northeast China. In : *Journal of Hydrology*, 410(3–4).