

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

Larissa Silva Melo

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
SÃO FRANCISCO ENTRE 1985 E 2019: ANÁLISE DE TENDÊNCIAS E RELAÇÕES
COM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ANTRÓPICAS**

Belo Horizonte
2022

Larissa Silva Melo

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
SÃO FRANCISCO ENTRE 1985 E 2019: ANÁLISE DE TENDÊNCIAS E RELAÇÕES
COM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ANTRÓPICAS**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Wilson dos Santos Fernandes

Coorientador: Veber Afonso Figueiredo Costa

Belo Horizonte
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

**["AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE VAZÕES NO RIO SÃO FRANCISCO ENTRE 1985 E 2019: ANÁLISE DE
TENDÊNCIAS E RELAÇÕES COM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ANTROPOGÊNICAS"]**

LARISSA SILVA MELO

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Wilson dos Santos Fernandes

Prof. Veber Afonso Figueiredo Costa

Prof. Priscilla Macedo Moura

Prof. Luiz Rafael Palmier

Prof. Dirceu Silveira Reis Junior

Prof. Carlos Rogério de Mello

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Wilson dos Santos Fernandes

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 16 de setembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Rogério de Mello, Usuário Externo**, em 17/09/2022, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Veber Afonso Figueiredo Costa, Professor do Magistério Superior**, em 17/11/2022, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Professora do Magistério Superior**, em 17/11/2022, às 18:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilson dos Santos Fernandes, Professor do Magistério Superior**, em 18/11/2022, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Rafael Palmier, Membro**, em 05/12/2022, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dirceu Silveira Reis Junior, Usuário Externo**, em 07/12/2022, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1761842** e o código CRC **1F2F0128**.

M528a

Melo, Larissa Silva.

Avaliação das alterações de vazões na bacia hidrográfica do rio São Francisco entre 1985 e 2019 [recurso eletrônico]: análise de tendências e relações com variáveis climáticas e antrópicas/ Larissa Silva Melo. – 2022.

1 recurso online (214 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Wilson dos Santos Fernandes.

Coorientador: Veber Afonso Figueiredo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexo: f. 215-225.

Bibliografia: f. 194-214.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Gestão de recursos hídricos – Qualidade – Teses. 3. Mudanças climáticas – Teses. 4. Atividade antrópica - Teses. I. Fernandes, Wilson dos Santos. II. Figueiredo, Veber Afonso. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, proteção, pelas oportunidades concedidas durante minha vida, e força para concluir mais essa etapa.

Aos meus familiares, que sempre me incentivaram na busca do conhecimento e acreditaram na minha capacidade.

Ao meu namorado e amigo, Filipe Assis, por todo companheirismo, auxílio, paciência, carinho e confiança dedicados ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson Fernandes, e coorientador, Prof. Dr. Veber Costa, pela paciência, dedicação, incentivo, sabedoria, pelos ensinamentos e auxílio que foram essenciais para a execução deste trabalho.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pela oportunidade e ao corpo docente pelos valiosos ensinamentos.

À banca examinadora, pela disponibilidade em participar deste momento e pelas contribuições.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, estiveram e estão próximos de mim, contribuindo, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os efeitos das intervenções antrópicas e das mudanças climáticas na hidrologia das bacias hidrográficas têm sido, ao longo dos anos, amplamente discutidos. Estudos de vazões são de grande importância para o conhecimento da disponibilidade hídrica de uma região. De fato, compreender o efeito combinado das variáveis climáticas, do uso da água e cobertura do solo é essencial para o desenvolvimento de planos sustentáveis de recursos hídricos. Com base nesse enfoque, se propõe, com o presente trabalho, estudar o comportamento espaço-temporal das vazões médias anuais na bacia do rio São Francisco (BHSF), a fim de identificar possíveis tendências nas séries e associar esse comportamento às variáveis climáticas e antrópicas. A bacia em questão foi escolhida pelo fato de possuir grande variabilidade da precipitação e diversidade de cobertura e uso do solo, com regiões de intensa atividade agrícola e/ou densamente florestadas. Primeiramente, foi avaliado o comportamento da vazão média anual em três regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco. Posteriormente, foram analisados os comportamentos das variáveis climáticas (precipitação, temperatura, evapotranspiração média anual) e antrópicas (usos da água, agricultura e vegetação natural) em três trechos da bacia. Para analisar o comportamento dessas variáveis foram utilizados três testes estatísticos (Mann-Kendall, Pettitt, Levene). Além dos testes de hipóteses, também foi utilizada análise espectral wavelet nas variáveis climáticas. Por fim, para a quantificação e compreensão do efeito combinado das variáveis climáticas e antrópicas na variabilidade das vazões foi utilizada a equação Budyko do tipo Fu, juntamente com o método de decomposição. Os resultados da análise das vazões apontaram indícios de redução em todos os trechos analisados, porém nos dados de precipitação média anual não foi possível constatar um padrão de mudanças. Nos dados de temperatura e evapotranspiração foi observada uma mudança de comportamento com aumento em todas as regiões. Quanto às atividades antrópicas foi possível identificar uma redução da vegetação natural, aumento nas áreas de agricultura e aumento do consumo de água em todos os trechos da bacia. Portanto, percebe-se que a precipitação analisada não parece ter influência importante nas alterações dessa vazão, e as possíveis mudanças encontradas nas vazões podem estar relacionadas à temperatura, evapotranspiração, agricultura, vegetação natural e consumo da água. Os resultados obtidos a partir da aplicação do método de decomposição mostram que a mudança climática é o fator determinante para a redução da vazão no Alto São Francisco, já no Médio e Baixo São Francisco, as atividades antrópicas se destacam.

Palavras-chave: Modelo bayesiano hierárquico. Budyko. Gestão de recursos hídricos. Mudanças climáticas. Atividades antrópicas.

ABSTRACT

The effects of human interventions and climate change on the hydrology of watersheds have been widely discussed over the years. Flow studies are of great importance for the knowledge of water availability in a region. Indeed, understanding the combined effect of climate variables, water use and land cover is essential for the development of sustainable water resource plans. Based on this approach, the present work proposes to study the spatio-temporal behavior of the average annual flows in the São Francisco River basin (BHSF), in order to identify possible trends in the series and associate this behavior with climatic and anthropic variables. The basin in question was chosen because of the great variability of precipitation and diversity of land cover and use, with regions of intense agricultural activity and/or densely forested. First, the behavior of the average annual flow in three physiographic regions of the São Francisco River basin was evaluated. Subsequently, the behavior of climatic variables (rainfall, temperature, annual average evapotranspiration) and anthropic variables (water use, agriculture and natural vegetation) in three parts of the basin were analyzed. To analyze the behavior of these variables, three statistical tests were used (Mann-Kendall, Pettitt, Levene). In addition to hypothesis testing, wavelet spectral analysis was also used for climatic variables. Finally, to quantify and understand the combined effect of climatic and anthropic variables on the variability of flows, the Fu-type Budyko equation was used, together with the decomposition method. The results of the flow analysis showed signs of reduction in all the analyzed sections, however in the data of average annual precipitation it was not possible to verify a pattern of changes. In the temperature and evapotranspiration data, a change in behavior was observed with an increase in all regions. As for human activities, it was possible to identify a reduction in natural vegetation, an increase in agricultural areas and an increase in water consumption in all parts of the basin. Therefore, it can be seen that the analyzed precipitation does not seem to have an important influence on the changes in this flow, and the possible changes found in the flows may be related to temperature, evapotranspiration, agriculture, natural vegetation and water consumption. The results obtained from the application of the decomposition method show that climate change is the determining factor for the reduction of flow in the Upper São Francisco, in the Middle and Lower São Francisco human activities stand out.

Keywords: Hierarchical Bayesian Model. Budyko-type equation. Water resources management. Climate change. Human activities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Síntese das mudanças observadas no clima e em outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul	35
Figura 3.2 – Alteração da precipitação anual nas décadas de 1901 a 2010 e de 1951 a 2010	37
Figura 3.3 – Impacto da urbanização no ciclo hidrológico.....	41
Figura 3.4 – Evolução da retirada de água no Brasil (1931-2030)	45
Figura 3.5 – Curva Budyko (BUDYKO, 1974, modificado).....	55
Figura 3.6 – Direções na curva Budyko (Adaptado de JIANG et al., 2015).....	61
Figura 3.7 - Método de decomposição (Adaptado de JIANG et al., 2015)	62
Figura 4.1 – Bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	67
Figura 4.2 – Clima da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Adaptado de Köppen, 1948)	70
Figura 4.3 – Precipitação média anual (1977-2006) na bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	73
Figura 4.4 – Tipos de Solo da bacia hidrográfica do rio São Francisco	76
Figura 4.5 – Biomas localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	79
Figura 4.6 – Uso e cobertura do Solo na bacia hidrográfica do rio São Francisco....	82
Figura 4.7 – Área irrigada da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	84
Figura 4.8 – Distribuição das principais UHE na calha do rio São Francisco	86
Figura 4.9 – Província estrutural da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	89
Figura 4.10 – Rochas encontradas na bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	90
Figura 4.11 – Unidades hidro estratigráficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	91
Figura 4.12 – Divisão da bacia hidrográfica do rio São Francisco conforme a localização dos reservatórios	95
Figura 4.13 – Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	97
Figura 4.14 - Grade de Xavier (2016) na região hidrográfica do São Francisco	101
Figura 4.15 - Localização estações meteorológicas utilizadas na bacia hidrográfica do rio São Francisco	103
Figura 5.1 – Comportamento da vazão média anual nos trechos analisados da Bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	120

Figura 5.2 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Alto da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	122
Figura 5.3 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Médio da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	122
Figura 5.4 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Baixo da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	123
Figura 5.5 – Comportamento da precipitação nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco	125
Figura 5.6 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	126
Figura 5.7 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	126
Figura 5.8 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	126
Figura 5.9 – Comportamento da evapotranspiração potencial nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco	128
Figura 5.10 - Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco	130
Figura 5.11 – Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco	130
Figura 5.12 – Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco	131
Figura 5.13 – Comportamento da temperatura nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	132
Figura 5.14 - Potência espectral da temperatura média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	134
Figura 5.15 – Potência espectral da temperatura média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	134
Figura 5.16 – Potência espectral da temperatura média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	135

Figura 5.17 – Evolução da Agricultura nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco	136
Figura 5.18 – Evolução da Vegetação nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco	138
Figura 5.19– Consumo de água na bacia hidrográfica do rio São Francisco	141
Figura 5.20 – Matriz de correlação das variáveis selecionadas (Q - Vazão, P - Precipitação, Eto - Evapotranspiração, T - Temperatura, C - Consumo de Água, V - Vegetação, A - Agricultura)	148
Figura 5.21 - Resultados das simulações obtidas com as equações Budyko de Fu e Turc-Pike, considerando as variáveis P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação)	150
Figura 5.22 - Resultados das simulações obtidas com as equações Budyko de Wang-Tang e Zhang, considerando as variáveis P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação).....	151
Figura 5.23 - Parâmetros de regressão.....	159
Figura 5.24 - Variação do parâmetro “w” estimado nos trechos da bacia	160
Figura 5.25 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Alto São Francisco.....	162
Figura 5.26 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Médio São Francisco	163
Figura 5.27 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Baixo São Francisco.....	163
Figura 5.28 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Alto São Francisco.....	164
Figura 5.29 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Médio São Francisco.....	165
Figura 5.30 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Baixo São Francisco.....	165
Figura 5.31 – Decomposição da variabilidade das vazões no Alto São Francisco..	166
Figura 5.32 - Decomposição da variabilidade das vazões no Médio São Francisco	168
Figura 5.33 - Decomposição da variabilidade das vazões no Baixo São Francisco	168

Figura 5.34 – Decomposição da contribuição climática no trecho Alto São Francisco	169
Figura 5.35 – Decomposição da contribuição climática no trecho Médio São Francisco.....	169
Figura 5.36 – Decomposição da contribuição climática no trecho Baixo São Francisco.....	170
Figura 5.37 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Alto São Francisco	171
Figura 5.38 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Médio São Francisco.....	172
Figura 5.39 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Baixo São Francisco	172
Figura 5.40 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Alto São Francisco.....	176
Figura 5.41 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Médio São Francisco.....	176
Figura 5.42 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Baixo São Francisco.....	177
Figura 5.43 - Decomposição da variabilidade das vazões no Alto São Francisco ..	178
Figura 5.44 - Decomposição da variabilidade das vazões no Médio São Francisco	178
Figura 5.45 - Decomposição da variabilidade das vazões no Baixo São Francisco	179
Figura 5.46 – Decomposição da contribuição climática no trecho Alto São Francisco	180
Figura 5.47 – Decomposição da contribuição climática no trecho Médio São Francisco.....	180
Figura 5.48 - Decomposição da contribuição climática no trecho Baixo São Francisco	181
Figura 5.49 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Alto São Francisco	182
Figura 5.50 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Médio São Francisco.....	182

Figura 5.51 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Baixo São Francisco	183
Figura 6.1 - Espaços tempo-frequência de duas wavelets $\psi_{u,s}$ e $\psi_{u0,s0}$	223

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Variações das equações tipo Budyko.....	57
Tabela 4.1 – Características da bacia do rio São Francisco	68
Tabela 4.2 – Usos do solo, por região fisiográfica, em porcentagem (2010)	80
Tabela 4.3 – Principais usinas hidrelétricas na calha do rio São Francisco	86
Tabela 4.4 - Síntese das características físicas na bacia do rio São Francisco	93
Tabela 4.5 – Estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco consideradas no trabalho	98
Tabela 5.1 – Estatísticas descritivas da vazão média anual para as três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	120
Tabela 5.2 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) para os trechos analisados de vazão média anual da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	121
Tabela 5.3 – Estatísticas descritivas da precipitação média anual para as regiões fisiográficas (Alto São Francisco, Médio São Francisco, e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do Rio São Francisco	124
Tabela 5.4 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) de precipitação média anual, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	125
Tabela 5.5 - Estatísticas descritivas da evapotranspiração nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	127
Tabela 5.6 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da evapotranspiração, para os três trechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco	129
Tabela 5.7 - Estatísticas descritivas da temperatura média anual nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	132
Tabela 5.8 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da temperatura média anual, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	133
Tabela 5.9 - Estatísticas descritivas da Agricultura nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	136
Tabela 5.10 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da Agricultura, para os três trechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco	137

Tabela 5.11 - Estatísticas descritivas da Vegetação Natural nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	137
Tabela 5.12 - Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da Vegetação Natural, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco	139
Tabela 5.13 – Estatísticas descritivas do uso da água nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	141
Tabela 5.14 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) do consumo de água nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco	142
Tabela 5.15 – Resultados das estatísticas modelo Fu	153
Tabela 5.16 – Resultados das estatísticas modelo Wang Tang.....	154
Tabela 5.17 – Resultados das estatísticas modelo Zhang	155
Tabela 5.18 – Resultados das estatísticas modelo Turc-Pike	156
Tabela 5.19 – Períodos de comparação do método de decomposição.....	161
Tabela 5.20 – Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Alto São Francisco	173
Tabela 5.21 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Médio São Francisco	174
Tabela 5.22 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Baixo São Francisco	174
Tabela 5.23 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Alto São Francisco	184
Tabela 5.24 – Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Médio São Francisco	184
Tabela 5.25 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Baixo São Francisco	185

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Φ - Índice de aridez

Σ - somatório

α - Nível de significância do teste estatístico

τ - coeficiente de correlação de Kendall

μ - Média

σ_x^2 - Variância

$\hat{x}(\omega)$ - Transformada de Fourier

ψ - Função de *wavelet*

ΔS - Variação do armazenamento de água

B_k - Curva do tipo Budyko

β - Parâmetro de regressão

E - Evapotranspiração real

E_t - Evapotranspiração no tempo t

E_p - Evapotranspiração potencial

ET_o - Evapotranspiração de referência

ET_{pc} - Evapotranspiração potencial da cultura

ET_{rc} - Evapotranspiração real da cultura

F - distribuição cumulativa dos dados

F_N - Função de distribuição da amostra

H - fluxo de calor sensível

H_o - Hipótese nula

H_1 - Hipótese alternativa

K_s - Coeficiente de umidade do solo

$L_e E$ - fluxo de calor latente

N - Tamanho da série temporal

P - Precipitação média anual

P_t - Precipitação média no tempo t

Q_t - Escoamento Superficial no tempo t

R_n - radiação líquida incidente na superfície terrestre

s - Parâmetro de Escala

S - Estatística do teste Mann Kendall

SF - Rio São Francisco

T - Tempo

UFs - Unidades da Federação

u - Parâmetro de posição

U_T - Estatística do teste de Pettitt

w - Parâmetro de características de captação

X_i - Variável de ordem i

ω_0 - Frequência *wavelet*

AESA-PB - Agência Executiva de Gestão das Águas do Governo da Paraíba

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APAC-PE - Agência Pernambucana de Águas e Clima

ASF - Trecho Alto São Francisco

BHSF - Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

BSF - Trecho Baixo São Francisco

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CNAE - Classificação Nacional de Atividades Econômicas

CODEVASF - Companhia Desenvolvimento Vale São Francisco

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

EDA - Exploratory Data Analysis

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN

FDP - Função de Distribuição de Probabilidade Conjunta

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

FUNCEME-CE - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GBHM - Modelo Hidrológico Baseado em Geomorfologia

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

IDW - Inverse Distance Weighted

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MSF - Trecho Médio São Francisco

MK - Mann Kendall

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PBHSF - Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PIA - Pesquisa Industrial Anual

RAIS - Relatório Anual de Informações Sociais

SMSF - Trecho Submédio da bacia do Rio São Francisco

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UTES - Usinas Termelétricas

SEMARH-AL - Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas

TSM - Temperatura de Superfície do Mar

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

VIC - Variable Infiltration Capacity

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS	28
2.1	Objetivo geral	28
2.2	Objetivos específicos	28
3	REVISÃO DA LITERATURA	29
3.1	Variabilidade de características hidroclimatológicas	29
3.2	Mudanças climáticas	31
3.3	Atividades antrópicas	39
3.4	Quantificação dos impactos nas vazões	46
3.4.1	<i>Framework</i> Budyko	53
3.4.2	Método de Decomposição	60
4	MATERIAL E MÉTODOS	66
4.1	Caracterização da bacia de estudo	66
4.1.1	Aspectos gerais	66
4.1.2	Clima	68
4.1.3	Precipitação	71
4.1.4	Vazão	74
4.1.5	Pedologia	74
4.1.6	Cobertura vegetal	77
4.1.7	Uso e ocupação do solo	80
4.1.8	Usos múltiplos da água	83
4.1.9	Geologia	86
4.2	Metodologia	95
4.2.1	Dados hidrológicos	96
4.2.1.1	Vazão	96
4.2.1.2	Precipitação	99
4.2.1.3	Evapotranspiração de Referência (ET _o)	102
4.2.1.4	Temperatura	102
4.2.2	Evolução do uso e ocupação do solo	104
4.2.3	Evolução dos usos da água	105
4.2.3.1	Abastecimento humano	106
4.2.3.2	Abastecimento animal	107
4.2.3.3	Indústria de Transformação	108
4.2.3.4	Mineração	108
4.2.3.5	Termoeletricidade	109

4.2.3.6	Agricultura irrigada	110
4.2.4	Análises das séries temporais	112
4.2.5	Método Budyko.....	115
4.2.6	Quantificação da variabilidade das vazões	117
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
5.1	Comportamento das vazões	119
5.2	Comportamento da precipitação	124
5.3	Comportamento da evapotranspiração	127
5.4	Comportamento da temperatura	131
5.5	Evolução do uso e cobertura do solo	135
5.5.1	Agricultura	135
5.5.2	Vegetação natural	137
5.6	Evolução do uso da água.....	140
5.7	Modelo Budyko	146
5.8	Quantificação dos fatores climáticos e antrópicos	161
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	189
	REFERÊNCIAS	194
	ANEXO.....	215

1 INTRODUÇÃO

As alterações no ciclo hidrológico constituem um dos tópicos mais discutidos atualmente pela comunidade científica. O ciclo hidrológico é um processo físico complexo, que é influenciado em suas características pelo clima local, assim como pelas atividades humanas nas bacias hidrográficas (ZHENMEI *et al.*, 2008; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019). As alterações no ciclo hidrológico decorrem de variação nas entradas e saídas de seus componentes como, por exemplo, precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, e das mudanças nos padrões de variação dos processos hidroclimatológicos, sendo esse o ponto de interesse do trabalho.

Entre os diferentes componentes do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, a vazão é considerada a resultante mais importante para o gerenciamento de recursos hídricos e sua variabilidade afeta consideravelmente o padrão de uso da água em diferentes setores, como agricultura, abastecimento humano, indústria, geração de energia hidrelétrica e navegação (TUCCI & MENDES, 2006; DEY & MISHRA, 2017).

As séries temporais de vazão são resultados da integração dos componentes do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, das influências naturais e antrópicas em uma determinada região (HUANG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2019; SHAHID *et al.*, 2020). Essas séries têm fundamental importância, servindo como subsídio para a tomada de decisões em relação à racionalização do uso da água e à preservação desse recurso. Por meio das séries históricas de vazões é possível analisar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, permitindo, assim, avaliar a disponibilidade hídrica e detectar mudanças no regime hidrológico em longos períodos que, por sua vez, fornecem elementos indispensáveis ao processo de gestão dos recursos hídricos associados aos usos múltiplos da água (ANDRADE & RIBEIRO, 2020). Para um gerenciamento adequado dos potenciais hídricos disponíveis no mundo, é fundamental conhecer a hidrologia das bacias, considerando-se padrões de variabilidades temporal e espacial.

As vazões possuem expressivo potencial de mudança de comportamento ao longo do tempo e podem apresentar tendências de aumento ou redução, provocando

impactos generalizados sobre os demais recursos naturais (GASHAW *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; TORABI *et al.*, 2020). A variação da vazão depende dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, os quais possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e longitudinal. O fluxo vertical está relacionado à precipitação, evaporação, umidade e fluxo no solo, enquanto o longitudinal está ligado aos processos de escoamento superficial, dos rios e do subsolo (TUCCI, 2002).

Muitos fatores são relatados entre as possíveis causas da variabilidade das vazões, podendo ser citadas as modificações creditadas às intervenções antrópicas sobre os sistemas hídricos, por meio da alteração da superfície da bacia e uso da água, e os efeitos relacionados às mudanças climáticas, associados à variabilidade da precipitação, temperatura e evapotranspiração (AMIN *et al.*, 2017; ARMAL *et al.*, 2018; BOONWICHAI *et al.*, 2019; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019; SHAHID *et al.*, 2020).

Dentre as alterações da superfície podem-se mencionar a mudança da cobertura do solo e a mudança no uso do solo. A mudança da cobertura do solo está relacionada à mudança dos materiais biofísicos que cobrem a sua superfície, já a mudança de uso do solo relaciona-se com a mudança dos usos que os seres humanos fazem da mesma, como a urbanização, reflorestamento para exploração, e desmatamento ligado à extração de madeira, cultura anual e cultura perene. A redução da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo (urbanização) reduzem a capacidade de infiltração da água no solo. Em contrapartida, o aumento da cobertura vegetal aumenta a infiltração de água no solo, visto que, com a diminuição da velocidade de escoamento, a água permanece por maior tempo na superfície do solo, fazendo com que a mesma se infiltre (BLÖSCHL *et al.*, 2015). Essas atividades comprometem a capacidade de armazenamento de água pelo solo e têm impactos sobre o escoamento, afetando diretamente a disponibilidade de água superficial e subterrânea (DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018).

Fatores como o acelerado crescimento populacional, a expansão das áreas agricultáveis irrigáveis, o desenvolvimento econômico e a diversificação das

atividades antrópicas resultam em um aumento da demanda pelos recursos hídricos superficiais e subterrâneos em seus usos múltiplos, o que afeta diretamente a sua disponibilidade e o comportamento das vazões (SOBRAL *et al.*, 2018; ANA, 2019; LACERDA, 2020; SANTOS *et al.*, 2020). Devido ao crescimento da demanda, podem surgir conflitos entre os usos da água, principalmente no uso consuntivo, como abastecimento humano, abastecimento animal, indústria de transformação, mineração, termoelectricidade e irrigação.

As mudanças no clima, por sua vez, alteram o regime de chuvas, provocando mudança na frequência de ocorrência e/ou intensidade de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca, falhas no abastecimento de água, geração de energia, erosão, deterioração da qualidade das águas e diversidade dos ecossistemas, afetando a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para os diversos usos múltiplos (ZHANG *et al.*, 2019).

As mudanças no comportamento das vazões têm sido um grande desafio para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (AHN & MERWADE, 2014). Em resposta a esse desafio, uma das tarefas dos pesquisadores é identificar os diferentes papéis das mudanças climáticas e atividades antrópicas na alteração do comportamento das vazões (JIANG *et al.*, 2015). Além de estudar os fatores que impactam o ciclo hidrológico, resultando em mudanças nos padrões de variabilidade das vazões, é importante quantificar os impactos causados pelas mudanças climáticas e atividades antrópicas, e avaliar o efeito combinado dessas variáveis. A quantificação da contribuição desses fatores no escoamento é importante para entender a resposta do escoamento sob ambiente em mudança, necessária para o desenvolvimento de medidas adaptativas às mudanças climáticas, e útil para um gerenciamento adequado dos recursos hídricos.

Nesse contexto, para entender como as mudanças climáticas e as atividades humanas contribuem para a variabilidade nas vazões, o *framework* Budyko vem ganhando destaque em diversos estudos em todo o mundo, pois é um método de fácil aplicação, e que permite estudar como o balanço hídrico responde às mudanças climáticas e às interferências antrópicas (TIAN *et al.*, 2018; XU *et al.*,

2019; ZHANG *et al.*, 2019). A estrutura do *framework* Budyko é uma equação de equilíbrio de água e energia, em que a evapotranspiração média anual de uma bacia hidrográfica é estimada pela chuva e pela radiação líquida (BUDYKO, 1974). O método de Budyko, utilizado juntamente com o método de decomposição proposto por Roderick & Farquhar (2011), tem sido empregado como fundamento teórico de muitos estudos, os quais têm como propósitos quantificar a variabilidade das vazões associada às mudanças climáticas e às atividades antrópicas, e entender as características climáticas da bacia e sua relação com o equilíbrio do balanço hídrico de longo termo (JINGJING *et al.*, 2017; LEE & KIM, 2017; LI *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2018; TIAN *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019; ABERA *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; ZHONG *et al.*, 2020; YEH & TSAO, 2020).

Com base nesse enfoque, se propõe, com o presente trabalho, estudar o comportamento espaço-temporal das vazões médias anuais na bacia do rio São Francisco (BHSF), a fim de identificar possíveis tendências nas séries e associar esse comportamento às variáveis climáticas (precipitação, temperatura) e variáveis antrópicas (uso da água, agricultura e vegetação natural). A BHSF é a terceira maior do Brasil, e sua importância para o país não é relacionada apenas ao volume de água transportado em uma região semiárida, mas também pelo potencial hídrico passível de aproveitamento e por sua contribuição histórica e econômica para a região. A bacia está situada em sete unidades da federação, sendo um importante meio de ligação entre as Regiões Sudeste e Nordeste. Devido à sua grande extensão territorial, a BHSF apresenta uma diversidade de cobertura e uso do solo, com regiões de intensa atividade agrícola e/ou densamente florestadas. Além disso, a expansão da urbanização e da industrialização, desmatamento, queimadas e atividades como a mineração, agricultura, pecuária e a pesca tem resultado em grande impacto ambiental, interferindo na quantidade e qualidade da água para a região. Outro fator que possui grande variabilidade na bacia é a distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica, pois grande parte da bacia está inserida na região semiárida do Nordeste Brasileiro. Distinguir e analisar essas variações espaço-temporais das vazões médias anuais dentro da bacia é tarefa importante para identificar e explicar os possíveis comportamentos das séries históricas de

vazão, e podem ser úteis para avaliar políticas de gerenciamento de recursos hídricos.

Dessa forma, no presente trabalho propõe-se quantificar a variabilidade das vazões devido às variáveis climáticas e antrópicas. A explicação da mudança do comportamento das vazões diante desses fatores possibilitará avaliar qual fator tem uma maior influência na variabilidade das vazões, fornecendo, então, uma ferramenta para política de gestão socioambiental. Embora existam muitos estudos que quantificam o efeito do clima e das atividades antrópicas na vazão, a maioria deles não decompõem os efeitos das mudanças nas vazões em parcelas antrópicas e climáticas. Às vezes é necessário descobrir quanto da vazão é afetada pelas atividades humanas e pelos efeitos climáticos. Tais informações podem permitir o desenvolvimento de estratégias de mitigação, dependendo se o clima ou os seres humanos estão afetando principalmente as mudanças no escoamento. O desenvolvimento deste estudo, que tenciona quantificar e decompor o impacto da alteração climática e das atividades antrópicas na vazão baseados no *framework* Budyko caracteriza assim um primeiro passo para que novos trabalhos dessa natureza sejam realizados.

Além disso, a ideia desta pesquisa é ajudar os tomadores de decisão a projetar os planos de adaptação e mitigação de maneira mais eficaz com as informações de disponibilidade de água e sua variabilidade devido às mudanças climáticas e atividades humanas. Essas incorrem em enormes despesas para o desenvolvimento de novas infraestruturas nos países subdesenvolvidos. O aumento dos riscos relacionados à água, como inundações, secas ou alterações das características espaciais e temporais das chuvas, pode aumentar ainda mais o estresse e continuará independentemente das estratégias de mitigação adotadas. Para um progresso social sustentável, os gestores de recursos hídricos precisam oferecer infraestrutura e serviços aprimorados, mais resilientes às mudanças nos padrões climáticos e às atividades humanas (DEY & MISHRA, 2017).

Nesse sentido, o trabalho tem como hipóteses:

- As alterações das vazões podem estar associadas às mudanças climáticas;
- Os diferentes usos da água e do solo interferem na variabilidade das vazões;
- É possível quantificar, em alguma medida, as parcelas da alteração das vazões associadas às mudanças climáticas e às diferentes atividades antrópicas; e
- A variação do armazenamento de água no interior da bacia durante longo prazo pode ser considerada nula.

O texto está organizado em sete capítulos, que podem se apresentar subdivididos em tópicos, itens e subitens. Sua estrutura se mostra conforme segue:

- Capítulo 1 – Introdução: contextualiza o problema objeto da presente pesquisa e apresenta as abordagens metodológicas a serem empregadas;
- Capítulo 2 – Objetivos: apresenta os objetivos geral e específicos da pesquisa;
- Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica: explica os principais fatores (mudanças climáticas e atividades antrópicas) que interferem na variabilidade das vazões e aborda a importância de quantificar essa variabilidade;
- Capítulo 4 – Material e Métodos: descreve a área de estudo, as informações dos dados e o desenvolvimento da metodologia empregada;
- Capítulo 5 – São apresentados os resultados obtidos com a pesquisa e as discussões com outros trabalhos já realizados;
- Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações: são apresentadas as conclusões do trabalho e, a partir da experiência obtida são recomendadas algumas abordagens para desenvolvimentos em trabalhos futuros; e
- Capítulo 7 – Referências bibliográficas

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar a alteração espaço-temporal das vazões médias anuais na bacia hidrográfica do rio São Francisco e associar tal comportamento às variáveis climáticas e antrópicas.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o comportamento da vazão, precipitação temperatura e evapotranspiração real em termos espaciais e temporais por meio de testes de hipóteses, e, por meio de análise espectral via Wavelets, para séries em escala anual;
- Avaliar a evolução temporal do uso e cobertura do solo e consumo de água na bacia, utilizando testes de hipóteses, para séries em escala anual;
- Associar o padrão de variabilidade de vazões àquele das variáveis climáticas e antrópicas por meio do framework Budyko e método de decomposição; e
- Decompor os efeitos das mudanças nas vazões em parcelas antrópicas e climáticas pelo método de decomposição.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais tópicos relacionados ao presente estudo. A revisão de literatura no presente trabalho foi dividida em quatro partes. Inicialmente, é abordada a variabilidade de características hidroclimatológicas. Posteriormente, a segunda parte da revisão é voltada a explicar como as mudanças climáticas interferem nas alterações das vazões; a terceira etapa está relacionada aos diferentes usos do solo e da água e sua relação com as vazões; e, por fim, a quarta etapa é voltada à quantificação das alterações das vazões relacionadas aos fatores climáticos e antrópicos.

3.1 Variabilidade de características hidroclimatológicas

O comportamento das variáveis hidrológicas e a possibilidade da existência da não estacionariedade em processos hidrológicos são temas de grande discussão na comunidade científica e vêm gerando grandes debates (SERINALDI & KILSBY, 2015a; SERINALDI *et al.*, 2018).

Um processo estocástico $X(t)$ é dito estacionário se sua distribuição de probabilidade é invariante no tempo para qualquer n e qualquer τ , isso é:

$$F(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}) = F(X_{t_1+\tau}, X_{t_2+\tau}, \dots, X_{t_n+\tau}), \forall n, t_1, t_2, \dots, t_n, \tau \quad (3.1)$$

em que $F(.)$ denota a função acumulada de probabilidade (FAP) conjunta. Dado que $F(.)$ não muda com uma defasagem temporal τ , segue-se que as medidas descritivas populacionais de um processo estocástico estacionário não mudam no tempo (KOUTSOYIANNIS & MONTANARI, 2015). O processo estacionário, como foi introduzido nos trabalhos de Kolmogorov (1931) e Khintchine (1934), sofre mudanças, mas suas medidas descritivas populacionais são conservadas no tempo. Já a não estacionariedade implica necessariamente que algumas medidas descritivas populacionais contemplam uma função determinística do tempo (KOUTSOYIANNIS, 2014).

Segundo Koutsoyiannis (2014):

“A estacionariedade é um conceito que se aplica a processos estocásticos e a suposição de não estacionariedade precisa ser apoiada por uma descrição determinística das medidas descritivas populacionais do processo ao longo do tempo. Qualquer mudança determinística das medidas descritivas populacionais do processo é sobreposta a um componente aleatório que é necessariamente estacionário. Nomeadamente, qualquer processo aleatório, estacionário ou não, inclui necessariamente um componente estacionário e, portanto, qualquer previsão futura precisa, em última análise, deve basear-se na suposição de estacionariedade dessa parte aleatória”.

De acordo com Naghettini & Pinto (2007), em um contexto hidrológico, os comportamentos não estacionários podem ser divididos em tendências, saltos e ciclos. As tendências estão relacionadas às alterações graduais que ocorrem na bacia, como, por exemplo, um processo de urbanização crescente. Nos casos mais comuns trabalha-se com tendência linear, exponencial ou quadrática. Os saltos em uma série associam-se a alterações bruscas, tais como a construção de uma barragem ou alteração repentina do uso do solo. Os ciclos, por sua vez, são caracterizados pelas oscilações nas séries, de maneira periódica, e podem estar relacionados a flutuações climáticas de longo período, sendo de difícil detecção. Essas mudanças podem afetar algumas características estatísticas das séries como média, mediana, variância e autocorrelação, entre outras.

A identificação de mudanças nos processos hidrológicos é o primeiro passo na investigação para avaliar se tais alterações estão relacionadas a fatores climáticos ou interferências antrópicas. Para identificar possíveis tendências em séries de dados de vazão podem ser feitas análises a partir de testes estatísticos. A escolha do teste estatístico a ser utilizado depende do tipo de mudanças de interesse ao estudo (tendências monotônicas, mudanças abruptas, periodicidade), do conhecimento ou desconhecimento da localização do ponto de mudança e das suposições sobre a sua dependência temporal (COULIBALY & BALDWIN, 2005).

Dessa forma, diferentes tipos de testes podem ser aplicados para a análise estatística de mudanças nas séries de dados hidrológicos, dentre eles: Mann-

Kendall, Kendall Sazonal e Spearman Rho, muito utilizados para a identificação de mudanças graduais nas séries; e teste de Pettitt, Wilcoxon e CUSUM, utilizados para a identificação de mudanças abruptas. Além dos testes estatísticos, também pode ser utilizada a análise espectral *wavelet*, para identificar a presença de oscilações e ciclos nas séries de dados.

Portanto, devido à importância das vazões para a gestão de recursos hídricos, há um grande interesse na comunidade científica em entender seu comportamento e os possíveis fatores que podem influenciar em sua variabilidade natural, como as mudanças climáticas e as atividades antrópicas (TORABI *et al.*, 2020; SHAHID *et al.*, 2020).

Na sequência, apresenta-se uma descrição dos principais fatores (mudanças climáticas e atividades antrópicas) que interferem na variabilidade de vazões, e como quantificar essa variabilidade a fim de identificar qual fator tem uma maior contribuição em seu comportamento.

3.2 Mudanças climáticas

Um dos assuntos mais discutidos nos últimos anos e que vem despertando um crescente interesse no público e na comunidade científica são as mudanças climáticas, como elas ocorrem e quais são as causas (BATES *et al.*, 2008; DEY & MISHRA, 2017; JINGJING *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2018; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019). O termo “mudança climática” refere-se, sucintamente, a um conjunto de alterações nos padrões do clima – precipitação, ventos, tempestades – que ocorrem ao longo do tempo em uma região ou em todo o planeta. De acordo com o quinto relatório (AR5) do IPCC, mudança climática é definida como:

“As alterações climáticas referem-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada (por meio de testes estatísticos, por exemplo) por mudanças na média e/ou na variação das suas propriedades e que persistem durante um longo período de tempo. A mudança climática pode ocorrer tanto por meio de processos internos naturais ou forças externas, como modulações dos ciclos solares, erupções

vulcânicas e as mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra.”

Segundo TORRES (2014):

“O sistema climático consiste de cinco componentes principais que interagem entre si: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera, e a biosfera. Este sistema modifica-se com o tempo pela influência de sua própria dinâmica interna e por causa de forçantes externas naturais e antropogênicas (MOSS et al., 2010). Nesse sentido, o termo “mudança climática” refere-se a uma variação no estado do clima de uma região ou do planeta como um todo, decorrente de uma perturbação no sistema climático. Uma mudança climática pode ser identificada como alterações no valor médio do clima e/ou na variabilidade de seus elementos (e.g., precipitação, temperatura, vento, etc.), e que persiste por um período longo, tipicamente acima de várias décadas. As mudanças climáticas podem ser atribuídas tanto à variabilidade interna natural do sistema climático quanto à forçantes externas atuando sob este sistema (IPCC, 2007; HEGERL et al., 2007)”.

Na década de 1950, foi feito o primeiro alerta de que algumas atividades humanas poderiam ter influência no aquecimento global (HARTMANN et al., 2013). Posteriormente, foi levantada a possibilidade do aumento da temperatura devido a emissões de dióxido de carbono (CO₂), o que estaria comprometendo, de forma sem precedente, o meio ambiente.

Segundo Félix et al. (2020), o efeito estufa destaca-se como principal fenômeno responsável pelas mudanças climáticas. Chaves et al. (2017) evidenciam que os principais gases na qual corroboram para o efeito estufa são o dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso, oriundos, na grande maioria, em razão de atividades antrópicas, com destaque para as industriais e agrícolas (CARVALHO, 2016).

Erroneamente, essa discussão é atrelada as crescentes as emissões de gases causadores do efeito estufa por ações antrópicas em que há, principalmente, queima de combustíveis fósseis. Possivelmente isso pode ter ocorrido devido ao fato de esses gases serem intensivamente pesquisados e estudados, particularmente em

trabalhos de paleoclimatologia (HIGGINS *et al.*, 2015; DAVIS, 2017; CUI *et al.*, 2020; KOUTSOYIANNIS *et al.*, 2020). Porém, alguns estudos (KOUTSOYIANNIS *et al.*, 2009; KOUTSOYIANNIS, 2020; KOUTSOYIANNIS, 2021; POYET, 2021) apontam que os gases do efeito estufa, como o CO₂, não tem um papel tão importante na alteração do clima como a água. Koutsoyiannis (2021) ainda ressalta que a associação do CO₂ às alterações do clima pode ter ocorrido, pois a concentração dele é mais fácil de estudar, já que sua mudança no tempo é mais suave quando comparada à do vapor d'água, e, além disso, o CO₂ pode ser detectado no gelo, em sedimentos e em complexos estomáticos.

Essas modificações podem ser oriundas de dois tipos de interferências, sejam elas naturais ou antrópicas, e por sua vez, ocasionam efeitos em diversos aspectos dos sistemas geofísicos, naturais e humanos. Por sua vez, em decorrência dos impactos oriundos das mudanças climáticas, iniciaram-se na década de 1980, discussões em nível internacional em busca de soluções que combatessem as agravantes desse problema (NUNES & SANTOS, 2019; FÉLIX *et al.*, 2020; AMBRIZZI, 2021).

Devido a isso, com o intuito de avaliar, interpretar e reunir todas as informações relevantes dos diversos estudos a respeito das mudanças climáticas que estavam sendo desenvolvidos na época foi criado, em 1988, o Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC, *International Panel on Climate Change*) pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP). Desde a sua criação, o IPCC já divulgou cinco grandes relatórios: o primeiro em 1990 (FAR, *First Assessment Report*), o segundo em 1995 (SAR, *Second Assessment Report*), o terceiro em 2001 (TAR, *Third Assessment Report*), o quarto em 2007 (AR4, *Fourth Assessment Report*) e o último em 2014 (AR5, *Fifth Assessment Report*). Desde o primeiro relatório, foram apresentadas evidências científicas das mudanças climáticas, com significativo aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE), resultando em um aumento médio da temperatura global (IPCC, 1995).

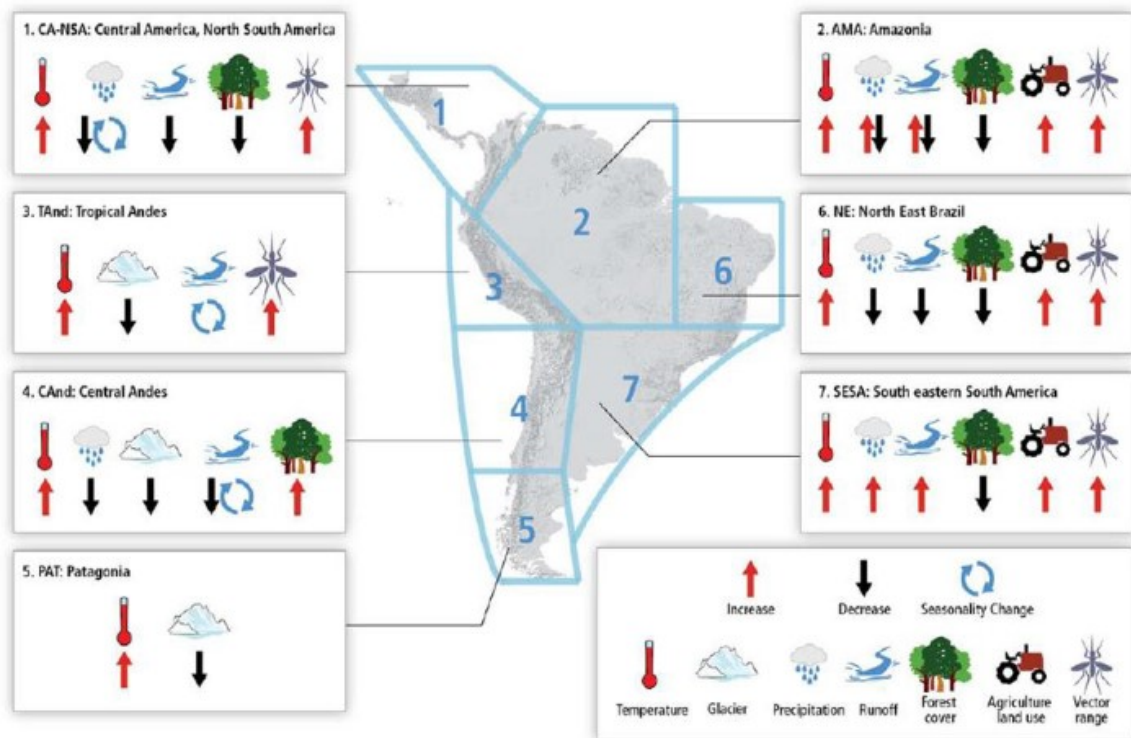
Dados apontam que, desde 1850, a temperatura de superfície média da Terra tem aumentado, sendo que um aquecimento 0,85°C foi registrado durante o período

1880-2012 (IPCC, 2014). Estudos similares sugerem que mais da metade dos aumentos observados na temperatura média da superfície global de 1951-2010 tenha sido causada pelo aumento nas concentrações de gases de efeito de estufa, juntamente com outras interferências antrópicas (IPCC, 2014).

De acordo com o AR5 (IPCC, 2014), muitas mudanças foram observadas no clima desde a década de 1950, podendo-se citar a elevação das temperaturas da atmosfera e dos oceanos, a redução nas quantidades de neve e gelo, e o aumento do nível do mar e das concentrações de gases de efeito estufa. A Figura 3.1 apresenta um resumo dessas mudanças em algumas regiões da América Central e do Sul. Verifica-se que em todas as regiões a tendência de aumento das temperaturas é unânime, enquanto outros fatores são variáveis conforme a região. No Nordeste do Brasil, a tendência para as precipitações e vazões nos cursos hídricos é de diminuição, enquanto na região Sul, é indicado um aumento da precipitação e das vazões.

Nunes & Santos (2019) destacam que as mudanças climáticas podem variar de acordo com cada região. Observa-se, portanto, que, enquanto algumas cidades sofrem por questões de excesso, como alagamentos no Sul e no Sudeste do Brasil, outras sofrem por condições de escassez, como a seca na região Nordeste e em algumas partes da região Norte.

Figura 3.1 – Síntese das mudanças observadas no clima e em outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul



Fonte: ANA, 2016a

Diferente do que foi afirmado pelo IPCC, Koutsoyiannis *et al.* (2009), Koutsoyiannis (2021) e Poyet (2021) acreditam que as mudanças climáticas observadas fazem parte da variabilidade natural do clima, que depende, principalmente, da atividade solar (ciclos e manchas solares), do vulcanismo e de mecanismos atmosféricos com flutuação de alta frequência (El Niño e La Niña) ou de baixa frequência (20 a 30 anos), como é o caso, por exemplo, da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (MANTUA *et al.*, 1997), entre outros.

Molion (2007) acrescenta que a variabilidade natural do clima não permite afirmar que o aquecimento seja decorrente da intensificação do efeito estufa causada pelas atividades humanas ou mesmo que essa tendência de aquecimento persistirá nas próximas décadas, como sugerem as projeções produzidas pelo IPCC. O mesmo afirma, ainda, que a aparente consistência entre os registros históricos e as previsões dos modelos não significa que o aquecimento esteja ocorrendo; na realidade, para ele, as características desses registros históricos conflitariam com a hipótese do efeito estufa intensificado o planeta se aqueceu mais rapidamente entre

1925-1946, quando a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera era inferior a 10% da atual e se resfriou entre 1947-1976, quando ocorreu o desenvolvimento econômico acelerado após a Segunda Guerra Mundial.

Já Koutsoyiannis (2020) analisou se o ciclo hidrológico intensificou por causa do aquecimento global. O autor observou que, nos dados de precipitação e evapotranspiração houve mudanças, porém as mudanças ocorreram como flutuações plurianuais, não como tendências consistentes. Koutsoyiannis (2020) ressalta que não há dúvida de que em certas áreas e em épocas específicas há intensificação ou desintensificação do ciclo hidrológico. No entanto, à medida que a escala espacial e o período de observação aumentam, o risco de uma falsa alegação de intensificação diminui. Por fim, o autor afirma que, mesmo que houvesse uma intensificação climática em percentuais como 1% ou 5%, esse valor é muito baixo quando comparado com as projeções realizadas pelo IPCC. Os dados reais sobre impactos de desastres climáticos sugerem queda desde o início do século XX.

Um dos principais efeitos das mudanças e variabilidade do clima se faz sentir nos escoamentos gerados nas bacias hidrográficas (SILVEIRA *et al.*, 2016). As mudanças climáticas podem influenciar direta e indiretamente o ciclo da água, o volume do escoamento superficial e sua distribuição espacial em todo o mundo (DEY & MISHRA, 2017). O ciclo hidrológico está diretamente vinculado às mudanças de temperatura da atmosfera, dos oceanos e ao balanço de radiação. Entretanto, as mudanças climáticas podem acelerar ou atenuar os processos associados ao comportamento natural da hidroclimatologia terrestre (CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019).

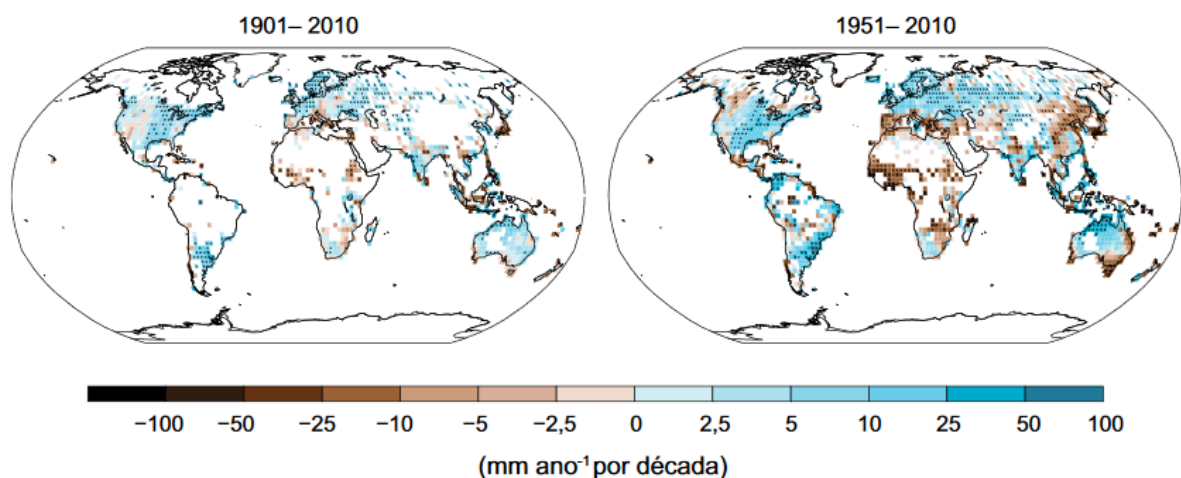
Com o aquecimento da atmosfera, espera-se que ocorram mudanças nos padrões da precipitação (aumento ou diminuição na frequência, intensidade e/ou quantidade de precipitação), o que poderá afetar a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios (BATES *et al.*, 2008; IPCC, 2014; IPCC, 2016; DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019). Alterações nas precipitações podem comprometer a disponibilidade hídrica, aumentando a

ocorrência de eventos de cheias e estiagens (ANA, 2016; DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018).

Além da precipitação, a evapotranspiração real também é influenciada pelo aumento da temperatura da atmosfera. A evapotranspiração real é a principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, exercendo uma grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo que esse componente está estreitamente relacionado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial. A geração de escoamento superficial depende do processo de evapotranspiração, que, por sua vez, é um processo básico de transformação da energia solar na superfície terrestre (BUDYKO, 1974). O aumento da temperatura induz uma maior evapotranspiração real, reduzindo a quantidade da água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente, interferindo no processo de escoamento (NOBRE *et al.*, 2017).

As alterações no ciclo hidrológico não são uniformes, sendo que, em algumas regiões do globo terrestre, foram observados aumentos da frequência e intensidade de precipitação, enquanto em outras regiões houve diminuições (IPCC, 2016) (Figura 3.2). Porém, com o passar dos anos, espera-se que haja mais áreas com aumento da precipitação do que com reduções, sendo que os maiores volumes de precipitação são encontrados nas áreas de latitude média e nas regiões tropicais úmidas (POLADE *et al.*, 2014).

Figura 3.2 – Alteração da precipitação anual nas décadas de 1901 a 2010 e de 1951 a 2010



Fonte: IPCC (2014)

Apesar de a precipitação ser um dos processos responsáveis pelo comportamento das vazões, não se pode afirmar que toda alteração na precipitação será refletida nas vazões. De acordo com Wasko & Sharma (2017), essa seria uma situação válida somente se toda a precipitação fosse convertida em escoamento. Porém, as inúmeras abstrações que existem no volume de água precipitado em decorrência da infiltração no solo, armazenamento em depressões, evapotranspiração, etc., fazem com que não exista uma relação linear entre o volume de água precipitado e aquele escoado. Além disso, a temperatura média do ar mais elevada pode também resultar em menor umidade do solo (decorrente das maiores taxas de evapotranspiração), logo maior capacidade de armazenamento de água no mesmo e menor escoamento (HIRSCH & RYBERG, 2012). Esses são alguns exemplos de fatores que podem levar a uma condição de relação negativa entre tendências nos valores de precipitação e de vazão observados em uma determinada bacia hidrográfica.

Portanto, se a mudança climática tem papel preponderante sobre o comportamento das vazões, é essencial estudar o impacto do clima sobre os recursos hídricos visando o melhor planejamento e gestão dos mesmos (BAO *et al.*, 2012). Porém, quando se fala em mudanças climáticas, a maioria dos estudos tem abrangência global. As pesquisas relacionadas às mudanças em âmbito regional são muito escassas. Isso se deve ao fato de que as séries hidrológicas possuem amostras curtas e não há disponibilidade de uma grande quantidade de dados hidrológicos que permitam um estudo detalhado, prejudicando os resultados das análises. De acordo com Schewe *et al.* (2014), mudanças climáticas constituem uma ameaça adicional à segurança hídrica da população ao redor do globo, pois a variação na precipitação e em outras variáveis climáticas pode resultar em reduções significativas da disponibilidade hídrica em muitas regiões.

Assim, neste trabalho se propõe avaliar como as mudanças climáticas que ocorrem na região da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco interferem no comportamento das vazões. Para avaliar como as mudanças climáticas interferem no comportamento das vazões, foram escolhidas como variáveis a precipitação, a evapotranspiração real e a temperatura média anual. Estudar os impactos das mudanças climáticas sobre o comportamento das vazões, em âmbito regional,

poderá contribuir para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos regional.

3.3 Atividades antrópicas

As atividades humanas exercem impactos no meio ambiente, os quais impõem riscos crescentes para os seres humanos e a natureza, com diversas implicações para a disponibilidade da água (HUANG *et al.*, 2018; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019; SHAHID *et al.*, 2020). Essas atividades podem, direta ou indiretamente, alterar o ciclo hidrológico, resultando em mudanças espaciais e temporais nos recursos hídricos regionais (GASHAW *et al.*, 2018; ANDRADE & RIBEIRO, 2020).

O crescimento populacional, as mudanças do uso e ocupação do solo, a construção de reservatórios e as retiradas de água para os diversos usos múltiplos são os principais vetores que modificam os padrões de ocorrência da oferta e da demanda hídrica (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007; ZHAO *et al.*, 2010; AHN & MERWADE, 2014; PBMC, 2016; DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018; SHAHID *et al.*, 2020). Atividades como essas interferem no comportamento das variáveis hidrológicas, pois incidem em aumento ou diminuição na quantidade de água escoada superficialmente, influenciando, sobretudo, o regime fluvial e o transporte de particulados do solo, processos de erosão e transporte de sedimentos causando alterações na qualidade da água (GASHAW *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018).

Atividades antropogênicas são complexas, e algumas levam ao aumento no escoamento, enquanto outras levam à diminuição. Geralmente, as atividades antrópicas ocorrem ao mesmo tempo, e é difícil considerar apenas uma atividade humana em particular (WANG, 2014; HUANG *et al.*, 2018).

Em geral, para grandes bacias hidrográficas, existem dois tipos de atividades humanas que afetam o escoamento. As atividades antrópicas do Tipo I, como captação/desvio e armazenamento de águas superficiais (barragem), podem afetar a vazão dentro de um curto período de implementação (GRAF, 2006; DEY & MISHRA, 2017), enquanto aquelas do Tipo II, como o desmatamento/reflorestamento e conversão de terras em agricultura, podem levar um tempo relativamente longo para

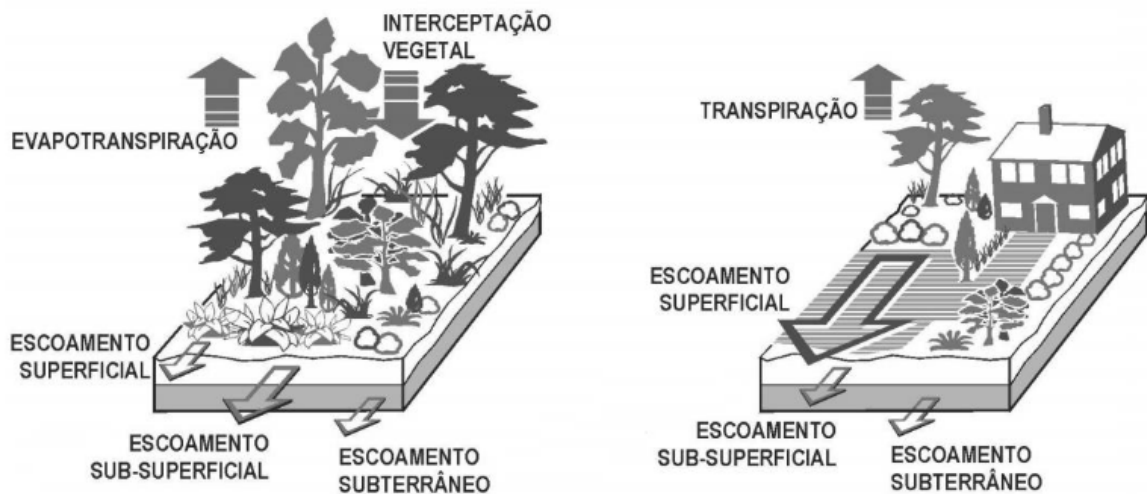
exercer influências mensuráveis na vazão dos rios (KARLEN *et al.*, 1999). Além disso, para o Tipo I, uma atividade individual (por exemplo, desvio) poderia induzir mudanças mensuráveis na vazão (OKI *et al.*, 2010); para o Tipo II, embora uma atividade individual possa ter influência desprezível, várias atividades poderiam resultar cumulativamente em mudanças mensuráveis na vazão (COE *et al.*, 2011). As interferências antrópicas do Tipo I são mensuráveis logo após a atividade e também podem ser estendidas para um período posterior, ao passo que, para a atividade humana do Tipo II, suas influências não são mensuráveis até um longo período após a ocorrência da atividade. Portanto, é muito importante entender os tipos de intervenções antrópicas que ocorreram em uma bacia hidrográfica, preferencialmente com dados históricos disponíveis que permitam quantificar as mudanças no escoamento (WANG, 2014; DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018).

As mudanças no uso da terra alteram as propriedades do solo, interceptação da precipitação, rugosidade da superfície (WANG *et al.*, 2013; DEY & MISHRA, 2017) e frequência de inundação (ALEXAKIS *et al.*, 2014; SHAHID *et al.*, 2020). Os efeitos da vegetação na cobertura e uso do solo exercem um papel de destaque no regime hidrológico, por meio das trocas solo-planta-atmosfera. A cobertura vegetal, como um dos componentes do uso do solo, pode sofrer várias modificações, naturais ou antrópicas, ao longo do tempo, e tais modificações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente, pois possuem grande influência no equilíbrio do balanço hídrico devido à complexidade de sua relação com o ciclo hidrológico (GASHAW *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018; ANDRADE & RIBEIRO, 2020).

Quanto maior for a superfície da vegetação, menor será o impacto da gota de chuva no solo e maior será a área de retenção da água durante a precipitação. Dessa forma, a vegetação aumenta a capacidade de infiltração, e interfere no volume e na velocidade do escoamento superficial (TOMER & SCHILLING, 2009; DEY & MISHRA, 2017; GASHAW *et al.*, 2018). Isso ocorre em áreas de floresta e pastagem, pois esse tipo de cobertura do solo tem maior evapotranspiração e produz menos escoamento quando comparado com áreas desmatadas e urbanizadas (GASHAW *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018).

Quando uma bacia sofre desmatamento ou é parcialmente urbanizada, têm-se menores perdas por interceptação, evapotranspiração e há uma redução da infiltração da água no solo, com maior disponibilidade de água para escoamento superficial (Figura 3.3) (SILVA *et al.*, 2018; GASHAW *et al.*, 2018; SHAHID *et al.*, 2020; ANDRADE & RIBEIRO, 2020). Como resultado desse processo, a erosão se intensifica, carreando um maior volume de sólidos às calhas fluviais, lagos e reservatórios, diminuindo as áreas de suas respectivas seções transversais, provocando, assim, transbordamentos e inundações mais frequentes (TUCCI, 2002; SILVA *et al.*, 2018).

Figura 3.3 – Impacto da urbanização no ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Schueler (1987)

A remoção da cobertura vegetal e o uso do solo para agricultura, sem práticas de conservação de água e do solo, têm contribuído para o aumento dos processos erosivos, carreando sedimentos para a calha dos rios da Bacia, alterando sua capacidade de retenção, com efeitos inevitáveis nas planícies de inundação. A cobertura vegetal é um dos parâmetros que interfere no aporte de sedimentos para os rios, e, no caso do rio São Francisco, a maior parte da área já apresenta alteração em sua cobertura natural. Por outro lado, a predominância de áreas de Caatinga e Cerrado indicam que o índice de cobertura vegetal não é muito elevado.

O uso das pastagens sem manejo adequado tem levado à sua degradação, bem como o pastoreio excessivo, tem, também, contribuído para a compactação dos

solos pelas patas dos animais alterando a capacidade de infiltração do solo facilitando o escoamento superficial. Como consequências da diminuição dos macroporos devido à compactação, observa-se e quantifica-se alterações significativas nas propriedades físicas do solo, alterando principalmente a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração da água dos mesmos. Tais fatos podem comprometer e/ou limitar a recarga dos aquíferos, por alterar o hidrograma natural, ou seja, a relação entre chuva x infiltração x escoamento, além de elevarem os riscos de erosão e assoreamento.

Para se ter uma ideia da magnitude da expansão da área ocupada com lavouras temporárias na região da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, a área total ocupada com essas lavouras, em São Desidério, município com a maior área plantada com lavouras temporárias no oeste baiano, saltou de 137.788 mil hectares, de média trienal para o período 1990-1992, para 474.735 mil hectares, para o período 2010-2012 (BUANAIN *et al.*, 2017).

Em seu trabalho, Lacerda (2020) identificou nos últimos 10 anos um aumento de, aproximadamente, 4% de áreas de pastagens e agricultura mecanizada, equivalentes a 692,10 km² da área da bacia hidrográfica do rio Carinhanha, localizada na margem esquerda do rio São Francisco. Outro aumento importante identificado, foi o número de pivôs centrais para a agricultura irrigada de grãos (café, soja e milho), além de fumo (tabaco). O expressivo aumento de, aproximadamente, 115 Km² se deu entre os anos de 2008 e 2018. Houve um aumento de aproximadamente 5% das áreas referentes às atividades antrópicas, devido a isso, o Cerrado perdeu espaço para essas atividades no decorrer dos 10 anos analisados. O autor ainda destacou que o estudo de Uso e Cobertura do Solo como diagnóstico das atividades antrópicas ao longo do tempo, vem contribuindo muito para as práticas de gestão integrada dos recursos hídricos na área de trabalho e faz-se fundamental para a sustentabilidade, não só da área da bacia, mas também do Bioma Cerrado e de outras bacias hidrográficas interdependentes, frente ao avanço do modo de uso da terra em toda área de estudo.

Sobral *et al.* (2018) ao analisar as mudanças no uso e ocupação do solo no entorno do reservatório de Sobradinho concluiu que enquanto a disponibilidade hídrica tem apresentado padrão de redução, a agricultura, que é a principal atividade econômica no Submédio São Francisco, triplicou sua área de abrangência, passando de 19.866 ha em 1985 para 57.655 ha em 2016 principalmente nas áreas a jusante do reservatório de Sobradinho.

Especificamente, o trabalho de Menke *et al.* (2009), ao analisar a rápida expansão agrícola no município de Luís Eduardo Magalhães-BA, principalmente na década de 1990, alerta para os riscos dessa expansão sobre os recursos naturais, especialmente a água, da região. Esse risco ocorre por diversas razões. Em primeiro lugar, alguns dos principais afluentes do rio São Francisco, como o rio Grande e o Urucuia, nascem nos cerrados. O principal aquífero da BHSF, o Urucuia, localiza-se no subsolo dos cerrados da região. O desmatamento provocado pela expansão da atividade agrícola interfere no processo de recarga natural desse aquífero, com impactos ainda não completamente mapeados sobre a disponibilidade hídrica da BHSF.

Outro significativo impacto sobre o meio ambiente – resultante da retirada da cobertura vegetal natural do solo para instalação de lavouras e pastagens – é o aumento de processos erosivos, com consideráveis perdas de camadas do solo e a deposição dos sedimentos retirados pela ação das chuvas e dos ventos no leito dos rios. Essa deposição de sedimentos no leito dos rios provoca, entre outros problemas, a diminuição da capacidade de navegação nos rios da bacia (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

Concomitantemente com essa expansão das áreas ocupadas por atividades agrícolas no oeste baiano, ocorre uma maior pressão sobre os recursos hídricos regionais devido à expansão da agricultura irrigada não somente nos cerrados baianos, mas também em vários outros pontos da BHSF.

As bacias hidrográficas nordestinas, principalmente aquelas situadas na porção semiárida, têm sido degradadas ao longo de décadas devido à extensiva atividade

antrópica como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e pecuária (ARAGÃO *et al.*, 2013).

Assim, a ocupação e o uso do solo das bacias hidrográficas pelos seres humanos interferem diretamente em elementos importantes do ciclo hidrológico, como infiltração, escoamento superficial e nas taxas de evapotranspiração, e, a depender da forma como se dá essa alteração da paisagem, poderá trazer consequências positivas ou negativas para a quantidade e qualidade da água disponível nas nascentes e cursos d'água, no meio rural e no meio urbano.

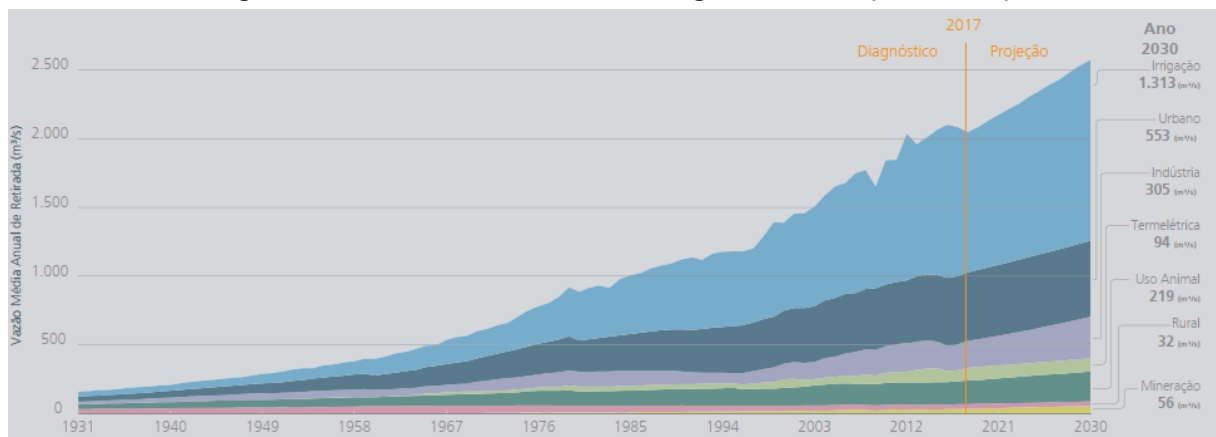
Além do uso e cobertura do solo, o uso da água também é um fator que pode gerar impactos de grande magnitude sobre o escoamento dos cursos d'água (CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019). A expansão dos centros urbanos, o aumento populacional, o desenvolvimento econômico, industrial e a ampliação da agricultura irrigada observada nas últimas décadas têm intensificado os usos dos recursos hídricos, tanto no que se refere ao aumento da quantidade demandada para determinada utilização quanto no que se refere à variedade desses usos (SALATI *et al.*, 2007; VANZELA *et al.*, 2010; MARTINS *et al.*, 2011). Entre os tipos de usos da água podem ser citados o uso consuntivo e uso não consuntivo.

Um uso é considerado consuntivo quando a água retirada é consumida, parcial ou totalmente, no processo a que se destina, não retornando diretamente ao corpo d'água. No Brasil, os principais usos consuntivos da água são o abastecimento humano (urbano e rural), o abastecimento animal, a indústria de transformação, a mineração, a termoelectricidade, a irrigação. Já os usos da água para a navegação, a pesca, o turismo e o lazer não afetam diretamente a quantidade de água local, embora dela dependam, sendo considerados usos não consuntivos (ANA, 2019).

De acordo com a ANA (2019) a cada segundo são utilizados, em média, 2.083 m³ de água no Brasil. Em 1931, eram utilizados apenas 131 m³, o que corresponde a 6,3% do uso atual. Na década de 1940, o uso preponderante da água nos municípios brasileiros era para abastecimento humano rural e abastecimento animal. Com o desenvolvimento econômico e o avanço da urbanização, a situação atual revela

maior diversidade de usos, com ampliação da importância do uso urbano e relevante expansão dos usos industrial e para a agricultura irrigada. A demanda por água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado nas últimas duas décadas. A previsão é de que ocorra um aumento de 24% na demanda até 2030 (Figura 3.4). Devido a isso, o comportamento das vazões é influenciado diretamente pela quantidade de água que é retirada para os diversos usos múltiplos (ANA, 2019). Atualmente, o setor responsável pelas maiores retiradas de água é a irrigação (52%), seguida pelo abastecimento urbano (23,8%), pela indústria de transformação (9,1%) e pelo abastecimento animal (8%).

Figura 3.4 – Evolução da retirada de água no Brasil (1931-2030)



Fonte: ANA (2019)

O aumento acelerado da demanda de recursos hídricos cria, inicialmente, o problema da escassez quantitativa do recurso, diminuindo a disponibilidade *per capita*. Concomitantemente, sua qualidade vem deteriorando, criando, assim, conflitos pelo uso da água, uma vez que a água de qualidade inferior não pode ser utilizada livremente para o consumo, para a produção ou para o lazer.

A maioria dos estudos que avaliam a interferência antrópica no comportamento das vazões analisa apenas o uso e a cobertura do solo, deixando de lado o uso da água. Essa variável possui grande importância em estudos dessa natureza, pois, a partir desses dados, é possível compreender quais usos necessitam de uma maior demanda de água, a fim de planejar estratégias que minimizem os efeitos indesejáveis dos conflitos de usos e disponibilidade hídrica (WANG, 2014; GASHAW *et al.*, 2018). Nesse sentido, para avaliar o comportamento das vazões em relação

às atividades antrópicas, serão analisados, neste trabalho, os dados de uso da água e os dados de uso e ocupação do solo na bacia.

3.4 Quantificação dos impactos nas vazões

O efeito combinado das mudanças climáticas e das atividades antrópicas causam mudanças na distribuição espaço-temporal das vazões, podendo amplificar ou atenuar a resposta do escoamento dependendo da natureza da mudança (YE *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2018). A maioria dos estudos considera apenas o efeito isolado do clima ou das atividades antrópicas, e isso pode distorcer o quadro das respostas hidrológicas, atribuindo pouca ou muita importância ao clima ou às atividades antrópicas. Quantificar o impacto combinado das mudanças climáticas e das atividades antrópicas é um grande desafio, pois o escoamento é a associação de ambos os fatores (DEY & MISHRA, 2017; HUANG *et al.*, 2018; SHAHID *et al.*, 2020).

Diante da complexidade sobre as várias formas de influência do clima e das atividades antrópicas no escoamento, é interessante compreender que os comportamentos das vazões são uma resposta integrada do mosaico apresentado em cada bacia hidrográfica e do clima regional (ZHANG *et al.*, 2018; ANDRADE *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2019), seja na distribuição irregular das chuvas, na diversidade espacial do uso e cobertura do solo, com áreas densamente urbanizadas ou florestadas, ou ainda pouco exploradas.

Destaca-se, dessa forma, a importância da realização de monitoramento sistemático em locais de referência, uma vez que atividades humanas e mudanças climáticas atuantes na escala da bacia hidrográfica podem produzir resultados similares nos elementos das séries hidrológicas observadas (HUANG *et al.*, 2018). Conseqüentemente, a obtenção de uma informação robusta, que aponte mudanças nesses locais de referência posições que, por definição, estão sujeitas à modificação antropogênica limitada seria o meio preliminar de isolar essas duas vertentes dos impactos.

Embora o efeito dos fatores climáticos sobre o escoamento seja relativamente bem compreendido e os modelos hidrológicos sejam comumente usados para quantificar

seu impacto (XU *et al.*, 2019; TORABI *et al.*, 2020), estimar o efeito da mudança regional relacionado às atividades antrópicas ainda é problemático. As atividades antrópicas podem afetar os processos hidrológicos por meio de mudanças na dinâmica de evapotranspiração, umidade do solo e disponibilidade hídrica (CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019). Porém há uma grande dificuldade na compreensão das respostas de escoamento relacionadas a essas atividades, principalmente devido à escassez de dados.

Diversos estudos (YE *et al.*, 2013; WANG, 2014; QIU *et al.*, 2016; DEY & MISHRA, 2017; AHIABLAME *et al.*, 2017; ANIL & RAMESH, 2017; HUANG *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019) demonstram que quantificar os impactos combinados das mudanças climáticas e das atividades antrópicas no escoamento é um desafio, pois o uso do solo e da água e as mudanças climáticas influenciam nos processos hidrológicos de maneira complexa.

Qiu *et al.* (2016), ao tentarem identificar os impactos causados pelas atividades antrópicas diretas e mudanças no clima sobre a bacia hidrográfica do rio Heihe, na China, destacaram que o acoplamento entre essas duas variáveis é de difícil separação, devido à complexidade dos processos individuais. Os processos condutores das mudanças observadas nas vazões são variados, incluindo alterações no clima, no uso e cobertura do solo, que interagem de maneira simultânea e dificultam a separação da influência de cada processo sobre o comportamento das vazões (SALMORAL *et al.*, 2015). Logo, a necessidade de compreender os principais mecanismos que influenciam o comportamento das vazões, seja precipitação ou uso e cobertura do solo, é fundamental para avaliar medidas a serem adotadas para minimizar o grau de vulnerabilidade hídrica de uma bacia hidrográfica.

Outro fator que deve ser levado em conta é que as mudanças do clima e no uso do solo podem se anular (YE *et al.*, 2013; DEY & MISHRA, 2017; AHIABLAME *et al.*, 2017; ANIL & RAMESH, 2017; HUANG *et al.*, 2018). Por exemplo, pode-se não detectar mudanças no escoamento quando uma bacia experimenta aumento na precipitação e expansão na agricultura.

Quantificar os impactos causados pelas mudanças climáticas e atividades humanas nas vazões é necessário para estruturar diferentes medidas de adaptação devido às mudanças climáticas nas bacias hidrográficas e para perceber o futuro padrão de uso da água e do solo para diferentes atividades humanas (WANG, 2014; HUANG *et al.*, 2018). Numerosos métodos têm sido utilizados para distinguir quantitativamente os efeitos das atividades antropogênicas e do clima na vazão. Esses métodos podem ser categorizados como abordagens experimentais, modelagem hidrológica e abordagens conceituais.

As abordagens experimentais incluem análises de tendência temporal (AHN e MERWADE, 2014; GAO *et al.*, 2016) e o método *paired catchment* (HUANG *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2012). O método de tendência temporal é utilizado para investigar a diferença de vazão durante o período de calibração e teste sob mudanças no clima e no manejo do solo (BOSCH & HEWLETT, 1982). O método *paired catchment* é uma abordagem experimental utilizada para analisar o efeito de alterações antrópicas nos processos hidrológicos, utilizando observações de longo prazo de captações naturais e modificadas existentes lado a lado. O objetivo desse método é quantificar as diferenças de escoamento sob mudanças de vegetação ou mudanças nas práticas de manejo do solo. A suposição básica do método é que a correlação do escoamento de duas bacias hidrográficas deve permanecer semelhante sob a mesma cobertura vegetal ou se a variação da cobertura ocorrer de maneira idêntica.

A modelagem hidrológica é usada para simular o fluxo em condições naturais (ZUO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; CHOKKAVARAPU & MANDLA, 2019; TORABI *et al.*, 2020). Nesse tipo de modelagem, é feita a simulação dos processos de escoamento superficial utilizando dados hidrometeorológicos para a área de estudo. A modelagem hidrológica é um método útil para entender o comportamento das diferentes variáveis e suas interações, no entanto os desempenhos dos modelos diferem devido à estrutura, requisitos de dados, e estratégias de calibração e validação. É importante que se faça uma análise de quais dados são suficientes ou necessários para diminuir as incertezas e para entender o mecanismo das mudanças hidrológicas. As incertezas

na modelagem podem surgir devido às informações incompletas usadas na simulação, nos parâmetros e nos dados de entrada do modelo. Atualmente, um número crescente de estudos tem investigado as contribuições das mudanças climáticas e das atividades antrópicas no comportamento das vazões usando modelagem hidrológica (YANG *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018).

Xu *et al.* (2014) analisaram as principais razões para a redução da vazão na bacia do rio Haihe usando o método de simulação hidrológica. Os resultados mostram que as atividades antrópicas são as principais causas da diminuição do escoamento superficial e que a influência das atividades antrópicas advém principalmente do aumento da agricultura. Xia *et al.* (2014) estudaram os efeitos das atividades antrópicas e do clima na vazão de captação do rio Yongding. Os resultados mostram que as atividades antropogênicas contribuíram para 87,4-89,5% da redução do escoamento superficial. Zhang *et al.* (2016) usaram o modelo australiano do balanço hídrico (AWBM) e a regressão multivariada para analisar os fatores determinantes da redução do escoamento na bacia do Lago Poyang. Os resultados mostraram que atividades antropogênicas e mudanças climáticas contribuíram com 73,2% e 26,8%, respectivamente, da redução do escoamento superficial do lago Poyang. Zeng *et al.* (2014) usaram o modelo SIMHYD para estudar os possíveis fatores na variação do fluxo da bacia de Zhang. Os resultados mostram que, em comparação com os fatores de atividades antropogênicas, as mudanças climáticas têm um impacto maior no escoamento superficial.

As abordagens conceituais incluem aplicações da hipótese de Budyko, juntamente com um método de decomposição e/ou sensibilidade hidrológica (TOMER & SCHILLING, 2009; WANG & HEJAZI, 2011; RODERICK & FARQUHAR, 2011; LIANG *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2013; WANG, 2014; GAO *et al.*, 2016; JIANG *et al.*, 2015; MWANGI *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2017^a; DORNELES, 2021). A estrutura de Budyko é um método de equilíbrio de água e energia, em que a evapotranspiração média anual em longo prazo em uma bacia hidrográfica é determinada pela chuva e radiação líquida (BUDYKO, 1974). A utilização do *framework* Budyko, juntamente com o método de decomposição proposto por Wang & Hejazi (2011) e o método de sensibilidade hidrológica proposto por Roderick & Farquhar (2011), permite estimar e

separar os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas nos recursos hídricos. Os estudos que utilizaram a abordagem conceitual foram realizados principalmente na China para quantificação do impacto da variabilidade climática e das atividades humanas na vazão. As descobertas revelam que na maioria dos casos (JIANG *et al.*, 2015; MWANGI *et al.*, 2016; DEY & MISHRA, 2017; LI *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017b; XU *et al.*, 2019), a diminuição da vazão devido à variabilidade climática é comparativamente menor do que a das atividades humanas.

Com o aumento do foco dos estudos nos efeitos das mudanças globais nos recursos hídricos o método Budyko ganhou destaque, devido à simplicidade de seus cálculos, à facilidade de obtenção das variáveis de entrada e à incorporação de restrições de água e energia em processos hidrológicos (JUNIOR *et al.*, 2013; SINGH & KUMAR, 2015; OTSUKI *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2016; GUDMUNDSSON *et al.*, 2016; JINGJING *et al.*, 2017; LEE & KIM, 2017; WU *et al.*, 2017b; TIAN *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2014; KIM & YU, 2019; XU *et al.*, 2019; ZHONG *et al.*, 2020; YEH & TSAO, 2020; DORNELES, 2021).

O método Budyko é utilizado para diferentes finalidades. Por exemplo, Donohue *et al.* (2011) e Roderick & Farquhar (2011) utilizaram o Budyko para avaliar a sensibilidade da descarga de rios às mudanças climáticas. Outros estudos utilizaram o *framework* Budyko para quantificar a relação entre cobertura do solo e evapotranspiração ou para separar os efeitos da mudança climática e induzida pelos seres humanos nos balanços hídricos (LI *et al.*, 2017; JINGJING *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017b; LEE & KIM, 2017; TIAN *et al.*, 2018; KIM & YU, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; ZHONG *et al.*, 2020; YEH & TSAO, 2020). Nos últimos anos, o *framework* Budyko tem sido aplicado com sucesso para relacionar a hidrologia ao clima e às características das bacias (OTSUKI *et al.*, 2015; JUNIOR *et al.*, 2013; JIANG *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; GAO *et al.*, 2016; MWANGI *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019; ZHONG *et al.*, 2020; YEH & TSAO, 2020; DORNELES, 2021).

Estudos comparativos mostraram que os métodos derivados da estrutura Budyko são eficazes em análises hidrológicas (WU *et al.*, 2017b; HUANG *et al.*, 2018; TIAN

et al., 2018; KIM & YU, 2019; XU *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019). Em seu estudo, Li *et al.* (2017) objetivaram quantificar os impactos da mudança da superfície da terra e da variabilidade climática na vazão na bacia hidrográfica do rio Jing, na China, utilizando equações tipo Budyko. Os autores concluíram que os impactos da mudança da superfície da terra na redução do escoamento, durante 1971-2010, variaram de 38% a 58%. As mudanças climáticas contribuíram com 42% a 62% na redução do escoamento. As alterações na precipitação foram responsáveis pela maior parte da alteração do escoamento induzido pela variabilidade climática. Xu *et al.* (2019) utilizaram o *framework* Budyko para quantificar as alterações das vazões em duas estações, Dongwan e Luhun, na bacia hidrográfica de Yihe na China (1960-2008). Observou-se que a mudança climática foi o principal fator que contribuiu para a diminuição da vazão. Isso ocorreu, pois houve redução na precipitação e aumento na evapotranspiração. A precipitação contribuiu em 50% da redução da vazão na estação de Dongwan e 55% para a estação de Luhun. Já a evapotranspiração representou em 24,25% de redução nas vazões para a estação Dongwan e 24,45% para a estação de Luhun.

Zhang *et al.* (2019) objetivaram decompor os impactos das atividades humanas e das mudanças climáticas nos recursos hídricos em 31 provinciais da China, no período de 2004 a 2016. Primeiro, foram avaliadas a utilidade das equações do tipo Budyko (Fu, Wang-Tang, Turc-Pike, Zhang) com um parâmetro constante “*w*” e um parâmetro variável no tempo “*w*”. Em seguida, foi estabelecido um modelo hierárquico considerando a correlação espacial de parâmetros e as interações entre covariáveis para as equações do tipo Budyko. Os autores concluíram que as atividades antrópicas diminuem os recursos hídricos na maioria das divisões provinciais na China. O sudeste da China foi à área mais influenciada e diminuiu aproximadamente 50 mm. Os impactos de as atividades humanas diminuiram gradualmente para o noroeste e foram praticamente nulas nas províncias de Qinghai (QH) e Gansu (GS). Os autores ressaltaram que as mudanças de recursos hídricos causadas pelas mudanças climáticas foram positivo para a maioria das divisões. As regiões do sudeste da China foram mais propensas a serem influenciadas pelas mudanças climáticas. Por fim, eles concluíram que as equações do tipo Budyko, usando um parâmetro variável no tempo, podem melhorar os resultados, em

comparação com as equações constantes do tipo Budyko, na maioria das regiões da China. Além disso, os quatro tipos de equações do tipo Budyko exibiram desempenhos muito semelhantes, e a equação de Wang-Tang foi um pouco melhor que as outras.

Considerando a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Dorneles (2021) em seu estudo objetivou estimar a contribuição relativa do clima e das mudanças nas características de cobertura da bacia, na variação das vazões médias anuais de longo período de 1987 a 2020. Para isso, foram aplicados diversos métodos tais como a regressão linear, o método da decomposição e a elasticidade climática (ambos baseados na hipótese de Budyko), e a modelagem hidrológica. Os resultados apresentados mostram que 60% das estações sem influência de reservatório apresentaram mudanças na vazão média anual durante o período observado, com mudanças ocorrendo principalmente na virada do século. A redução de vazão foi observada em todas as estações utilizadas no estudo, com mudanças relativas variando entre 10 a 45% referente ao período anterior a alteração. O grau de mudança e a contribuição relativa do clima e das mudanças nas características da bacia variam ao longo da região, apresentando, contudo, claro padrão espacial. Além disso, a autora concluiu em seu trabalho que nas sub-bacias localizadas no Alto São Francisco as atividades antrópicas possuem um maior peso na variabilidade das vazões, enquanto nas outras 3 sub-bacias localizadas no Médio São Francisco os fatores climáticos tem maior predominância no comportamento das vazões.

Junior *et al.* (2013) em seu estudo utilizou a hipótese de Budyko juntamente com a elasticidade climática para estimar a sensibilidade do escoamento de longo prazo devido às mudanças no clima. A metodologia foi aplicada na bacia do Alto Jaguaribe, localizada na região semiárida do estado do Ceará, nordeste do Brasil. Os resultados obtidos sugeriram que houve uma redução de 10% na precipitação resultando em uma redução de 27,3% na vazão. Além disso, houve um aumento de 10% na evapotranspiração potencial resultando em uma diminuição da 17,3% na vazão. Os autores ressaltaram que os resultados, obtidos da metodologia baseada na equação de Budyko em conjunto com a elasticidade climática, podem ser

confiáveis e úteis para identificar bacias mais sensíveis que necessitam de estudos mais detalhados e complexos.

3.4.1 *Framework* Budyko

A evapotranspiração desempenha um papel importante no balanço hídrico e surge como um dos componentes vitais do ciclo hidrológico, que fornece informações sobre a dinâmica clima-solo-vegetação. Sendo assim, o regime hidrológico de cada local é definido pelas transformações da energia e pelos fluxos da massa inserida e retirada do sistema.

O balanço hídrico é o somatório das quantidades de água que entram e saem de um determinado sistema em um dado intervalo de tempo. Considerando uma escala de longo prazo, o escoamento superficial é dado pela diferença entre precipitação e evapotranspiração. O cálculo do balanço hídrico para uma região, em um determinado ano, pode ser escrito da seguinte maneira:

$$P_t = E_t + Q_t + \Delta S \quad (3.2)$$

em que:

P_t = precipitação média em longo prazo no ano t ;

E_t = evapotranspiração real no ano t ;

Q_t = escoamento superficial, no ano t ; e

ΔS = variação do armazenamento de água. Em longo prazo, essa variação em uma região pode ser insignificante, e ΔS pode ser considerado nulo.

O balanço de energia na superfície é utilizado para descrever a quantidade de energia que está sendo trocada entre a atmosfera e a superfície terrestre. Suas componentes descrevem diversos processos de transformação da energia na superfície, sendo também um regulador do clima e dos processos atmosféricos na

escala local. A equação do balanço de energia considerando uma escala temporal de longo período pode ser determinada por:

$$R_n = L_e E + H \quad (3.3)$$

em que:

R_n = radiação líquida incidente na superfície terrestre;

$L_e E$ = fluxo de calor latente; e

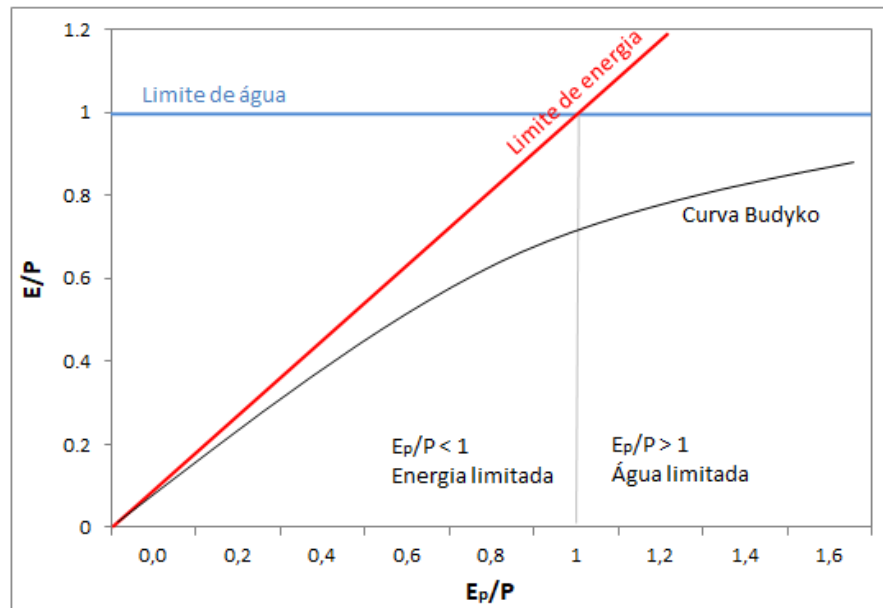
H = fluxo de calor sensível.

Em 1948, o climatologista russo Mikhail Budyko observou que o ciclo hidrológico possui relação evidente com os componentes do balanço energético, visto que a transformação da precipitação em escoamento é influenciada diretamente pela evapotranspiração, que, por sua vez, consiste em um dos processos básicos de transformação de energia solar na Terra.

Para desenvolver sua análise, Budyko (1948, 1974) identificou a relação entre as médias de longo período de precipitação (P) e vazão (Q) com as componentes do balanço de energia, partindo de duas situações extremas: condições de aridez no solo e condições de umidade abundante no solo. De acordo com Budyko (1974), o estudo da conexão entre essas duas situações contribui para explicar as fases que governam o ciclo hidrológico.

Budyko (1948, 1974) demonstrou que a razão entre a evapotranspiração real (E) e a precipitação média anual (E/P , taxa de evaporação) é controlada principalmente pela razão entre a evapotranspiração potencial média anual (E_p) e a precipitação média anual (E_p/P , ou índice de aridez = Φ), como mostra a Figura 3.5. O índice de aridez é a relação entre a disponibilidade de energia na superfície e a quantidade disponível de água, representado pela precipitação. Portanto, quanto menor o índice, mais úmida é a bacia.

Figura 3.5 – Curva Budyko (BUDYKO, 1974, modificado).



Quanto maior o índice aridez (E_p/P), menor será a disponibilidade de água, sendo esse um fator limitante. Nesse caso a evapotranspiração real (E) se aproxima muito da evapotranspiração potencial (E_p) não aumentando significativamente em relação à precipitação (P), pois a evapotranspiração real (E) é limitada pelo valor da evapotranspiração potencial (E_p). Grande parte da água recebida em forma de precipitação é retida pelas forças moleculares das partículas de solo; assim, a taxa de evapotranspiração da bacia se aproxima do total precipitado. Devido à escassez de água no solo, pouca água é convertida em escoamento superficial. Sendo assim, essa água que é retida fica na camada superficial do solo é retirada somente por meio da evapotranspiração. A evapotranspiração real é limitada pela quantidade de água disponível. Nesse caso, a bacia encontra-se em condição de aridez extrema, sendo representada da seguinte forma:

$$\lim_{\frac{E_p}{P} \rightarrow \infty} \frac{E}{P} = 1 \quad (3.4)$$

Na segunda situação analisada por Budyko (1974), quando o índice de aridez diminui (E_p/P menor que 1) o suprimento de energia é o fator limitante para a evapotranspiração. Nesse caso o valor da evapotranspiração real (E) se aproxima muito do valor da precipitação (P) não aumentando significativamente com relação a evapotranspiração potencial (E_p), em função de E estar limitada a quantidade de

água disponível (P). Dessa forma, o teor médio de umidade do solo tenderá a aumentar com o aumento das taxas de precipitação e com a diminuição da radiação líquida disponível, resultando no aumento do volume escoado. Assim, tem-se a situação de umidade abundante no solo, sendo representada da seguinte forma:

$$\lim_{\frac{E_p}{P} \rightarrow 0} \frac{E}{P} = \frac{E_p}{P} \quad (3.5)$$

Considerando a relação entre a precipitação e evapotranspiração, a equação final proposta por Budyko (1974) é:

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_p}{P} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_p}{P}\right) \right] \operatorname{tgh}\left(\frac{P}{E_p}\right) \right\}^{1/2} \quad (3.6)$$

na qual:

E = evapotranspiração real;

P = precipitação; e

E_p = evapotranspiração potencial (representa a máxima radiação líquida disponível que seria utilizada para evaporar a água).

A equação original de Budyko utiliza apenas o índice de aridez (BUDYKO, 1963; TURC, 1953; PIKE, 1964). Porém esse índice, em geral, não é suficiente para sintetizar o comportamento do fluxo natural de uma bacia hidrográfica. Desvios na curva Budyko foram detectados em vários estudos (DONOHUE et al., 2007, 2011; YANG et al., 2009; LI et al., 2013; ZHANG et al., 2016), o que indica que, além das condições climáticas, outras variáveis também podem influenciar a variabilidade dos balanços hídricos regionais, como cobertura vegetal, topografia e propriedades do solo (JIANG et al., 2015; DEY & MISHRA, 2017). Devido a isso, pesquisadores modificaram a equação de Budyko (FU, 1981; ZHANG et al., 2001; TURC, 1954; PIKE, 1964; WANG & TANG, 2014) introduzindo um parâmetro w que pode incorporar características da bacia que interferem na variabilidade da vazão.

O parâmetro “ w ” em cada equação do tipo Budyko é um expoente cujo intuito é aumentar a flexibilidade da equação, e que pode ser relacionado às variáveis explicativas das condições climáticas e atividades antrópicas. Representar o parâmetro w como uma função dessas variáveis pode melhorar o desempenho do comportamento da vazão (JIANG *et al.*, 2015). Portanto, é necessário determinar os principais fatores que afetam as variações de w , de modo a interpretar as mudanças hidrológicas induzidas pelas atividades antrópicas. Valores mais altos de w indicam que as características das bacias hidrográficas favorecem a evapotranspiração (para bacias densamente vegetadas) e valores mais baixos indicam que as características não favorecem a evapotranspiração (JIANG *et al.*, 2015; DEY & MISHRA, 2017).

Além da abordagem clássica desenvolvida por Budyko, há na literatura diversas outras equações que incorporam aos modelos o parâmetro “ w ” que representa características físicas das bacias. A Tabela 3.1 traz exemplos das equações tipo Budyko mais utilizadas.

Tabela 3.1 – Variações das equações tipo Budyko

Equações Tipo-Budyko	Expressões
Equação de Turc-Pike (1964)	$\frac{E}{P} = \left(1 + \frac{E_p}{P}\right)^{-\frac{1}{w}} \quad (3.7)$
Equação de Fu (1981)	$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_p}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_p}{P}\right)^w\right]^{1/w} \quad (3.8)$
Equação de Zhang (2001)	$\frac{E}{P} = \left(1 + w\frac{E_p}{P}\right) + \left(1 + w\frac{E_p}{P} + \frac{E_p^{-1}}{P}\right)^{-1} \quad (3.9)$
Equação de Wang-Tang (2014)	$\frac{E}{P} = \frac{\left[1 + \frac{E_p}{P} - \sqrt{\left(1 + \frac{E_p}{P}\right)^2 - 4w(2-w)\frac{E_p}{P}}\right]}{[2w(2-w)]} \quad (3.10)$

A fim de revelar como o parâmetro “ w ”, em cada equação do tipo Budyko, varia com a mudança climática e atividades antrópicas, esse parâmetro pode ser expresso como uma variável dependente de covariáveis explicativas por meio de uma função linear (JIANG *et al.*, 2015):

$$w_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1,t}^C + \dots + \beta_k X_{k,t}^C + \beta_{k+1} X_{k+1,t}^h + \dots + \beta_m X_{m,t}^h \quad (3.11)$$

em que w_t é o parâmetro da equação tipo Budyko no ano t , $X_{1,t}^C, \dots, X_{k,t}^C, X_{k+1,t}^h, \dots, X_{m,t}^h$ são “ m ” variáveis explicativas no ano t denotada pela matriz \mathbf{X} , entre os quais $X_{i,t}^C$ ($i = 1, 2, \dots, k$) que é o vetor de variáveis explicativas associadas às condições climáticas, representado pela precipitação média anual, temperatura e evaporação potencial; $X_{i+1,t}^h$ ($i = k + 1, \dots, m$) é o vetor de variáveis explicativas associadas às atividades humanas; e $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ são parâmetros de regressão, denotados pelo vetor $\boldsymbol{\beta}$. O parâmetro “ w ” nas equações do tipo Budyko relaciona-se com as variáveis explicativas das condições climáticas e atividades antrópicas.

O uso de um modelo variável no tempo fornece uma maneira de explicar não apenas a variabilidade natural do índice de aridez, mas também quaisquer possíveis alterações nas curvas de Budyko utilizadas no balanço hídrico de longo prazo, o que pode implicitamente refletir mudanças graduais nas vazões devido às mudanças climáticas e atividades antrópicas (JIANG *et al.*, 2015).

As equações do tipo Budyko são ferramentas úteis para estimar, em longo prazo, a evaporação média anual. Porém, para quantificar e decompor os impactos das mudanças climáticas e das atividades antrópicas nas vazões, a aplicação da hipótese de Budyko deve ser utilizada juntamente com um método de decomposição ou de sensibilidade, tal como proposto por Wang & Hejazi (2011), Roderick & Farquhar (2011) e Jiang *et al.* (2015).

O método de sensibilidade é calculado por meio das derivadas parciais das variáveis vazão, precipitação, evaporação potencial e do parâmetro “ w ” (RODERICK & FARQUHAR, 2011). A mudança no escoamento causada pela mudança climática é estimada pela soma das mudanças devidas tanto à precipitação quanto à evaporação potencial, enquanto a contribuição das atividades antrópicas para a mudança de escoamento é considerada como a diferença entre a mudança observada no escoamento e a mudança estimada no escoamento atribuído à mudança climática. Já no método de decomposição, ao incorporar o parâmetro “ w ” à

equação de Budyko, é feita a separação dos fatores que podem contribuir para as mudanças nas vazões, como atividades antrópicas e fatores climáticos (WANG & HEJAZI, 2011). Nesse sentido, as mudanças nos vazões causadas pelas mudanças climáticas resultariam de alterações na precipitação, evaporação e no parâmetro “ w ”. Já as mudanças nas vazões causadas pelas atividades antrópicas, por outro lado, resultariam na variação do parâmetro “ w ”. A diferença entre o método de sensibilidade e o método de decomposição é que, para calcular as mudanças na vazão, o método de sensibilidade necessita calcular as derivadas parciais da precipitação, evaporação potencial e do parâmetro “ w ”. Posteriormente, são calculadas as alterações dessas variáveis considerando um período de pré-mudança e pós-mudança. Já o método de decomposição expressa às mudanças nas vazões devidas às mudanças climáticas e atividades antrópicas, em relação à taxa de evaporação e ao índice de aridez, de forma independente, sem que haja necessidade de calcular qualquer coeficiente de sensibilidade; assim, esse método isola as contribuições relativas das mudanças climáticas e os impactos humanos diretos sobre a vazão (JIANG *et al.*, 2015).

Pesquisas recentes demonstram que esses métodos são úteis e têm sido extensivamente aplicados e explorados para avaliar as mudanças nas vazões (XU *et al.*, 2019; ABERA *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019).

Sun *et al.* (2014) usaram essa abordagem para investigar a variabilidade espacial da variação climática e das propriedades das bacias hidrográficas na diminuição da vazão da bacia do Alto Hanjiang River China, e descobriram que 60% da redução no fluxo é influenciado pela variabilidade climática. Eles também usaram dados demográficos, como densidade populacional, para explicar a variabilidade do fluxo. Jiang *et al.* (2015) utilizaram tanto a sensibilidade climática quanto a abordagem de decomposição com variabilidade no tempo do parâmetro do modelo “ w ” usando análise de covariância nas curvas de Budyko do tipo Turk-Pike, Fu, Zhang e Wang e Tang na bacia do rio Weihe, China, para o período de 1960 a 2009. Os autores concluíram que a mudança climática é o principal fator por trás da redução do fluxo da bacia hidrográfica, enquanto as atividades humanas têm menor impacto.

Os estudos que utilizaram o método de decomposição e sensibilidade hidrológica para quantificação do impacto da variabilidade climática e das atividades humanas na vazão foram realizados principalmente na China (TIAN *et al.*, 2018; KIM & YU, 2019; XU *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019). As descobertas revelam que, na maioria dos casos (LI *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2008a; LI *et al.*, 2010; JIANG *et al.*, 2011), a diminuição da vazão devido à variabilidade climática é comparativamente menor do que a das atividades humanas. Zhao *et al.* (2010) aplicaram essa abordagem em bacias hidrográficas da Austrália, Nova Zelândia e África do Sul e concluíram que ocorreu uma redução de 16 a 72% na vazão devido apenas à variabilidade climática.

3.4.2 Método de Decomposição

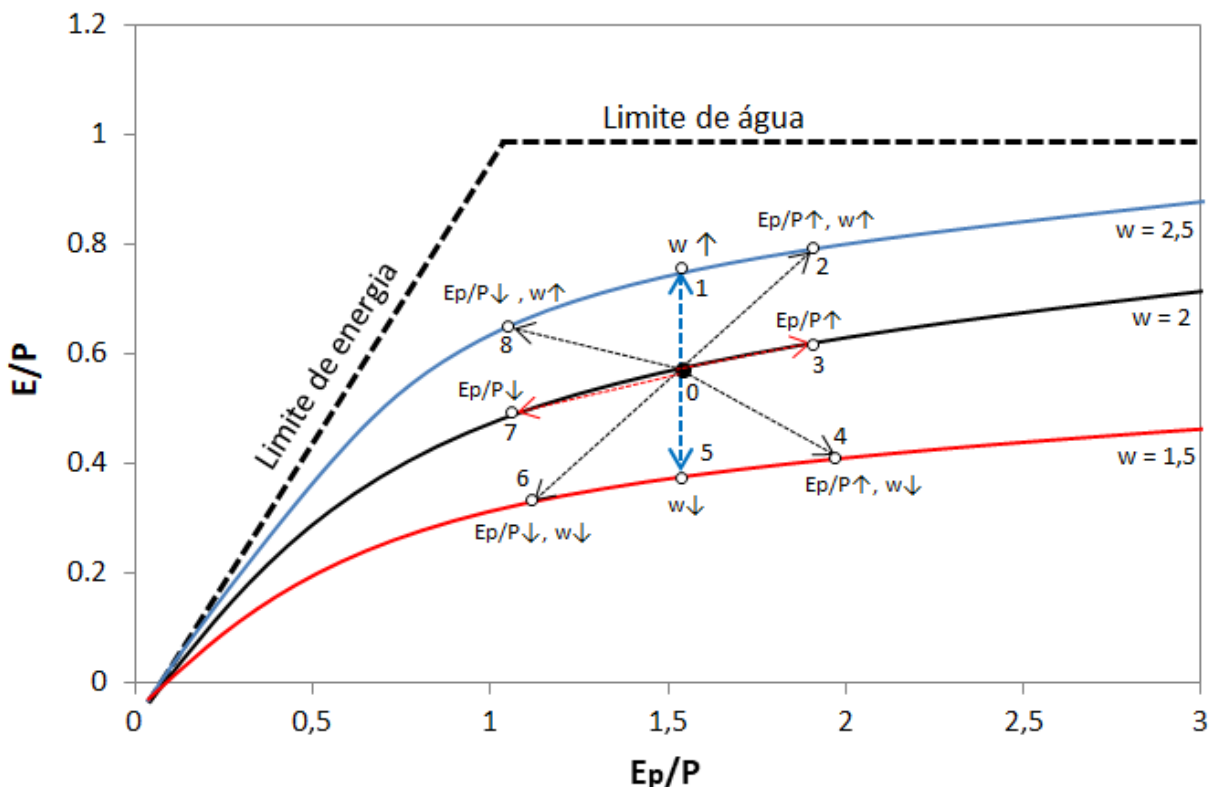
O método de decomposição expressa as mudanças nas vazões médias anuais devido às mudanças climáticas e atividades antrópicas, em relação à taxa de evaporação e ao índice de aridez (Jiang *et al.*, 2015). Ao incorporar o parâmetro “ w ” à equação de Budyko, as contribuições climáticas e antrópicas podem ser estimadas separando as influências da precipitação, evaporação e parâmetro “ w ” na estrutura Budyko. Nesse sentido, as mudanças nas vazões causadas pelas mudanças climáticas resultariam de alterações na precipitação, evaporação e parâmetro “ w ”. As mudanças nos recursos hídricos causadas pelas atividades humanas, por outro lado, resultariam na variação do parâmetro “ w ” (ZHANG *et al.*, 2019).

A hipótese original de Budyko é que as bacias hidrográficas, sem interferência humana, seguem a curva de Budyko conforme apresentado na Figura 3.5 (BUDYKO, 1974). As bacias hidrográficas em diferentes regiões climáticas ficam em diferentes pontos ao longo da curva de Budyko, dependendo dos valores do índice de aridez. Se houver mudanças climáticas atuando em uma determinada bacia, o índice de aridez (E_p/P) pode mudar para uma região mais seca ou úmida e, sendo assim, a taxa de evaporação (E/P) também mudará para uma nova posição, mas permanecerá na curva Budyko. Com a interferência antrópica em uma bacia, haverá uma variação na taxa de evaporação (E/P), causando mudança no valor do parâmetro “ w ”, dessa forma, teremos uma mudança na direção vertical e uma nova curva Budyko. Portanto, na curva Budyko, as mudanças na vazão devido à

variabilidade climática induzirão componentes verticais e horizontais, e a interação humana induzirá apenas componentes verticais (WANG & HEJAZI, 2011).

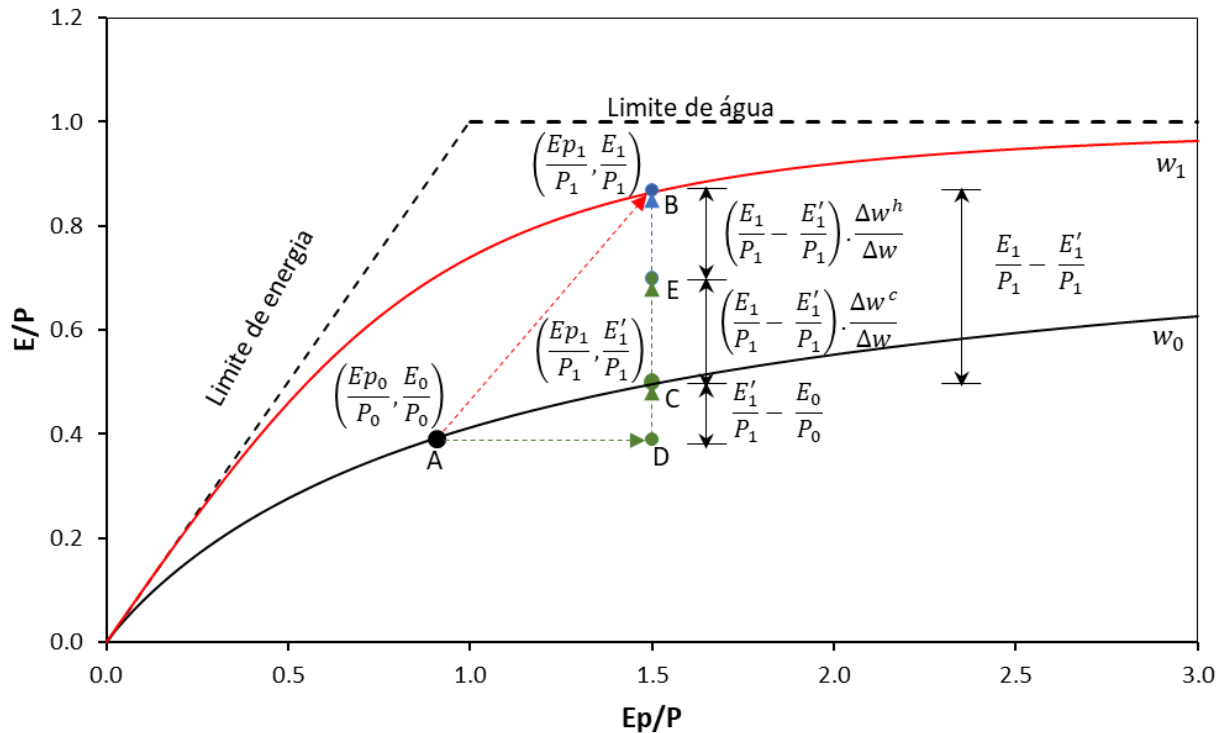
De acordo com as equações Budyko apresentadas na Tabela 3.1, a razão da taxa de evaporação (E/P) é determinada pelo índice de aridez (E_p/P) e pelo parâmetro “ w ”. Jiang *et al.* (2015) propuseram que as mudanças nas vazões devido às mudanças climáticas e atividades humanas possuem oito direções possíveis de deslocamento na curva Budyko (Figura 3.6). Os desvios verticais para a direção 1 ou 5, partindo do ponto 0, são induzidos apenas pela mudança de “ w ”, enquanto deslocamentos partindo de 0 para a direção 3 ou 7 são induzidos apenas pela mudança de E_p/P . Por outro lado, os deslocamentos para as outras quatro direções são induzidas pelas mudanças simultâneas do parâmetro “ w ” e do índice de aridez (E_p/P). Porém, para decompor os impactos nas vazões relacionados às alterações simultâneas do parâmetro “ w ” e do índice de aridez (E_p/P), é necessário utilizar um método de decomposição, como proposto por Wang & Hejazi (2011).

Figura 3.6 – Direções na curva Budyko (Adaptado de JIANG et al., 2015)



O método de decomposição é apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Método de decomposição (Adaptado de JIANG et al., 2015)



No período de pré-mudança, a relação entre razão de evaporação e índice de aridez é representada pelo ponto A $(Ep_0/P_0, E_0/P_0)$ localizado na curva de tipo Budyko de w_0 . No período pós-mudança, a relação entre razão de evaporação e índice de aridez mudou para o ponto B $(Ep_1/P_1, E_1/P_1)$, que está localizado na curva do tipo Budyko de w_1 . Ao contrário da descrição original do método de decomposição (WANG & HEJAZI, 2011), a qual apenas mostrava a curva tipo Budyko do período de pré-mudança, nesse caso a curva tipo Budyko do período pós-mudança, ou seja, a curva de w_1 , também é exibida na figura. O ponto C $(Ep_1/P_1, E_1'/P_1)$ é um ponto hipotético, localizado na mesma curva do tipo Budyko que o ponto A, mas com o mesmo índice aridez do ponto B. Na mudança do ponto A para o ponto B é assumido que primeiro evolui do ponto A para o ponto C ao longo da curva do tipo Budyko de w_0 , e então se move verticalmente do ponto C para o ponto B. Assim, a mudança na taxa de evaporação do período pós-mudança (ponto B) e a do período de pré-mudança (ponto A), isto é, $\Delta \varepsilon^{A \rightarrow B} = \frac{E_1}{P_1} - \frac{E_0}{P_0}$, pode ser separada em duas partes, isto é, a diferença da razão de evaporação entre os pontos A e C denotada por $\Delta \varepsilon^{A \rightarrow C} = \frac{E_1'}{P_1} - \frac{E_0}{P_0}$, e a diferença da razão de evaporação entre os pontos C e B,

denotados por $\Delta\varepsilon^{C \rightarrow B} = \frac{E_1}{P_1} - \frac{E'_1}{P_1}$, que são atribuídos às mudanças de índice de aridez e w , respectivamente. Consequentemente, a diferença do escoamento entre o ponto A e o ponto B, isto é, ΔQ , pode ser dividida em duas partes por meio do ponto C, denotado por $\Delta Q^{A \rightarrow C}$ e $\Delta Q^{C \rightarrow B}$, que são atribuídas à vazão. As mudanças nas variáveis climáticas (precipitação e evaporação potencial) e a mudança do parâmetro w , respectivamente, são representadas por:

$$\Delta Q^{A \rightarrow C} = P_1[1 - B(\phi_1, w_0)] - P_0[1 - B(\phi_0, w_0)] \quad (3.12)$$

$$\Delta Q^{C \rightarrow B} = P_1[B(\phi_1, w_0) - B(\phi_1, w_1)] \quad (3.13)$$

em que $\phi_0 = Ep_0/P_0$ é o índice de aridez do período de pré-mudança e $\phi_1 = Ep_1/P_1$ é o índice de aridez do período de pós-mudança.

Em estudos anteriores (WANG & HEJAZI, 2011), $\Delta Q^{A \rightarrow C}$ e $\Delta Q^{C \rightarrow B}$ foram tratados como as contribuições de mudança climática e atividades humanas para ΔQ , respectivamente, sob o pressuposto de que as mudanças nas variáveis climáticas são atribuídas às mudanças climáticas, enquanto a mudança do parâmetro “ w ” é atribuída às atividades humanas. Entretanto, pode não ser razoável atribuir a mudança do parâmetro “ w ” apenas às atividades humanas, uma vez que as condições climáticas também poderiam ser um fator importante que afeta o parâmetro w (YANG *et al.*, 2007; WILLIAMS *et al.*, 2012). Portanto, a mudança de escoamento induzida pela mudança de w , isto é, $\Delta Q^{C \rightarrow B}$, deve ser atribuída não apenas às atividades antrópicas, mas também às mudanças climáticas. De acordo com a Eq. (4.7), a diferença entre w_1 e w_0 pode ser expressa como:

$$\Delta w = w_1 - w_0 = \sum_{i=1}^k \beta_i \Delta x_i^c + \sum_{i=k+1}^m \beta_i \Delta x_i^h = \Delta w^c + \Delta w^h \quad (3.14)$$

em que $\Delta w^c = \sum_{i=1}^k \beta_i \Delta x_i^c$ e $\Delta w^h = \sum_{i=k+1}^m \beta_i \Delta x_i^h$ são as contribuições das mudanças climáticas e atividades humanas para a Δw . O termo $\Delta Q^{C \rightarrow B}$, causada pela mudança de w , pode ser dividido em duas partes, de acordo com as proporções de Δw^c e Δw^h , isto é, a parte induzida pelas atividades humanas é dada por $(\Delta w^h /$

$\Delta w)\Delta Q^{C \rightarrow B}$ e a parte induzida pela mudança climática é definida como $(\Delta w^C / \Delta w)\Delta Q^{C \rightarrow B}$.

Depois de separar o $\Delta Q^{C \rightarrow B}$ em duas partes, a contribuição total para a mudança do escoamento induzida pela mudança climática, denotada por ΔQ^C , deve conter dois componentes, ou seja, ΔQ^{C-1} e ΔQ^{C-2} . ΔQ^{C-1} é $\Delta Q^{A \rightarrow C}$ induzida pela mudança nas variáveis climáticas (precipitação e evaporação potencial) para a bacia hidrográfica, enquanto ΔQ^{C-2} é a parte induzida pela mudança climática de $\Delta Q^{C \rightarrow B}$, sendo expressos como:

$$\Delta Q^C = \Delta Q^{C-1} + \Delta Q^{C-2} \quad (3.15)$$

$$\Delta Q^{C-1} = P_1[1 - B(\phi_1, w_0)] - P_0[1 - B(\phi_0, w_0)] \quad (3.16)$$

$$\Delta Q^{C-2} = \frac{\Delta w^C}{\Delta w} P_1[B(\phi_1, w_0) - B(\phi_1, w_1)] \quad (3.17)$$

Para ΔQ^{C-2} , a contribuição devido à variação da variável explicativa climática x_i^c ($i = 1, \dots, k$) pode ser estimada como:

$$\Delta Q^{C-2-x_i^c} = (\beta_i \Delta x_i^c / \Delta w) \Delta Q^{C \rightarrow B} \quad (3.18)$$

A contribuição para a mudança na vazão induzida pelas atividades antrópicas, parte do $\Delta Q^{C \rightarrow B}$, é calculada por:

$$\Delta Q^h = \frac{\Delta w^h}{\Delta w} P_1[B(\phi_1, w_0) - B(\phi_1, w_1)] \quad (3.19)$$

Para ΔQ^h , a contribuição devido à variação das atividades antrópicas x_i^h ($i = k + 1, \dots, m$) pode ser estimada como:

$$\Delta Q^{h-x_i^h} = (\beta_i \Delta x_i^h / \Delta w) \Delta Q^{C \rightarrow B} \quad (3.20)$$

Finalmente, a mudança de escoamento estimada para o método de decomposição, denotado por ΔQ^{DM} , é a soma de ΔQ^C na Eq. (4.19) e ΔQ^h na Eq. (4.23), ou seja:

$$\Delta Q^{DM} = \Delta Q^c + \Delta Q^h \quad (3.21)$$

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, dispostos em dois tópicos são apresentados os procedimentos utilizados para a aplicação da metodologia do estudo. Primeiramente, será delineada a área onde serão implementados os métodos, seguido de informações climatológicas e geográficas. No segundo tópico é feita a descrição dos dados utilizados no estudo do comportamento das vazões, juntamente com a metodologia utilizada para atingir os objetivos da pesquisa.

4.1 Caracterização da bacia de estudo

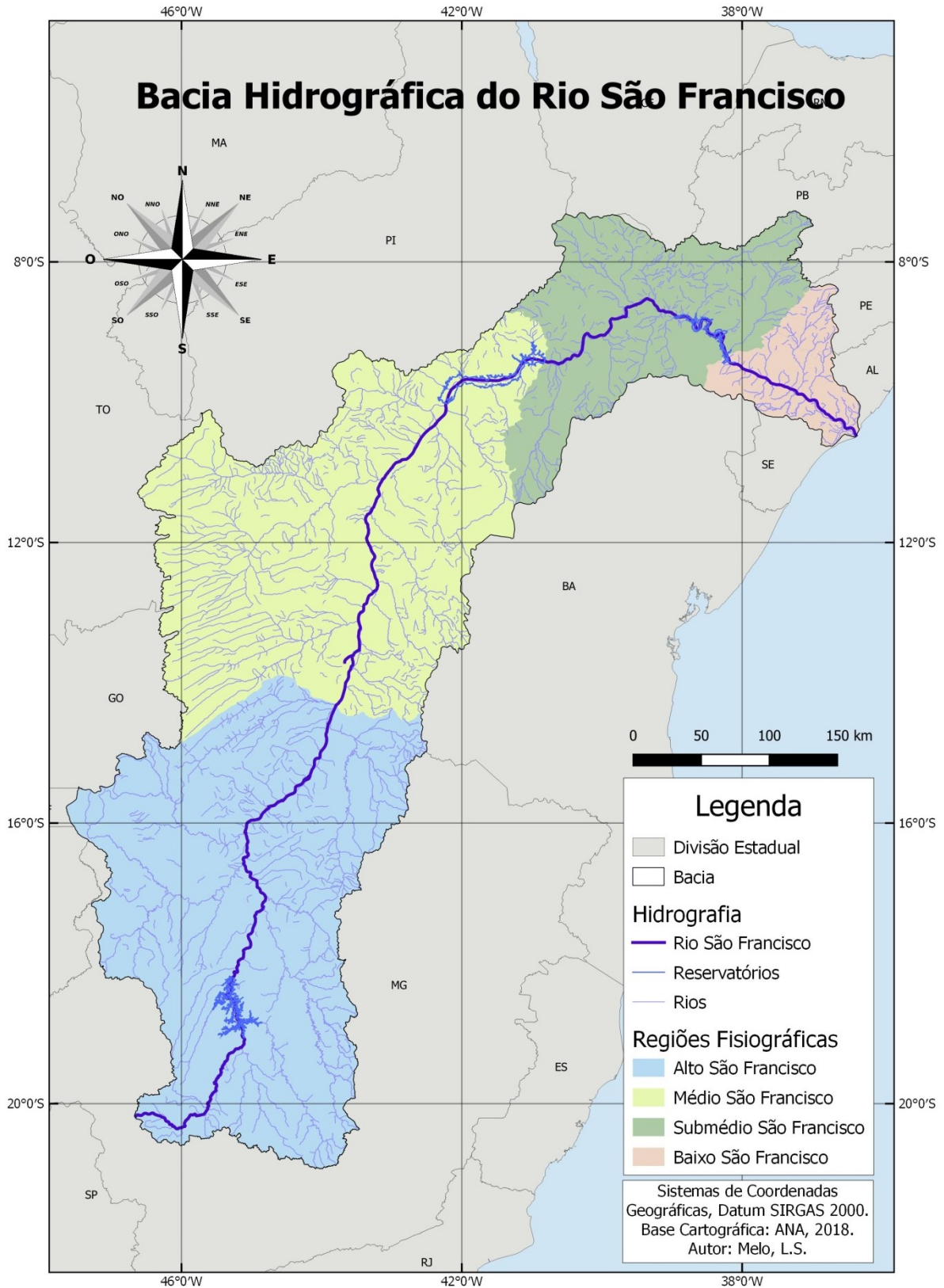
Para a execução da metodologia proposta, a área de estudo escolhida foi a bacia do rio São Francisco. A escolha dessa região é fundamentada, em primeiro lugar, pela enorme complexidade social e econômica decorrente da grande heterogeneidade inter e intrarregional de seus trechos fisiográficos (Alto - ASF, Médio - MSF, Submédio - SMSF e Baixo - BSF). Além disso, a bacia possui uma complexidade climática por influência da latitude, cobertura vegetal, proximidade ao mar, continentalidade e sistemas atmosféricos associados. A atuação desses fatores fisiográficos e meteorológicos causa variação interanual e espacial do clima, interferindo nos recursos hídricos.

Na bacia em estudo, é possível identificar a presença de diversas formas de uso dos seus recursos hídricos, o que representa um grande desafio e exige uma análise do conjunto para que se possa planejar adequadamente sua gestão.

4.1.1 Aspectos gerais

Complexa e extensa, a bacia do rio São Francisco é a terceira maior bacia brasileira. Desde a sua nascente, na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas (MG), à foz, na divisa de Sergipe e Alagoas, entre os municípios de Brejo Grande (SE) e Piaçabuçu (AL), o rio São Francisco totaliza 2.697 km de extensão, e uma área de drenagem de 638.323 km² (8% do território nacional) (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Bacia hidrográfica do rio São Francisco



A bacia situa-se entre as coordenadas 7°17' a 20°50' de latitude sul e 36°15' a 47°39' de longitude oeste, e abrange 505 (cerca de 9% do total de municípios do país) municípios e sete unidades da federação – Bahia (307.794 km², 48,2%), Minas Gerais (235.635 km², 36,8%), Pernambuco (68.966 km², 10,9%), Alagoas (14.687 km², 2,2%), Sergipe (7.024 km², 1,2%), Goiás (3.193 km², 0,5%) e Distrito Federal (1.277 km², 0,2%).

De acordo com o PBHSF (2016), ao longo do seu curso, o rio São Francisco recebe água de 168 afluentes, dos quais 99 são perenes, 90 estão na sua margem direita e 78 na esquerda. A produção de água de sua bacia concentra-se principalmente na região dos cerrados dos estados de Minas Gerais e da Bahia, e a grande variação do porte dos seus afluentes é consequência das grandes diferenças climáticas que ocorrem entre as regiões drenadas.

Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes percorridos, a bacia hidrográfica é dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco (PBHSF, 2016) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Características da bacia do rio São Francisco

Região Fisiográfica	Área		Unidades da Federação – UFs (%)	Número de municípios	População residente em 2010	Número de sub-bacias
	km ²	BHSF (%)				
ASF	253.291	39,8	MG, BA, GO e DF	244	11.739.000	14
MSF	247.518	38,9	BA	92	2.784.600	6
SMSF	105.540	16,6	PE, BA e AL	92	2.093.000	9
BSF	29.866	4,7	AL, SE, PE e BA	78	1.583.400	5

Fonte: NEMUS, 2015; IBGE, 2015.

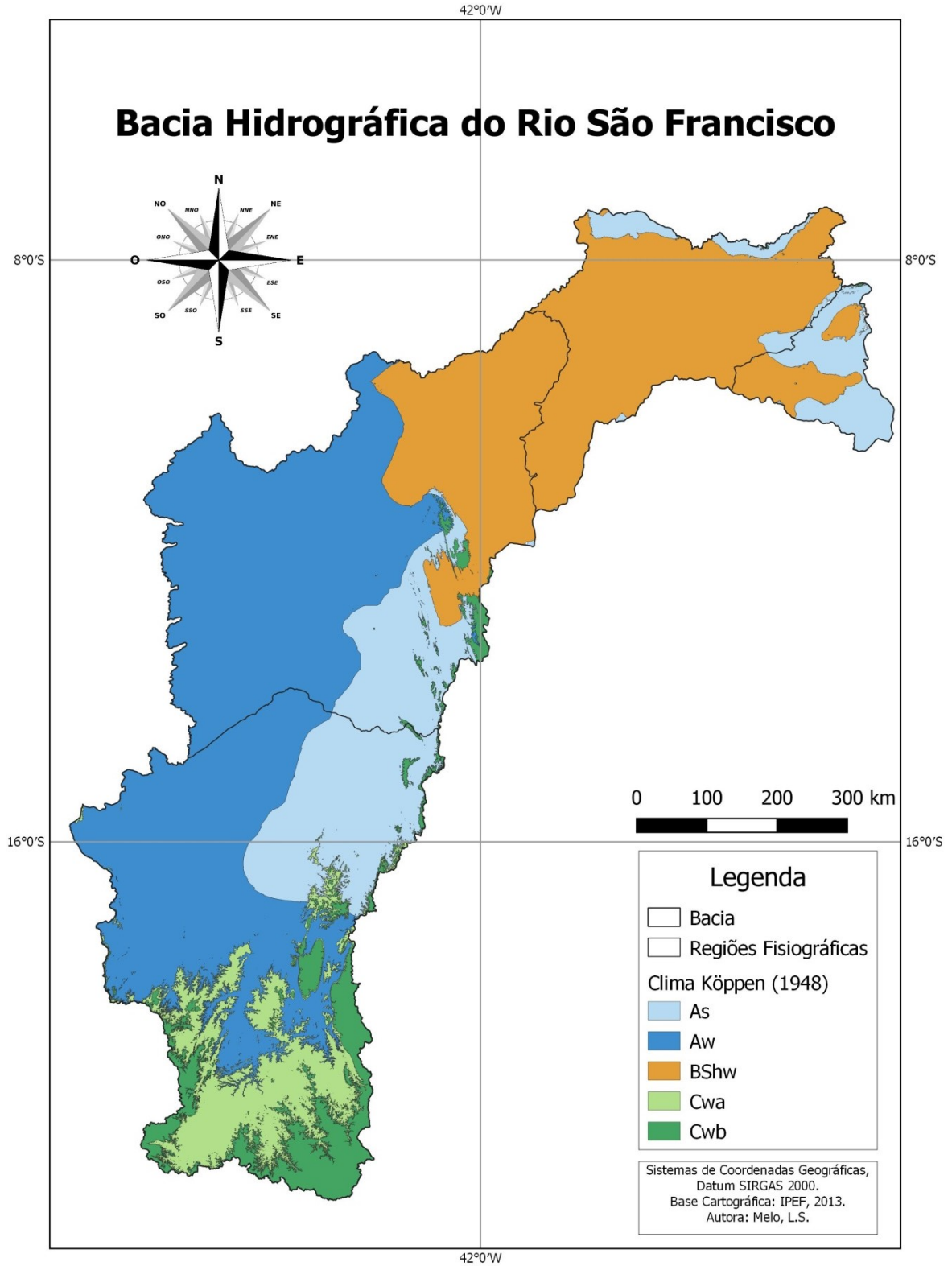
4.1.2 Clima

Devido à sua extensão e às diferentes regiões com condições naturais bastante diversas, a bacia apresenta grande variabilidade climática (PBHSF, 2016). Estão presentes na bacia em estudo cinco tipologias climáticas: As - Clima tropical quente e úmido, com estação seca no inverno; Aw - Clima tropical, com inverno seco; BShw - Clima Semi-árido quente; Cwa - Clima subtropical de inverno seco e verão quente;

Cwb - Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno, de acordo com a classificação de Köppen (1948) (Figura 4.2).

No Alto São Francisco foram identificados quatro tipos climáticos, Cwb, Cwa, As e Aw, sendo o Aw de maior predominância. No Médio o clima predominante também é o Aw, porém também são encontrados outros 3 tipos (Cwb, As e BShw). Diferente das demais regiões, no Médio e Baixo São Francisco foram identificados dois climas: As e BShw, sendo o BShw o de predominância em ambas as regiões.

Figura 4.2 – Clima da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Adaptado de Köppen, 1948)



4.1.3 Precipitação

O clima regional é fortemente influenciado pelo regime pluviométrico, apresentando grande variação das precipitações médias anuais ao longo da bacia (Figura 4.3). No Alto São Francisco há uma variação de 1.100 a 2.000 mm na precipitação média anual, sendo os meses de novembro, dezembro e janeiro os mais chuvosos. Já no Médio São Francisco, a precipitação média anual varia de 1.400 mm (Serra Geral de Goiás) a 600 mm (lago de Sobradinho). O Submédio São Francisco, por sua vez, apresenta precipitação média anual variando entre 350 e 800 mm, sendo que seu período principal de precipitação ocorre no verão, no trimestre janeiro, fevereiro e março. Por fim, o Baixo São Francisco apresenta precipitação média variando de 1.300 mm, na zona litorânea, a 600 mm, na parte semiárida, com a estação chuvosa ocorrendo de maio a julho.

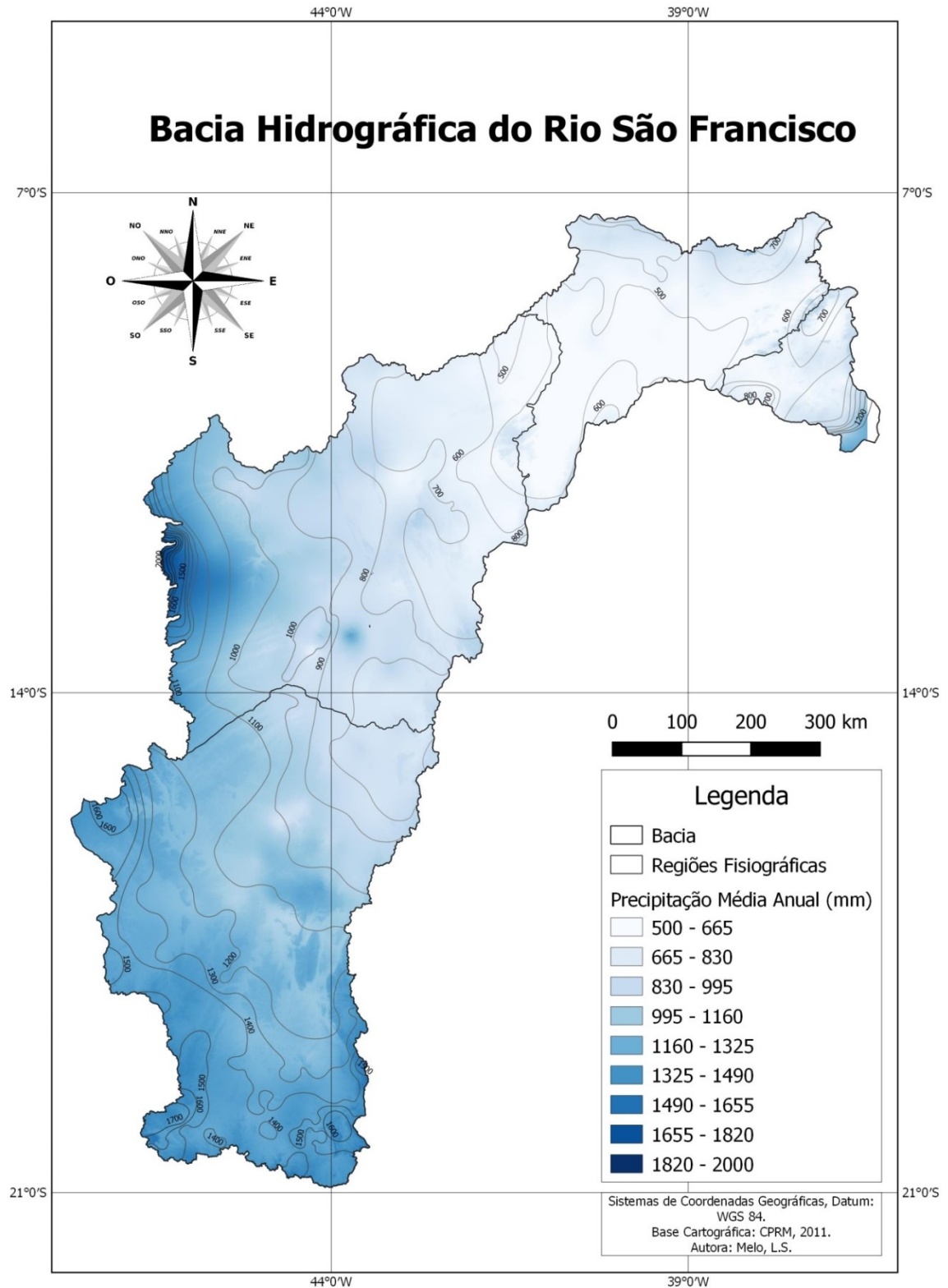
É importante ressaltar que grande parte da bacia está inserida no nordeste brasileiro, região que possui diversos sistemas atmosféricos atuando (Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, Vórtice Ciclônico de Ar Superior – VCAS, Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZACS) e isso causa grande variabilidade climática, o que pode interferir na variação da precipitação e vazão da bacia. Acredita-se que, devido à sua localização geográfica, próxima à inversão dos ventos alísios, a região sofre influência da alta subtropical semipermanente do Atlântico Sul (NIMER, 1989). Devido a isso, o nordeste brasileiro apresenta alta variabilidade espacial na quantidade de precipitação na escala interanual e alta variabilidade espaço-temporal da precipitação em uma mesma estação chuvosa (MARENGO *et al.*, 2012). Outros fatores que contribuem para a variabilidade da precipitação são a Temperatura da Superfície do Mar do Atlântico (TSM), sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul, Oscilação Sul e El Niño.

Galvício (2000) observou que existe uma relação direta entre a precipitação e os índices de anomalias de temperatura de superfície do mar (TSM) nas diferentes áreas dos Niños, mostrando os contrastes entre o Alto São Francisco (ASF)/Médio São Francisco (MSF) e Baixo São Francisco (BSF). Em anos de El Niño, ocorrem altas precipitações na sub-bacia do ASF, e conseqüentemente altas vazões, e

baixas precipitações na sub-bacia do BSF. Em anos de La Niña, ocorre exatamente o contrário, ou seja, altas precipitações na sub-bacia do BSF e baixas sobre a sub-bacia do ASF.

Dos municípios da bacia, 251 estão situados no Polígono das Secas e 226 no Semiárido (PBHSF, 2004). A esse propósito, convém recordar que o Polígono das Secas corresponde a uma divisão regional de ordem político-administrativa e que é reconhecido pela legislação como uma área sujeita a períodos críticos de estiagens prolongadas. Já o Semiárido corresponde a uma das seis grandes áreas climáticas do Brasil, caracterizada basicamente pelo regime de chuvas (menos de 800 mm anuais, com distribuição irregular e concentração das precipitações em cerca de três meses).

Figura 4.3 – Precipitação média anual (1977-2006) na bacia hidrográfica do rio São Francisco



4.1.4 Vazão

De acordo com o PBHSF (2016), a vazão natural média do rio na foz é de 2.850 m³/s e, ao longo do ano, a vazão média mensal oscila entre 1.077 m³/s e 5.290 m³/s. As descargas têm seus menores valores nos meses de setembro e outubro, e maiores nos meses de janeiro, fevereiro e março. Com relação à vazão regularizada, as barragens de Três Marias e de Sobradinho têm papel fundamental na regularização da vazão na bacia. Considerando a série de vazões naturais, estimada para o período compreendido entre 1931 e 2001, a barragem de Três Marias garante uma vazão de 513 m³/s à jusante e, a partir da barragem de Sobradinho, a vazão regularizada passa a ser de 1.815 m³/s (BRASIL, 2004).

A vazão máxima ocorre em fevereiro no Alto, Médio e Submédio São Francisco, com 1.303 m³/s no rio Pirapora, 4.393 m³/s no rio Juazeiro e 4.660 m³/s em Pão de Açúcar. No Baixo São Francisco, a vazão máxima ocorre em março, com 4.680 m³/s na foz. Já a vazão mínima ocorre em agosto no Alto, com 637 m³/s. Nas demais áreas acontecem em setembro, sendo que, no Médio São Francisco, a vazão mínima é verificada no município de Juazeiro, sendo de 1.419 m³/s. No Submédio, em Pão de Açúcar, é de 1.507 m³/s e, no Baixo na Foz, de 1.461 m³/s.

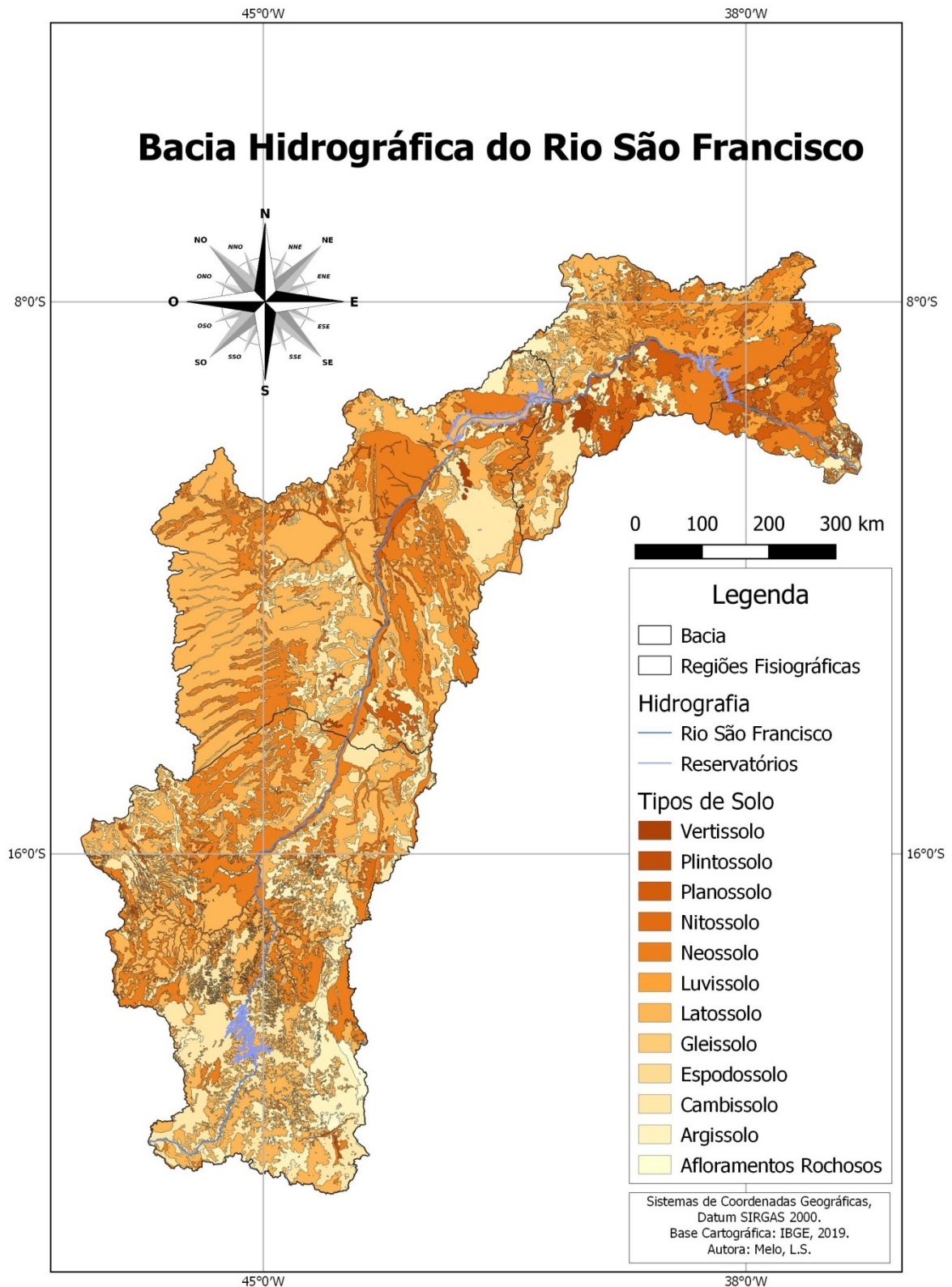
O estado de Minas Gerais contribui com 2.769 m³/s, representando 73,9% para a vazão média do rio São Francisco; 20% são oriundas do estado da Bahia, 2% de Pernambuco, 0,9% de Alagoas, 0,5% de Sergipe, 2,1% de Goiás e 0,6% do Distrito Federal. A vazão média que cada área fisiográfica contribui corresponde a 1.184 m³/s no Alto São Francisco, cuja contribuição vem dos rios Pirapora, das Velhas e Jequitaiá; 1.446 m³/s do Médio, sendo que o rio Juazeiro é o maior colaborador; 160 m³/s do Submédio e apenas 20 m³/s do Baixo São Francisco.

4.1.5 Pedologia

Há uma grande variedade de tipos de solo encontrados na bacia, de acordo com o PBHSF (2016), predominando os Latossolos, Neossolos, Cambissolos (Figura 4.4). Já os solos que têm menor expressão são os Plintossolo e os afloramentos de rochas (EMBRAPA, 2006).

No Médio e no Alto São Francisco, os tipos de solo dominantes são os mesmos, apesar de terem diferentes proporções – Latossolos (43,9% e 31,1%, respectivamente), Neossolos (31,1% e 10,6%) e Cambissolos (14,0% e 36,6%). No Submédio São Francisco, os Luvisolos (27,6%), os Neossolos (22,9%) e os Planossolos (16,1%) predominam. No Baixo São Francisco, os tipos de solo com maior representatividade são os Planossolos (41,5%), os Neossolos (32,5%) e os Argissolos (13,3%).

Figura 4.4 – Tipos de Solo da bacia hidrográfica do rio São Francisco



É importante destacar que os solos Argilossolos e os Latossolos têm uma elevada aptidão para a prática de agricultura (incluindo a agricultura de irrigação). No que

concerne à retenção de água, os Latossolos apresentam taxas de infiltração maiores que os Argissolos, provavelmente devido à maior porosidade (MMA, 2006). Já os Luvisolos e os Neossolos não têm potencial para a prática agrícola, devido à sua maior susceptibilidade à erosão. Por fim, os Neossolos, além da erosão, apresentam uma textura grosseira, altas taxas de infiltração e baixa fertilidade (MMA, 2006).

O Médio e o Submédio São Francisco têm 8,1% e 7,1%, respectivamente, de solo com bom potencial agrícola, ao passo que as áreas com menor potencial agrícola se concentram no Baixo e no Alto São Francisco (51,3% e 46,6%).

A maioria das terras presente na bacia são irrigáveis, com representatividade de 48,1%, mas com aptidão agrícola restrita, isso é, são territórios com características físicas que se adaptam a um leque restrito de culturas, maior custo de produção e podem apresentar limitações como a fertilidade muito baixa, textura arenosa, topografia irregular, salinidade ou a drenagem restrita (CAVALCANTI *et al.*, 2012).

Nas terras irrigáveis com aptidão moderada, as limitações que dispõem podem ser corrigíveis, podendo estar associadas à fertilidade, à permeabilidade e à profundidade dos solos, à topografia, à disponibilidade de água ou à sua capacidade de drenagem (CAVALCANTI *et al.*, 2012). As terras irrigáveis de uso especial apresentam deficiências passíveis de correção, mas com elevados custos financeiros.

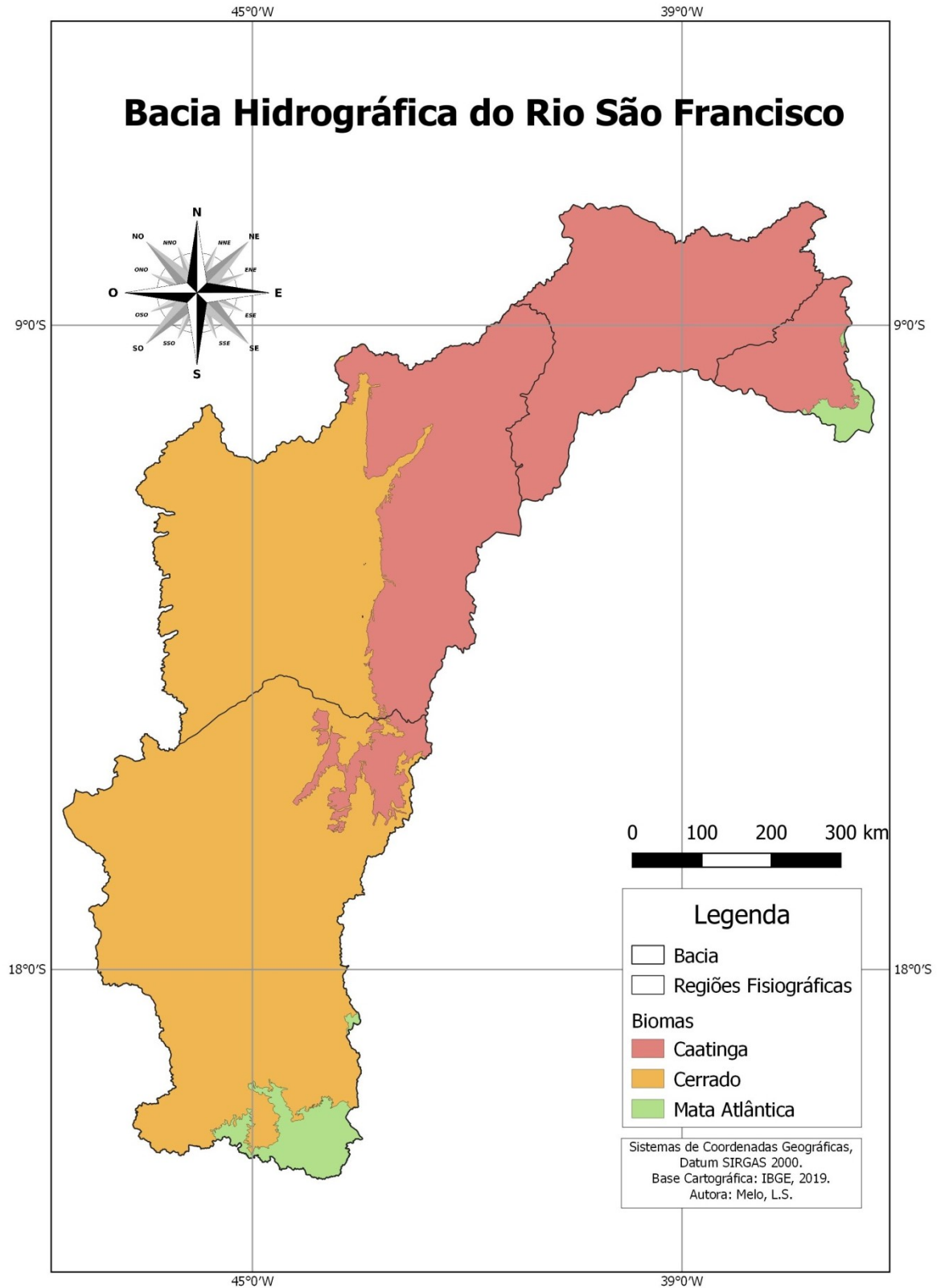
Contudo, a porcentagem de terras não irrigáveis corresponde a 47,9%. Considerando as regiões fisiográficas, as terras não irrigáveis têm maior representatividade no Submédio 67,2%, no Alto 63,9%, no Baixo 56,2% e no Médio São Francisco 39,1%.

4.1.6 Cobertura vegetal

A bacia hidrográfica do rio São Francisco integra três dos mais importantes biomas brasileiros: o cerrado, com 57,2%, a caatinga, com 39,5%, e a mata atlântica, com 3,3%, tendo grande importância na conservação da natureza e sua biodiversidade, em específico para espécies da flora (Figura 4.5).

O cerrado cobre praticamente metade da área da bacia, compreendendo quase todo o estado de Minas Gerais e oeste e sul da Bahia, enquanto a caatinga predomina no nordeste da Bahia, justamente sob as condições de clima mais severas. A mata atlântica, hoje quase totalmente devastada pelo uso agrícola e pastagens, ocorre na região do Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras de seus formadores. Os remanescentes de mata atlântica na BHSF, que se estimam em cerca de 22% da sua área original, possuem uma elevada importância ecológica e em relação aos recursos hídricos, devido ao seu papel regulador do fluxo dos mananciais hídricos, assegurando a fertilidade do solo, controlando o clima e protegendo as encostas (IBAMA, 2015).

Figura 4.5 – Biomas localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco



4.1.7 Uso e ocupação do solo

O uso do solo na bacia em estudo é marcado por estabelecimentos agropecuários, pastagens, áreas de floresta e mata nativa, exploração agrícola e ocupação urbana (PBHSF, 2016). A repartição dos usos do solo em 2010 por região fisiográfica, apresentada na Tabela 4.2, mostra que a atividade agrícola (pastagens e estabelecimentos agropecuários) ocupa uma parcela considerável do solo em toda a bacia. Os “estabelecimentos agropecuários” ocupam cerca de 57% da área da bacia e de todas as regiões fisiográficas, à exceção do Baixo São Francisco, em que o grupo mais representativo são as pastagens, cerca de 53% da área.

Tabela 4.2 – Usos do solo, por região fisiográfica, em porcentagem (2010)

Grandes grupos de uso do solo	ASF	MSF	SMSF	BSF	BHSF
Área urbanizada	3,3	0,3	0,7	1,0	0,9
Lavouras	1,9	5,6	1,6	5,4	4,3
Matas e/ou florestas	5,4	11,7	7,9	2,4	9,7
Pastagens	32,5	17,8	8,6	52,6	19,9
Estabelecimentos Agropecuários	44,5	57,6	72,8	27,1	56,9
Outros/Diversos	12,3	7,1	8,4	11,5	8,3

ASF = Alto São Francisco; MSF = Médio São Francisco; SMSF = Submédio São Francisco; BSF = Baixo São Francisco; BHSF = Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Fonte: IBGE (valores obtidos por meio de cálculos com base na informação georreferenciada disponível no portal do MMA [2014]).

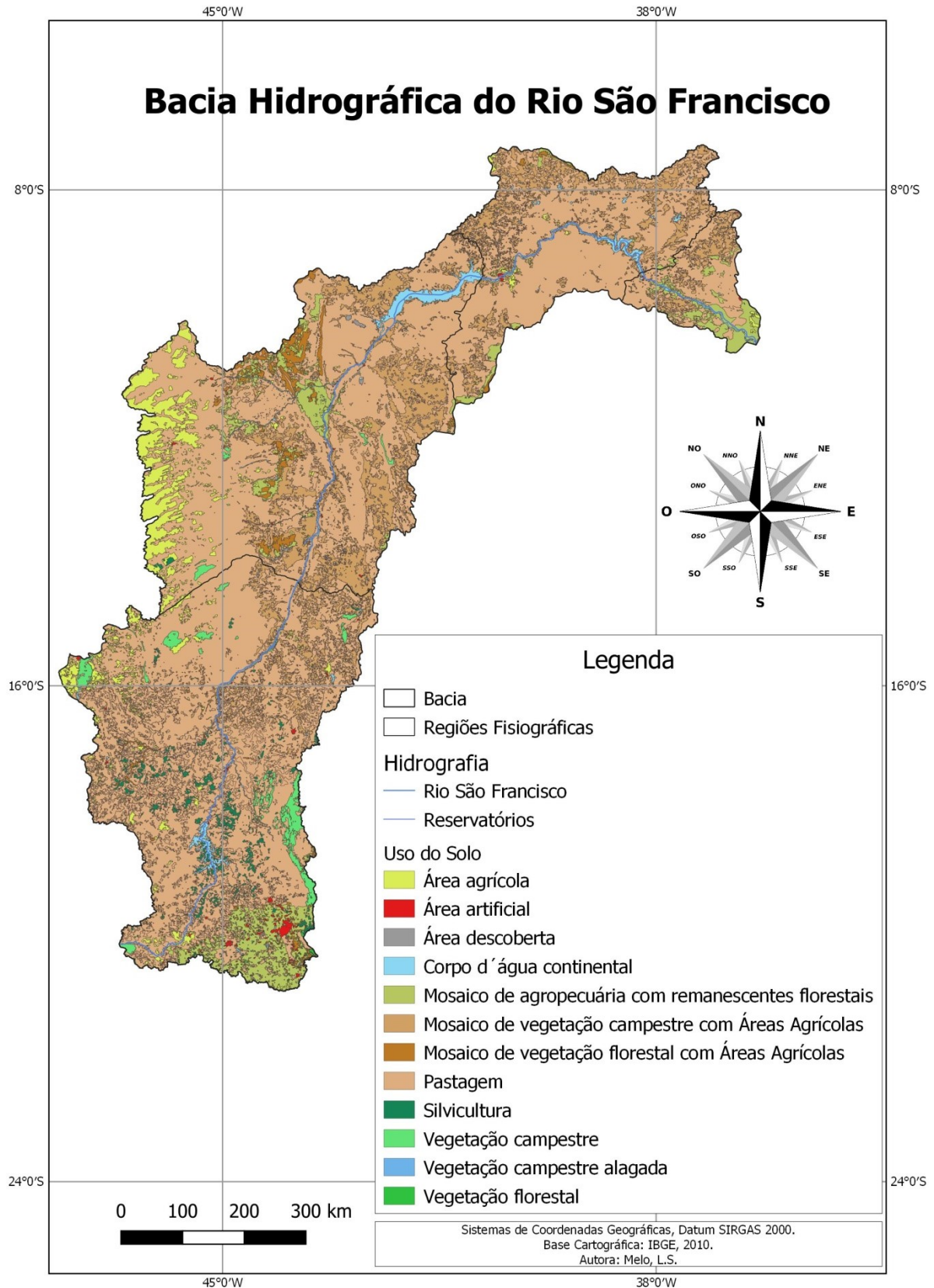
O Alto, Médio e Submédio São Francisco são constituídos pelos mesmos padrão de uso do solo, ainda que com diferenças quantitativas relativamente à representatividade de cada grupo. Os estabelecimentos agropecuários têm uma elevada importância relativa nas três regiões fisiográficas (44,5% 57,6% e 72,8%, respectivamente). Do ponto de vista dos grandes grupos de uso do solo, destacam-se também, pelo grau de importância relativa, as pastagens (32,5%, 17,8% e 8,6%), as matas e/ou florestas (5,4%, 11,7% e 7,9%), outros usos (12,3%, 7,1% e 8,4%) e, por fim, as lavouras (1,9%, 5,6% e 1,6%). Diferente das demais regiões, no Baixo São Francisco predomina o grande grupo pastagens (52,6%). Dentro dos grandes grupos de uso do solo, as matas e/ou florestas e as lavouras são os menos expressivos (2,4% e 5,4%, respectivamente).

O Alto São Francisco é a região mais urbanizada (62%) da bacia. Nesse trecho é localizado o quadrilátero ferrífero, a maior região metropolitana da bacia e também a área mais industrializada. Por outro lado, o Médio São Francisco apresenta, dentre as regiões, a menor área urbanizada, com 5% da bacia. O Médio e o Baixo têm 13% e 18% da área urbanizada, respectivamente (PBHSF, 2016). Devido à urbanização, agropecuária e diversos fatores, há um grande crescimento do desmatamento ao longo de toda a bacia. As áreas urbanizadas ocupam, em termos percentuais da abrangência geográfica da bacia, um papel residual, sendo esse setor com menor representação na bacia (Figura 4.6).

De acordo com o PBHSF (2016), em comparação ao uso do solo em 2004, houve um aumento expressivo da área associada à produção agropecuária em todas as regiões fisiográficas da BHSF, por substituição, principalmente, de áreas de ecótono, caatinga (estepe), cerrado (savana) e floresta. Devido a isso, o desmatamento constitui a principal ameaça para a conservação da natureza e biodiversidade na bacia. Entre as quatro regiões fisiográficas destacam-se o BSF e o ASF, onde as ações de desmatamento atingiram, respectivamente, 84,2% e 59% das suas áreas.

Paralelamente ao desmatamento, a salinização dos solos está entre os fatores da desertificação e é responsável por danos graves ao meio ambiente. Ao longo de quase todo o rio São Francisco (Médio, Submédio e parte do Baixo São Francisco), os solos apresentam alto risco de salinização (PBHSF, 2016). A prática da agricultura irrigada é uma das principais causadoras de salinização dos solos de drenagem deficiente ou nula, sobretudo nas regiões de clima semiárido.

Figura 4.6 – Uso e cobertura do Solo na bacia hidrográfica do rio São Francisco



4.1.8 Usos múltiplos da água

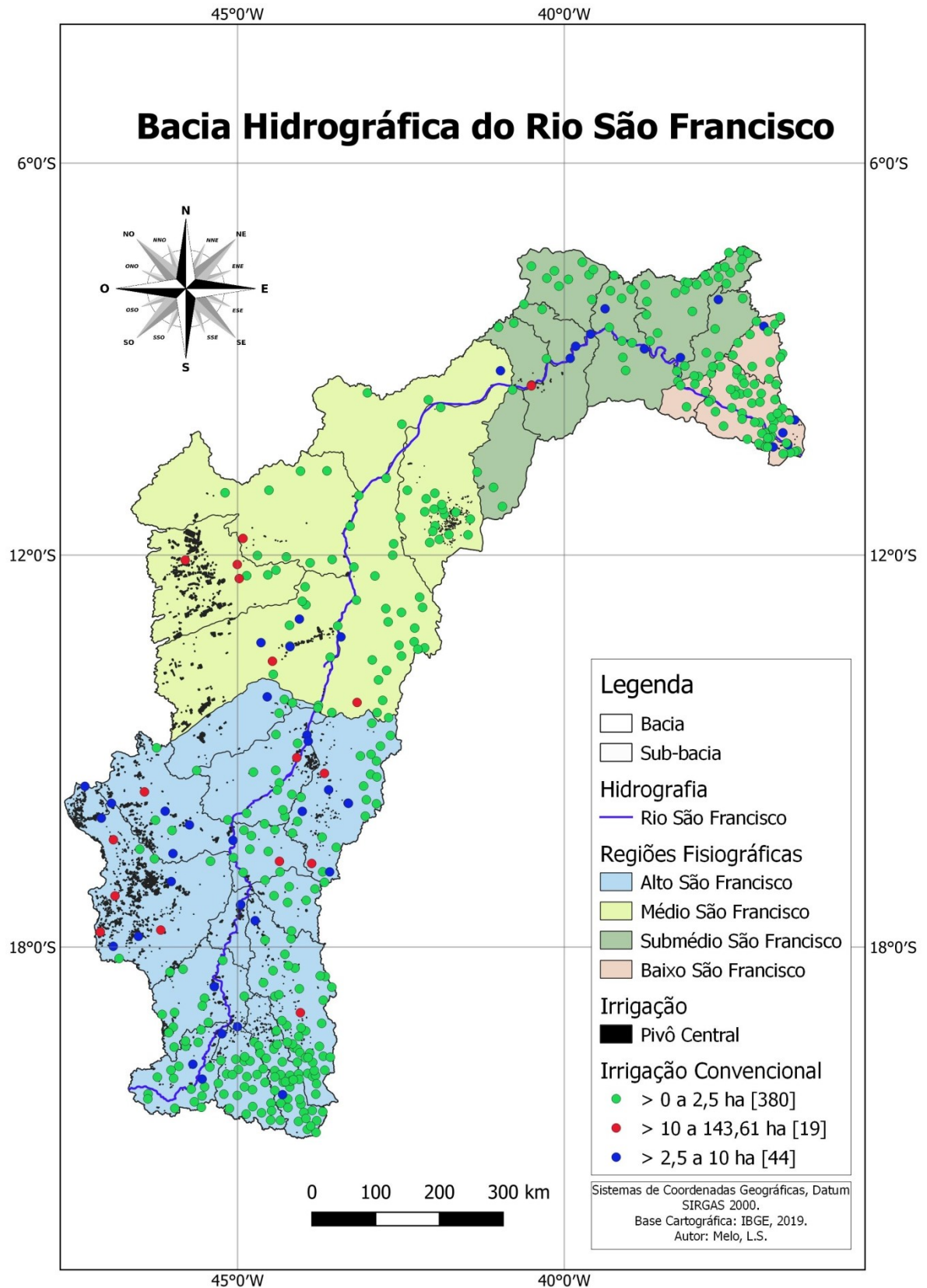
A bacia do rio São Francisco, devido à sua grande extensão territorial e diversos estágios de desenvolvimento, atende praticamente a todas as categorias de uso da água e, por isso, ela é caracterizada como uma bacia de usos múltiplos (PBHSF, 2016).

Os usos dos recursos hídricos da bacia compreendem o abastecimento urbano, rural, industrial, animal e irrigação. A vazão de retirada na bacia do São Francisco é distribuída da seguinte forma: 79% para irrigação, 10% para abastecimento urbano, 7% para abastecimento industrial, 3% para criação animal e 1% para abastecimento rural. A vazão consumida é distribuída entre os diferentes usos com 90% para irrigação, 4% para criação animal, 3% para abastecimento urbano, 2% para abastecimento industrial e 1% para abastecimento rural.

A irrigação é o uso predominante em todas as regiões fisiográficas, com 38% da vazão de retirada no Alto, 91% no Médio, 90% no Submédio e 85% no Baixo São Francisco (PBHSF, 2016). No Alto São Francisco, três setores predominam: abastecimento urbano, com 26,7 m³/s, em seguida o da irrigação, com 14,4 m³/s, e o terceiro setor é o da indústria, com 11,47 m³/s. No Médio São Francisco a irrigação consome 58,8 m³/s da água disponível. As demais categorias juntas consomem um pouco mais de 11 m³/s.

Comparativamente aos dados do PRH-SF 2004-2013, a vazão consumida passou de 105,5 m³/s para 215,8 m³/s, representando um aumento de 105%, enquanto a vazão de retorno aumentou de 60,3 m³/s para 93,7 m³/s (55%). O aumento significativo das demandas totais de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco entre 2000 e 2010 pode ser explicado pela expansão dos perímetros irrigados dentro da bacia, tendo em conta o aumento da demanda de água neste setor (de 114,0 m³/s para 244,4 m³/s –114%). Na Figura 4.7 está apresentada a localização dos perímetros irrigados na bacia.

Figura 4.7 – Área irrigada da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Os dados do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006) indicam que na bacia do rio São Francisco existia 630 mil estabelecimentos dedicados a atividades agrícolas e pecuárias. Esses ocupavam uma área de mais de 30 milhões de hectares, o que correspondia a cerca de metade da área geográfica da bacia. A evolução da pecuária na última década foi bastante acentuada na bacia, sendo que o número de cabeças de gado (bovino, suíno, caprino e ovino) aumentou cerca de 6,5%. O gado bovino predomina nas regiões do Alto (81,6%), do Médio (77,2%) e do Baixo (69,1%). Já no Submédio, os caprinos (43%) e os ovinos (37,3%) são as espécies mais presentes.

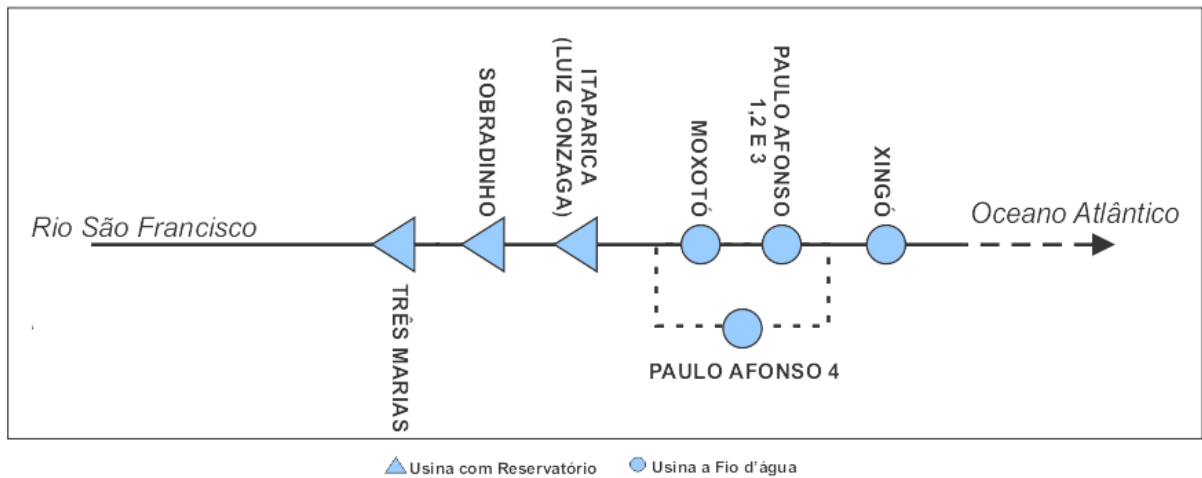
Em relação ao uso industrial, o Alto São Francisco responde por 90% da vazão retirada em toda a bacia para esse uso, dada a importância e diversidade do setor na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Essa mesma região fisiográfica também é responsável pelo maior consumo de água em relação à atividade minerária.

Outro uso da água que merece destaque é a geração de energia. Em 2005, a bacia do rio São Francisco gerava cerca de 10% do total brasileiro (CGEE/ANA, 2012). Existem atualmente 65 unidades geradoras de eletricidade instaladas no leito do rio São Francisco e seus afluentes. Elas são divididas em 16 Usinas Hidrelétricas (UHE) com mais de 30 MW de potência; 26 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com potência entre 1,1 e 30 MW; e 23 Centrais Geradoras Hidroelétricas, com no máximo 1 MW de potência (ANEEL, 2015; 2017). O potencial hidrelétrico da bacia do rio São Francisco é de 25.795 MW, dos quais 10.395 MW estão distribuídos em usinas em operação na bacia: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso (Moxotó, Paulo Afonso I, II, III e IV) e Xingó (Tabela 4.3). Além da geração de energia elétrica, os reservatórios de Três Marias, Itaparica e Sobradinho têm papel fundamental na regularização das vazões do rio São Francisco, promovendo o controle de cheias e alterando o ciclo hidrológico da bacia (CODEVASF, 2015). A Figura 4.8 mostra esquematicamente a distribuição das principais unidades geradoras pela calha do rio.

Tabela 4.3 – Principais usinas hidrelétricas na calha do rio São Francisco

Usina Hidrelétrica	Início da operação	Volume total (Hm ³)	Volume útil (%)*	Potência (MW)
Três Marias	1962	19.528	76,40	396
Sobradinho	1979	34.116	75,18	1050
Itaparica	1988	10.782	81,12	1500
Paulo Afonso I	1954	-	-	180
Paulo Afonso II	1961	-	-	445
Paulo Afonso III	1971	-	-	800
Moxotó	1977	-	-	400
Paulo Afonso IV	1979	-	-	1460
Xingó	1994	-	-	3000

* Dados do dia 02/09/2020 (ONS, 2020)

Figura 4.8 – Distribuição das principais UHE na calha do rio São Francisco

Fonte: NOS, 2020

4.1.9 Geologia

A bacia hidrográfica do rio São Francisco integra-se majoritariamente na Província Estrutural de São Francisco (Figura 4.9), abrangendo uma vasta diversidade de formações geológicas. As rochas mais antigas – do Eoarqueano (mais de 3600 milhões de anos) – ocorrem de forma localizada, enquanto as mais recentes (menos de 65 milhões de anos) ocorrem de forma dispersa, em todas as regiões fisiográficas, sobre os terrenos do embasamento (PBHSF, 2016).

Considerando toda a extensão da bacia do rio São Francisco predominam os terrenos do Proterozóico (cerca de 46% da sua área, sendo 29% do Neoproterozóico), sobretudo as rochas sedimentares (69% da bacia), seguidas das rochas metamórficas, metassedimentares e metaígneas (26% do total), sendo que

só 5% correspondem a rochas ígneas (Figura 4.10). No Alto São Francisco predominam os terrenos do Neoproterozóico (45% da região), sendo a unidade geológica com maior extensão de afloramento pertencente à Formação da Serra de Santa Helena. No Médio São Francisco verifica-se uma distribuição relativamente equitativa entre os afloramentos do Neoproterozóico (24%), Cenozóico (32%) e Mesozóico (26%). No Submédio São Francisco predominam os terrenos do Proterozóico (61% da região), embora exista uma diversidade de unidades geológicas. As unidades geológicas com afloramentos mais extensos pertencem ao Neoproterozóico (29%). Por fim, no Baixo São Francisco há um predomínio dos terrenos do Neoproterozóico (46%), seguido dos terrenos do Meso e do Paleoproterozóico, totalizando 34% da região.

De acordo com o plano diretor da bacia (2016) grande parte da bacia hidrográfica possui uma favorabilidade hidrogeológica variável (47% da área da bacia hidrográfica), que está associada à grande diversidade de terrenos e às respectivas condições de permeabilidade, adquirindo particular expressão no Alto e Médio São Francisco (Figura 4.11).

A favorabilidade hidrogeológica alta (17% da bacia) está essencialmente associada aos terrenos sedimentares detríticos e carbonatados. Destaca-se pela importância regional os terrenos sedimentares do Grupo Urucua, que permitem o desenvolvimento de um meio de escoamento poroso com alta produtividade, sendo encontrados no Submédio São Francisco. Esses meios de escoamento porosos possuem elevada capacidade de armazenamento e boa produtividade nas captações neles instalados.

A favorabilidade hidrogeológica baixa a muito baixa (36%) está associada às diferentes naturezas dos terrenos cristalinos (rochas metamórfica, metassedimentar, metaígneas e ígneas), mas também sedimentares. A favorabilidade baixa a muito baixa é atribuída essencialmente à reduzida permeabilidade dos terrenos cristalinos, sendo que o armazenamento de água se restringe às fissuras. A esses terrenos estão associados pequenos aquíferos locais e descontínuos espacial e verticalmente, sendo limitadas as vazões dos poços. A favorabilidade muito baixa

adquire particular expressão no Baixo São Francisco, sendo que praticamente metade da região do Submédio também possui reduzida favorabilidade ao desenvolvimento de aquíferos.

Figura 4.9 – Província estrutural da bacia hidrográfica do rio São Francisco

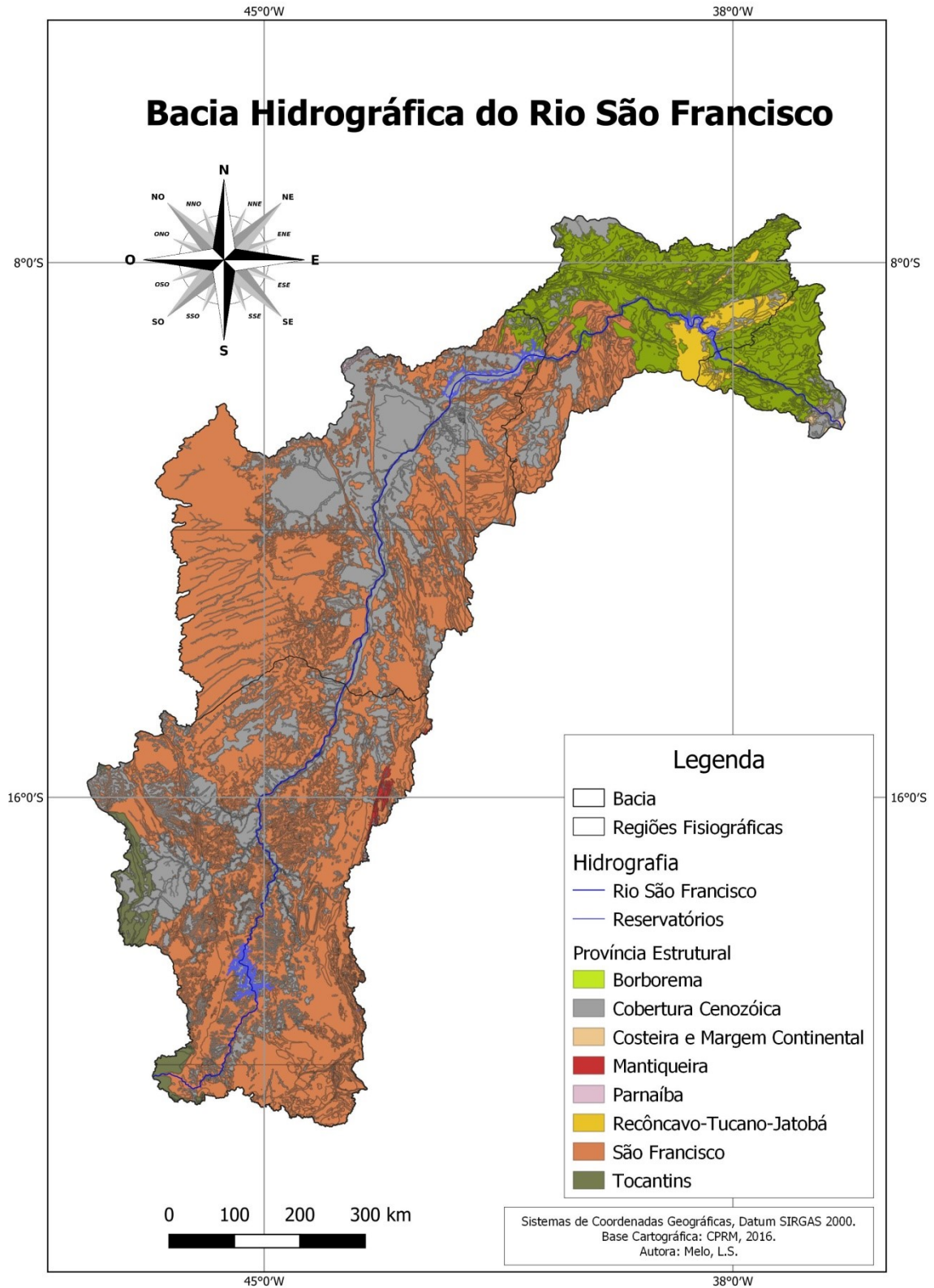


Figura 4.10 – Rochas encontradas na bacia hidrográfica do rio São Francisco

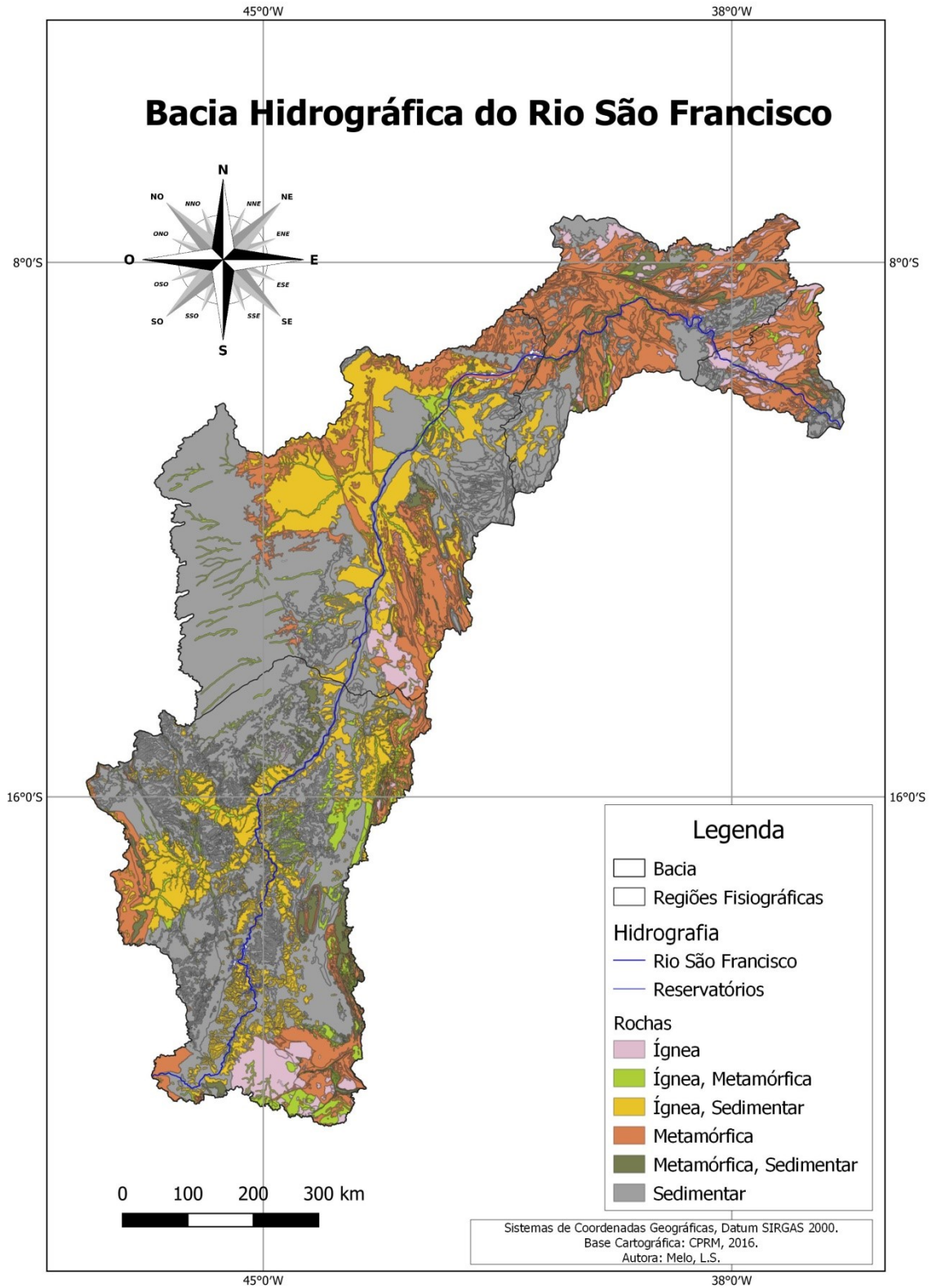
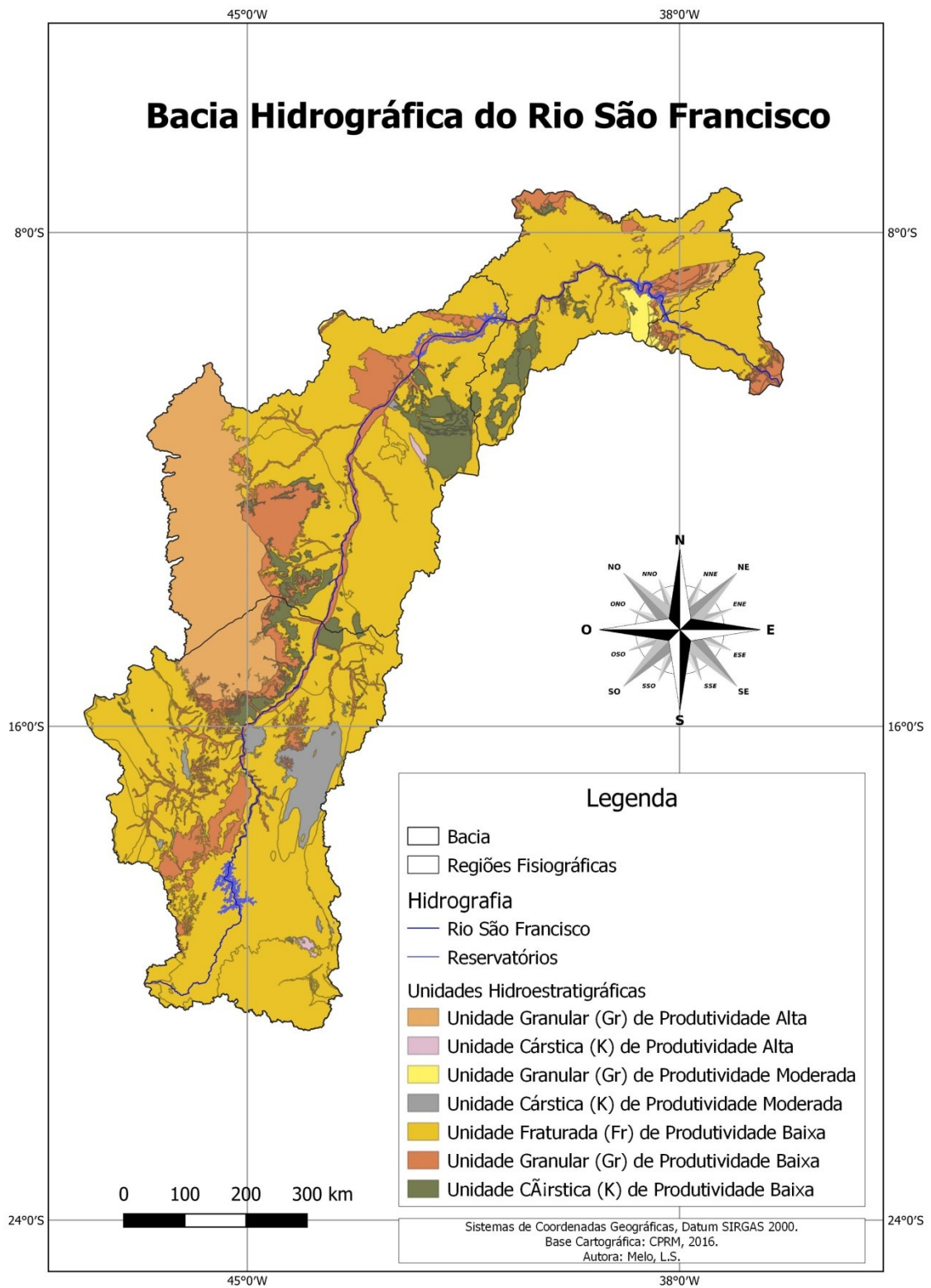


Figura 4.11 – Unidades hidroestratigráficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Para facilitar o entendimento das diferenças físicas que ocorrem ao longo da bacia hidrográfica do rio São Francisco, na Tabela 4.4 é apresentado um resumo das principais características de cada um dos trechos fisiográficos.

Tabela 4.4 - Síntese das características físicas na bacia do rio São Francisco

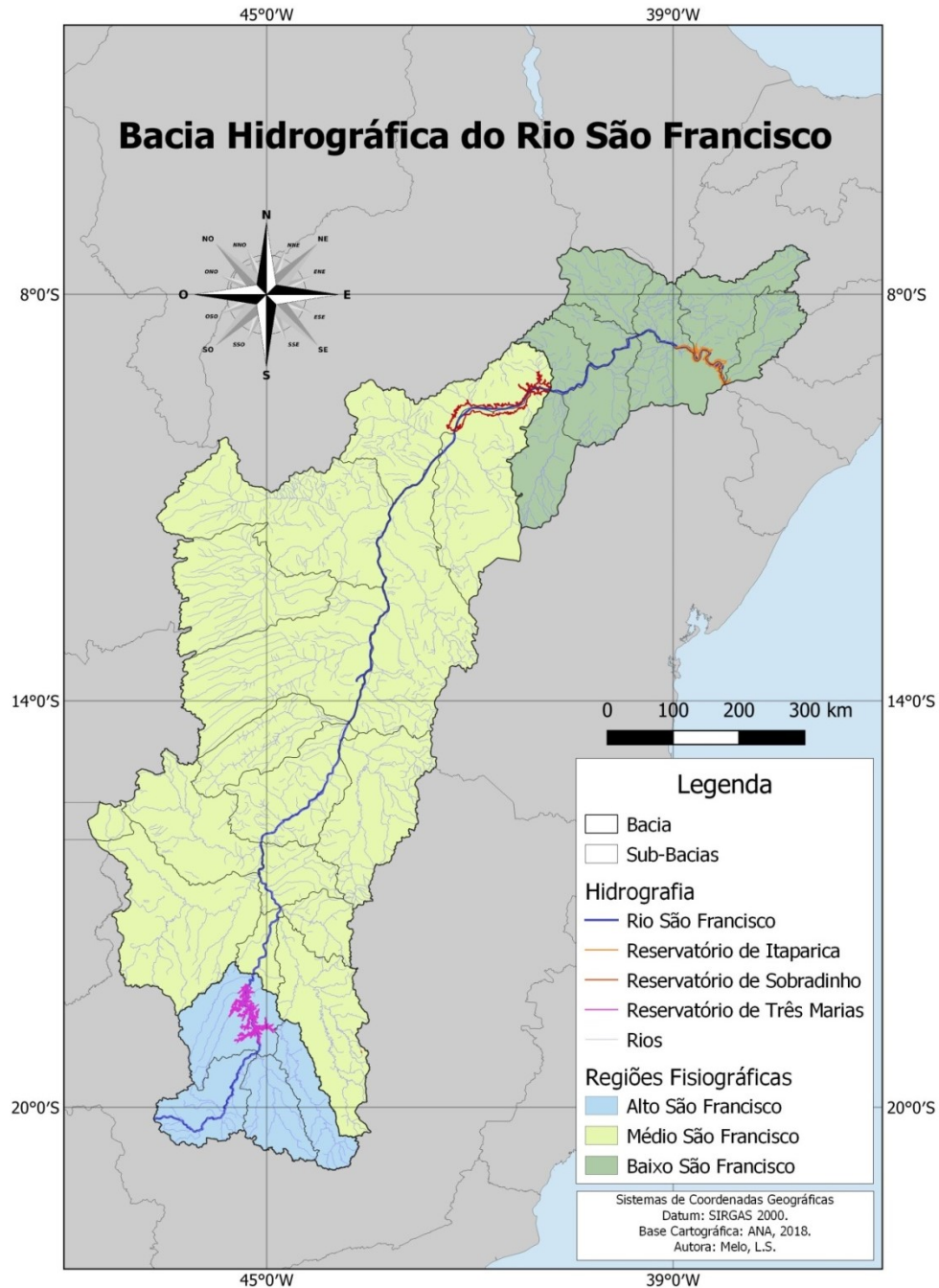
Características	Região Fisiográfica			
	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Clima Predominante (Classificação de Köppen)	Aw (quente e úmido, com chuvas de verão).	Aw (quente e úmido), com variação climática BShw (semiárido)	BShw (semiárido)	As (quente e úmido, com chuvas de inverno). Zonas a noroeste com características climáticas BShw (semiárido com curta estação chuvosa no outono/inverno).
Precipitação média anual - INMET (mm)	1.295	990	583	759
Temperatura média máxima (°C)	29	31,2	30,9	31,2
Temperatura média mínima (°C)	16	18,6	20,2	20,8
Evaporação média anual (mm/dia)	3,8	5,3	6,9	5,1
Vazão média anual máxima (m³/s)	Pirapora 1.303 em fevereiro	Juazeiro 4.393 em fevereiro	Pão de açúcar 4.660 em fevereiro	Foz 4.999 em março
Vazão média anual mínima (m³/s)	Pirapora 637 em agosto	Juazeiro 1.419 em setembro	Pão de açúcar 1.507 em setembro	Foz 1.461 em setembro
Geologia	45% da região é ocupada por terrenos sedimentares e metamórficos do Neoproterozóico. Sobre os terrenos mais antigos assenta uma cobertura sedimentar Cenozóica (18% da região).	Distribuição relativamente equitativa entre terrenos do Neoproterozóico (24%), Cenozóico (32%) e Mesozóico (26%). O Grupo Urucuia (arenitos, arenitos conglomeráticos e pelitos) ocupa 24% da região.	Predominam os terrenos do Proterozóico, em particular os do Neoproterozóico (29% da região). Abrange terrenos de importantes bacias sedimentares: Araripe, Tucano e Jatobá	Afloram as rochas mais antigas da bacia. Os terrenos do Neoproterozóico ocupam a maior área da bacia (46%). Junto à costa de Alagoas e Sergipe afloram depósitos litorâneos e do tipo Barreiras.
Geomorfologia	Cerca de 46% do território é ocupado por depressões, com particular destaque para a Depressão do Alto-Médio Rio São Francisco (41% da região). 13% do território é ocupado pelo Planalto Centro Sul Mineiro.	Cerca de 25% da região abrange as Chapadas do Rio São Francisco e 30% as Depressões do Alto-Médio e do Baixo-Médio São Francisco.	Cerca de 71% do território é ocupado por depressões e patamares, destacando-se pela sua extensão o Patamar Sertanejo	Cerca de 59% do território é ocupado por depressões (Depressão do Baixo Rio São Francisco). 25% da área é ocupada pelos Tabuleiros Costeiros e dos Rios Real/Vaza-Barris.
Principais acidentes topográficos	Serras da Canastra e Espinhaço	Serra Geral de Goiás, Chapada da Diamantina, Chapadas das Mangabeiras e Serra da Tabatinga	Chapada do Araripe e Serras dos Cariris Velho e Cágados	Serras redonda e Negra
Principais bacias sedimentares	São Francisco	São Francisco e Jacaré	Araripe, Tucano e Jatobá	Costeira Alagoas e Sergipe
Solos	Latossolos, Neossolos, Cambissolos	Latossolos, Neossolos, Cambissolos	Luvissolos, Neossolos, Planossolos	Planossolos, Neossolos, Argissolos

Fonte: PBHSF (2016 – modificado)

Nos itens anteriores foi feita a descrição da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de acordo com a divisão do PBHSF em 2016. Porém, no estudo em questão não foi utilizada a divisão fisiográfica conforme apresentada anteriormente.

A divisão utilizada é baseada na localização dos grandes reservatórios da bacia (Três Marias, Sobradinho e Itaparica). Sendo assim, a bacia foi dividida em Alto São Francisco (ASF), Médio São Francisco (MSF) e Baixo São Francisco (BSF), conforme apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Divisão da bacia hidrográfica do rio São Francisco conforme a localização dos reservatórios



4.2 Metodologia

A metodologia utilizada para analisar o comportamento das vazões associando-as com as variáveis climáticas (precipitação e temperatura) e variáveis antrópicas (uso da água, agricultura e vegetação natural) proposta no presente trabalho é dividida em duas partes. A primeira etapa da metodologia foi dividida em três fases. A

primeira fase compreende a verificação dos dados e análise de comportamento e tendências nas séries de vazões médias anuais. A segunda fase dedicou-se a analisar o comportamento das variáveis climáticas utilizadas no trabalho, como precipitação, temperatura e evapotranspiração média anual. Na terceira fase foram analisados os comportamentos das variáveis relacionadas às atividades antrópicas, como uso da água, evolução da agricultura e evolução da vegetação natural. Os dados de vazão, climáticos e antrópicos foram analisados com os testes estatísticos de Mann-Kendall, Pettitt e Levene. Além dos testes estatísticos, os dados de vazão e climáticos foram analisados por meio de análise espectral via *Wavelets*.

Por fim, a segunda etapa se dedicou à quantificação dos impactos causados pela variabilidade das variáveis climáticas e antrópicas na vazão. Para decompor e quantificar o impacto individual da variabilidade climática e das atividades humanas nas vazões foi utilizado o *framework* Budyko, juntamente com o método de sensibilidade proposto por Roderick & Farquhar (2011).

4.2.1 Dados hidrológicos

4.2.1.1 Vazão

Os dados consistidos de vazão utilizados foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB), da Rede Hidro meteorológica Nacional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para a realização do estudo foram selecionadas sete estações fluviométricas (Figura 4.13), todas de responsabilidade da ANA. Essas estações foram selecionadas levando-se em consideração a consistência dos dados e o período máximo de dados disponíveis em comum entre as estações. Os dados de vazão compreenderam uma série histórica de 35 anos, entre o período de 1985 a 2019. Esse período foi utilizado como referência para a obtenção das outras variáveis a serem utilizadas nesse estudo.

Não foi possível garantir uma distribuição espacial homogênea dos postos ao longo da bacia devido aos vazios representados pela inexistência de postos e ao excesso de dados faltantes nas séries. As estações fluviométricas consideradas no presente estudo, incluindo as informações sobre localização, estão indicadas na Tabela 4.5.

Figura 4.13 – Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo da bacia hidrográfica do rio São Francisco

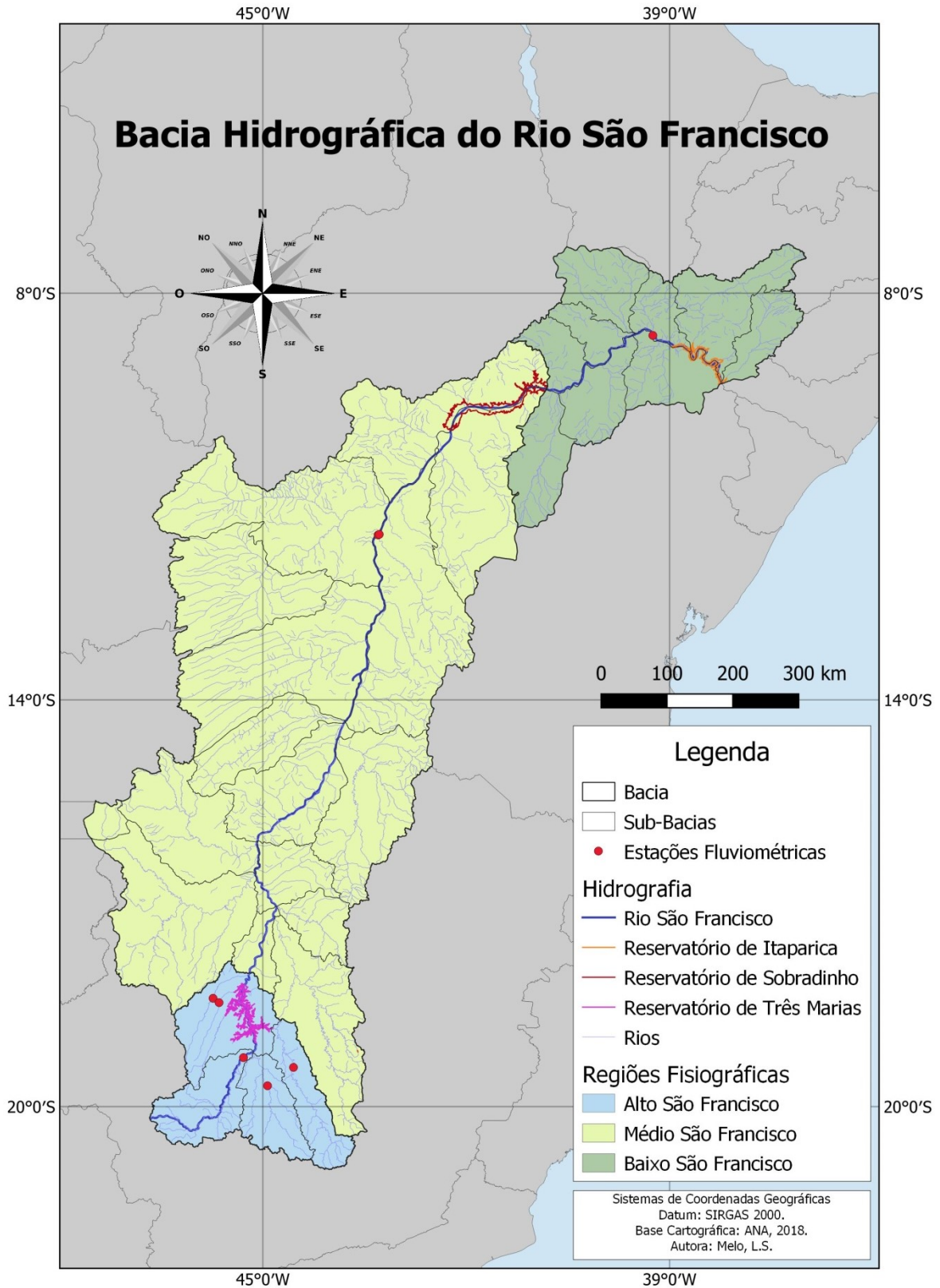


Tabela 4.5 – Estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco consideradas no trabalho

Código	Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Área da estação (km ²)	Área do trecho (km ²)	Trecho
40850000	Ponte da Taquara	-19 25 23	-44 32 52	8750		
40330000	Velho da Taipa	-19 41 38	-44 55 51	7350		
40100000	Porto das Andorinhas	-19 16 43	-45 17 09	14000	57272	ASF
40975000	Fazenda São Félix	-18 28 02	-45 38 45	970		
41075001	Porto do Passarinho	-18 24 11	-45 44 04	4130		
46360000	Morpará	-11 33 30	-43 16 57	345000	502617	MSF
48590000	Ibó	-08 37 00	-39 15 00	561000	608585	BSF

As sete estações fluviométricas apresentam características distintas quanto à utilização do solo e água, o que interfere no comportamento das vazões. As estações de Ponte de Taquara, Velho da Taipa, Porto das Andorinhas, Fazenda São Félix e Porto do Passarinho estão localizadas no trecho do Alto São Francisco. Essa região é marcada por intensa urbanização e grandes indústrias. Com a urbanização, há um aumento da impermeabilização do solo, acarretando a diminuição da infiltração e o aumento do escoamento superficial. A estação de Morpará está localizada no trecho médio da bacia do Rio São Francisco, região marcada por atividades agrícolas e pecuárias. De acordo com o PBHSF (2016), a região do médio São Francisco é responsável por 91% da retirada de água na bacia destinada à irrigação, consumindo 58,8 m³/s da água disponível. Além disso, nos últimos anos houve um aumento da pecuária na bacia, sendo que nesse trecho há um predomínio de gado bovino (77,2%) (IBGE, 2015). Por fim, a estação de Ibó está localizada no trecho do baixo São Francisco, região localizada a jusante de grandes reservatórios da bacia do rio São Francisco, e com intensas atividades agrícolas.

Para analisar o comportamento das vazões foi feita uma transformação com a finalidade de se obter a vazão média anual do trecho analisado considerando a localização das estações presentes. Para a obtenção da vazão média anual de cada trecho inicialmente foi feita a divisão da área de drenagem da região fisiográfica pela área da estação fluviométrica, posteriormente esse resultado foi multiplicado pela vazão da estação em cada ano de referência (1985-2019).

4.2.1.2 Precipitação

No presente estudo utilizou-se o grid de dados climáticos especializados provenientes da pesquisa realizada por Xavier *et al.* (2016). A base de dados de Xavier *et al.* (2016) é uma grade georreferenciada de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (Figura 4.14), com valores diários e mensais de chuvas, obtidos a partir dos melhores resultados de interpolações realizadas por métodos como Média Aritmética, Vizinho Natural, Inverso da Distância ao Quadrado (Inverse Distance Weighted, IDW) e Krigagem Ordinária.

As fontes utilizadas para a obtenção dos dados de Xavier *et al.* (2016) foram o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional das Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), provenientes de estações meteorológicas convencionais e automáticas, no período de 1980 a 2015, totalizando uma série histórica de 36 anos utilizando 406 estações na bacia do rio São Francisco.

O trabalho de Xavier *et al.* (2016) forneceu dados até 2015, porém, como os dados de vazão compreenderam o período de 1985 a 2019, foi necessário estimar os valores de precipitação para os anos de 2016 a 2019 a partir da interpolação pelo método IDW dos dados de postos pluviométricos localizados na bacia em estudo. O método IDW realiza a estimativa da variável ao longo do espaço, atribuindo pesos a cada um dos “N” postos mais próximos. O método parte do pressuposto de que os postos têm suas contribuições reduzidas à medida que se distancia da região analisada, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado. Esse modelo determinístico propõe dividir as observações pela distância em relação a um ponto alvo. Assim, esse método assume que cada ponto amostral possui influência sobre o ponto interpolado e que essa influência diminui com o aumento da distância (LUO *et al.*, 2008).

Sua expressão é dada por:

$$F(x, y) = \sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) F(x_k, y_k) \quad (4.1)$$

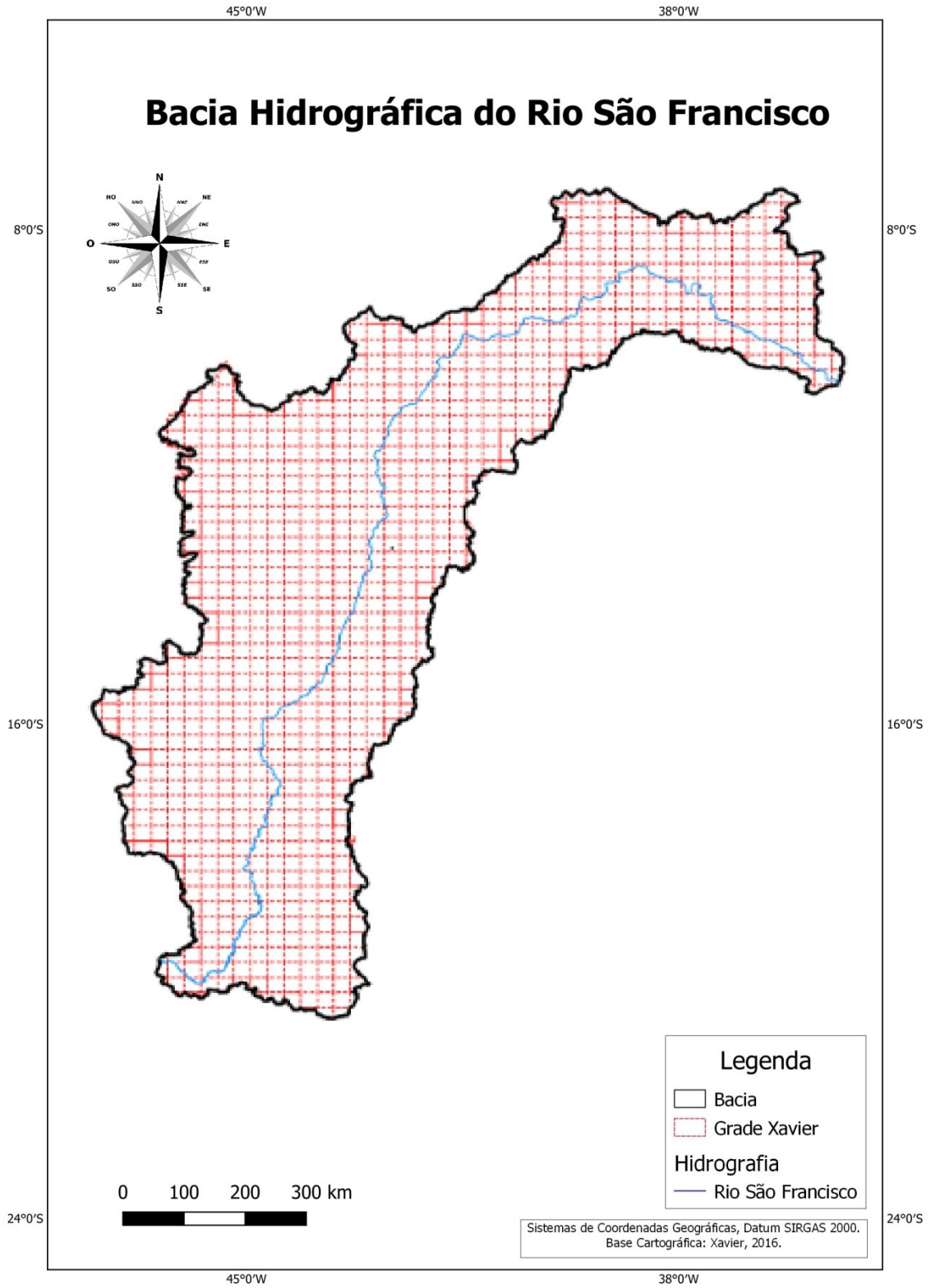
em que $F(x, y)$ é o valor interpolado para a coordenada (x, y) , N é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado, $F(x_k, y_k)$ é o valor observado no ponto k e $W(x_k, y_k)$ são os pesos atribuídos a cada uma das localidades. A expressão para determinar a função do peso é dada por:

$$W(x_k, y_k) = \frac{d_k(x, y)^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_k(x, y)^{-p}} \quad (4.2)$$

em que $d_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ é a distância entre a coordenada interpolada (x, y) e cada um dos locais observados (x_k, y_k) (a distância pode ser obtida utilizando o sistema de coordenadas esféricas) e $\sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) = 1$.

O peso no processo de interpolação através do IDW é controlado por um parâmetro “p” e, segundo Isaaks & Srivastava (1989), a precisão do método é também afetada por esse parâmetro. A escolha de tal parâmetro é feita de forma arbitrária (WEBSTER & OLIVER, 2007), mas é largamente utilizado com valores de 0 a 2 (GARDIMAN *et al.*, 2012). Quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó (MAZZINI & SCHETTINI, 2009). Após um processo manual de otimização, foi utilizado o valor $p = 1,75$.

Figura 4.14 - Grade de Xavier (2016) na região hidrográfica do São Francisco



4.2.1.3 Evapotranspiração de Referência (ET_o)

Foram utilizados dados de ET_o fornecidos por Xavier *et al.* (2016). A ET_o foi calculada conforme recomendação da Food and Agriculture Organization (FAO), usando o método de Penman-Monteith (PM) (Allen *et al.*, 1998), com base em dados de temperaturas máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento a 2 m. O método PM foi amplamente verificado e validado com base em dados de lisímetros de várias regiões climáticas (Allen *et al.*, 1994, Ventura *et al.*, 2000). Para a construção de séries temporais de ET_o, Xavier *et al.* (2016) utilizaram o método de interpolação Angular Distance Weighting (ADW).

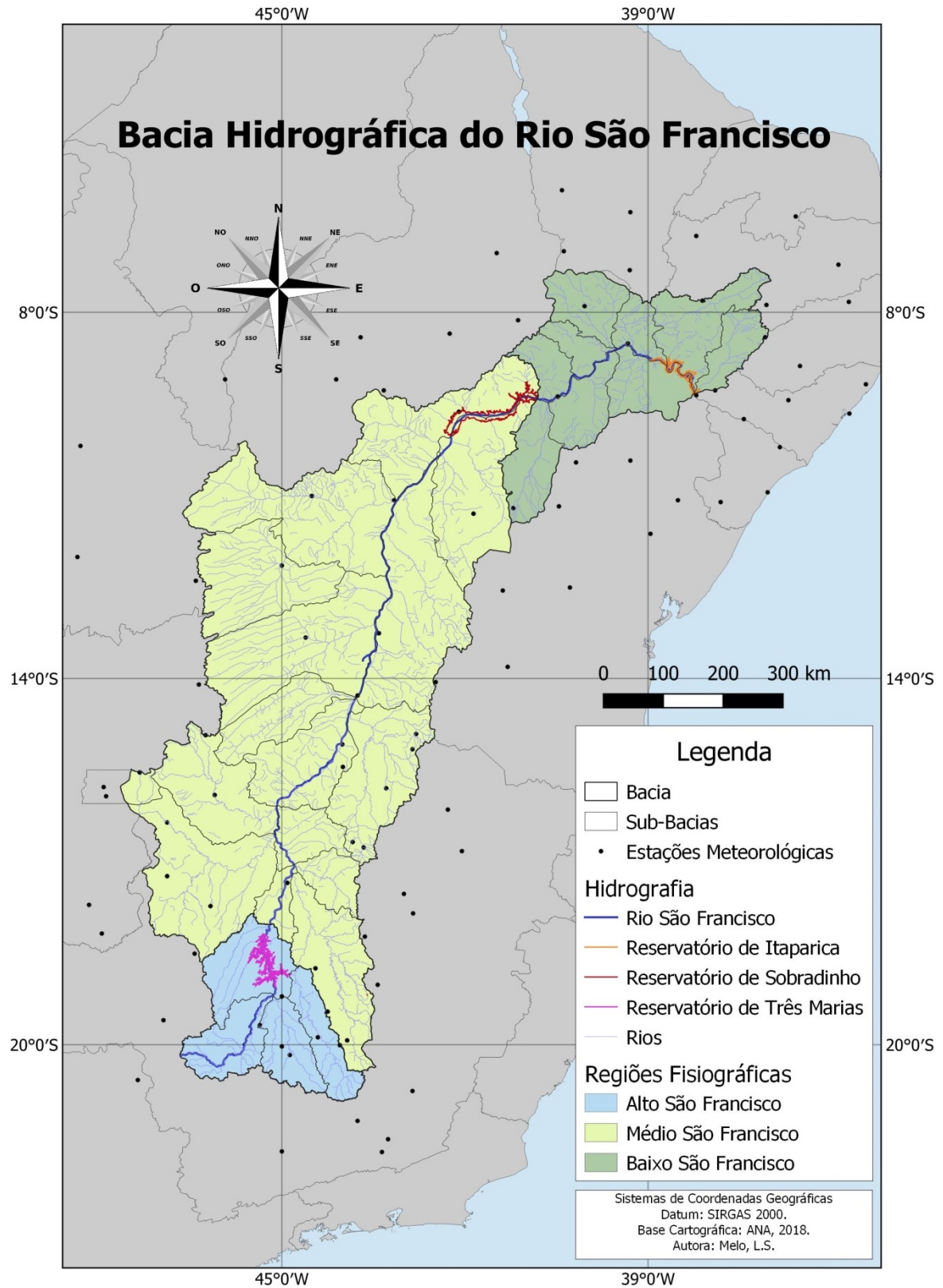
Como os dados de vazão compreendem um período de 1985 a 2019 e os dados fornecidos por Xavier *et al.* (2016) são até 2015, os dados de Evapotranspiração de Referência de 2016 a 2019 foram estimados pela temperatura máxima por meio de regressão linear simples.

4.2.1.4 Temperatura

Os dados de temperatura média anual foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram selecionadas 94 estações meteorológicas localizadas na bacia hidrográfica do rio São Francisco e as estações que estavam localizadas em um raio aproximado de 100 km da bacia. As localizações das estações meteorológicas utilizadas encontram-se na Figura 4.15.

Devido à ausência de dados e estações em operação, não foi possível obter uma espacialização homogênea dos postos meteorológicos na bacia em estudo. Assim, foi utilizada a interpolação para estimar os valores de temperatura de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos. A interpolação dos dados foi feita pelo método Inverso da Distância ao Quadrado (Inverse Distance Weighted, IDW) conforme descrito no Item 4.2.1.2.

Figura 4.15 - Localização estações meteorológicas utilizadas na bacia hidrográfica do rio São Francisco



4.2.2 Evolução do uso e ocupação do solo

Para avaliar a evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio São Francisco foram utilizados os dados disponibilizados pelo MAPBIOMAS, que surgiu em 2015 por meio da iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG (Sistema de Informação Geográfica) e ciência da computação. Esses utilizam processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google EarthEngine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (SOUZA *et al.*, 2020). Desde que foi criado, foram elaboradas seis coleções de mapas. A coleção utilizada para este estudo foi a Coleção 5, publicada em agosto de 2020. Tal coleção revisa dados dos mapas anuais de cobertura e uso do solo no Brasil, em uma série histórica, de 1985 a 2019, em escala de 30 m x 30 m.

Os mapas têm sua melhor aplicação em escalas até 1:100.000 e são gerados a partir de imagens LANDSAT 8, com resolução espacial de 30 metros. Assim, cada pixel das imagens é classificado com cinco classes principais, divididas em 27 subclasses de uso da terra (SOUZA *et al.*, 2020). No ambiente do MAPBIOMAS é possível avaliar os diversos tipos de classes da cobertura do solo, tais como floresta, formações não vegetadas, uso agropecuário, corpos hídricos e infraestrutura urbana. Neste trabalho foram utilizados os dados da classe Floresta Natural (no qual se utilizou a denominação de Vegetação Natural) e agropecuária (no qual se utilizou a denominação de Agricultura).

Os dados da região da bacia do rio São Francisco da Coleção 5 do MAPBIOMAS foram obtidos em *raster*, juntamente com a planilha eletrônica (.xlsx) contendo as referências para os códigos de legenda. Todas as análises e procedimentos em ambiente SIG foram realizadas utilizando-se o software livre QGIS 3.20.2 (Nightly).

O processamento consistiu em: 1) recorte dos 35 arquivos *raster*, para cada região fisiográfica da área de estudo; 2) conversão de *raster* para vetor em .shp; 3) correção das geometrias dos polígonos; 4) mesclagem dos códigos da legenda com os arquivos vetorizados; 5) reprojeção para Datum oficial do Sistema Geodésico

Brasileiro (SIRGAS2000), projetado em Universal Transversa de Mercator (UTM), sob o código EPSG 31982 (UTM 22 SUL); 6) cálculo da área de cada classe utilizada; e, por fim, 7) tabela de atributos do arquivo resultante, que foi tratada no Microsoft Excel e no Bloco de Notas, no formato Comma-Separated Values (CSV).

Assim, este estudo enfatiza a dinâmica de expansão das atividades agrícolas e pastoris (pastagens plantadas), e a sua relação com as perdas da floresta natural, considerando, para tal, as classes mapeadas Vegetação Natural e Agricultura. O cálculo da área de Vegetação Natural considerou o somatório das subclasses Formação Florestal e Formação Savânica, para cada ano, em cada uma das regiões fisiográficas. Para o cálculo da Agricultura foi considerado o somatório das subclasses Floresta Plantada, Pastagem, Agricultura, Lavoura Temporária, Soja, Cana, Lavoura Perene e Mosaico de Agricultura e Pastagem.

4.2.3 Evolução dos usos da água

Para avaliar a evolução do uso da água na bacia, foram utilizadas as séries históricas de usos consuntivos a montante de aproveitamentos hidrelétricos obtidas da ANA (2019). O Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil é parte de um estudo abrangente, que contemplou a definição de métodos, a construção de bases de dados e a produção, armazenamento e disponibilização de resultados de estimativas de usos consuntivos da água para todos os municípios brasileiros, acompanhando a evolução da malha territorial desde 1931 (1.365 municípios) até a atualidade (5.570 municípios). Também foram realizadas projeções das demandas até 2030, totalizando, portanto, 100 anos de investigação sobre os usos da água.

Esse documento tem como bases de dados trabalhos da ONS e da própria ANA (ONS, 2003; ONS, 2005; ANA, 2005; ANA, 2009; BRASIL, 2006). As categorias de usos da água consideradas no manual são o abastecimento humano (urbano e rural), o abastecimento animal, a indústria de transformação, a mineração, a termoeletricidade e a irrigação.

O cálculo do consumo de água para cada região fisiográfica corresponde ao somatório de todas as categorias do consumo de água de todos os municípios localizados em determinada região no respectivo ano.

Na sequência será exibida uma breve apresentação da metodologia utilizada pela ANA, para avaliar o uso da água nos setores: abastecimento humano, abastecimento animal, indústria de transformação, mineração, termoeletricidade e irrigação. Para um aprofundamento maior na metodologia de cálculo, sugere-se consultar o Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil (2019).

4.2.3.1 Abastecimento humano

O método para estimativa do abastecimento urbano e rural baseia-se na aplicação de coeficientes técnicos às contagens e estimativas populacionais. No abastecimento humano urbano os valores de retirada são estimados a partir de dois indicadores: o uso per capita (água que potencialmente chega aos usuários) e as perdas nas redes de distribuição (água perdida entre a captação e o usuário final). O uso corresponde aos volumes distribuídos que efetivamente são disponibilizados aos habitantes (volumes hidrometrados nas residências + volumes estimados para habitantes sem medição). A perda corresponde à parcela do volume de retirada que não é convertido em uso, potencialmente decorrente de falhas e vazamentos na rede de distribuição (perda física), mas que também pode incorporar parcelas de perda aparente (água usada, mas não contabilizada por falhas de medição ou ligações clandestinas).

Os indicadores municipais de uso e de perdas de água foram obtidos pelos próprios municípios, sem a necessidade de adotar coeficientes teóricos ou médios da literatura. Quanto aos coeficientes de consumo e de retorno, foi utilizado o retorno correspondendo a 80% da retirada (assim, o consumo corresponde a 20% da mesma), com base na recomendação da NBR 9649 de 11/1986 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). De posse dos indicadores de uso per capita e de perda, as vazões de consumo e retorno para o abastecimento foram calculadas (ANA, 2019).

Quanto à população rural, foi feita a estimativa com coeficientes de retirada adotados em estudos anteriores (ONS, 2003; 2005), que variam de 75 a 125 litros por habitante por dia, de acordo com a Unidade de Federação (UF). O consumo foi também estimado em 20% da retirada (80% de retorno). Em função da indisponibilidade de dados em escala nacional e da incerteza em modelos de regressão relacionados ao uso da água pelas populações, os valores per capita obtidos para o diagnóstico foram utilizados nos cenários passados e futuros.

Para a quantificação das populações municipais consideradas no cálculo da demanda de abastecimento humano por água, foram utilizados os levantamentos censitários, contagens e estimativas da população divulgadas pelo IBGE.

4.2.3.2 Abastecimento animal

O cálculo do abastecimento animal consiste na aplicação de coeficientes técnicos per capita (litros por dia por cabeça), por tipo de rebanho, ao número de cabeças registrado ou estimado no ano de referência.

Com relação ao consumo da dessedentação (necessidades fisiológicas dos animais) foi proposta a taxa de 80% adotada em outros estudos (ANA, 2017; ONS, 2003). Por consequência, o retorno via excrementos sólidos e líquidos, ou ainda via transpiração animal, é de 20%.

De posse dos coeficientes técnicos adotados e das bases de dados sobre rebanhos, as vazões de retirada, consumo e retorno para abastecimento animal foram calculadas. A vazão total para abastecimento animal no município corresponde à soma das vazões necessárias aos diferentes rebanhos. As modelagens realizadas são detalhadas em ANA (2019).

Para projeção dos rebanhos municipais (horizonte 2030), foram inicialmente determinadas as taxas médias observadas no curto (2006-2014) e médio (2000-2014) prazos nas 137 mesorregiões brasileiras, agrupadas em quatro tipologias de rebanhos (bovinos, suínos, galináceos e outros). Na definição dos períodos e em busca de informações adicionais, foram consultados documentos setoriais e governamentais (MAPA, 2011; UFMG, 2015; FIESP, 2015).

4.2.3.3 Indústria de Transformação

O método de estimativa do uso da água na indústria de transformação consiste na aplicação de coeficientes técnicos (vazões médias, por empregado, por tipologia industrial) ao número de trabalhadores de determinada tipologia em determinado município.

O método proposto baseou-se na disponibilidade de dados de número de empregados, por tipologia industrial, ao longo das décadas. Ao número de empregados é associada uma matriz de coeficientes técnicos que indica a quantidade média de água que os processos atrelados a uma tipologia industrial demandam. A demanda total no município corresponde à soma das diferentes tipologias (ANA, 2017).

Foram obtidos 101 coeficientes técnicos na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0) para 40% das classes (cerca de 85% da demanda hídrica). Nas demais classes (15% da demanda) foram obtidos coeficientes únicos para o respectivo grupo ou divisão. Os coeficientes técnicos de consumo para as tipologias industriais basearam-se em estudo do MMA (BRASIL, 2011).

Quanto às bases de dados sobre número de trabalhadores, foram obtidas no Relatório Anual de Informações Sociais – RAIS (disponibilizados pelo Ministério do Trabalho), e nos Censos Industriais e das Pesquisas Industriais Anuais – PIAs (disponibilizados pelo IBGE).

4.2.3.4 Mineração

O método de cálculo utilizado (ANA, 2019) associa a produção mineral (toneladas/ano), por tipo ou grupo de substância, com coeficientes técnicos (volume de água médio necessário para a produção de cada tonelada). Dada a importância e representatividade, foram definidos quatro agrupamentos de minérios: carvão mineral, minério de ferro, minerais metálicos não-ferrosos e minerais não-metálicos.

Os dados das séries históricas de volume da produção mineral foram obtidos do MineralData, mantido pelo Centro de Tecnologia Mineral, da Pesquisa Industrial

Anual – PIA (IBGE, 2016b), e, no caso do minério de ferro, foram obtidas do Balanço Mineral Brasileiro (DNPM).

Os coeficientes técnicos de retirada e de consumo utilizados para a estimativa das demandas hídricas do setor mineral foram baseados no estudo realizado pelo MMA (BRASIL, 2011). Há uma grande variação nos valores de consumo médio, 8,6% da retirada (metais preciosos) e 85% (alumínio).

Com as informações de produção mineral (tonelada por classe mineral) e os coeficientes técnicos adotados (m^3 de água por tonelada), as vazões de retirada (Q_{Min}), consumo e retorno foram calculadas (ANA, 2019).

4.2.3.5 Termoeletricidade

O método para estimativa do setor termelétrico consiste na aplicação de coeficientes técnicos (litros por energia gerada) às séries de geração (energia efetivamente gerada) ou, na ausência dessa informação, ao potencial de geração.

Os coeficientes são agrupados em quatro categorias (Rankine, ciclo aberto, combinado e motor a combustão), com a associação entre a tecnologia de conversão do calor em energia elétrica (ciclo termodinâmico) e o sistema de resfriamento de cada UTE.

As informações características de cada UTE para aplicação dos coeficientes técnicos (ciclo termodinâmico e sistema de resfriamento) foram obtidas diretamente do ONS e de publicações específicas, especialmente do IEMA (2016). Informações do sistema de resfriamento de UTEs que operam com carvão mineral também foram obtidas em Arroyo (2012). Para as UTEs a gás natural o ciclo termodinâmico consta no Plano Nacional de Energia 2030 (Brasil, 2007).

Os coeficientes técnicos adotados foram obtidos pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2016), com base em trabalhos de Stillwell *et al.* (2011) e Delgado & Herzog (2012). Foram consideradas eficiências de 50% para o ciclo combinado e 34% para o ciclo Rankine.

As séries médias mensais de geração (2000-2017) das UTEs operadas de forma centralizada foram obtidas em consulta direta ao ONS. Essas UTEs concentram 70% da potência outorgada e apresentam grandes variabilidades anual e intranual de geração, em função do acionamento variável, como fonte complementar à hidroeletricidade. Em anos sem informação ou com falhas nos dados, foi considerada a média mensal de geração de cada UTE, a partir da série disponível. Para as demais usinas, sem séries de geração disponíveis, foi considerada uma geração constante correspondente à potência outorgada.

Com a preparação da base de dados, aliada ao conhecimento do ciclo termodinâmico e do sistema de resfriamento associado a cada UTE, foram aplicados coeficientes técnicos necessários para a estimativa das vazões de retirada, consumo e retorno.

4.2.3.6 Agricultura irrigada

O método de cálculo da demanda de água baseia-se no balanço hídrico nas áreas irrigadas, atribuindo à irrigação a fração de água necessária às culturas e não suprida por fontes naturais (chuva e solo). Esse tipo de cálculo requer três grupos de informações: climáticas, culturas (evapotranspiração real e a precipitação efetiva) e sistemas de irrigação (eficiência do uso da água).

Para a determinação das séries de precipitação média mensal foram utilizados os dados de 10.083 estações, provenientes da rede de estações do Banco de Dados de Informações Hidrológicas (Hidro/ANA). Para cálculo da irrigação, a precipitação efetiva corresponde à parcela da precipitação total efetivamente utilizada pela cultura para atender as suas necessidades evapotranspirométricas. A precipitação efetiva é estimada em função do armazenamento de água no solo, da evapotranspiração da cultura e da precipitação, com base em estudo conduzido pelo USDA (1970).

Para a determinação da evapotranspiração real da cultura, foram calculadas a evapotranspiração de referência (ou potencial) e a evapotranspiração potencial da cultura. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) foi obtida pelo método

Penman-Monteith-FAO, descrito em Allen *et al.* (1998). As variáveis climatológicas foram obtidas das 524 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015). A evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) depende da ET_o e dos valores de coeficientes de cultura das diferentes fases de desenvolvimento de cada cultura, estando esses disponíveis em Allen *et al.* (1998). A evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}) foi calculada a partir da evapotranspiração potencial (ET_{pc}) e do coeficiente de umidade do solo (K_s), sendo que o valor de K_s considerado corresponde à média entre o momento em que o solo se encontra próximo à capacidade de campo e o limite de depleção de água.

As séries anuais (áreas irrigadas) municipais foram obtidas nos Censos Agropecuários realizados pelo IBGE e no Atlas Irrigação (ANA, 2017). O percentual de cada cultura no município foi obtido do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2009) e de levantamentos mais recentes: para a cana-de-açúcar e o arroz inundado (ANA, 2017).

Em relação aos sistemas de irrigação, esses determinam o potencial de eficiência do uso da água e, portanto, as parcelas de perdas (água retirada não aproveitada pelas plantas). Para cada cultura, em cada município, foi associado um sistema preponderante de irrigação, adotando-se os valores de referência, com base no Censo Agropecuário 2006 do IBGE.

O método detalhado anteriormente é empregado para todas as culturas, exceto para a cana-de-açúcar e o arroz inundado, que apresentam características especiais de manejo do uso da água não representadas adequadamente pelo método geral.

A cultura da cana-de-açúcar é caracterizada como baixo consumidor de água por unidade de área, mas de grande relevância devido à larga extensão em que ocorre, o que pode alterar o balanço hídrico em escala local e regional. Assim, foram adotadas três formas de manejo da cultura, sendo realizadas estimativas distintas: irrigação plena, irrigação suplementar e irrigação por salvamento (ANA, 2017).

O arroz cultivado sob inundações possui metodologia desenvolvida para dois sistemas de cultivo: o sistema convencional e o pré-germinado, cujos períodos e

fórmulas de cálculo são detalhados em ANA (2019). Nesse cultivo são consideradas, além das vazões de retirada (captada nos corpos hídricos) e de retorno (água que retorna aos mananciais), duas classes de consumo: o consumo efetivo, que se refere ao que é consumido pela lavoura durante o período de irrigação; e a vazão de consumo, dada pela diferença entre a retirada e o retorno em base mensal.

As vazões estimadas para cada município (retirada, consumo e retorno) correspondem ao somatório das vazões estimadas para cada cultura, considerando os procedimentos de cálculo apresentados anteriormente para todas as culturas, assim como as especificidades da cana-de-açúcar e do arroz inundado.

4.2.4 Análises das séries temporais

Foram analisados os comportamentos das vazões, precipitações, evapotranspiração, temperatura, área de agricultura, área de vegetação natural e usos da água da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Todos os dados foram agrupados em médias ou acumulados anuais.

Para as atividades antrópicas (uso da água e uso do solo) foram considerados a área incremental das regiões fisiográficas, isso é, os dados da região do Médio São Francisco correspondem ao somatório dos dados do Alto e Médio São Francisco, já os dados da região do Baixo São Francisco são o resultado do somatório do Alto, Médio e Baixo São Francisco.

Para avaliar o comportamento e identificar possíveis tendências nas séries de vazão, precipitação, temperatura, evapotranspiração, agricultura, vegetação natural e usos da água, foram utilizados três testes estatísticos não paramétricos, quais sejam, o teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945), o teste de Pettitt (PETTIT, 1979) e o teste de Levene (LEVENE, 1960). Esses testes visam avaliar, respectivamente, a existência de tendências graduais nas médias populacionais, saltos nas médias populacionais e mudanças nas variâncias populacionais.

Uma análise sobre os diversos estudos (AHMAD *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2016; LEE & KIM 2017; LI *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019; KIM & YU 2019;

SHAHID *et al.*, 2020; TORABI *et al.*, 2020) para detecção de tendências em séries hidrológicas permite apontar os testes de hipóteses como métodos mais utilizados. Trata-se de ferramentas estatísticas empregadas para confrontar suposições acerca da população de interesse.

Para a utilização dos testes estatísticos é necessário que os dados não tenham nenhuma estrutura de correlação serial entre as observações (DINPASHOH *et al.*, 2011). Porém essa é uma condição que raramente é cumprida por processos hidrometeorológicos (HAMED, 2009). Em muitas situações, os dados observados são autocorrelacionados podendo resultar em interpretação equivocada dos resultados do teste de tendência. Segundo Von Storch (1995), quando a correlação serial está presente no conjunto de dados, ao utilizar o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) para detecção de tendências, esse indicará existência significativa de tendência com mais frequência do que o especificado pelo nível de significância. Isso leva a uma rejeição desproporcional da hipótese nula de ausência de tendência, enquanto a hipótese nula é realmente verdadeira (YUE & WANG 2002).

De acordo com Yue *et al.* (2002b), Dinpashoh *et al.* (2011) e Serinaldi & Kilsby (2015b) a técnica mais comum para remover a correlação serial de um conjunto de dados antes da utilização de um teste de tendência tem sido o *prewhitening* da série. Yue *et al.* (2002) demonstraram que a remoção da autocorrelação positiva de séries temporais por *prewhitening* removeu a tendência e, conseqüentemente, reduziu a possibilidade de rejeitar a hipótese nula quando a mesma pode ser falsa. De outra forma, a retirada da autocorrelação negativa por *prewhitening* pode elevar a tendência e leva a um aumento na possibilidade de rejeitar a hipótese nula quando a mesma pode ser verdadeira. A aplicação do teste de Mann-Kendall, sem *prewhitening*, pode erroneamente detectar a existência de uma tendência significativa devido à presença de autocorrelação (ZHANG & ZWIERS, 2004).

Quando a tendência existe em uma série temporal, o efeito da correlação serial positiva, negativa no teste Mann-Kendall depende do tamanho da amostra, magnitude da correlação serial e da magnitude da tendência. Quando o tamanho da

amostra e magnitude da tendência são grandes o suficiente, a correlação serial não afeta mais significativamente as estatísticas do teste Mann-Kendall (YUE & WANG, 2002).

Para que não seja identificada erroneamente a presença de uma tendência significativa devido à autocorrelação serial na aplicação do teste Mann-Kendall, foi feito o *prewhitening* utilizando uma forma modificada do teste como proposto por Hamed & Rao (1998). No caso dos testes de Pettitt e Levene, utilizou-se a forma modificada do método como proposto por Yue & Wang (2002) e Serinaldi & Kilsby (2015b).

Após a análise dos testes de hipóteses, foi utilizada a análise espectral (*wavelet*) para a identificação da existência de oscilações e sua localização no tempo nos dados das séries hidrológicas (SANTOS *et al.*, 2013). Segundo Barbosa *et al.* (2004), a ideia central da *wavelet*, no contexto de análises de sinais, consiste em decompor uma série temporal em diferentes níveis de resolução, processo conhecido como multirresolução. Diversos trabalhos (ANCTIL *et al.*, 2004; COULIBALY & BALDWIN *et al.*, 2005; IONITA *et al.*, 2011; SCHULTE *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018) utilizaram esse método para investigar sinais de variabilidades de diferentes frequências em séries temporais de parâmetros hidrológicos e meteorológicos. Esse método tem a capacidade de detectar componentes não-estacionários de diferentes frequências, e tem como vantagem a capacidade de mostrar quando e com que amplitude as principais variabilidades ocorreram ao longo da série temporal (TORRENCE & COMPO, 1998; GRINSTED *et al.*, 2004), não limitando-se apenas na identificação dos principais períodos (ciclos) de variabilidades de componentes estacionários.

Em meio à importância dos testes de hipóteses e da análise espectral no estudo de séries hidrológicas, a descrição das técnicas utilizadas e suas aplicações encontram-se detalhadas no Anexo I. Os testes estatísticos e a análise espectral das séries temporais foram executados no programa R (v. 3.3.1) (R CORE TEAM, 2016).

Ressalta-se que o objetivo da utilização dos testes de hipóteses e da análise espectral via *Wavelets* é descrever o comportamento estatístico das séries e não necessariamente explicar as causas desse comportamento. A compreensão do comportamento das variáveis utilizadas facilitará o entendimento do comportamento das vazões.

4.2.5 Método Budyko

Inicialmente, quatro tipos de equações do tipo Budyko foram utilizados (Tabela 3.1) neste estudo para calcular as vazões e, posteriormente, para decompor os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas nas vazões da bacia em estudo.

Para calcular os impactos dos usos da água e das mudanças climáticas sobre recursos hídricos, o parâmetro “ w ” foi calculado conforme a equação 4.6. Para tanto, foi estabelecida uma associação entre o parâmetro “ w ” nas equações do tipo Budyko e covariáveis anuais, como uso da água, uso e cobertura do solo (agricultura e vegetação natural), temperatura e precipitação média anual.

No *framework* Budyko não são consideradas as inter-relações entre os fatores climáticos e fatores antrópicos, e entre os próprios fatores antrópicos, ou seja, todos os fatores são considerados independentes entre si.

O parâmetro “ w ” será modelado dentro de um contexto Bayesiano hierárquico, tal como proposto por Zhang *et al.* (2019). A análise Bayesiana é utilizada na tentativa de quantificar as incertezas paramétricas do modelo. Modelos bayesianos hierárquicos têm sido utilizados em diversas áreas, pois são ferramentas úteis para modelar a correlação espacial e para reduzir a incerteza das interações entre covariáveis (ZHANG *et al.*, 2019; BRACKEN *et al.*, 2018). Os parâmetros do modelo espacialmente independente são estimados para cada região, a partir do seguinte modelo probabilístico.

Primeiro nível:

$$Y_t = P_t - E_t - \Delta S_t \quad (4.3)$$

$$Y_t \sim N(\mu_t, \sigma^2) \quad (4.4)$$

$$\mu_t = P_t (1 - B_k(Ep_t, P_t, w_t)) \quad (4.5)$$

$$w_t = \alpha_t + \beta_0 + \beta_1 X_{1,t}^C + \dots + \beta_k X_{k,t}^C + \beta_{k+1} X_{k+1,t}^h + \dots + \beta_m X_{m,t}^h \quad (4.6)$$

Segundo nível:

$$\boldsymbol{\beta} \sim NMV(0, 100^2 I) \quad (4.7)$$

$$\alpha \sim N(0, 100^2) \quad (4.8)$$

$$\sigma^2 \sim \text{Gamma}(0,001, 0,001) \quad (4.9)$$

em que $N(\cdot)$ representa uma distribuição gaussiana univariada, $NMV(\cdot)$ refere-se a uma distribuição gaussiana multivariada e I é a matriz identidade; μ_t e σ^2 são os parâmetros do modelo não estacionário, P_t é a precipitação anual, E_t denota a evapotranspiração, α é a interceptação do preditor linear, $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de coeficientes de regressão, $X_{i,t}^C$ são vetores de preditores climáticos e $X_{i,t}^h$ são os vetores de covariáveis das atividades antrópicas. O primeiro nível do modelo compreende a função de verossimilhança do escoamento anual Y ; a média variável no tempo da distribuição gaussiana deriva da equação de Budyko sob a suposição de que a mudança de armazenamento na escala de tempo anual é nula. O segundo nível envolve distribuições de incerteza a priori para os parâmetros do modelo. No modelo, foi assumido que não existem estruturas de dependência espacial nos dados ou coeficientes de regressão, ou seja, a inferência é realizada separadamente para cada uma das regiões fisiográficas na bacia do rio São Francisco.

Para a construção do modelo de regressão, foi considerado como covariáveis climáticas os valores anuais de precipitação e as temperaturas médias anuais.

Quanto às covariáveis antrópicas, se utilizou o uso da água e a extensão das áreas com atividades agrícolas e vegetação natural. Como o interesse é avaliar as contribuições marginais de tais covariáveis, que podem estar relacionadas a mudanças de escoamento em bases físicas, não se recorreu a técnicas de seleção de variáveis e discriminação de modelos. Foi utilizado o algoritmo Monte Carlo Cadeia de Markov (MCMC) para simular as distribuições à posteriores dos parâmetros. As simulações foram realizadas usando o amostrador de Gibbs (JAGS 4.3.0; (DENWOOD, 2016)). Foi simulada uma única cadeia com 10.050.000 amostras posteriores, das quais as primeiras 50.000 iterações foram descartadas como *burn-in*. Além disso, foi utilizada uma defasagem de 100 para remover a correlação serial das amostras, o que resultou em uma amostra de 100.000 para análises subsequentes.

Para avaliar o desempenho do modelo hierárquico, foram utilizados o erro quadrático médio (RMSE), o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970), o coeficiente de determinação (R^2), o viés percentual (PBIAS%; Gupta *et al.*, 1999) e a Eficiência Kling-Gupta (KGE; Gupta *et al.*, 2009).

4.2.6 Quantificação da variabilidade das vazões

Para separar os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas no escoamento, a quantificação da variabilidade das vazões foi feita pelo Método de Decomposição conforme descrito seção 3.4.2.

A escolha desse método tem sido amplamente utilizada na análise de atribuição das mudanças nas vazões, que, se deu pelo fato de que tanto o método de sensibilidade quanto o de decomposição geralmente produzem resultados semelhantes (WANG & HEJAZI, 2011; LIANG *et al.*, 2013).

Foram estabelecidas relações dos parâmetros com os fatores climáticos (precipitação, temperatura) e das atividades antrópicas (área de vegetação natural, área de agricultura e consumo de água).

A escolha das variáveis climáticas e antrópicas utilizadas nesse estudo se deram após intensa pesquisa na literatura, em busca de fatores que pudessem explicar o comportamento das vazões e estivessem disponíveis em escala anual no período analisado (1985-2019) na bacia em questão. O aumento do número de parâmetros também pode aumentar a incerteza dos resultados. Além disso, inúmeros autores utilizaram diferentes variáveis; assim, diversos resultados foram obtidos. Por exemplo, o estudo de Zhang *et al.* (2019) selecionou como variáveis a renda per capita para representar as atividades antrópicas, mas outros estudos usaram anomalias de temperatura da superfície (ARMAL *et al.*, 2018) e área de irrigação (JIANG *et al.*, 2015) para representar a influência das atividades humanas.

Em relação ao período considerado para análise foi determinado a partir do tamanho da série histórica de vazões (1985-2019). Na literatura não há sugestão analítica para o requisito mínimo de dados, dessa forma acredita-se que seja melhor utilizar um conjunto de dados suficientemente grandes para representar as alterações das variáveis hidrológicas (P, Ep e T), bem como as alterações em seus meios. De fato, alguns autores (KOUTSOYIANNIS & MONTANARI, 2015; ZANG *et al.*, 2019) argumentam que as características de longo prazo dos processos naturais podem não ser adequadamente compreendidas a partir das séries temporais hidrológicas geralmente curtas disponíveis. Considerando o tempo mínimo para análise usando a hipótese de Budyko, Tekleab *et al.* (2011) utilizaram apenas 9 anos de dados (1995–2004) para estudar o balanço hídrico das bacias do alto Nilo Azul. Dorneles (2021) estimou a contribuição relativa do clima e das mudanças nas características de cobertura da bacia, na variação das vazões médias anuais de longo período de 1987 a 2020, 33 anos. Zhang *et al.* (2019) utilizaram 13 anos de dados (2004 a 2016) para decompor os impactos das atividades antrópicas e das mudanças climáticas nas vazões em 31 provinciais da China, enquanto Wang e Hejazi (2011) usaram 55 anos (1948–2003) para quantificar as contribuições relativas das mudanças climáticas e das atividades antrópicas no escoamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente tópico contém os resultados das etapas metodológicas percorridas desta pesquisa, os quais estão relacionados à análise espaço-temporal das séries de vazão, das variáveis climáticas, variáveis antrópicas e associação do comportamento das vazões a essas variáveis. No item 5.1 serão apresentados os resultados dos testes estatísticos e do comportamento das vazões. Na sequência, no item 5.2, serão exibidos os resultados das estatísticas das séries de precipitação. No item 5.3 são apresentados os resultados da evapotranspiração. Os resultados de temperatura são apresentados no item 5.4. No item 5.5 são apresentados os resultados de uso e cobertura do solo. Os resultados dos dados de uso da água são exibidos no item 5.6. Por fim, no item 5.7 são apresentados os resultados obtidos do *framework* Budyko e no item 5.8 são exibidos os resultados do método de decomposição.

É importante ressaltar que para as atividades antrópicas (uso da água e uso do solo) foram consideradas as áreas incrementais das regiões fisiográficas, isso é, os dados da região do Médio São Francisco correspondem ao somatório dos dados do Alto e Médio São Francisco, já os dados da região do Baixo São Francisco são o resultado do somatório do Alto, Médio e Baixo São Francisco.

5.1 Comportamento das vazões

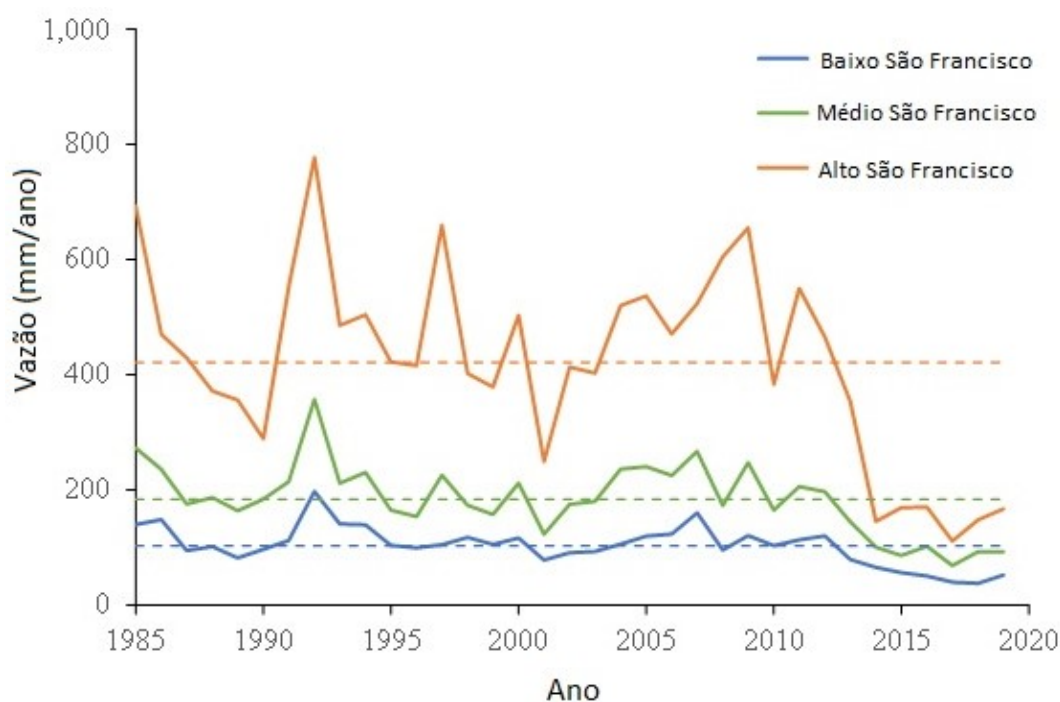
Nesta seção é analisada a variabilidade espaço-temporal do regime da vazão média anual da bacia do rio São Francisco no período de 1985 a 2019. Inicialmente realizou-se a análise dos dados com o objetivo de avaliar a variação da vazão média anual. Foram calculadas as estatísticas mínimo, máximo, média, mediana e desvio padrão. Os resultados das estatísticas descritivas para as estações fluviométricas analisadas são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Estatísticas descritivas da vazão média anual para as três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Região Fisiográfica	Mínimo (m ³ /s)	Máximo (m ³ /s)	Média (m ³ /s)	Mediana	Desvio Padrão (m ³ /s)
Alto SF	201,6	1411,3	765,5	766,7	301,77
Médio SF	1091	5696	2933	2876	977,02
Baixo SF	729	3804	1989	2004	656,87

A fim de se identificar possíveis alterações ou mudanças no comportamento das séries de vazão média anual, realizou-se a análise gráfica das séries temporais (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Comportamento da vazão média anual nos trechos analisados da Bacia hidrográfica do rio São Francisco



Apesar de as regiões fisiográficas apresentarem características distintas, as vazões médias anuais analisadas apresentam um comportamento semelhante (Figura 5.1). Há evidências de que houve uma redução das vazões em todas as regiões fisiográficas analisadas, fato que foi corroborado pelos resultados dos testes de hipóteses aplicados a essas séries, pelo menos ao nível de significância de 10% (Tabela 5.2). Apesar de o teste de Pettitt identificar um salto nas séries no ano de 2013, a partir da Figura 5.1 é possível identificar uma redução nas vazões com mudança de comportamento próximo do ano de 2000. O período entre 1999 e 2001 foi crítico na Bacia do São Francisco, em termos de disponibilidade de água,

coincidindo com a crise energética que o país enfrentou e que culminou com o racionamento de energia durante o ano de 2001; devido a isso, as médias históricas foram mudadas nesse período (PBHSF, 2016).

As mudanças das vazões, evidenciadas na Figura 5.1 e corroboradas pelos testes de hipóteses na Tabela 5.2, podem estar relacionadas com o uso e ocupação do solo e usos da água na bacia, fator que interfere no processo de escoamento superficial e escoamento de base. Os resultados encontrados foram semelhantes aos apresentados por Milliman *et al.* (2008). Os autores constataram que houve redução de aproximadamente 20% nas vazões médias anuais do rio São Francisco entre 1951 e 2000, em função das mudanças no clima global e de atividades antrópicas desenvolvidas na bacia. Valença *et al.* (2015) também identificaram redução nas vazões incrementais nos trechos São Francisco/Carinhanha e São Francisco/ Morpará (Médio São Francisco).

Tabela 5.2 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) para os trechos analisados de vazão média anual da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Região Fisiográfica	<i>p</i> -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann- Kendall	Levene
Alto SF	0,0936	0,0911	0,4340
Médio SF	0,0936	0,0448	0,6300
Baixo SF	0,0936	0,0951	0,6921

A bacia em estudo tem o predomínio de atividades agrícolas e pecuárias (PBHSF, 2016). Possivelmente, o aumento das áreas agricultáveis e aumento do consumo da água para irrigação e pecuária podem ter influência na redução das vazões. Além do uso do solo, a implantação de reservatórios na bacia se configura como um dos fatores que podem influenciar nas variâncias das vazões. Isso ocorre, pois os reservatórios exercem um efeito regularizador das vazões.

A transformada *wavelet* foi utilizada para identificar a presença de ciclos nas séries de vazão média anual da bacia do rio São Francisco. Os escalogramas que representam a potência espectral *wavelet* (WPS) são apresentados da Figura 5.2 à Figura 5.4. Os escalogramas indicam a escala de periodicidades (anos), ou ciclos, no eixo das ordenadas, em função do tempo, representado nas abcissas. As

potências mais elevadas (na WPS) são representadas pelas cores quentes (vermelho), enquanto as de menor representatividade têm cores frias (azul). As potências que apresentam significância estatística são circundadas por um contorno preto e espesso, e representam as periodicidades dominantes (na WPS), em um nível de confiança de 95%. A região curva em forma de “U” invertido representa o cone de influência (COI), cuja área interna resguarda as potências *wavelet* do efeito de borda.

Figura 5.2 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Alto da bacia hidrográfica do rio São Francisco

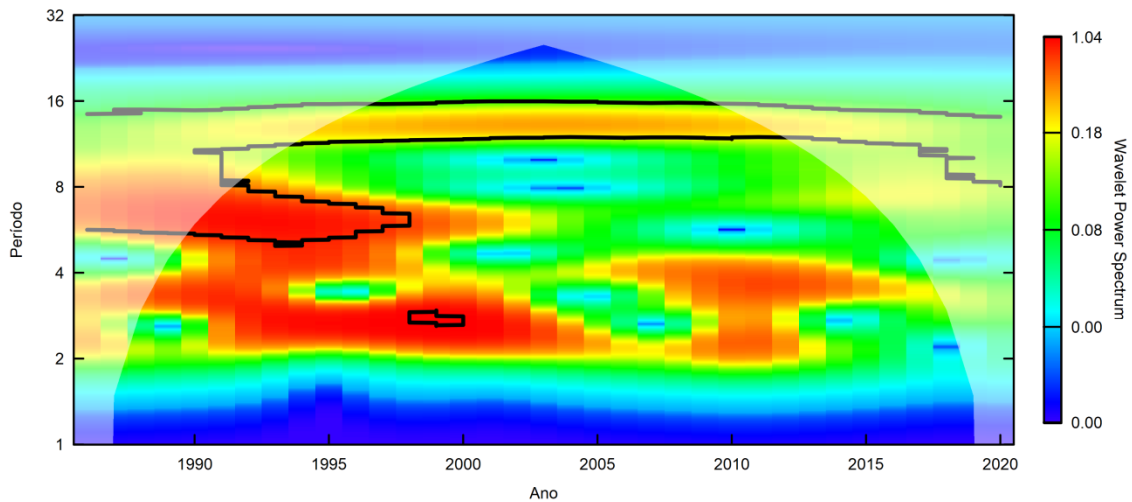


Figura 5.3 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Médio da bacia hidrográfica do rio São Francisco

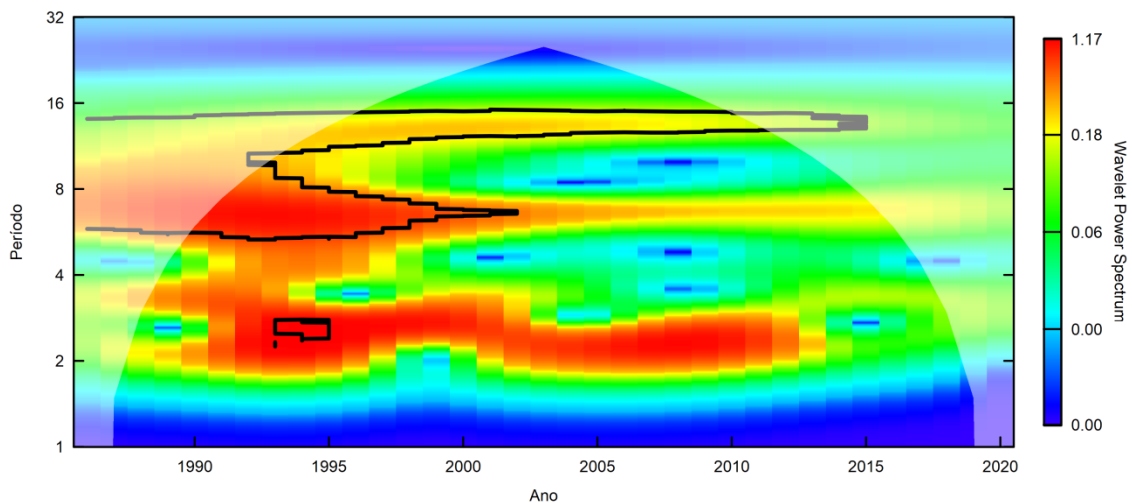
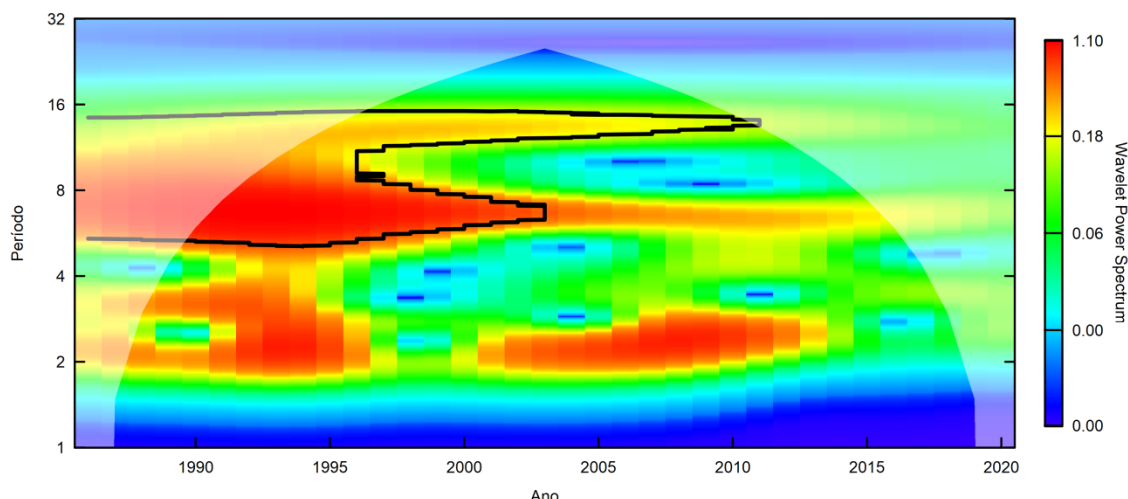


Figura 5.4 – Potência espectral da vazão média anual do trecho Baixo da bacia hidrográfica do rio São Francisco



A similaridade entre as periodicidades dominantes entre todas as regiões fisiográficas analisadas é notável. Em todas as regiões foi possível identificar a presença de pelo menos dois ciclos significativos dentro do cone de influência. Os ciclos presentes na região do Alto São Francisco (Figura 5.2) e Médio São Francisco (Figura 5.3) diferem ligeiramente do Baixo São Francisco (Figura 5.4), pois foram identificados um ciclo de grande duração, em torno de 10 e 16 anos, entre os anos de 1993 e 2014, um ciclo intermediário de 5 e 8 anos, entre 1989 e 2003, e, por fim, um pequeno ciclo de 2 e 3 anos, entre 1993 e 2000. No Baixo São Francisco (Figura 5.4) foram identificados apenas 2 ciclos, um ciclo grande entre 10 e 16 anos, entre os anos de 1994 e 2011, e um ciclo intermediário entre 5 e 9 anos, durante 1989 e 2003.

Os ciclos identificados em torno de 10 e 16 anos entre os anos de 1993 e 2014 ocorrem ao longo de praticamente todo o período de observação em todas as regiões analisadas, porém, depois do ano de 2002, percebe-se o enfraquecimento da potência espectral. Além disso, todos os ciclos identificados parecem enfraquecer em anos mais recentes. A partir das *wavelets* obtiveram-se resultados que indicaram que a variabilidade da vazão na região é definida por multi-escalas temporais localizadas em certos intervalos de tempo.

5.2 Comportamento da precipitação

Nesta seção é analisado o comportamento espaço-temporal da precipitação média anual das três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no período de 1985 a 2019, a fim de associar à precipitação o comportamento das vazões apresentados anteriormente.

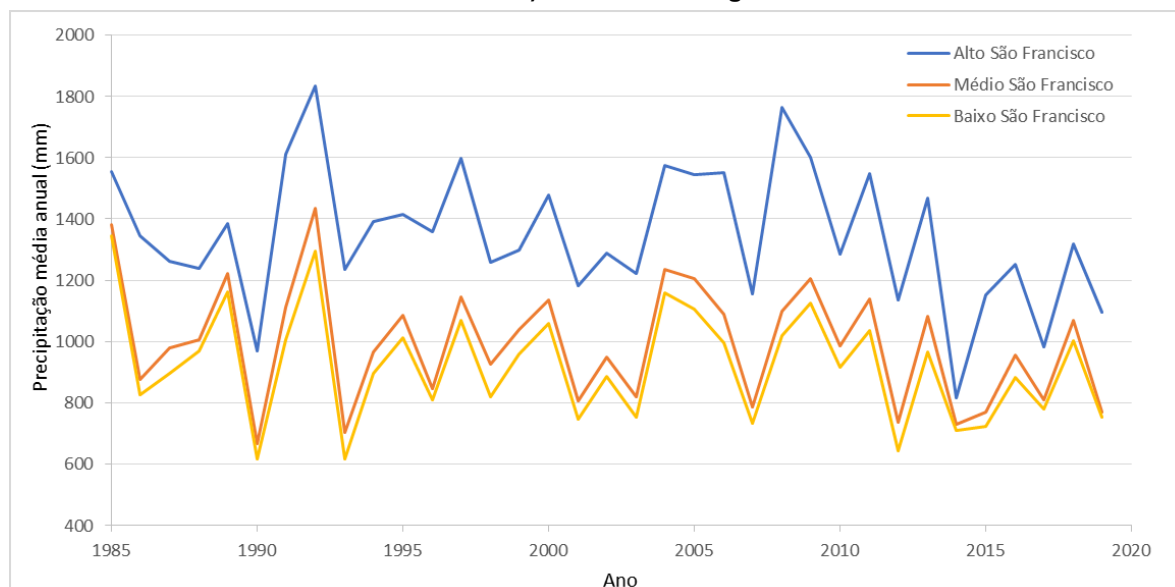
Inicialmente realizou-se uma análise dos dados com o objetivo de avaliar a variação da precipitação média anual, na qual foram calculados as estatísticas descritivas. Os resultados das estatísticas descritivas para as três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco estão listadas na Tabela 5.3. Os menores valores das estatísticas descritivas são encontrados no trecho Baixo da bacia, já os maiores valores são encontrados no Alto São Francisco.

Tabela 5.3 – Estatísticas descritivas da precipitação média anual para as regiões fisiográficas (Alto São Francisco, Médio São Francisco, e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do Rio São Francisco

Região Fisiográfica	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Média (mm)	Mediana	Desvio Padrão (mm)
Alto SF	815	1833	1347	1317	223,99
Médio SF	666	1435	993,5	985	194,23
Baixo SF	615	1346	922,8	916	182,63

Posteriormente à análise descritiva dos dados, realizou-se a análise gráfica das séries temporais de precipitação média anual para avaliar possíveis alterações ou mudanças no comportamento da variável (Figura 5.5).

Figura 5.5 – Comportamento da precipitação nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Não foi possível identificar um padrão de mudança para a variável em questão, o que foi sugerido pelos resultados dos testes de hipóteses (Tabela 5.4). Diferente do encontrado neste trabalho, Andrade *et al.* (2018) e Pereira *et al.* (2007) calcularam a precipitação média anual pelos métodos de Krigagem Ordinária e Polígono de Thiessen, respectivamente, e encontraram mudanças no comportamento das precipitações médias anuais na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Tabela 5.4 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) de precipitação média anual, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da bacia	p -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,1287	0,1117	0,123
Médio SF	0,3008	0,1913	0,9078
Baixo SF	0,3629	0,2062	0,7725

A mesma análise da transformada *wavelet* foi aplicada às séries de precipitação média anual para as três regiões fisiográficas da bacia (Alto, Médio e Baixo) São Francisco. Os escalogramas que representam a potência espectral *wavelet* (WPS) são exibidos nas Figura 5.6 a Figura 5.8. Foi possível observar sinais significativos em todas as regiões da bacia, entre os períodos de 2 até 6 anos. De um modo geral, em todas as regiões analisadas, os contornos significativos foram detectados entre os anos 1985 e 2015.

Figura 5.6 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco

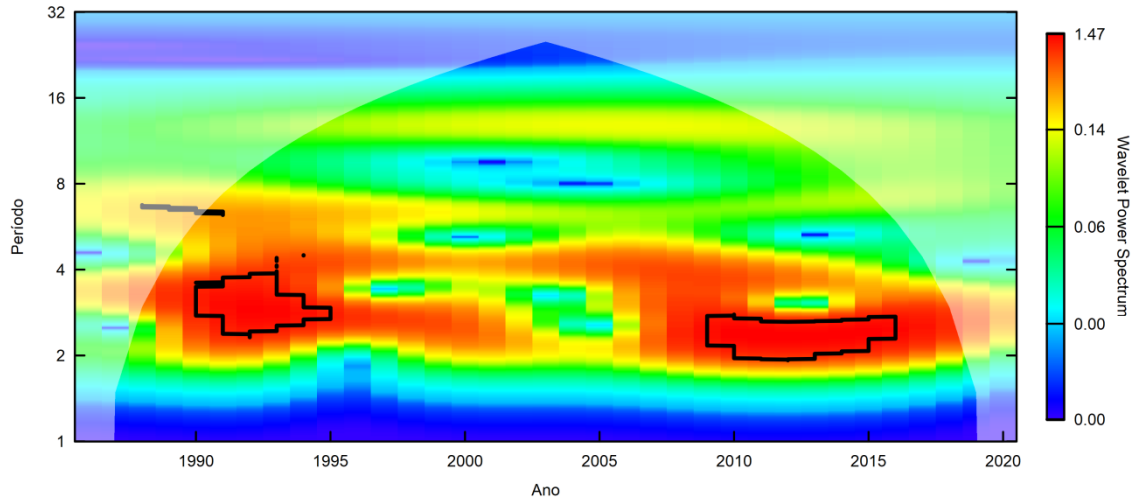


Figura 5.7 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco

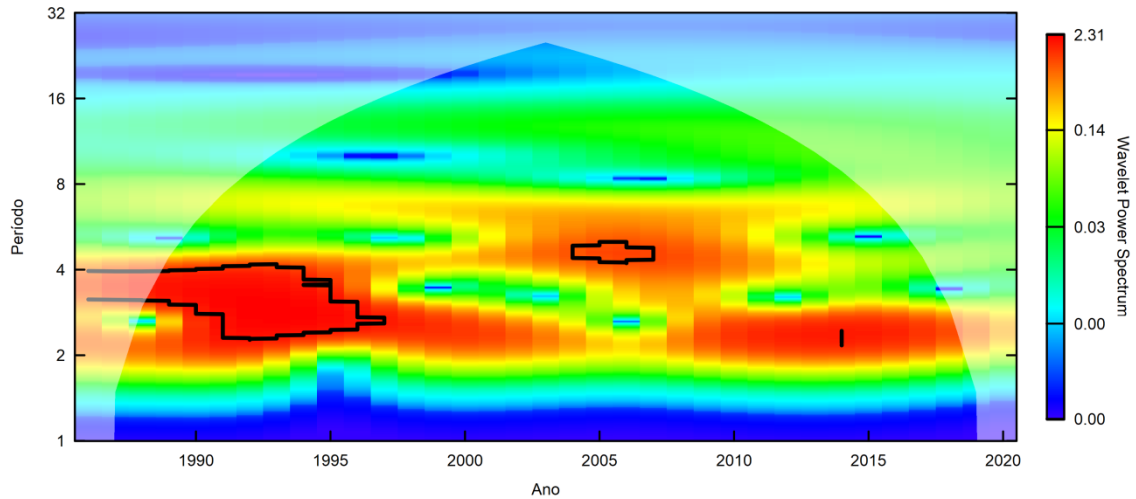
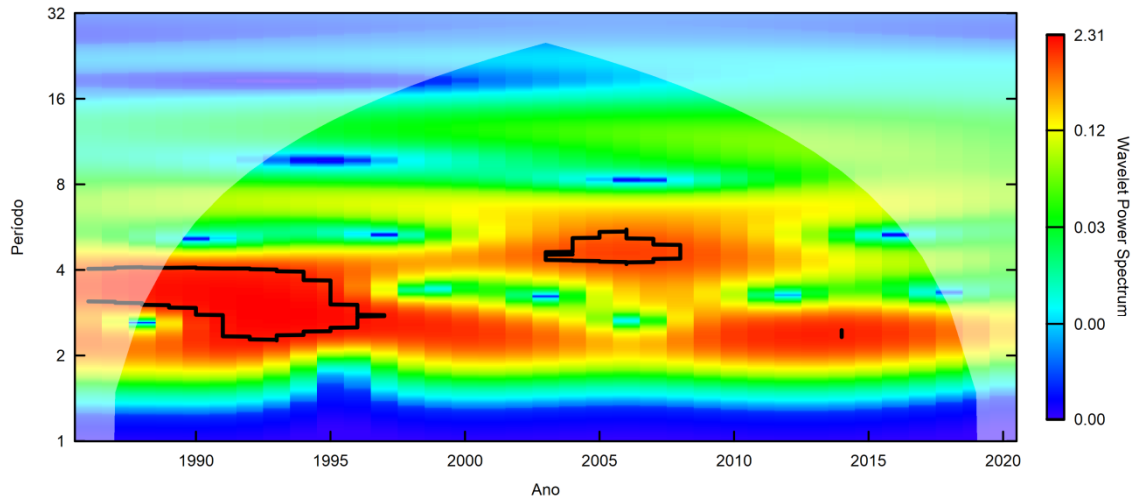


Figura 5.8 – Potência espectral da precipitação média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



No Alto São Francisco (Figura 5.6), a primeira área significativa foi observada no período de 3 e 4 anos, entre os anos de 1988 e 1994, e a segunda foi identificada nos períodos de 2 e 3 anos, entre os anos de 2008 a 2016. Percebe-se grande semelhança entre os contornos das regiões Médio (Figura 5.7) e Baixo São Francisco (Figura 5.8), sendo identificada uma região significativa nos períodos de 3 e 4 anos, entre os anos de 1985 e 1996, e outra região localizada nos períodos entre 4 e 6 anos, entre os anos de 2003 a 2007. Diferente das demais regiões fisiográficas, no trecho Alto São Francisco (Figura 5.6) os dois ciclos identificados estão totalmente inseridos dentro do cone de influência.

A partir das *wavelets* obtiveram-se resultados os quais indicaram que a variabilidade de precipitação na região é definida por multi-escalas temporais localizadas em certos intervalos de tempo. As Figura 5.6 a Figura 5.8 colocam em evidência que os períodos de maior potência se concentram entre 2 e 4 anos, sendo o período de 4 anos com mais energia. Não foi possível atribuir causas para o comportamento identificado nos dados.

5.3 Comportamento da evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração de referência obtidos por Xavier *et al.* (2016) e por regressão linear foram analisados no espaço-temporal em três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco no período de 1985 a 2019. Para analisar o comportamento da evapotranspiração, com o objetivo de associar ao comportamento das vazões apresentados anteriormente, foi feita a análise descritiva dos dados (Tabela 5.5) e posteriormente realizou-se a análise gráfica das séries temporais (Figura 5.9).

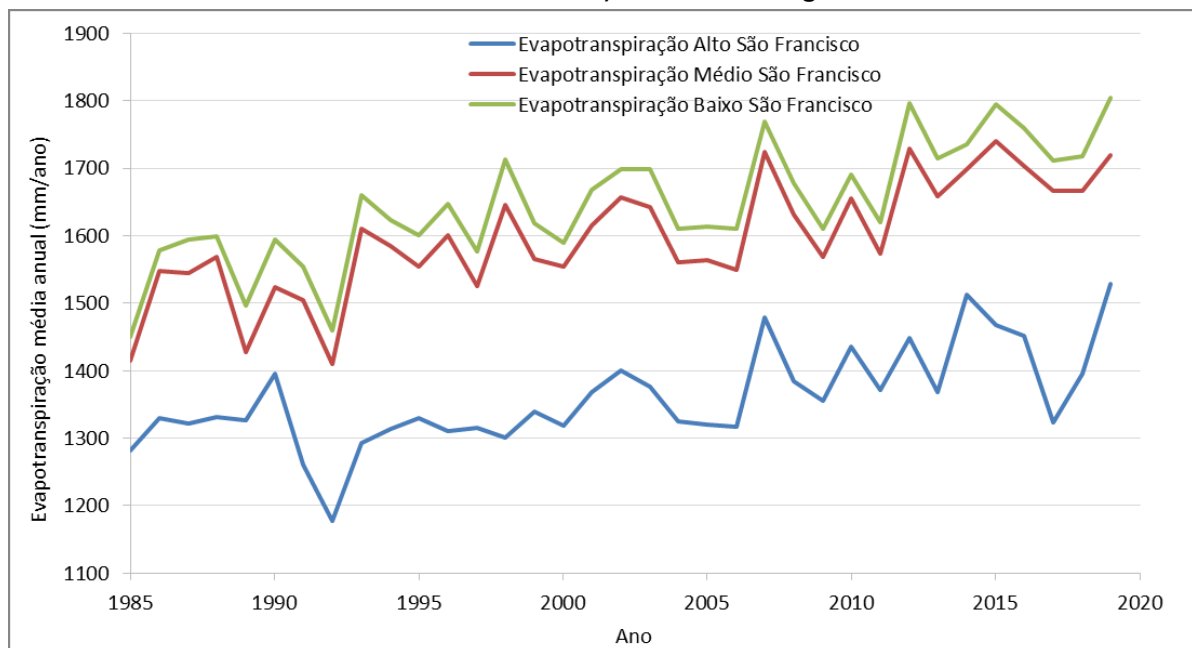
Tabela 5.5 - Estatísticas descritivas da evapotranspiração nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	Mínimo (mm/ano)	Máximo (mm/ano)	Média (mm/ano)	Mediana	Desvio Padrão (mm/ano)
Alto SF	1177	1529	1359	1332	73,2
Médio SF	1410	1741	1597	1585	85,86
Baixo SF	1450	1804	1647	1624	88,5

De uma forma geral, o comportamento apresentado nas três regiões fisiográficas analisadas são semelhantes entre si, sendo o Médio e Baixo São Francisco com um comportamento muito próximo e a região do Alto São Francisco com os menores valores apresentados quando comparado às demais regiões (Tabela 5.5 e Figura 5.9).

Possivelmente as maiores taxas de evapotranspiração potencial são encontradas no Médio e Baixo São Francisco porque elas se localizam na região do Semiárido Brasileiro, que se caracteriza, naturalmente, como de alto potencial para evaporação da água, em função da disponibilidade de energia solar e altas temperaturas. O aumento de temperatura, já seria suficiente para causar maior evaporação dos lagos, açudes e reservatórios e maior demanda evaporativa das plantas (ANA, 2010).

Figura 5.9 – Comportamento da evapotranspiração potencial nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Bosmans *et al.* (2017) destacam que atividades humanas como irrigação e construção de reservatórios podem promover um aumento evapotranspiração sobre as áreas irrigadas e áreas alagadas pelo espelho do reservatório, contribuindo para a redução da vazão.

Foi possível identificar um aumento na evapotranspiração potencial em todos os trechos analisados, resultado que também foi obtido a partir dos testes de hipóteses (Tabela 5.6). Esse aumento da evapotranspiração pode ter implicado na redução das vazões como constatado anteriormente.

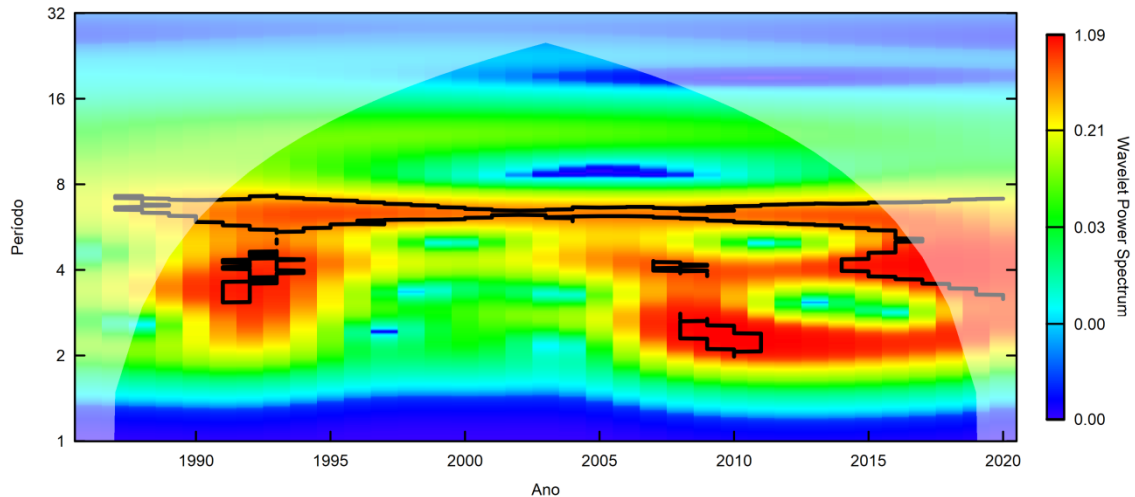
Tabela 5.6 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da evapotranspiração, para os três trechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco

Trecho da bacia	<i>p</i> -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,2306	1,5459E-06	0,9939
Médio SF	0,1738	5,3417E-07	0,3966
Baixo SF	0,1614	4,2347E-07	0,4394

Para identificar a presença de ciclos nas séries de evapotranspiração média anual foi utilizada a transformada *wavelet* nas três regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco. Os escalogramas que representam a potência espectral *wavelet* (WPS) são apresentados nas Figura 5.10 a Figura 5.12. Foi possível identificar pelo menos três ciclos significativos em todos os trechos da bacia.

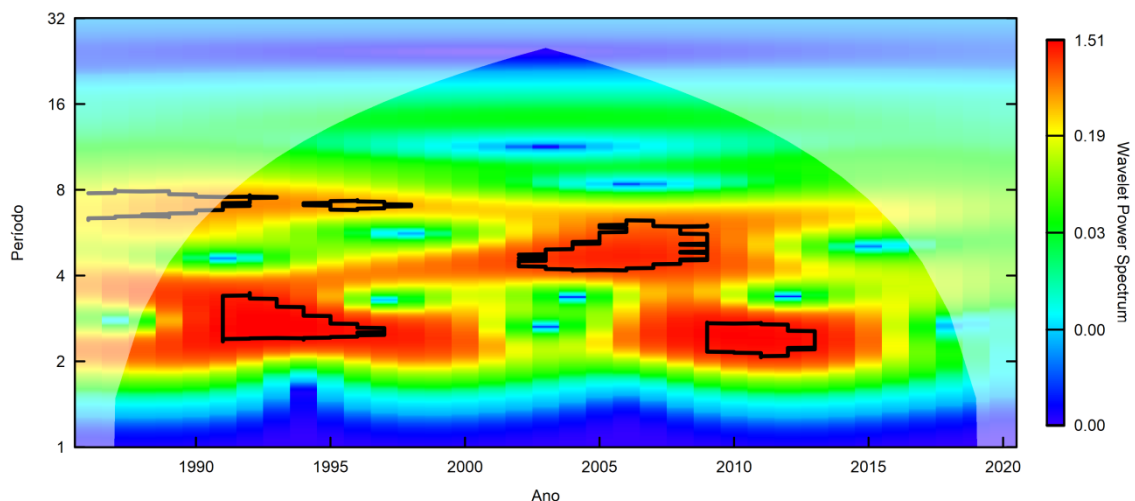
Na região do Alto São Francisco (Figura 5.10) observa-se a presença de um ciclo de grande duração no período de 6 a 8 anos entre os anos de 1990 e 2016. Também foi possível identificar outros três ciclos de curta duração, sendo um entre 1990 e 1994 no período entre 3 e 5 anos, outros dois ciclos entre os anos de 2007 e 2011, sendo um no período de 4 anos e outro no período entre 2 e 3 anos.

Figura 5.10 - Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



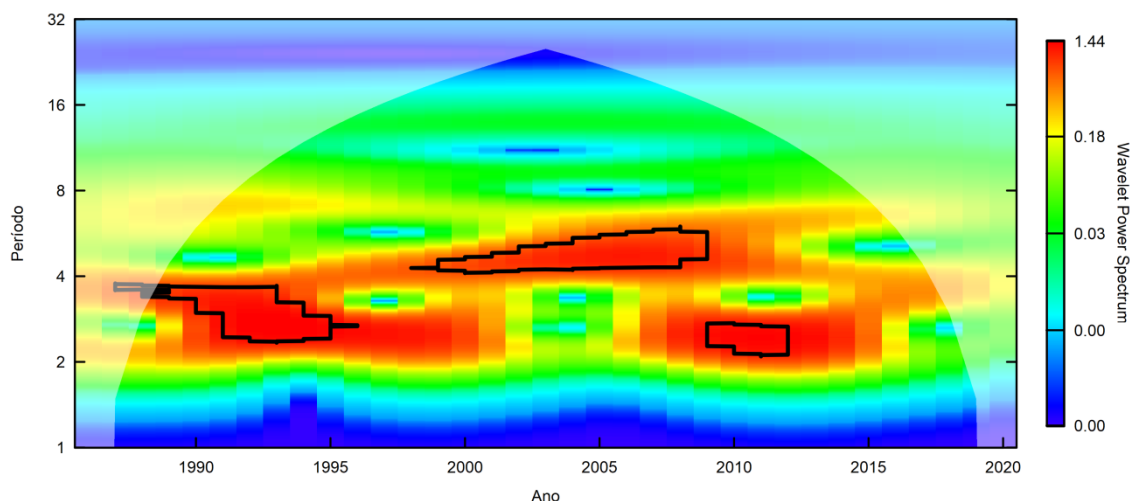
No Médio São Francisco (Figura 5.11) também foi possível identificar quatro ciclos significativos nas séries de dados. Diferente do Alto São Francisco, os ciclos encontrados nesse trecho possuem curto tempo de duração. Foram identificados um ciclo curto no período de 8 anos entre 1994 e 1996, e três outros ciclos intermediários, sendo um no período de 3 e 4 anos entre os anos de 1991 e 1996, outro entre os anos de 2001 e 2009 no período de 4 e 7 anos, e por fim, um último ciclo de período de 2 e 3 anos entre os anos de 2009 e 2013. De uma forma em geral, os ciclos nessa região fisiográfica estão localizados entre os anos de 1991 e 2013.

Figura 5.11 – Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Diferente das demais regiões, no Baixo São Francisco (Figura 5.12) foi possível identificar apenas três ciclos significativos, sendo que todos eles se encontram entre os anos de 1989 e 2012. O ciclo de maior duração foi observado entre os anos de 1999 e 2009 no período de 4 e 6 anos. O ciclo intermediário localiza-se no período de 2 e 4 anos entre os anos de 1989 e 1996. Por fim, o menor ciclo foi identificado no período de 2 e 3 anos entre os anos e 2009 e 2012.

Figura 5.12 – Potência espectral da evapotranspiração média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



A partir das Figura 5.10 a Figura 5.12 não foi possível identificar nenhum ciclo significativo acima do período de 8 anos em nenhuma região fisiográfica analisada. Percebe-se que não há uma grande semelhança entre os ciclos encontrados nas regiões analisadas. Os ciclos identificados em torno de período de 8 anos ocorrem ao longo de praticamente todo o período de observação em todas as regiões analisadas, porém, depois do ano de 2014, percebe-se o enfraquecimento da potência espectral. Além disso, todos os ciclos identificados parecem enfraquecer em anos mais recentes nas regiões do Médio e Baixo São Francisco.

5.4 Comportamento da temperatura

Os dados de temperatura média anual obtidos pela interpolação IDW dos dados de postos meteorológicos do Inmet foram analisados para entender o seu comportamento e associar ao comportamento das vazões apresentados anteriormente. A temperatura foi analisada em três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco no período de 1985 a 2019. Para entender como a

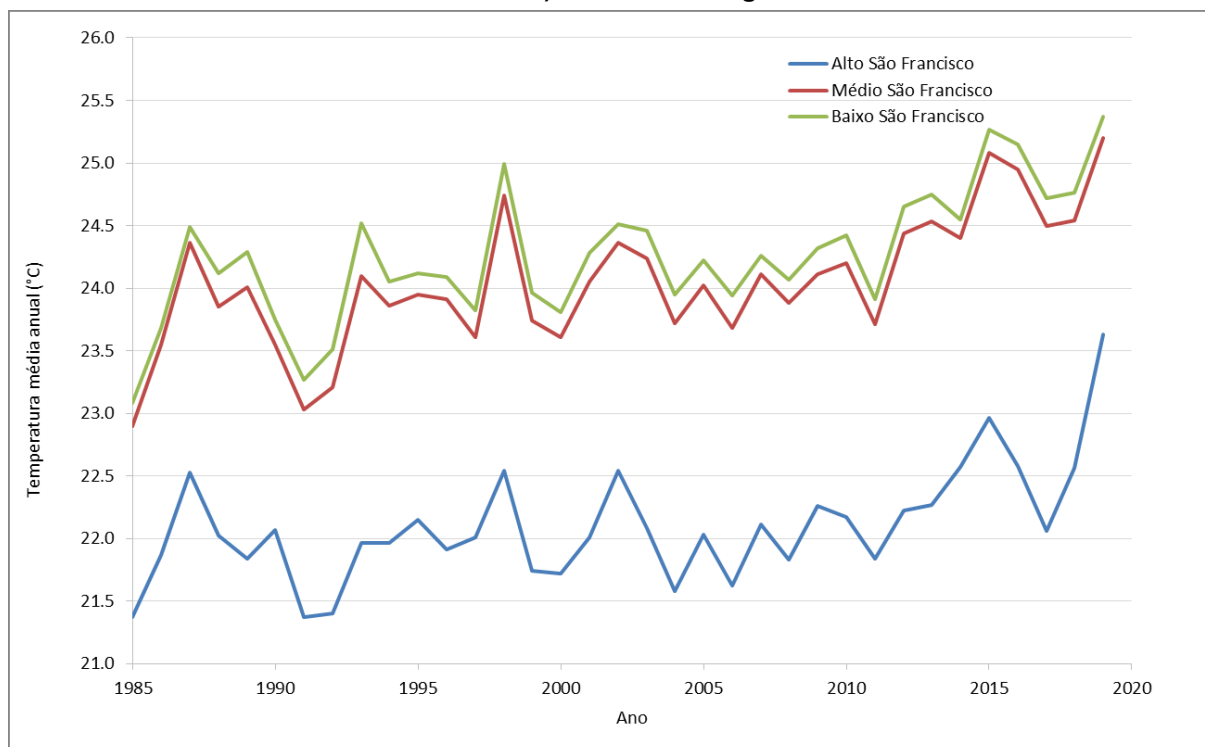
temperatura média anual se comportou na bacia em estudo, inicialmente foi feita uma análise descritiva dos dados (Tabela 5.7) para posteriormente realizar a análise gráfica (Figura 5.13).

Tabela 5.7 - Estatísticas descritivas da temperatura média anual nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Média (°C)	Mediana	Desvio Padrão (°C)
Alto SF	21,37	23,63	22,10	22,03	0,45
Médio SF	22,90	25,20	24,05	24,02	0,52
Baixo SF	23,08	25,37	24,26	24,26	0,52

A partir dos resultados obtidos percebe-se que a temperatura possui um comportamento semelhante ao da evapotranspiração média anual. Em todos os trechos analisados foi observado um aumento da temperatura com o passar dos anos, sendo que o Alto São Francisco apresentou os menores valores; já os resultados das regiões do Médio e Baixo São Francisco são muito próximas entre si, porém o Baixo São Francisco se destacou.

Figura 5.13 – Comportamento da temperatura nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco



A partir dos testes de hipóteses (Tabela 5.8) foi possível observar que em todas as regiões fisiográficas analisadas houve uma mudança de comportamento com aumento da temperatura. Os resultados do teste de Mann-Kendall apontam que há tendência positiva de aumento na temperatura para todas as regiões fisiográficas da bacia. Corroborando com os resultados encontrados neste estudo, Mariani Rodrigues (2019) identificou tendência significativa positiva nas séries de temperatura média anual na região do Recôncavo Baiano (Salvador, Cruz das Almas, Feira de Santana e Alagoinhas). O autor detectou um aumento regional de 0,15 °C por década, com acréscimo médio total de 0,75 °C.

Tabela 5.8 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da temperatura média anual, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco

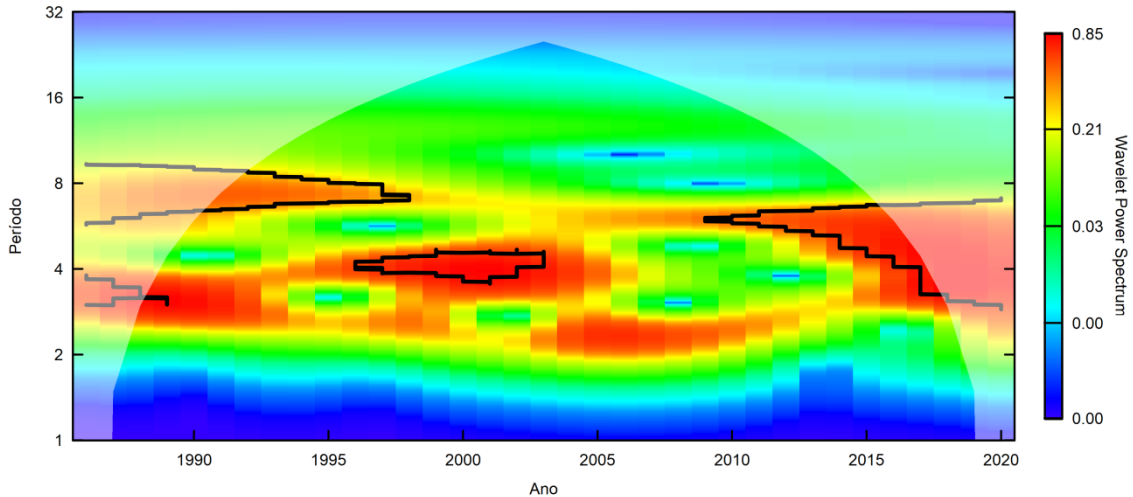
Trecho da bacia	p -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,0113	0,0004	0,3827
Médio SF	0,0062	1,5675E-05	0,8619
Baixo SF	0,0062	6,5793E-05	0,9894

Também foi possível identificar, a partir do teste de Pettitt, saltos nas séries de temperatura no ano de 2009 para o Alto São Francisco e no ano de 2012 para o Médio e Baixo São Francisco. O salto identificado nos trechos Médio e Baixo São Francisco são muito próximos ao salto identificados nas séries de vazões para todos os trechos da bacia, que foi o ano de 2013.

Assim como nas outras variáveis hidrológicas, a transformada *wavelet* foi aplicada às séries de temperatura média anual para as três regiões fisiográficas da bacia (Alto, Médio e Baixo São Francisco). Os escalogramas que representam a potência espectral *wavelet* (WPS), são exibidos nas Figura 5.14 a Figura 5.16.

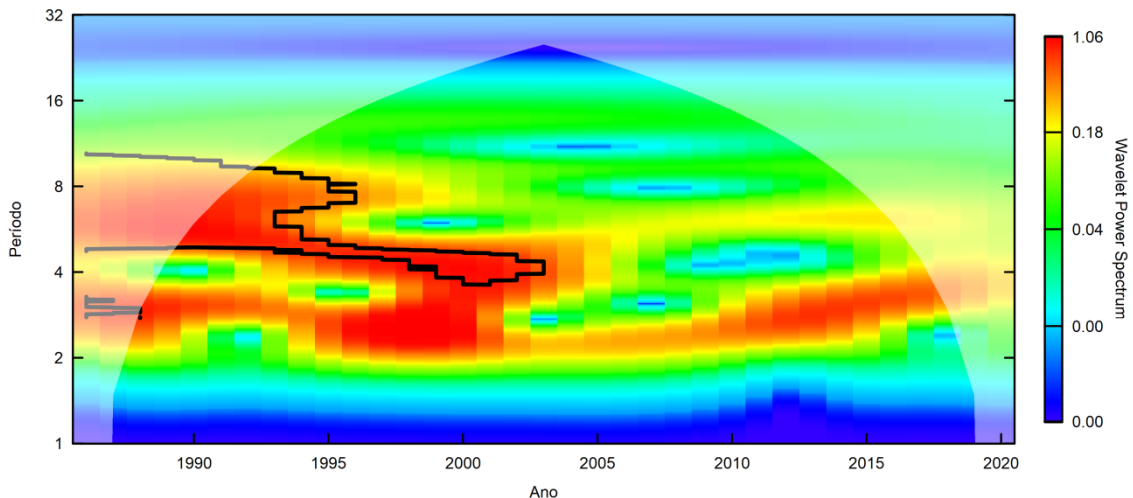
Na região do Alto São Francisco (Figura 5.14) foi possível identificar três ciclos significativos, sendo um ciclo no período de 6 a 9 anos entre 1989 e 1998, outro entre os anos de 1994 e 2003 no período de 4 e 6 anos, e, por fim, o último ciclo no período de 3 a 7 anos entre 2009 e 2017.

Figura 5.14 - Potência espectral da temperatura média anual do trecho Alto São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



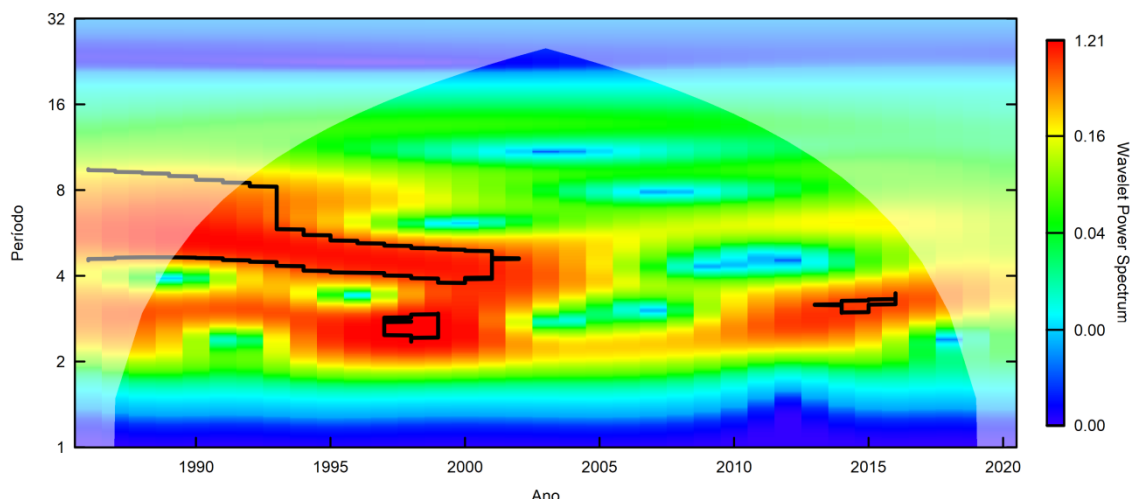
Diferente do Alto São Francisco é possível observar que as regiões do Médio e Baixo São Francisco possui uma similaridade quanto à potência espectral e a localização dos ciclos. No Médio São Francisco (Figura 5.15) foi identificado apenas um ciclo significativo entre o período de 5 e 10 anos entre 1989 e 2003.

Figura 5.15 – Potência espectral da temperatura média anual do trecho Médio São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Já no Baixo São Francisco (Figura 5.16) foram identificados um ciclo de grande duração entre 1989 e 2003 no período de 5 e 10 anos, e outros dois ciclos de curta duração no período de 2 e 3 anos, sendo que um localiza-se entre 1996 e 1999 e o outro entre 2014 e 2016.

Figura 5.16 – Potência espectral da temperatura média anual do trecho Baixo São Francisco da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Os ciclos identificados entre o período de 5 e 10 anos entre 1989 e 2003, nos trechos do Médio e Baixo São Francisco, são os de maior potência; além disso, percebe-se pelas Figura 5.14 a Figura 5.16 que após o ano de 2003 há um enfraquecimento da potência espectral nessas regiões.

5.5 Evolução do uso e cobertura do solo

Nesse tópico serão apresentados os resultados obtidos da evolução da área de Agricultura (item 5.5.1) e da Vegetação Natural (item 5.5.2) nas três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Os dados de uso e cobertura do solo foram obtidos a partir de imagens de satélite, fornecidas pelo MapBiomas, no período de 1985 a 2010.

Para a obtenção da área de Vegetação Natural considerou-se o somatório das subclasses Formação Florestal e Formação Savânica; já para o cálculo da Agricultura foi considerado o somatório das subclasses Floresta Plantada, Pastagem, Agricultura, Lavoura Temporária, Soja, Cana, Lavoura Perene, e Mosaico de Agricultura e Pastagem.

5.5.1 Agricultura

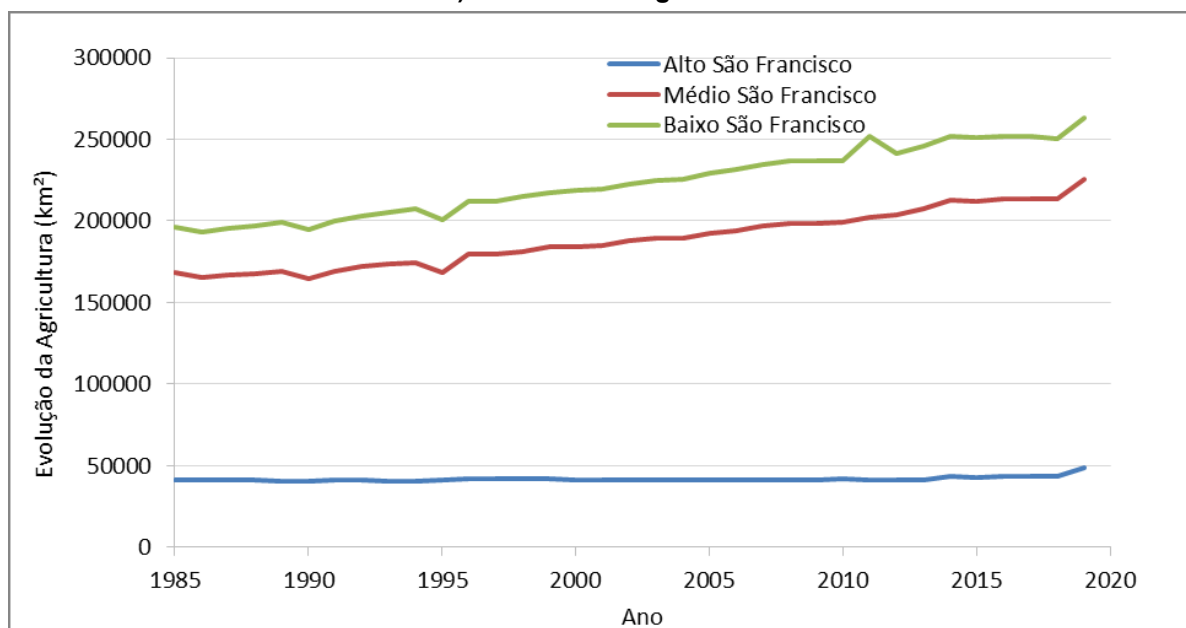
A avaliação da evolução da área Agricultura se deu inicialmente pela análise da estatística descritiva dos dados de áreas das três regiões fisiográficas da bacia em estudo. Os resultados das estatísticas estão listados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Estatísticas descritivas da Agricultura nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	Mínimo (km ²)	Máximo (km ²)	Média (km ²)	Mediana	Desvio Padrão (km ²)
Alto SF	40197	48507	41706	41348	1408,76
Médio SF	164543	225637	188675	187774	17313,19
Baixo SF	193214	263183	223621	222820	20912,63

Observa-se a partir dos resultados apresentados das estatísticas e da análise gráfica uma grande similaridade dos comportamentos da agricultura no Médio e Baixo São Francisco (Figura 5.17). A região do Alto São Francisco apresentou os menores valores. Em todas as regiões fisiográficas é possível observar um aumento na área agricultável, fato que também foi constatado pelos testes de hipóteses (Tabela 5.10). Apesar das regiões Médio e Baixo São Francisco se destacarem quanto ao aumento da área agricultável apenas no alto São Francisco foi possível identificar um salto significativo na série no ano de 2010. No Médio e Baixo São Francisco foi identificado um salto no ano de 2002.

Figura 5.17 – Evolução da Agricultura nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco



O aumento da área de agricultura observado nas regiões fisiográficas analisadas pode estar relacionado ao fato que a bacia como um todo constitui uma região de intensa antropização, tendo seu uso destinado principalmente à agricultura e pecuária (PBHSF, 2016).

Tabela 5.10 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da Agricultura, para os três trechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco

Trecho da bacia	p -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,0515	0,025	0,7597
Médio SF	0,0024	6,2161E-10	0,3115
Baixo SF	0,0119	5,6831E-15	0,3772

Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores para a mesma região de estudo, como apresentado em Buanain *et al.* (2017), Lacerda (2020), Sobral *et al.* (2018), Menke *et al.* (2009), Camapum de Carvalho *et al.* (2006). Esses autores identificaram uma expansão da área ocupada com lavouras na região da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Concomitantemente com essa expansão das áreas ocupadas por atividades agrícolas no oeste baiano, ocorreu uma maior pressão sobre os recursos hídricos regionais devido à expansão da agricultura irrigada não somente nos cerrados baianos, mas também em vários outros pontos da BHSF.

5.5.2 Vegetação natural

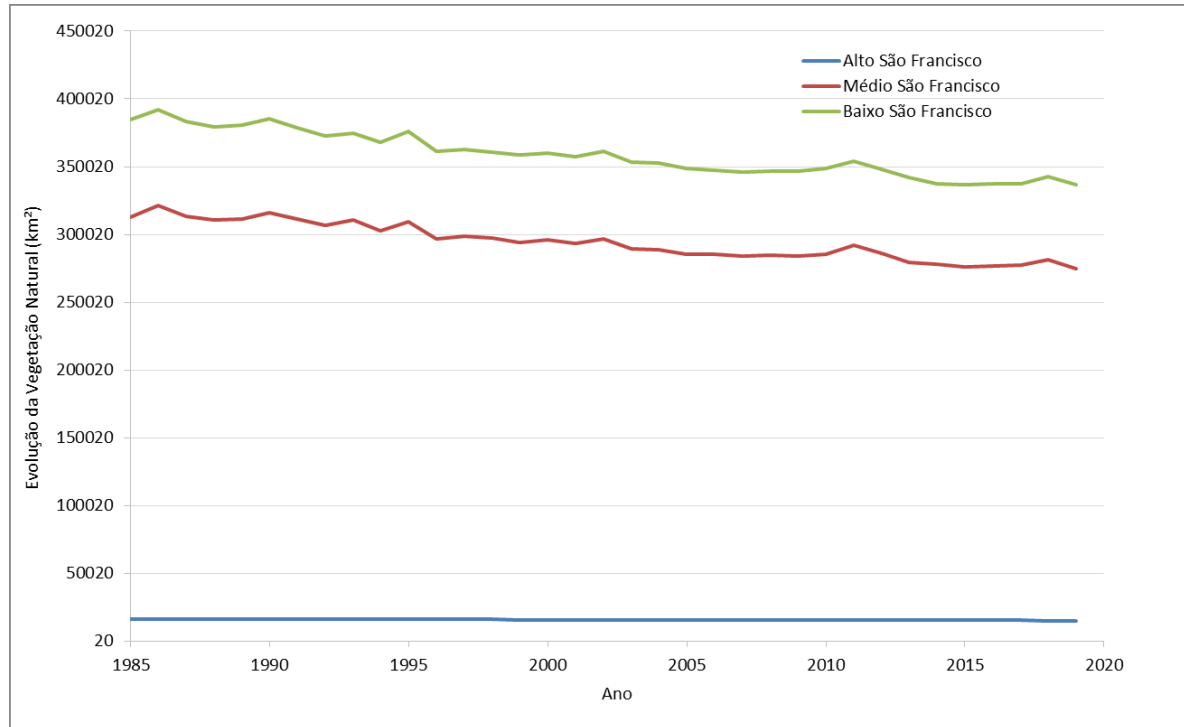
A evolução da área da vegetação natural foi analisada inicialmente por meio de análise da estatística preliminar dos dados. Os resultados das estatísticas descritivas estão listados na Tabela 5.11. Assim como observado na agricultura, os menores valores de área de vegetação natural são encontrados no trecho Alto São Francisco, seguido do Médio e Baixo São Francisco.

Tabela 5.11 - Estatísticas descritivas da Vegetação Natural nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	Mínimo (km ²)	Máximo (km ²)	Média (km ²)	Mediana	Desvio Padrão (km ²)
Alto SF	14606	16408	15729	15609	435,67
Médio SF	274897	321570	294581	293044	13468,46
Baixo SF	336569	391986	358863	357255	16399,44

A partir dos dados analisados, observa-se que o Alto São Francisco possui os menores valores de área de vegetação natural quando comparado às demais regiões fisiográficas. É possível identificar, a partir da análise gráfica, uma redução nas áreas de vegetação natural em todos os trechos analisados (Figura 5.18).

Figura 5.18 – Evolução da Vegetação nos trechos (Alto São Francisco, Médio São Francisco e Baixo São Francisco) da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Os resultados dos testes de hipóteses (Tabela 5.12) corroboram o resultado apresentado pela análise gráfica. A partir do teste de Mann-Kendall, foi identificada redução significativa da área de vegetação natural em todos os trechos fisiográficos analisados. Apesar de o Alto São Francisco não apresentar, visualmente, mudanças de comportamento, de acordo com os testes foi possível identificar redução da área vegetada e um salto significativo no ano de 2000. No Médio e Baixo São Francisco foram identificados saltos no ano de 2003.

Os saltos identificados nas séries por volta dos anos 2000 podem estar relacionados às ações de desmatamento que ocorreram em grandes proporções na bacia. Entre 2002 e 2009/2010 ocorreram cerca de 47% de desmatamento da área da BHSF, constituindo a principal ameaça para a conservação da natureza e biodiversidade na bacia. No que tange aos recursos hídricos, essas ações têm um efeito muito negativo, notadamente em relação à qualidade da água e ao regime de vazão dos corpos hídricos (aumentando gastos com tratamento da água e programa de combate a seca e inundações). Entre as regiões fisiográficas, destacam-se o Baixo e

o Médio São Francisco, onde as ações de desmatamento atingiram, respectivamente, 84,2% e 59% das suas áreas (PBHSF, 2016).

Tabela 5.12 - Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) da Vegetação Natural, para os três trechos da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da bacia	<i>p</i> -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,0014	0,0010	0,3330
Médio SF	0,3008	6,1830E-07	0,2871
Baixo SF	0,3412	1,9046E-06	0,2984

Os resultados apresentados pela análise gráfica e pelos testes de hipóteses constataam que, com o passar dos anos, houve uma redução da área de vegetação natural para que fossem implementadas outras atividades na bacia, dentre elas urbanização e atividades agrícolas. A degradação da vegetação natural é uma consequência da ocupação territorial, sendo variável nas diversas áreas em função da dinâmica das atividades econômicas (PBHSF, 2016). A redução da vegetação natural pode implicar em vários impactos no ciclo hidrológico, dentre eles o aumento do escoamento superficial, o aumento da erosão hídrica e a redução da disponibilidade de água (SANTOS *et al.*, 2020).

Muitos dos fatores que contribuem com a intensidade dos processos erosivos na bacia são consequências das atividades agrícolas desenvolvidas no território. Entre esses fatores, estão: o desmatamento das margens do rio São Francisco e de seus afluentes – notadamente nos cerrados; e o manejo inadequado dos solos – especificamente, o revolvimento intensivo dos solos por grades e arados no plantio convencional com os impactos resultantes sobre a estrutura física dos solos (BRASIL, 2011).

As atividades humanas alteram as condições geográficas naturais de uma bacia e causam alterações no sistema hidrológico. Tais atividades incluem gestão de recursos hídricos e engenharia hidrelétrica, conservação de água e solo, medidas agrícolas e urbanização. A absorção de água pelas raízes aumenta com a vegetação natural, reduzindo ainda mais a capacidade hídrica do solo e levando a um aumento da infiltração total de água no solo (ZHANG *et al.*, 2011). Em geral, o

aumento da vegetação na cobertura do solo diminui o escoamento do subsolo e da superfície (LI *et al.*, 2007a,b).

Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores para a mesma região de estudo. Silva *et al.* (2018) encontraram uma diminuição nos índices de vegetação no município de Petrolina (PE), localizado na região do Baixo São Francisco, entre os anos de 2013 e 2015. Santos *et al.* (2014) avalia o impacto das atividades antrópicas na vegetação nativa de mangue da região no ano de 2008. Os autores puderam concluir que parte das áreas de mangue podem ter sido convertida com o objetivo de desenvolver atividades de agricultura e aquicultura na região. Já no estudo desenvolvido por Santos *et al.* (2020), foi avaliado o impacto das alterações do uso do solo nas vazões observadas na região do Baixo São Francisco, entre os estados de Sergipe e Alagoas no período compreendido entre 2013 e 2018. Os autores identificaram dois tipos de área com diferentes comportamentos na região: um corresponde a uma área com solo mais homogêneo e que apresenta maior preservação ambiental (localizada mais a oeste); e o segundo tipo é representado por uma área mais heterogênea, com frações de solo exposto e elevada degradação ambiental (localizada mais a leste). Os resultados apontam que as atividades de irrigação e pastagem localizadas nas áreas mais degradadas da bacia são responsáveis pelo aumento da vulnerabilidade ambiental do local, uma vez que impulsionam o processo de assoreamento dos cursos d'água. Além disso, os autores também observaram uma diminuição na área superficial ocupada pelo corpo d'água de 2013 para 2018. Esse fenômeno está associado à crescente implantação de perímetros irrigados na bacia aliado à evaporação que já ocorre nos reservatórios.

5.6 Evolução do uso da água

Nesta seção é analisada a evolução espaço-temporal dos usos da água nas três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no período de 1985 a 2019, a fim de entender o comportamento das vazões apresentadas anteriormente.

Os usos da água foram obtidos de ANA (2019), sendo consideradas as categorias de consumo total de água de todos os consumos (abastecimento humano urbano e rural, abastecimento animal, indústria de transformação, mineração, termelétrica e irrigação).

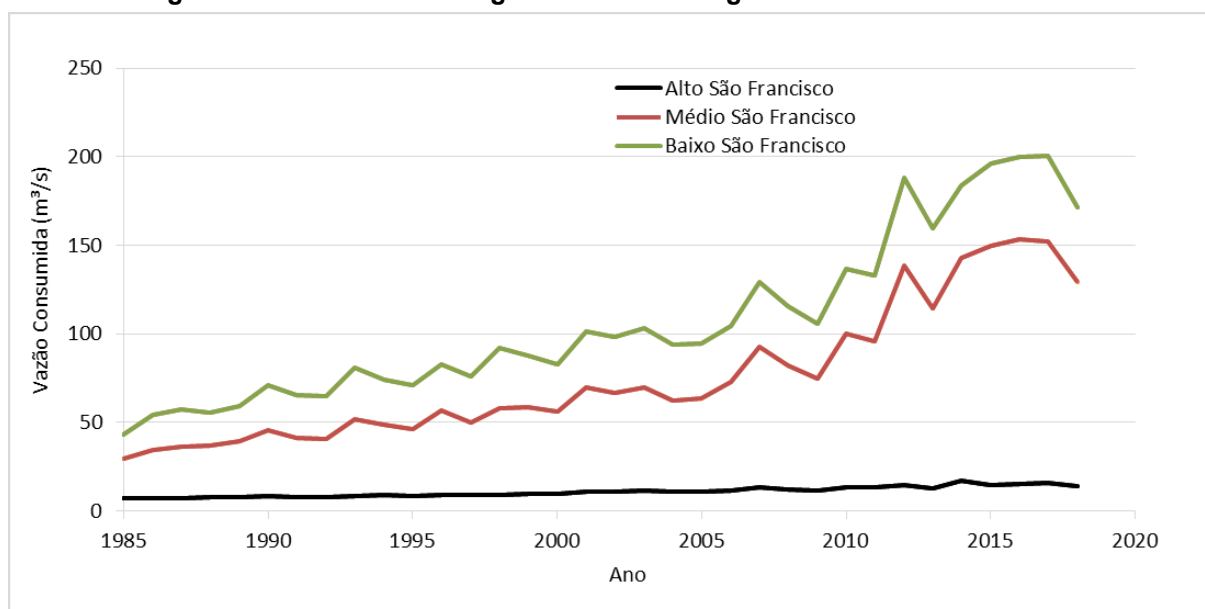
As estatísticas descritivas do uso da água nas três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco estão listadas na Tabela 5.13. O trecho Baixo São Francisco foi a região com maior consumo de água, enquanto o Alto São Francisco apresentou os menores consumos.

Tabela 5.13 – Estatísticas descritivas do uso da água nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	Mínimo (m ³ /s)	Máximo (m ³ /s)	Média (m ³ /s)	Mediana	Desvio Padrão (m ³ /s)
Alto SF	6,80	16,85	10,83	10,66	2,83
Médio SF	29,18	153,43	76,98	63,63	38,84
Baixo SF	42,92	200,61	108,85	94,74	47,61

Além da análise descritiva dos dados, realizou-se a análise gráfica das séries dos usos da água para identificar possíveis alterações ou mudanças no comportamento da variável (Figura 5.19).

Figura 5.19– Consumo de água na bacia hidrográfica do rio São Francisco



Há evidências de aumento no consumo de água em todos os trechos da bacia, fato que foi corroborado pelos resultados dos testes de hipóteses aplicados a essas

séries (Tabela 5.14). A partir do teste de hipótese Mann-Kendall, foi possível identificar tendência significativa de aumento no consumo de água em todos os trechos da bacia.

Tabela 5.14 – Resultados dos testes estatísticos (Pettitt, Mann-Kendall e Levene) do consumo de água nas diferentes regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Trecho da Bacia	<i>p</i> -Valor Testes Estatísticos		
	Pettitt	Mann-Kendall	Levene
Alto SF	0,7311	5,2015E-14	0,3784
Médio SF	0,4336	0,0001	0,0060
Baixo SF	0,4336	6,2618E-05	0,0275

Percebe-se que nos trechos Baixo e Médio São Francisco o consumo de água é superior quando comparado ao Alto São Francisco. Alguns dos fatores que podem estar relacionados ao aumento no consumo de água provavelmente são devido ao aumento expressivo da pecuária e agricultura. Com o crescimento populacional e desenvolvimento do país, acarretam um aumento da demanda urbana, agrícola e hidrelétrica em determinados períodos e regiões e, além disso, há a intensificação de certos processos de deterioração da qualidade da água e o incremento da intervenção humana (MANETA *et al.*, 2009; SOBRAL *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2020; FRANÇA *et al.*, 2021).

O comportamento observado no Médio São Francisco pode ter ocorrido devido ao crescimento populacional e à quantidade de habitantes na região fisiográfica. Cerca de 50% da população da bacia localiza-se nesse trecho, região mais urbanizada e de maior densidade demográfica da bacia (PBHSF, 2016).

Além da urbanização, as regiões do Baixo e Médio São Francisco se destacam como os maiores consumidores de água na indústria e mineração. Possivelmente, esse comportamento identificado no Médio São Francisco é devido ao uso da água no setor industrial que é bastante diversificado; e na região do Quadrilátero Ferrífero, que se caracteriza pela exploração do minério de ferro e de ouro (ANA, 2012; DNPM, 2014). Já no Baixo São Francisco, o comportamento encontrado no consumo da água pode estar relacionado com a geração de energia elétrica e a extração e produção de petróleo (CASTRO & PEREIRA, 2019).

Outra atividade que possui grande influência no aumento no consumo da água é a pecuária e irrigação. A pecuária tem crescido de forma expressiva nos últimos anos, principalmente no Médio e Baixo São Francisco, com aumento na produção de leite e no número de cabeças de gado. De acordo com o plano diretor da bacia (2016), a demanda para criação animal aumentou 52%. Esse aumento foi mais expressivo no Médio e Baixo São Francisco (cerca de 75%) do que no Alto São Francisco (aproximadamente 60%).

Já a irrigação é o setor responsável pela maior retirada (79% da vazão) e consumo (90% da vazão) de água na bacia em todos os trechos, sendo que as regiões do Médio e Baixo se destacam como maiores consumidoras (PBHSF, 2016). O aumento da demanda de água na irrigação pode ser explicado pelo fato de que o sistema produtivo das propriedades rurais regionais era caracterizado por baixa intensidade tecnológica e pequena utilização de insumos produtivos. Devido a isso, as atividades agrícolas na bacia eram de baixa produtividade e realizada em pequenas áreas - predominantemente, uma agricultura de subsistência, complementar à atividade pecuária e para abastecimento de pequenos núcleos urbanos. Com o aumento expressivo da população, ocorreu um aumento na demanda por alimentos. A partir dos anos de 1960 houve uma inovação em relação ao sistema de produção, insumos e implemento agrícolas e, com isso, houve uma melhora no sistema de produção, acarretando uma expansão das áreas agricultáveis e das áreas irrigadas (CASTRO & PEREIRA, 2019).

Nas regiões do Médio e Baixo estão localizadas as maiores demandas de água para a aplicação na agricultura irrigada. O consumo da água na região do Médio São Francisco é explicado pelo fato de que esse trecho representa cerca de 85% de toda a área colhida de lavoura temporária da bacia. A cultura responsável por essa realidade é a soja, pois representa quase metade (46,7%) de toda a área colhida de lavoura temporária na região (PBHSF, 2016). É nessa região que se situa o importante polo de Barreiras de produção de soja, cultura que é produzida com intensa irrigação (ANA, 2013). Já no Baixo há o predomínio da produção agrícola ligada à fruticultura, principalmente nas produções de banana, uva, melancia e manga (IBGE, 2009). As regiões de Juazeiro-BA/Petrolina-PE merecem especial

destaque com sua produção de frutas para exportação. O incremento da participação do Brasil no mercado internacional de frutas deve-se à expansão da fruticultura na bacia, principalmente no Semiárido (ARAÚJO & SILVA, 2013).

Além dos possíveis impactos diretos da expansão do uso e cobertura do solo no ciclo hidrológico da BHSF, os impactos decorrentes do aumento das demandas consuntivas de água para atender esses usos antrópicos também possuem influência equivalente, talvez maior, no ciclo hidrológico da bacia, reduzindo a sua disponibilidade hídrica, como apontado por Wada *et al.* (2013) e Bosmans *et al.* (2017). Os sistemas irrigados localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco interferem não somente nas alterações do uso do solo, mas também no regime de vazões e na disponibilidade hídrica para os demais usos na bacia (FRANÇA *et al.*, 2021).

Alguns estudos realizados apontam para um crescimento das demandas consuntivas na BHSF, principalmente para a irrigação. Landau *et al.* (2014) destacam o acentuado crescimento da agricultura irrigada na região do MATOPIBA. Em 2013, esses autores identificaram 1401 pivôs centrais, ocupando uma área irrigada de 138.087,91 hectares. Cerca de 90% desses pivôs se concentram na região Oeste da Bahia, na BHSF. Maneta *et al.* (2009) quantificaram a demanda hídrica dos projetos de ampliação da área irrigada na bacia hidrográfica do rio São Francisco e avaliaram o efeito dessa expansão nas vazões do rio. Os autores concluíram que as regiões de Barreiras e de Juazeiro/Petrolina, por exemplo, que possuem alto potencial de desenvolvimento de culturas irrigadas, pode contribuir para a diminuição da disponibilidade hídrica a jusante. Na análise, os autores também concluíram que o aumento da irrigação na região provocou uma redução no aporte de água para o reservatório de Sobradinho. O monitoramento da vazão afluente ao reservatório mostrou que, nos meses mais secos, houve uma redução de 90 m³/s em relação à vazão média observada para o mesmo período. Já para os meses úmidos, a redução chega a 122,2 m³/s. Esses valores são alcançados, pois, durante o período chuvoso, as áreas plantadas são mais extensas e a chuva não é bem distribuída, portanto a demanda hídrica sofre elevação. Os autores também avaliaram as alterações na vazão a jusante da barragem de Sobradinho e

concluíram que uma redução de até 505 m³/s pode ser alcançada nos períodos de estiagem.

Em seu estudo, França *et al.* (2021) observaram uma contínua e intensa alteração no uso do solo na bacia hidrográfica do rio São Francisco no início do séc. XXI e um aumento da vazão captada para atender às áreas irrigadas. De acordo com os autores, foram detectadas alterações significativas relacionadas à conversão de Florestas em áreas de Pastagem e de Savanas arborizadas e Pastagens em Terras agrícolas. Além disso, as transições descritas como Savana Arborizada para Terras agrícolas e Pastagem para Terras agrícolas estão diretamente relacionadas com o aumento da demanda hídrica na região devido à operação e expansão dos sistemas de irrigação. Os autores relataram que há evidências de que o aumento da demanda hídrica para irrigação possa estar gerando uma redução na vazão observada na bacia. Com base em processos de modelagem e previsão abordados na literatura, nota-se que a tendência atual é de ampliação dos perímetros irrigados e, conseqüentemente, de intensificação do processo de alteração do uso do solo. No entanto, os impactos decorrentes dessas alterações podem vir a ser minimizados por meio da aplicação de práticas sustentáveis, que atendam às necessidades e exigências ambientais, juntamente com uma gestão integrada e responsável dos recursos hídricos.

Os resultados dos testes de hipóteses (Tabela 5.14) corroboram com as evidências de que houve mudança no comportamento do consumo de água em todos os trechos. Apesar de não ser possível identificar um ponto de mudança significativo no consumo desse setor analisando a Figura 5.19, é importante ressaltar que em todos os trechos da bacia foi identificada uma mudança no comportamento do consumo da água no ano de 2001 - essa observação foi comprovada pelos resultados do teste de Pettitt.

A mudança no comportamento do consumo de água ocorrido por volta do ano de 2000 pode ter sido influenciada por fatores políticos que ocorreram no Brasil. Em 1999 ocorreu a desvalorização do real e, com isso, houve um aumento nas receitas para a maior parte dos setores produtivos e exportadores do Brasil, tanto na

agricultura, pecuária e extrativismo como nos setores industriais (OLIVEIRA & TUROLLA, 2003). Além de facilitar as exportações, a redução das importações ajudou a reaquecer a indústria nacional, aumentando a produção, e conseqüentemente, o consumo de água. Porém, com o elevado crescimento do PIB em 2000-2001, conjugado com a estiagem de 2000-2001, o baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas e os efeitos de uma década de baixos investimentos na infraestrutura energética levaram ao esgotamento da capacidade energética do Brasil, o que culminou com o racionamento de eletricidade, no episódio que ficou conhecido como o apagão elétrico de 2001 (SILVA, 2013).

Nessa questão de demanda, há que se considerar a perda de recursos hídricos por evaporação nos lagos dos reservatórios. Estudos realizados pela Eletrobrás avaliaram as perdas por evaporação nos reservatórios implantados no Alto e Submédio São Francisco, obtendo os seguintes valores médios: Três Marias – 20 m³/s; Sobradinho – 190 m³/s e Itaparica – 90 m³/s, totalizando cerca de 300 m³/s.

Silva *et al.* (2021), avaliando as demandas consuntivas dos principais reservatórios da BHSF: Três Marias, Sobradinho e Itaparica, constataram um acentuado crescimento das demandas consuntivas para irrigação, abastecimento humano e para indústria entre 1961 e 2017. Nesses reservatórios, observaram um proeminente crescimento das demandas consuntivas para irrigação. O contraste do crescimento dessa demanda em relação às outras foi mais acentuado nos reservatórios de Sobradinho, no MSF, e Itaparica, no BSF, do que no reservatório de Três Marias, no ASF.

5.7 Modelo Budyko

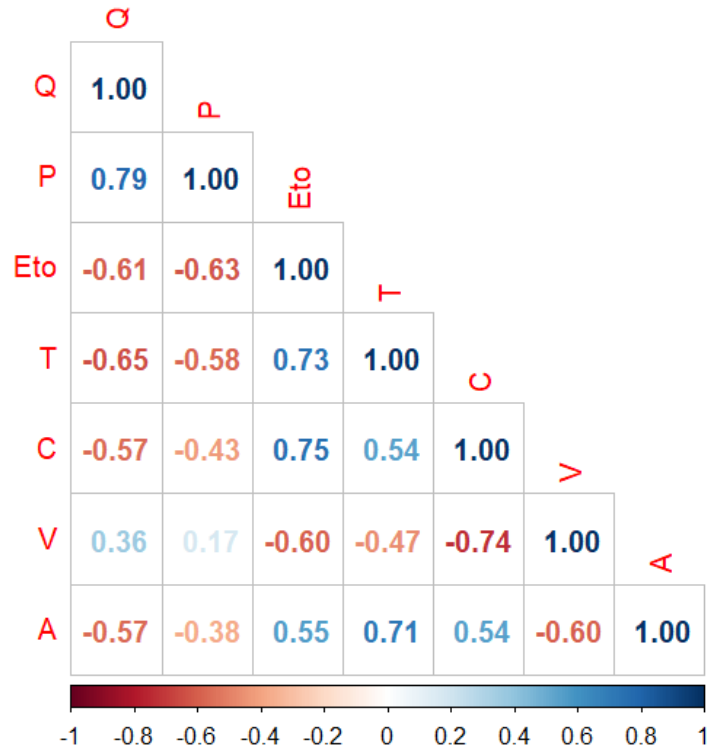
O modelo Budyko foi utilizado com o objetivo de calcular as vazões a partir do parâmetro “*w*” e associar sua variabilidade com as variáveis climáticas e antrópicas. Inicialmente foram utilizadas as quatro equações de Budyko conforme a Tabela 3.1. O parâmetro “*w*” em cada equação do tipo Budyko está relacionado aos fatores de ambas as condições climáticas (P - Precipitação, T - Temperatura) e atividades humanas (C - Consumo de Água, A - Agricultura, V - Vegetação). No primeiro momento, para o cálculo do parâmetro “*w*” foram utilizadas todas as variáveis

propostas para serem as covariáveis de “ w ”. A escolha de quais variáveis serão utilizadas no modelo final será feita no método de decomposição e sensibilidade. Nessa parte da pesquisa, serão feitas simulações para analisar quais variáveis possuem um maior peso na variabilidade das vazões.

A escolha das variáveis selecionadas para utilizar neste trabalho se deu por meio de intensa revisão bibliográfica para avaliar quais as variáveis disponíveis na bacia do rio São Francisco possuem grande período de dados e que servem como base para discutir e comparar com os resultados obtidos. Não foi possível obter mais variáveis além das selecionadas, pelo fato de, para muitas delas, não existirem dados anuais contínuos. Devido a isso, foram selecionadas, inicialmente, a precipitação, a temperatura, o consumo de água, a agricultura e a vegetação. Acredita-se que essas variáveis sejam capazes de auxiliar no entendimento do comportamento das vazões.

Na Figura 5.20 é apresentada a matriz de correlação das variáveis. A partir da Figura 5.20, pode-se perceber que a variável vazão (Q) tem uma correlação forte e positiva com a precipitação (P). Resultado similar foi encontrado no trabalho de Li *et al.* (2017), no qual os autores concluíram que a vazão está altamente correlacionada ao clima (P e ET_o) e não está correlacionada à vegetação, representada pelo Índice de vegetação por diferença normalizada ($NDVI$). Isso pode ser explicado pelo fato de que as mudanças de Q e $NDVI$ não são simultâneas; especificamente, a vazão reduziu, enquanto o $NDVI$ foi relativamente estável, considerando o mesmo período analisado. Vê-se também que a evapotranspiração (ET_o) é fortemente correlacionada com a temperatura (T) e o consumo de água (C), e a temperatura (T) também tem alto grau de correlação com a área de agricultura (A). As demais variáveis não têm correlação tão forte quanto as mencionadas anteriormente.

Figura 5.20 – Matriz de correlação das variáveis selecionadas (Q - Vazão, P - Precipitação, Eto - Evapotranspiração, T - Temperatura, C - Consumo de Água, V - Vegetação, A - Agricultura)



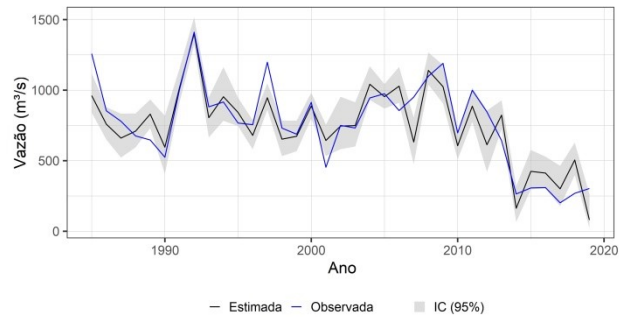
Foi realizada uma análise de covariáveis para construir a relação entre o parâmetro “w” em cada equação do tipo Budyko e as variáveis explicativas. Os valores médios da precipitação, temperatura, evaporação potencial, consumo de água, agricultura e vegetação natural da bacia do rio São Francisco durante todo o período observado (1985-2019) foram calculados e denotados por P, T, Ep, A e V, respectivamente. Todas essas variáveis explicativas candidatas foram normalizadas pelos valores médios para eliminar os impactos de diferentes dimensões físicas nos resultados.

A escolha de qual equação a ser utilizada nas etapas seguintes do trabalho se deu, inicialmente, com uma simulação com todas as combinações possíveis das quatro equações Budyko, Fu, Turc-Pike (TP), Whang (W), Zhang (Z) e das cinco variáveis explicativas (P, T, C, A, V), para cada uma das regiões fisiográficas da bacia. Ao todo foram feitas 280 simulações, sendo que foi necessário ter ao menos uma variável climática e uma variável antrópica a fim de comparação. Na Figura 5.21 e na Figura 5.22 são apresentados alguns dos resultados obtidos com as quatro equações nos três trechos da bacia, considerando todas as variáveis climáticas e

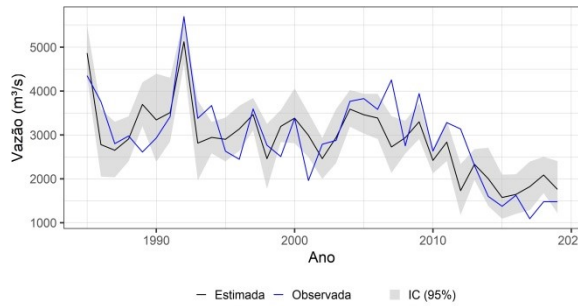
antrópicas. A partir das figuras é possível observar que todas as equações exibiram resultados muito semelhantes em todas as regiões da bacia.

Como mostrado na Figura 5.21 e na Figura 5.22 cada uma das quatro equações do tipo Budyko tem um desempenho ruim na simulação do escoamento médio anual na fase tardia do período observado em todos os trechos da bacia. Particularmente no período de 2000 até 2019, os escoamentos médios anuais simulados são menores que os observados, enquanto no período de 1985 e 2000, ocorre o oposto. Observa-se que nos trechos Médio e Baixo São Francisco não houve boa aderência do modelo aos dados. Devido a isso, é necessário analisar com cautela os resultados obtidos. Possivelmente, a perda de qualidade do modelo nessas regiões pode estar relacionada ao efeito regulatório dos reservatórios na bacia como Sobradinho e Itaparica, pois esse efeito pode interferir no modelo.

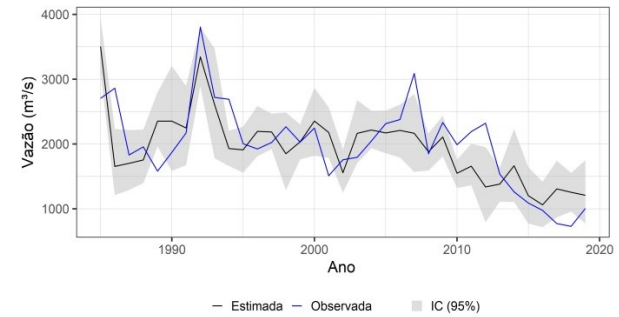
Figura 5.21 - Resultados das simulações obtidas com as equações Budyko de Fu e Turc-Pike, considerando as variáveis P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação)



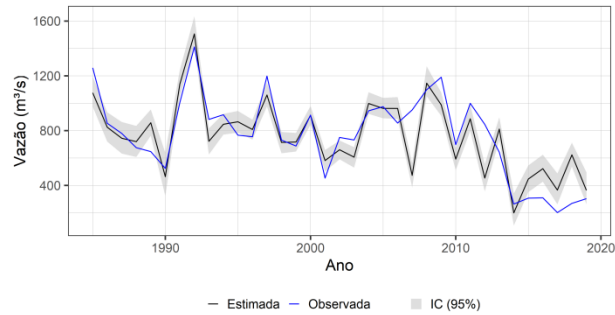
Alto São Francisco – Equação: Fu



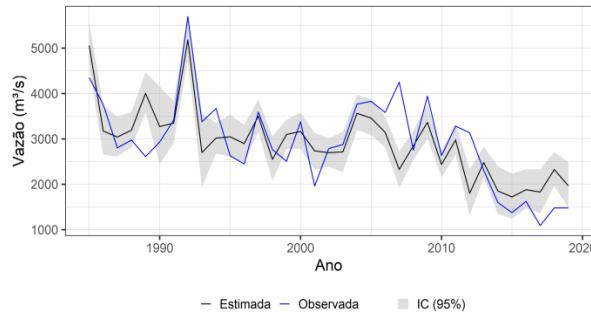
Médio São Francisco – Equação: Fu



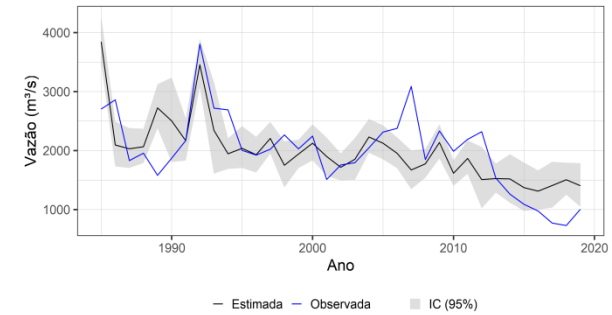
Baixo São Francisco – Equação: Fu



Alto São Francisco – Equação: Turc-Pike

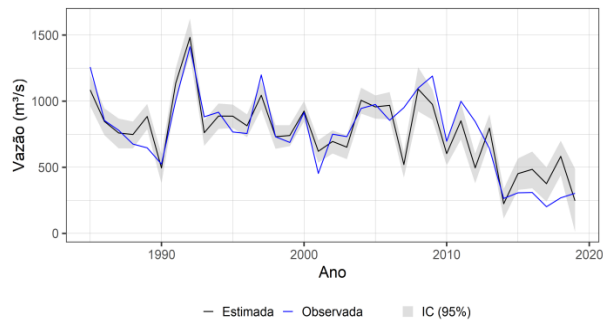


Médio São Francisco – Equação: Turc-Pike

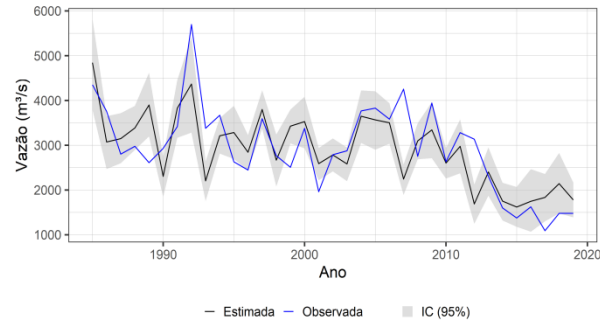


Baixo São Francisco – Equação: Turc-Pike

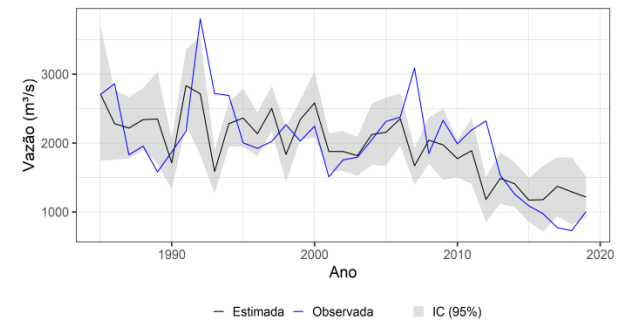
Figura 5.22 - Resultados das simulações obtidas com as equações Budyko de Wang-Tang e Zhang, considerando as variáveis P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação)



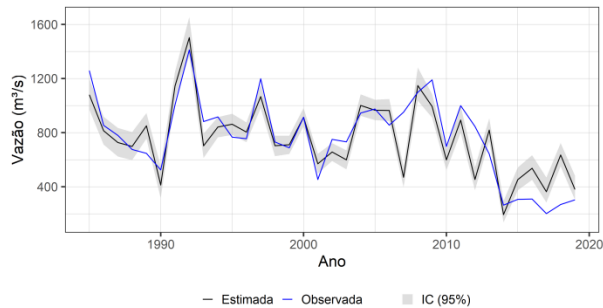
Alto São Francisco – Equação: Wang-Tang



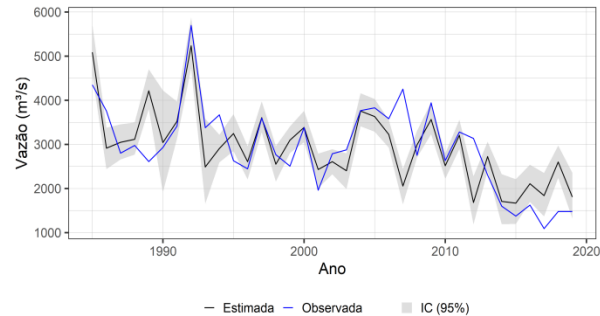
Médio São Francisco – Equação: Wang-Tang



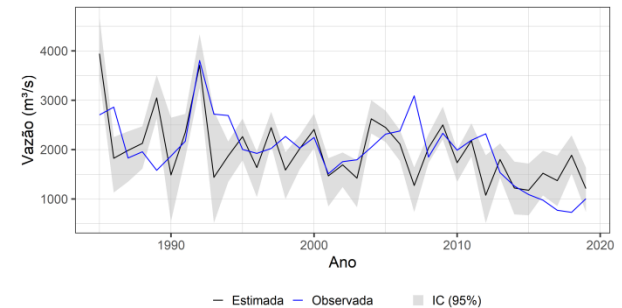
Baixo São Francisco – Equação: Wang-Tang



Alto São Francisco – Equação: Zhang



Médio São Francisco – Equação: Zhang



Baixo São Francisco – Equação: Zhang

Além da análise visual, foram analisadas as estatísticas Coeficiente de Determinação (R^2); Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE); Percentual de viés (PBIAS%); Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE); Eficiência Kling-Gupta (KGE), para avaliar o desempenho das quatro equações do tipo Budyko na simulação da vazão média anual. Os resultados obtidos estão apresentados da Tabela 5.15 à Tabela 5.18. Assim como na análise gráfica, pode-se notar que os quatro tipos de equações do tipo Budyko exibiram desempenho muito semelhante quanto às estatísticas analisadas.

Tabela 5.15 – Resultados das estatísticas modelo Fu

Variáveis	ALTO					MÉDIO					BAIXO				
	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE
P - T	0.66	0.66	-0.6	173.87	0.76	0.47	0.47	0.1	701.32	0.57	0.29	0.27	0.4	554.55	0.45
C - V - A	0.69	0.66	-1.2	174.55	0.83	0.37	-0.42	-9	1148.99	0.39	0.11	-1.84	-18	1090.7	0.07
P - T - C - V - A	0.78	0.77	-2.7	142.30	0.85	0.62	0.62	-1.4	596.80	0.72	0.48	0.46	-2	475.90	0.65
P - T - C - A	0.70	0.70	-0.6	163.17	0.81	0.58	0.58	-0.3	627.68	0.69	0.38	0.34	-0.2	527.29	0.57
P - T - C - V	0.70	0.69	-0.8	164.67	0.80	0.57	0.57	-0.1	630.49	0.69	0.39	0.35	0.1	521.3	0.58
P - T - A - V	0.68	0.67	-0.4	169.91	0.77	0.51	0.50	-0.2	677.66	0.62	0.34	0.31	0	539.31	0.53
P - T - C	0.70	0.69	-0.7	164.55	0.80	0.57	0.56	-0.1	636.17	0.69	0.38	0.34	0.1	526.91	0.57
P - T - A	0.67	0.67	-0.5	170.61	0.77	0.50	0.50	-0.1	681.44	0.61	0.34	0.31	0.1	538.96	0.53
P - T - V	0.66	0.66	-0.6	173.08	0.77	0.50	0.50	0.1	680.32	0.61	0.31	0.28	0.2	549.59	0.48
P - C - A	0.70	0.70	-0.7	163.30	0.81	0.58	0.57	-0.2	627.88	0.69	0.38	0.34	-0.1	527.13	0.57
P - C - V	0.70	0.69	-0.7	164.66	0.80	0.57	0.57	-0.1	632.20	0.69	0.39	0.35	0.1	520.09	0.58
P - A - V	0.67	0.67	-0.5	170.36	0.77	0.50	0.49	-0.2	685.47	0.61	0.34	0.30	0	540.92	0.53
P - C - V - A	0.70	0.70	-0.6	163.20	0.81	0.58	0.58	-0.3	625.44	0.69	0.39	0.35	-0.1	521.24	0.57
T - C - V - A	0.69	0.66	-1.2	174.45	0.83	0.37	-0.42	-9	1148.37	0.40	0.11	-1.83	-18	1089.93	0.08
T - C - A	0.69	0.66	-1.2	174.51	0.83	0.37	-0.42	-9	1148.44	0.39	0.11	-1.83	-18	1089.91	0.08
T - C - V	0.69	0.65	-1.2	175.16	0.83	0.36	-0.43	-8.5	1152.12	0.39	0.11	-1.83	-17.6	1089.69	0.07
T - A - V	0.67	0.64	-0.8	177.62	0.81	0.36	-0.42	-8.4	1146.34	0.39	0.15	-1.91	-18.2	1105.04	0.04
P - C	0.70	0.69	-0.7	164.66	0.80	0.57	0.56	-0.1	637.45	0.69	0.38	0.34	0.1	526.94	0.57
P - A	0.67	0.67	-0.5	171.03	0.77	0.49	0.48	-0.2	691.12	0.60	0.34	0.30	0.1	540.33	0.53
P - V	0.66	0.66	-0.6	173.37	0.76	0.49	0.49	0.1	688.17	0.60	0.31	0.27	0.3	551.61	0.48
T - C	0.69	0.65	-1.2	175.21	0.83	0.36	-0.43	-8.5	1151.99	0.39	0.11	-1.83	-17.5	1089.67	0.07
T - A	0.67	0.64	-0.8	178.09	0.81	0.36	-0.42	-8.2	1146.45	0.39	0.16	-1.92	-18.2	1106.01	0.04
T - V	0.66	0.64	-0.9	179.13	0.81	0.38	-0.43	-8.1	1153.02	0.38	0.17	-1.96	-17.9	1113.23	0.02

Variáveis: P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação). R² - Coeficiente de Determinação; NSE - coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS% - Percentual de viés; RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio; KGE - Eficiência Kling-Gupta.

Tabela 5.16 – Resultados das estatísticas modelo Wang Tang

Variáveis	ALTO					MÉDIO					BAIXO				
	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE
P - T	0.67	0.67	0.3	170.53	0.75	0.44	0.44	-0.8	722.85	0.57	0.28	0.27	-1.1	554.61	0.39
C - V - A	0.72	0.67	-0.5	170.08	0.84	0.37	-0.29	-7.1	1095.07	0.44	0.1	-1.32	-14	986.05	0.18
P - T - C - V - A	0.73	0.73	0.1	153.28	0.81	0.5	0.49	-0.9	687.42	0.66	0.36	0.34	-1.4	526.73	0.51
P - T - C - A	0.73	0.73	0.1	153.39	0.81	0.49	0.47	-0.8	699.17	0.65	0.32	0.3	-1.2	541.8	0.48
P - T - C - V	0.7	0.7	0.4	162	0.79	0.51	0.5	-0.9	683.72	0.66	0.35	0.32	-1.3	532.48	0.51
P - T - A - V	0.72	0.72	0	157.28	0.79	0.44	0.43	-0.7	725.01	0.58	0.31	0.3	-1.3	543.46	0.44
P - T - C	0.7	0.7	0.4	162.06	0.79	0.48	0.46	-0.9	706.61	0.63	0.32	0.29	-1.3	544.59	0.47
P - T - A	0.72	0.72	-0.1	157.49	0.78	0.44	0.43	-0.8	724.25	0.58	0.3	0.29	-1.1	546.27	0.44
P - T - V	0.68	0.68	0.3	167.47	0.76	0.44	0.43	-0.7	725.37	0.58	0.27	0.26	-1.1	556.81	0.4
P - C - A	0.73	0.73	0.1	153.65	0.81	0.47	0.45	-0.9	717	0.64	0.26	0.23	-1.3	569.31	0.43
P - C - V	0.7	0.7	0.4	162.79	0.79	0.47	0.45	-1	712.75	0.64	0.29	0.25	-1.5	561.36	0.46
P - A - V	0.72	0.72	-0.1	157.71	0.79	0.38	0.36	-0.8	768.73	0.54	0.19	0.15	-1.2	595.39	0.33
P - C - V - A	0.74	0.74	0.1	152.8	0.81	0.47	0.45	-1	711.64	0.64	0.29	0.25	-1.6	560.57	0.46
T - C - V - A	0.72	0.68	-0.5	168.98	0.84	0.36	-0.26	-6.9	1082.96	0.45	0.09	-1.25	-13.4	971.81	0.19
T - C - A	0.72	0.68	-0.5	169.15	0.84	0.37	-0.27	-7.1	1087.03	0.45	0.09	-1.25	-13.4	971.3	0.19
T - C - V	0.69	0.66	-0.2	174.21	0.83	0.35	-0.29	-7	1091.91	0.45	0.09	-1.26	-13.4	972.22	0.19
T - A - V	0.7	0.67	-0.5	170.2	0.84	0.35	-0.26	-6.8	1080.18	0.46	0.11	-1.26	-14.1	973.01	0.2
P - C	0.26	0.23	-1.4	569.56	0.43	0.45	0.43	-0.9	725.12	0.62	0.26	0.23	-1.4	569.61	0.43
P - A	0.72	0.72	-0.1	158.18	0.78	0.37	0.35	-0.8	775.58	0.52	0.19	0.15	-1.3	596.85	0.32
P - V	0.68	0.68	0.3	169.33	0.75	0.38	0.36	-0.8	768.51	0.53	0.18	0.14	-1.2	599.85	0.29
T - C	0.69	0.66	-0.3	174.41	0.83	0.35	-0.29	-7.1	1094	0.45	0.09	-1.25	-13.4	972.08	0.19
T - A	0.7	0.67	-0.6	171.04	0.84	0.35	-0.28	-7	1091.08	0.45	0.11	-1.26	-13.9	972.8	0.2
T - V	0.67	0.65	-0.2	176.42	0.82	0.36	-0.29	-7.2	1092.33	0.45	0.11	-1.26	-14.1	973.39	0.2

Variáveis: P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação). R² - Coeficiente de Determinação; NSE - coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS% - Percentual de viés; RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio; KGE - Eficiência Kling-Gupta.

Tabela 5.17 – Resultados das estatísticas modelo Zhang

Variáveis	ALTO					MÉDIO					BAIXO				
	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE
P - T	0.66	0.66	-0.9	174.49	0.77	0.43	0.42	0.9	732.71	0.59	0.2	-0.04	1.1	660.53	0.44
C - V - A	0.69	0.66	-1.7	172.67	0.83	0.36	-0.37	-12.3	1129.07	0.44	0.14	-1.31	-19.9	984.82	0.22
P - T - C - V - A	0.69	0.69	-1	165.88	0.81	0.51	0.49	-0.1	687.54	0.69	0.22	-0.08	-1	671.29	0.47
P - T - C - A	0.69	0.69	-1	166	0.81	0.51	0.49	0	687.93	0.69	0.22	-0.08	-1.2	672.2	0.47
P - T - C - V	0.69	0.69	-1.1	166.53	0.8	0.51	0.49	0.2	685.59	0.69	0.21	-0.08	-0.9	673.81	0.46
P - T - A - V	0.67	0.66	-0.9	172.91	0.77	0.47	0.45	0.4	712.44	0.63	0.22	-0.02	0.5	653.26	0.47
P - T - C	0.69	0.69	-1	166.52	0.8	0.51	0.49	0.2	686.98	0.69	0.22	-0.07	-0.6	669.14	0.47
P - T - A	0.66	0.66	-0.8	173.14	0.77	0.47	0.45	0.5	712.28	0.63	0.22	-0.01	0.5	652.11	0.47
P - T - V	0.66	0.66	-0.9	174.12	0.77	0.45	0.44	0.8	719.89	0.61	0.2	-0.05	0.8	662.24	0.44
P - C - A	0.69	0.69	-1	165.97	0.81	0.51	0.49	0	687.95	0.69	0.22	-0.08	-1.1	672.39	0.47
P - C - V	0.69	0.69	-1	166.51	0.8	0.51	0.49	0.3	685.81	0.69	0.22	-0.07	-0.6	669.53	0.47
P - A - V	0.66	0.66	-0.8	172.97	0.77	0.47	0.45	0.4	713.68	0.63	0.22	-0.02	0.4	653.6	0.47
P - C - V - A	0.69	0.69	-1	166.04	0.81	0.51	0.49	-0.1	687.7	0.69	0.22	-0.08	-1.1	672.37	0.46
T - C - V - A	0.69	0.66	-1.7	172.68	0.83	0.36	-0.37	-12.3	1128.67	0.44	0.14	-1.31	-19.8	984.47	0.22
T - C - A	0.69	0.66	-1.7	172.69	0.83	0.36	-0.37	-12.3	1128.53	0.44	0.14	-1.31	-19.8	984.69	0.22
T - C - V	0.69	0.66	-1.7	172.97	0.83	0.36	-0.38	-12	1130.98	0.44	0.14	-1.31	-19.6	984.24	0.22
T - A - V	0.66	0.65	-1.3	177.05	0.8	0.37	-0.37	-11.6	1126.3	0.43	0.16	-1.37	-20.2	995.98	0.21
P - C	0.69	0.69	-1	166.45	0.8	0.51	0.49	0.3	687.1	0.69	0.22	-0.08	-0.7	671.41	0.46
P - A	0.66	0.66	-0.8	173.34	0.77	0.46	0.45	0.5	714.4	0.62	0.22	-0.01	0.6	650.83	0.47
P - V	0.66	0.66	-0.9	174.24	0.77	0.45	0.44	0.8	722.3	0.6	0.2	-0.04	0.9	660.41	0.45
T - C	0.69	0.66	-1.7	172.99	0.83	0.36	-0.38	-11.9	1130.8	0.44	0.14	-1.31	-19.7	984.47	0.22
T - A	0.66	0.64	-1.3	177.34	0.8	0.37	-0.37	-11.6	1126.34	0.43	0.16	-1.37	-20.3	996.26	0.21
T - V	0.66	0.64	-1.3	177.74	0.8	0.38	-0.38	-11.5	1132.65	0.42	0.17	-1.37	-20.1	997.69	0.21

Variáveis: P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação). R² - Coeficiente de Determinação; NSE - coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS% - Percentual de viés; RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio; KGE - Eficiência Kling-Gupta.

Tabela 5.18 – Resultados das estatísticas modelo Turc-Pike

Variáveis	ALTO					MÉDIO					BAIXO				
	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE	R ²	NSE	PBIAS %	RMSE	KGE
P - T	0.66	0.66	-0.6	173.9	0.76	0.47	0.47	0.1	700.47	0.57	0.3	0.27	0.5	554.05	0.46
C - V - A	0.69	0.66	-1.2	174.65	0.83	0.36	-0.47	-9.4	1165.92	0.38	0.11	-1.92	-18.9	1107.05	0.06
P - T - C - V - A	0.7	0.7	-0.7	163.22	0.81	0.58	0.58	-0.3	626.16	0.69	0.38	0.35	-0.1	523.12	0.57
P - T - C - A	0.7	0.7	-0.7	163.4	0.81	0.58	0.57	-0.3	628.81	0.69	0.37	0.33	-0.1	528.95	0.57
P - T - C - V	0.7	0.69	-0.7	164.7	0.8	0.57	0.57	-0.1	631.9	0.69	0.39	0.35	0.2	521.82	0.58
P - T - A - V	0.67	0.67	-0.5	170.09	0.77	0.51	0.5	-0.1	677.73	0.62	0.34	0.3	0	540.29	0.53
P - T - C	0.7	0.69	-0.7	164.73	0.8	0.57	0.56	-0.1	637.16	0.69	0.38	0.33	0.1	528.63	0.57
P - T - A	0.67	0.67	-0.5	170.63	0.77	0.5	0.5	-0.1	680.24	0.61	0.34	0.3	0.1	540.31	0.53
P - T - V	0.66	0.66	-0.6	173.05	0.77	0.5	0.5	0.1	680.04	0.61	0.31	0.28	0.3	549.86	0.49
P - C - A	0.7	0.7	-0.6	163.42	0.81	0.58	0.57	-0.2	628.92	0.69	0.37	0.33	-0.1	528.97	0.57
P - C - V	0.7	0.69	-0.7	164.76	0.8	0.57	0.57	-0.1	632.98	0.69	0.39	0.35	0.2	522.39	0.58
P - A - V	0.67	0.67	-0.5	170.36	0.77	0.5	0.49	-0.2	685.32	0.61	0.34	0.3	0	542	0.53
P - C - V - A	0.7	0.7	-0.6	163.29	0.8	0.58	0.58	-0.3	626.35	0.69	0.38	0.35	-0.1	523.2	0.57
T - C - V - A	0.69	0.66	-1.2	174.62	0.83	0.36	-0.46	-9.3	1165.01	0.38	0.11	-1.92	-18.8	1106.55	0.06
T - C - A	0.69	0.66	-1.2	174.64	0.83	0.36	-0.46	-9.3	1165.08	0.38	0.11	-1.92	-18.8	1106.56	0.06
T - C - V	0.69	0.65	-1.3	175.27	0.83	0.36	-0.47	-8.8	1168.61	0.38	0.11	-1.92	-18.3	1105.64	0.06
T - A - V	0.67	0.64	-0.8	177.77	0.81	0.36	-0.46	-8.8	1162.88	0.38	0.15	-2.01	-18.9	1122.54	0.02
P - C	0.7	0.69	-0.7	164.79	0.8	0.56	0.56	-0.1	638.73	0.69	0.38	0.33	0.2	528.71	0.57
P - A	0.67	0.67	-0.5	171.03	0.77	0.49	0.49	-0.2	690.77	0.6	0.34	0.3	0.1	541.54	0.53
P - V	0.66	0.66	-0.6	173.4	0.77	0.49	0.49	0	688.48	0.59	0.31	0.27	0.3	552.21	0.48
T - C	0.69	0.65	-1.2	175.27	0.83	0.36	-0.47	-8.8	1168.69	0.38	0.11	-1.92	-18.2	1105.65	0.06
T - A	0.66	0.64	-0.8	178.2	0.81	0.36	-0.46	-8.7	1163.36	0.38	0.16	-2.01	-19	1123.6	0.02
T - V	0.66	0.64	-0.8	179.18	0.81	0.38	-0.48	-8.5	1170.17	0.36	0.17	-2.05	-18.7	1131.05	0

Variáveis: P (Precipitação), T (Temperatura), C (Consumo de Água), A (Agricultura), V (Vegetação). R² - Coeficiente de Determinação; NSE - coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBIAS% - Percentual de viés; RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio; KGE - Eficiência Kling-Gupta.

Devido à similaridade do desempenho das quatro equações, foi escolhida a equação de F_u para calcular as vazões a partir das variáveis obtidas. A partir desse momento será utilizada apenas a equação de F_u para simular o modelo. Além da similaridade, a equação de F_u também foi escolhida pelo fato de ser uma equação de fácil aplicação e amplamente utilizada em diversos estudos no mundo (ZHANG *et al.*, 2008; CASTRILLON, 2014; OTSUKI, 2015; ZHANG *et al.*, 2019).

Posteriormente, foi realizada a estimação dos parâmetros do modelo Hierárquico Bayesiano conforme apresentado na seção 4.2.5. Na Figura 5.23 são apresentados os boxplots marginais das estimativas dos coeficientes de regressão *a posteriori*. É importante ressaltar que os coeficientes aqui apresentados são adimensionalizados. Observa-se que todos os parâmetros β_1 (precipitação), β_2 (temperatura), β_3 (uso da água), β_4 (vegetação), β_5 (agricultura) analisados são positivos para todas as regiões fisiográficas. Possivelmente, isso indica que essas variáveis mostram correlações positivas com o parâmetro “ w ”. O aumento da variável “ w ” causará um aumento na evaporação e, conseqüentemente, poderá acarretar uma diminuição nos recursos hídricos. Portanto, essas variáveis têm associações negativas com os recursos hídricos.

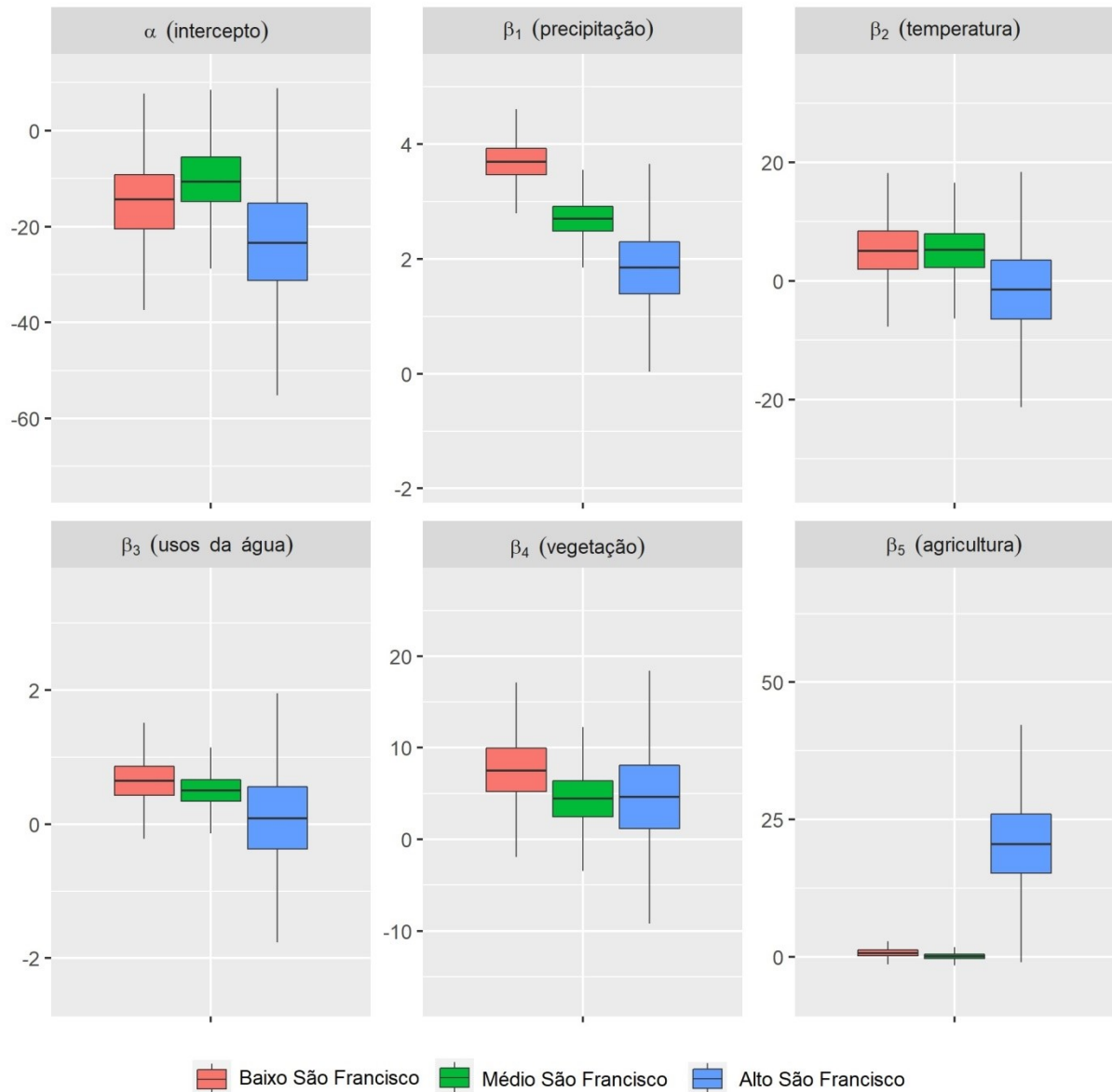
Como esperado, o comportamento dos parâmetros de regressão no Alto São Francisco é consideravelmente diferente daqueles do Médio e Baixo São Francisco, ao passo que, nas últimas regiões, não são percebidas distinções marcantes nos coeficientes. Esse fato provavelmente se deve às grandes diferenças de áreas de drenagem na porção superior em relação às demais porções da área de estudo, o que pode suavizar as contribuições relativas de cada covariável ao longo das regiões fisiográficas a jusante. Além disso, foi notado que o regime de vazão na porção superior não é afetado por grandes reservatórios.

Observou-se também que a contribuição relativa da covariável precipitação nas estimativas do parâmetro “ w ” é menor no Alto São Francisco do que nas demais áreas. Com efeito, uma vez que os trechos Médio e Baixo São Francisco compreendem regiões semiáridas, mesmo pequenos incrementos na precipitação podem impactar severamente o balanço hídrico, facilitando a mudança do modelo

nas curvas de Budyko. Por outro lado, em áreas úmidas, como no Alto São Francisco, maiores variações nos valores de precipitação são necessárias para acarretar mudanças significativas no parâmetro “ w ”.

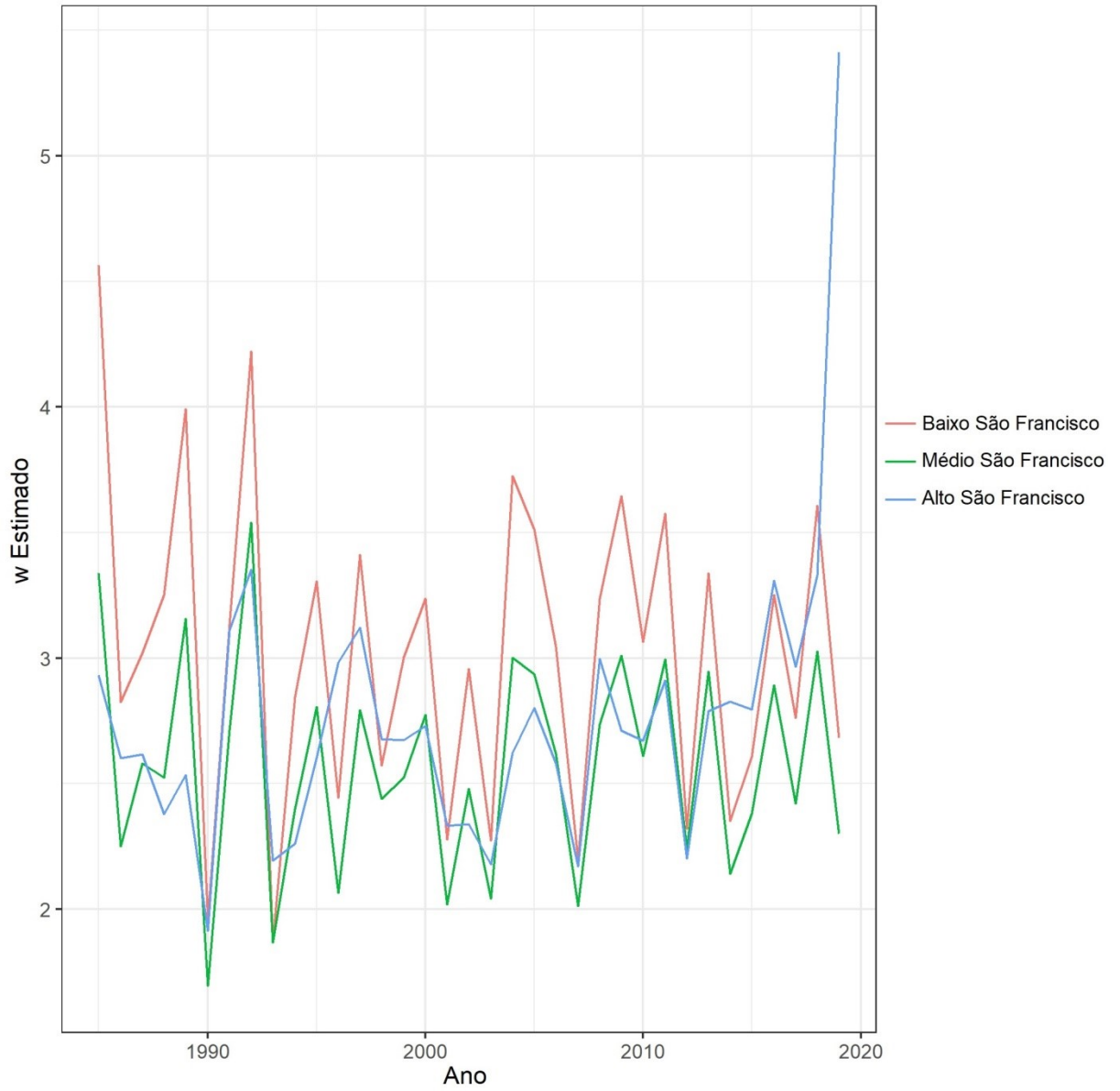
Outro aspecto que merece destaque é a influência das atividades agrícolas em cada região fisiográfica – a importância relativa dessa covariável tende a diminuir à medida que o tamanho da bacia aumenta. Como resultado, este preditor exerce pouca influência nas variações do parâmetro “ w ” no Médio e Baixo São Francisco, que compreendem grandes áreas de drenagem. Por fim, as demais covariáveis não apresentaram distinções perceptíveis entre as regiões.

Figura 5.23 - Parâmetros de regressão



O valor do parâmetro “ w ” foi calculado, de 1985 a 2019, a partir da relação entre o coeficiente de regressão e das covariáveis climáticas e antrópicas, para cada região fisiográfica da bacia. A Figura 5.24 mostra a evolução desse parâmetro a cada ano. Observa-se que os comportamentos do parâmetro “ w ” nas três regiões fisiográficas são similares e eles não apresentam tendência ou padrão ao longo do tempo. A partir das mudanças de valores no parâmetro “ w ”, há uma alteração na curva Budyko, porém não é possível inferir sobre as causas dessas mudanças.

Figura 5.24 - Variação do parâmetro “w” estimado nos trechos da bacia



5.8 Quantificação dos fatores climáticos e antrópicos

Nesta seção é analisado o quarto objetivo específico da pesquisa, o qual consiste em quantificar a influência relativa às variáveis climáticas e antrópicas na alteração do regime hidrológico. Para atingir esse objetivo foi necessária a aplicação do framework Budyko juntamente com o método de decomposição como proposto por Wang & Hejazi (2011) e Jiang *et al.* (2015).

Com base na relação entre o parâmetro “*w*” em cada equação do tipo Budyko e as variáveis explicativas (climáticas e antrópicas), o método de decomposição quantifica a variação do escoamento comparando dois períodos, denominados pré-mudança e pós-mudança. Para isso foi utilizada toda a série histórica (1985-2019), considerando como ano de mudança valores entre 1995 a 2009. Por exemplo, tendo como base o ano de 1995, o período de 1985 a 1995 é tratado como o período de pré-mudança e o *benchmark*, enquanto o período de 1996 a 2019 é dado como o período pós-mudança, conforme apresentado na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Períodos de comparação do método de decomposição

Ano de referência	Período pré-mudança	Período pós-mudança
1995	1985-1995	1996-2019
1996	1985-1996	1997-2019
1997	1985-1997	1998-2019
1998	1985-1998	1999-2019
1999	1985-1999	2000-2019
2000	1985-2000	2001-2019
2001	1985-2001	2002-2019
2002	1985-2002	2003-2019
2003	1985-2003	2004-2019
2004	1985-2004	2005-2019
2005	1985-2005	2006-2019
2006	1985-2006	2007-2019
2007	1985-2007	2008-2019
2008	1985-2008	2009-2019
2009	1985-2009	2010-2019

A escolha da janela temporal de 1995 a 2009 se deve pelo fato de que, embora os testes de hipóteses aplicados às séries de dados meteorológicos e hidrológicos não sejam conclusivos, há um indicativo de que há mudanças próximas no ano de 2010 nos dados analisados, conforme apresentado na Figura 5.25 a Figura 5.27. A escolha adequada da largura da janela é um problema crítico, mas não há uma

diretriz específica para tal definição. Em geral, se a série anual for longa, uma janela de tempo maior deve ser tomada. Mesmo que seja mais apropriado tratar um intervalo de tempo maior como período de pré-mudança, a duração dos dados restringe a seleção. Neste estudo, considerando o comprimento das séries hidrológicas (35 anos) e a denotação das variáveis hidrológicas, foi adotado o intervalo mínimo de 10 anos.

Da Figura 5.25 a Figura 5.27 são apresentadas as variações das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global nas três regiões fisiográficas da bacia em estudo. Percebe-se que há grande variação das vazões ao longo dos anos de 1995 a 2009, porém, próximo ao ano de 2010 observa-se que as médias das vazões apresentam um salto maior do que nos outros anos analisados. Esse fato foi observado em todas as séries históricas de dados hidrológicos e meteorológicos analisados. Devido a isso, o ano de 2010 foi escolhido como referência para a análise do método de decomposição.

Figura 5.25 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Alto São Francisco

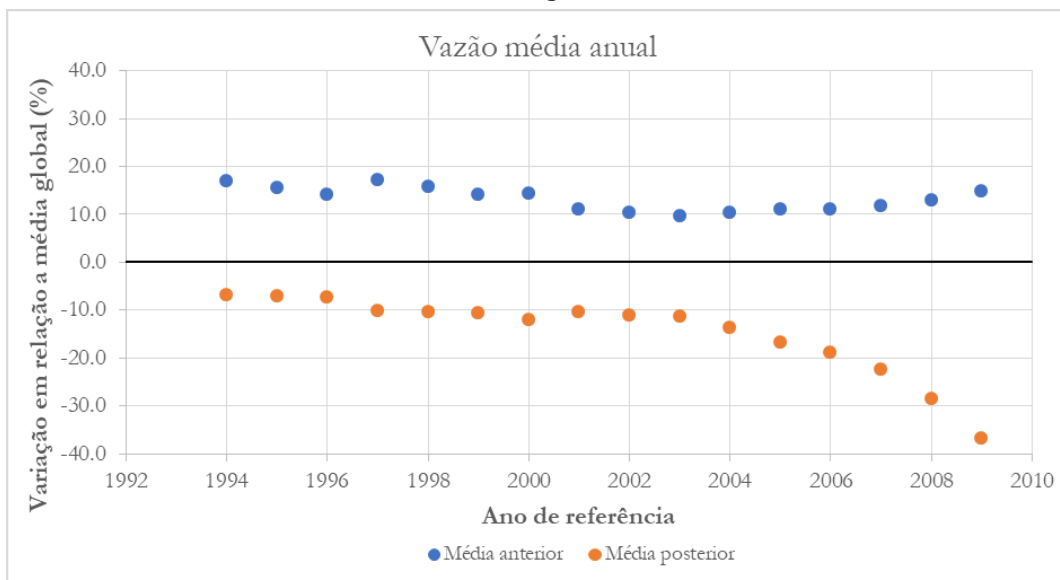


Figura 5.26 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Médio São Francisco

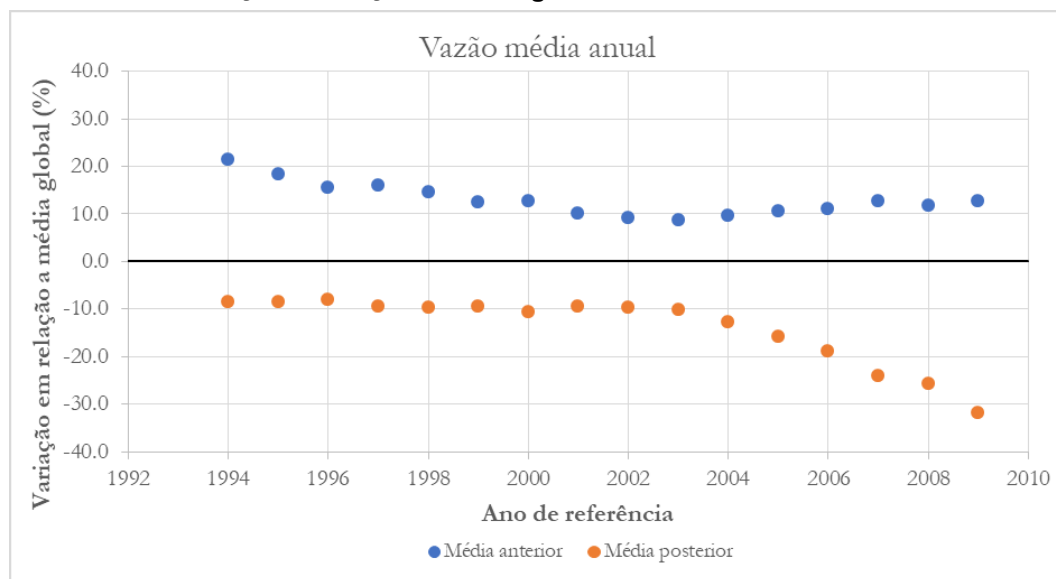
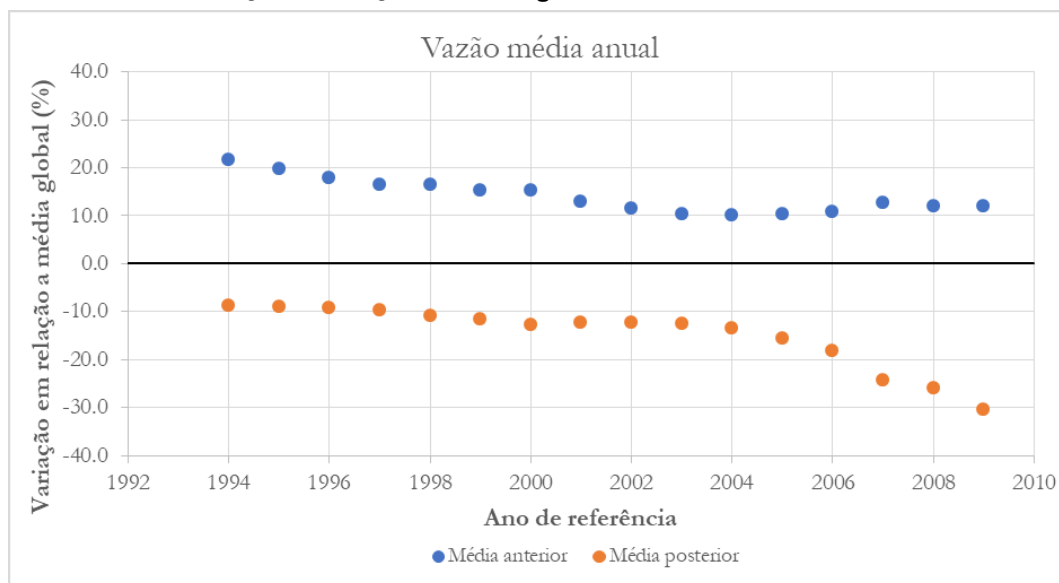


Figura 5.27 – Comparação das vazões médias anuais anteriores e posteriores ao período de mudança em relação à média global no Baixo São Francisco



Para decompor os impactos das atividades humanas e do clima na mudança nos recursos hídricos, utilizaram-se os valores medianos das distribuições *a posteriori* (JIANG *et al.*, 2015; RODERICK & FARQUHAR, 2011). As vazões estimadas e observadas estão representadas a Figura 5.28 à Figura 5.30. A partir das figuras percebe-se que houve redução de vazão em todos os trechos analisados, e as mudanças nas vazões estimadas e observadas são próximas para a região do Alto São Francisco (Figura 5.28). Já para as regiões do Médio (Figura 5.29) e Baixo São Francisco (Figura 5.30) não houve uma boa aderência entre as vazões, principalmente no Baixo São Francisco (Figura 5.30). Foi observada uma grande divergência entre elas. Até certo ponto, a boa aderência dos dados obtidas no Alto São Francisco aponta para a confiabilidade do método de decomposição e resultados obtidos. Em relação aos resultados obtidos no Médio e Baixo São Francisco é necessário analisar com cautela os resultados obtidos, devido à baixa aderência aos dados. Possivelmente, um dos motivos que podem ter influenciado nessa divergência entre vazões simuladas e observadas pode estar relacionado ao efeito regulatório dos reservatórios na bacia como Sobradinho e Itaparica.

Figura 5.28 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Alto São Francisco

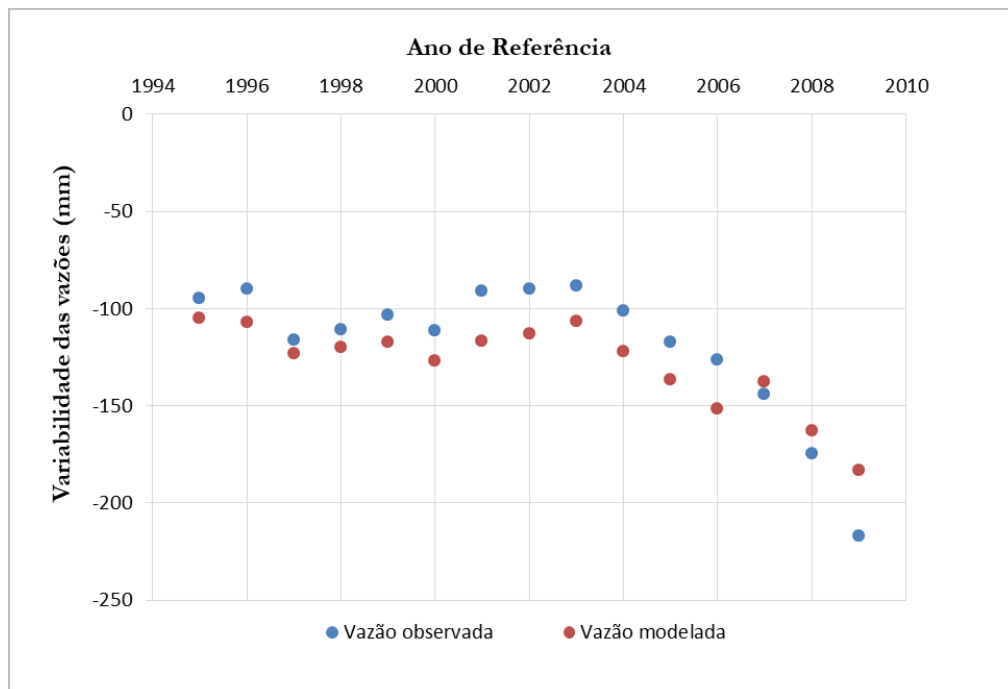


Figura 5.29 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Médio São Francisco

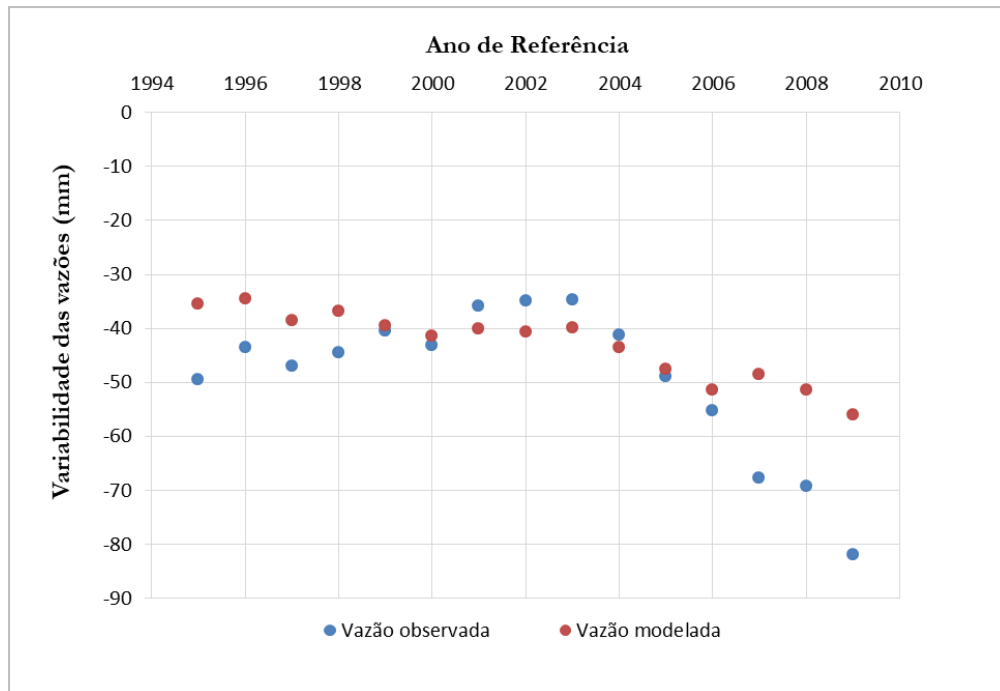
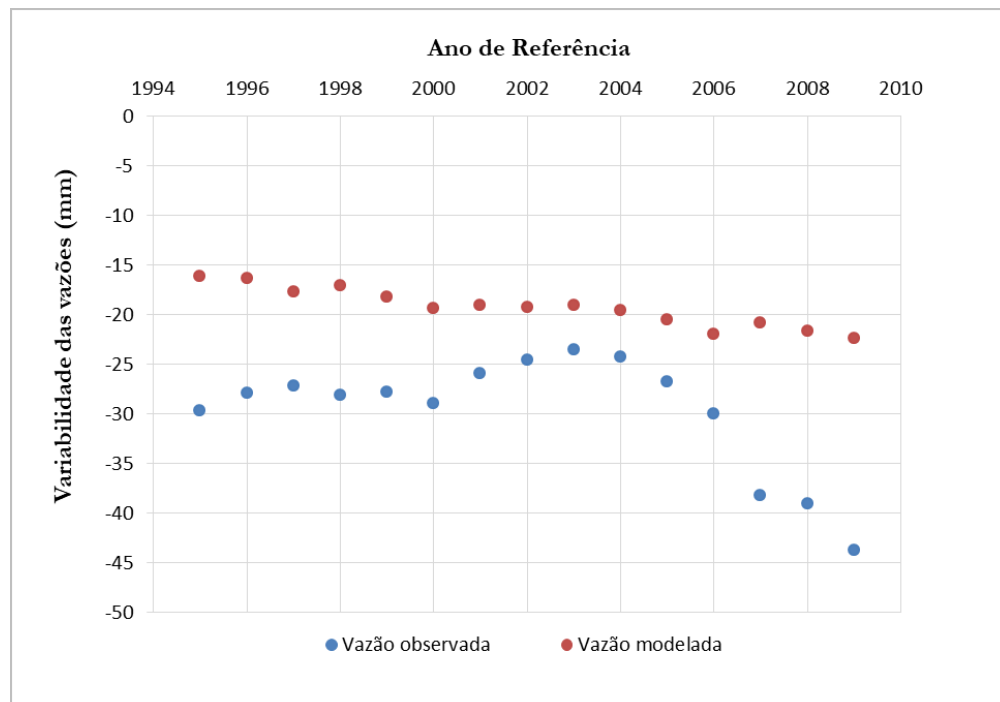


Figura 5.30 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Baixo São Francisco

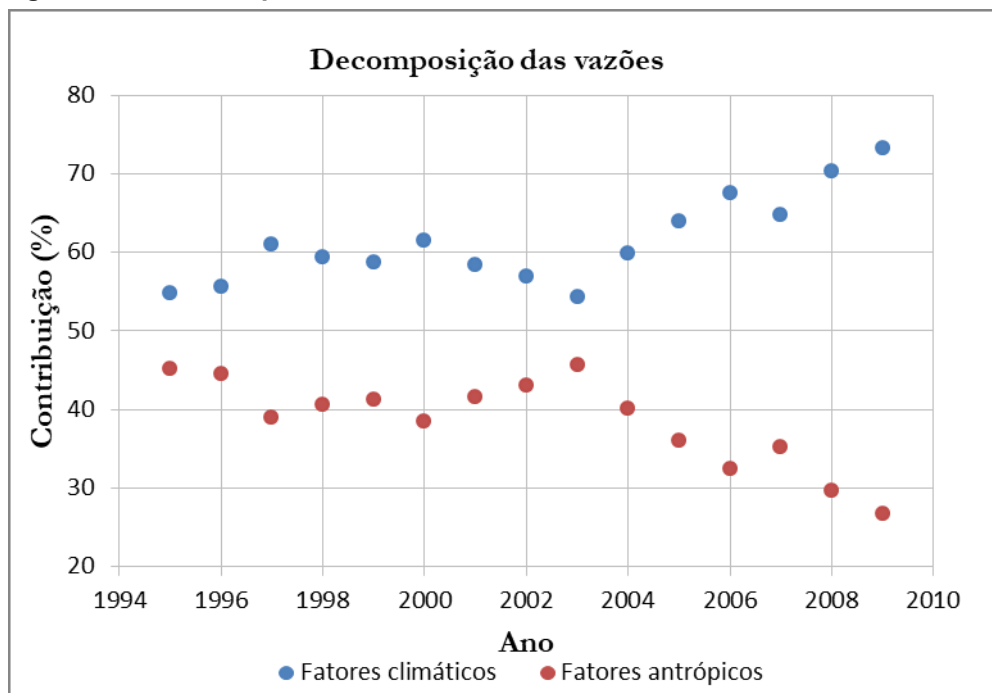


Em um primeiro momento, o método de decomposição foi aplicado utilizando todas as variáveis climáticas (precipitação e temperatura) e variáveis antrópicas (uso da água, agricultura e vegetação natural). Da Figura 5.31 à Figura 5.33 são mostradas as evoluções da mudança nas vazões e as contribuições induzidas pelos fatores

climáticos e a mudança de escoamento induzida pelos fatores antrópicos, obtidos a partir da aplicação do método de decomposição.

É possível observar que tanto os fatores climáticos quanto os fatores antrópicos possuem relevância na mudança de comportamento das vazões em todos os trechos fisiográficos da bacia, sendo que, com o passar dos anos, esse comportamento é alterado. No Alto São Francisco (Figura 5.31) os fatores climáticos possuem uma maior contribuição na redução das vazões, sendo que próximo ao ano de 2010 a parcela climática contribui com quase 75% na redução das vazões. Possivelmente esse resultado obtido pode estar relacionado pelo fato de que nessa região não está sob influência de reservatórios de grande regulação como Três Marias, Sobradinho e Itaparica. Além disso, nesse trecho da bacia não são observados muitos usos antrópicos que podem interferir no comportamento das vazões.

Figura 5.31 – Decomposição da variabilidade das vazões no Alto São Francisco



Diferente do que foi encontrado no Alto São Francisco, as regiões do Médio (Figura 5.32) e Baixo (Figura 5.33) São Francisco possuem um comportamento muito próximo entre si quando se analisam os fatores contribuintes da redução das vazões. Nessas duas regiões, os fatores antrópicos possuem um impacto maior no comportamento das vazões, sendo que no Médio São Francisco, a maior

contribuição antrópica foi observada no ano de 2003, com uma parcela de 60%. No Baixo São Francisco observa-se que em anos mais recentes há uma maior diferença entre as contribuições dos fatores, obtendo uma parcela de 57% de contribuição antrópica no ano de 2009. A partir dos resultados gráficos foram observados que apenas no ano de 2000 ambos os fatores possuem uma contribuição semelhante nas duas regiões.

Os comportamentos observados nas regiões do Médio e Baixo São Francisco podem estar relacionados ao uso intensivo do solo e da água para atividades agrícolas, já que nessas regiões estão localizados os maiores perímetros irrigados da bacia. Além disso, é importante ressaltar que nas regiões do Médio e Baixo São Francisco os efeitos são cumulativos das regiões analisadas. Por exemplo, o Médio São Francisco é o acumulado do Alto e Médio São Francisco e, por fim, o Baixo São Francisco é o acumulado do Alto, Médio e Baixo São Francisco. Como a região do Médio São Francisco possui grande extensão territorial e tem intensa atividade antrópica, o Baixo São Francisco não poderia ter um resultado muito diferente do atingido no Médio, pois o Baixo é um reflexo dos resultados obtidos no Médio São Francisco.

Diferente do que foi encontrado neste estudo, Dorneles (2021), ao analisar qual fator possui maior impacto na variabilidade das vazões, selecionou 32 estações localizadas no Alto e Médio São Francisco e subdividiu em cinco sub-bacias. A autora concluiu em seu trabalho que nas sub-bacias localizadas no Alto São Francisco as atividades antrópicas possuem um maior peso na variabilidade das vazões, enquanto nas outras três sub-bacias localizadas no Médio São Francisco os fatores climáticos têm maior predominância no comportamento das vazões. Possivelmente, essa divergência de resultado entre os estudos pode estar relacionada à divisão da bacia que foi considerada. Neste estudo à bacia foi dividida em três regiões baseada na localização dos grandes reservatórios da bacia (Três Marias, Sobradinho e Itaparica), já Dorneles (2021) analisou pontualmente, nas sub-bacias, qual fator teve maior influência no comportamento das vazões.

Figura 5.32 - Decomposição da variabilidade das vazões no Médio São Francisco

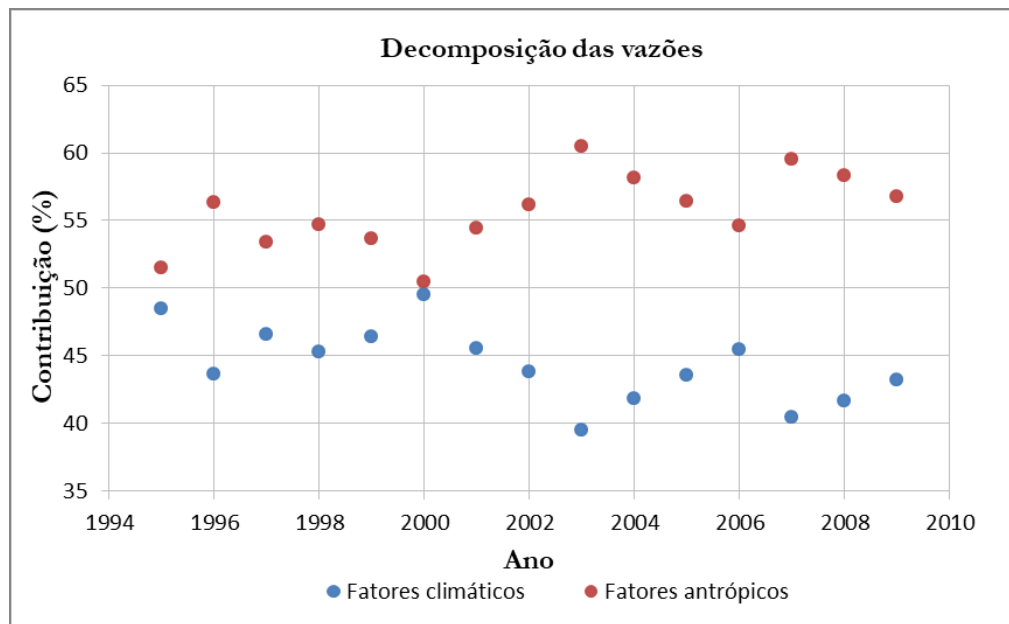
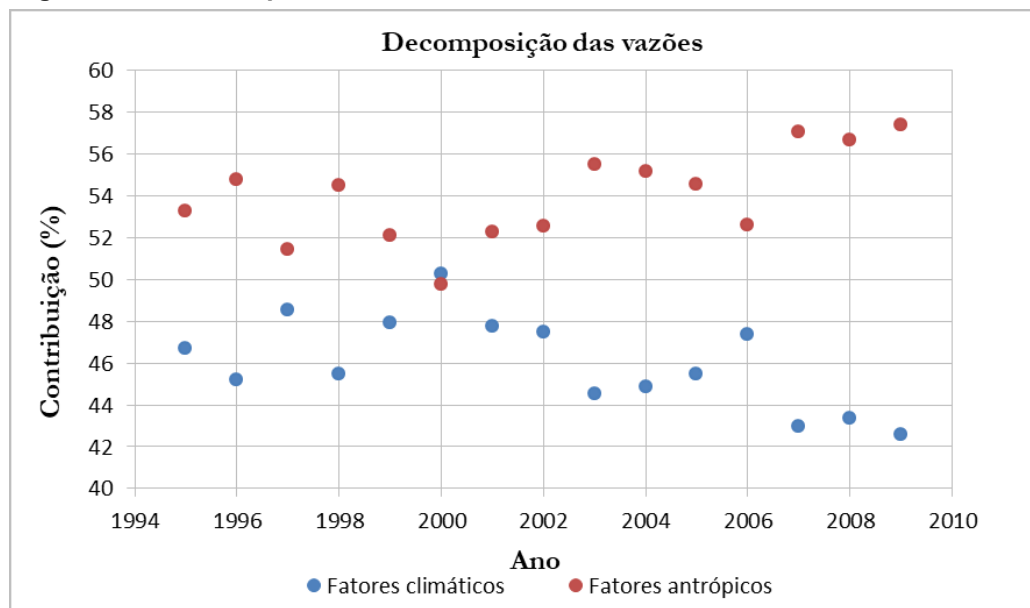


Figura 5.33 - Decomposição da variabilidade das vazões no Baixo São Francisco



A contribuição para a mudança de escoamento induzida pela mudança climática DQc contém dois componentes, ou seja, DQ_c1 e DQ_c2, sendo que DQ_c1 está relacionado aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial, e DQ_c2 é atribuído para a mudança nos recursos hídricos causada pelo parâmetro “w”. A partir da Tabela 5.20 à Tabela 5.22 e da Figura 5.34 a Figura 5.36 é possível observar que DQ_c1 possui uma maior contribuição no comportamento das vazões, levando a uma redução nas vazões em todos os trechos fisiográficos da bacia. Já o DQ_c2 tem uma menor contribuição na

variabilidade das vazões, levando a um aumento nas mesmas em todas as regiões analisadas. Próximo aos anos de 2003 os dois componentes são próximos entre si, e em anos mais recentes os dois componentes possuem uma maior divergência.

Figura 5.34 – Decomposição da contribuição climática no trecho Alto São Francisco

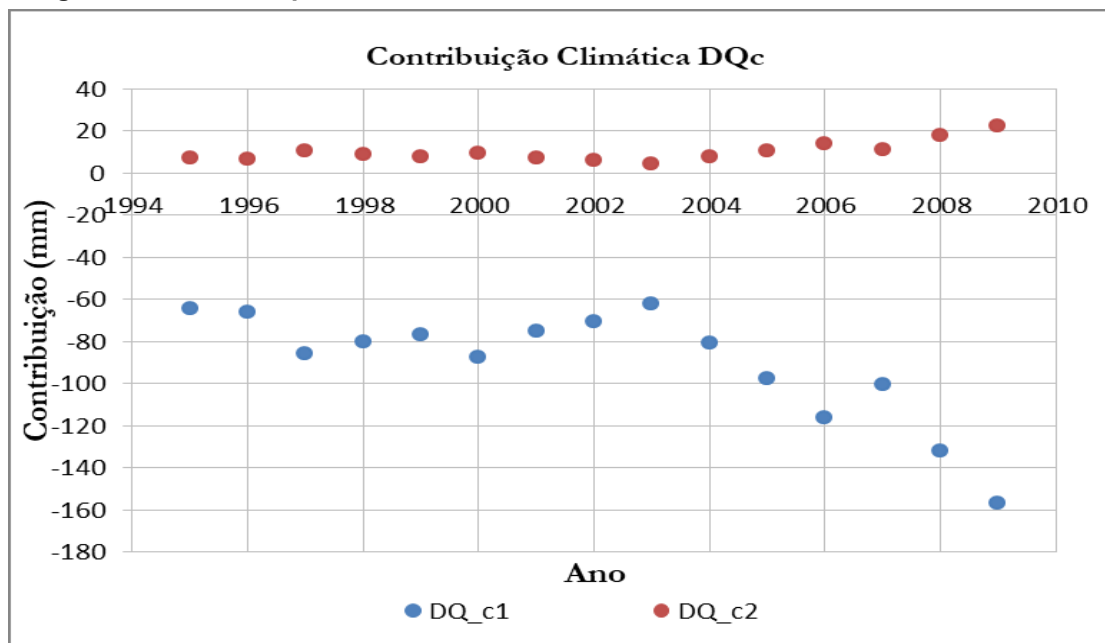


Figura 5.35 – Decomposição da contribuição climática no trecho Médio São Francisco

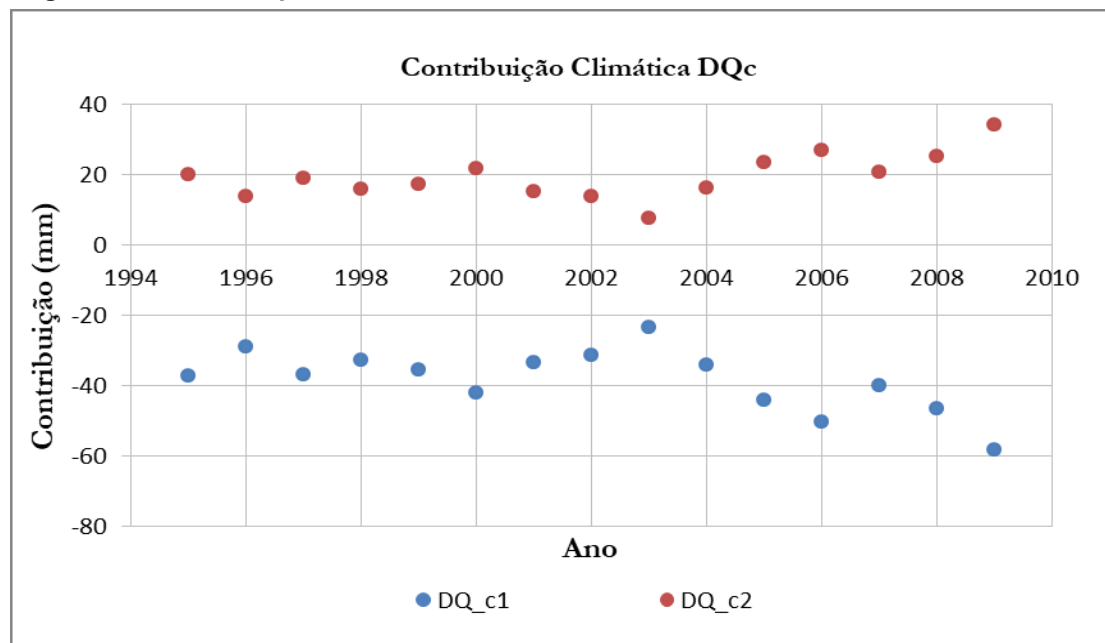
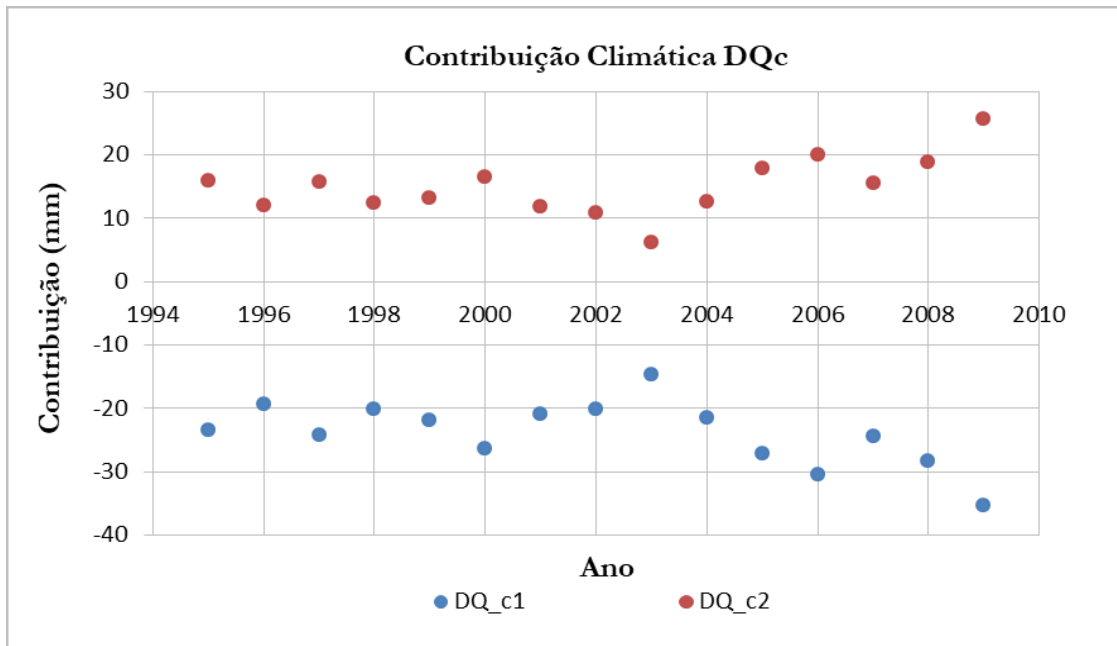


Figura 5.36 – Decomposição da contribuição climática no trecho Baixo São Francisco



Nas regiões fisiográficas e nos subperíodos analisados, existem variações espaço-temporais dos impactos das atividades humanas e da variabilidade climática nas vazões (Tabela 5.20 a Tabela 5.22). Apesar de as atividades antrópicas terem grande importância nas reduções das vazões, se pode observar, assim como apresentado na análise gráfica e da Tabela 5.20 à Tabela 5.22, que no Alto São Francisco a mudança climática é o principal fator determinante para a redução da vazão na bacia. Em contrapartida, no Médio e Baixo São Francisco as atividades humanas têm uma maior relevância no comportamento das vazões. Um ponto que merece atenção na contribuição da variabilidade das vazões é o comportamento isolado que cada uma das variáveis tem nas vazões (da Figura 5.37 à Figura 5.39). Em todas as regiões fisiográficas observa-se que a temperatura é a variável que possui menor influência nesse comportamento, seguido da vegetação; já o consumo de água se destaca com elevada importância no comportamento das vazões.

A importância que cada variável possui no comportamento das vazões é alterada de acordo com a região analisada (Figura 5.37 à Figura 5.39). No Alto São Francisco (Tabela 5.20 e Figura 5.37) as variáveis que possuem um papel de destaque são a precipitação e consumo de água. A precipitação foi a única variável que resultou em um aumento nas vazões, enquanto todas as variáveis antrópicas e a temperatura levaram a uma redução nas vazões. A temperatura, agricultura e vegetação obtiveram um comportamento muito próximo entre si, sem muita importância na

variabilidade das vazões nesse trecho da bacia e não deveriam compor o modelo. No Médio São Francisco (Tabela 5.21 e Figura 5.38), de uma forma geral, todas as variáveis possuem comportamentos semelhantes, sendo que em alguns pontos a precipitação, consumo de água, agricultura e vegetação se destacam. Nesse trecho da bacia, de uma forma geral, todas as variáveis contribuíram em um aumento nas vazões, salvo em alguns anos em que o consumo de água, a precipitação e agricultura contribuíram com a redução das vazões. Assim como no Médio, o Baixo São Francisco (Tabela 5.22 e Figura 5.39) apresentou um comportamento muito parecido entre as variáveis analisadas, sendo que o consumo de água obteve uma maior relevância no comportamento das vazões. Nesse trecho apenas a precipitação influenciou no aumento das vazões; todas as outras variáveis resultaram em uma redução nas vazões (temperatura, consumo de água, vegetação, agricultura).

Figura 5.37 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Alto São Francisco

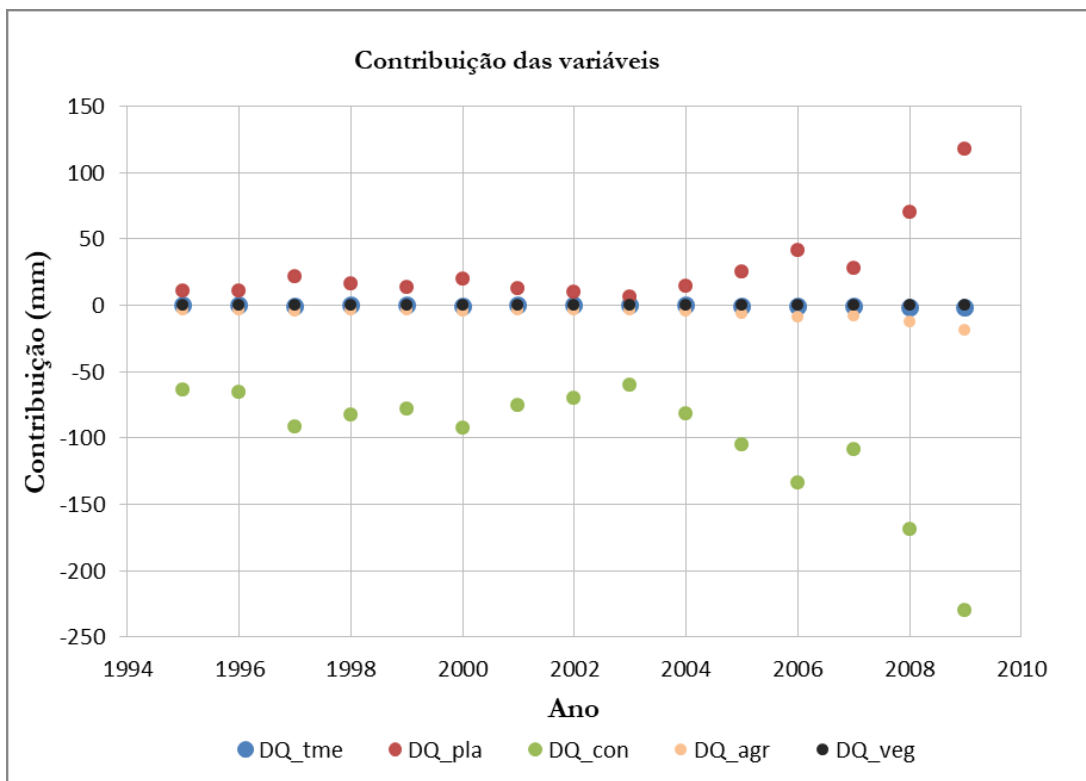


Figura 5.38 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Médio São Francisco

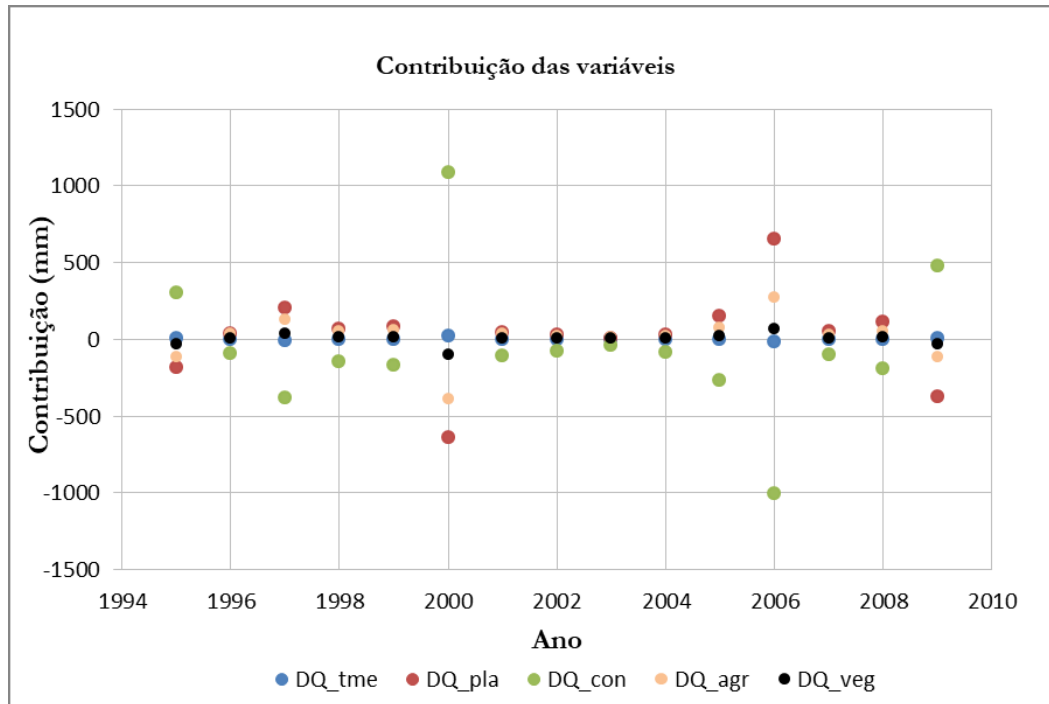
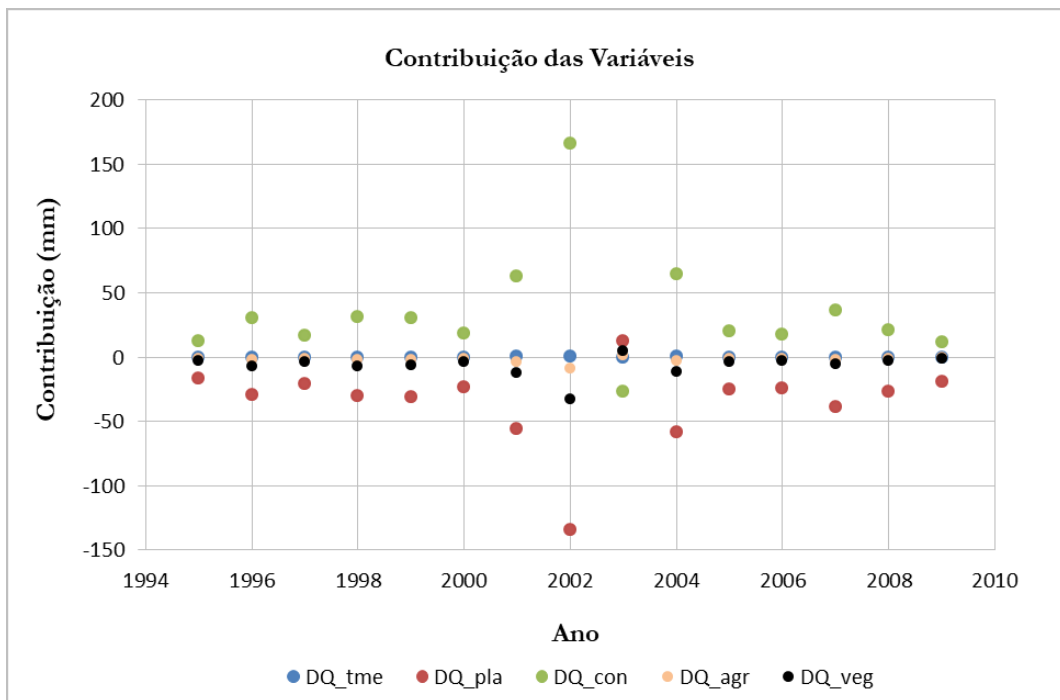


Figura 5.39 – Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Baixo São Francisco



Os impactos das atividades antrópicas e das mudanças climáticas nas vazões foram quantificados para cada região fisiográfica na janela temporal de 1995 a 2009 (da Tabela 5.20 à Tabela 5.22). As tabelas citadas resumem a contribuição climática (DQc), a contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas

causadas pela precipitação e evaporação potencial (DQ_c1), a contribuição climática causada pelo parâmetro “w” (DQ_c2), a contribuição humana (DQh) e a contribuição de cada variável analisada estimada pelo método de decomposição baseado na equação de Fu, juntamente com a vazão média anual observada (DQobs) e modelada (DQmod) em diferentes janelas de tempo.

Tabela 5.20 – Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Alto São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_tme	DQ_con	DQ_agr	DQ_veg
	(mm)				(%)		(mm)				
1995	-94.801	-104.881	-64.507	7.025	54.808	45.192	10.372	-0.371	-63.732	-3.499	-0.253
1996	-89.964	-107.050	-66.309	6.832	55.561	44.439	10.363	-0.389	-65.827	-3.356	-0.268
1997	-115.980	-123.123	-85.602	10.462	61.028	38.972	21.476	-0.525	-91.263	-4.460	-0.368
1998	-110.553	-119.656	-79.987	8.838	59.462	40.538	16.236	-0.384	-82.844	-3.833	-0.323
1999	-103.348	-117.418	-76.764	7.853	58.689	41.311	13.720	-0.409	-78.379	-3.548	-0.296
2000	-111.374	-126.907	-87.735	9.579	61.585	38.415	19.648	-0.536	-92.665	-4.271	-0.333
2001	-90.993	-116.477	-75.144	7.074	58.441	41.559	12.101	-0.452	-75.841	-3.617	-0.262
2002	-90.027	-112.978	-70.589	6.228	56.968	43.032	9.812	-0.357	-70.086	-3.503	-0.228
2003	-88.480	-106.497	-62.323	4.410	54.380	45.620	6.093	-0.312	-60.273	-3.238	-0.184
2004	-101.175	-121.925	-80.678	7.713	59.844	40.156	14.143	-0.499	-81.648	-4.727	-0.234
2005	-116.964	-136.511	-97.928	10.687	63.908	36.092	24.822	-0.656	-104.855	-6.269	-0.283
2006	-126.284	-151.801	-116.400	13.821	67.575	32.425	41.020	-0.973	-133.598	-8.694	-0.335
2007	-143.809	-137.798	-100.601	11.312	64.797	35.203	27.985	-0.832	-108.446	-7.739	-0.258
2008	-174.667	-162.538	-132.337	18.052	70.313	29.687	69.737	-1.426	-169.309	-12.916	-0.371
2009	-217.161	-183.410	-156.999	22.691	73.228	26.772	117.278	-1.891	-230.405	-18.816	-0.475

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Tabela 5.21 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Médio São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_tme	DQ_con	DQ_agr	DQ_veg
	(mm)				(%)		(mm)				
1995	-49.510	-35.382	-37.334	20.182	48.477	51.523	-183.422	6.105	306.969	-113.784	-33.020
1996	-43.482	-34.524	-28.850	13.767	43.687	56.313	38.449	-1.856	-95.008	33.507	9.826
1997	-47.025	-38.495	-36.790	18.845	46.616	53.384	205.999	-7.685	-379.944	125.966	37.719
1998	-44.502	-36.761	-32.646	15.998	45.288	54.712	67.188	-2.465	-148.682	52.933	14.378
1999	-40.495	-39.441	-35.427	17.138	46.372	53.628	81.012	-2.908	-169.532	57.394	15.745
2000	-43.180	-41.419	-42.131	21.627	49.503	50.497	-643.251	19.664	1086.436	-386.039	-97.314
2001	-35.931	-40.044	-33.392	15.158	45.535	54.465	43.431	-1.880	-105.449	36.429	9.235
2002	-34.892	-40.597	-31.452	13.651	43.846	56.154	27.817	-1.247	-76.336	25.335	6.630
2003	-34.708	-39.894	-23.429	7.661	39.526	60.474	7.933	-0.596	-38.684	12.348	3.230
2004	-41.267	-43.578	-34.358	16.126	41.838	58.162	33.200	-1.310	-81.097	24.585	6.390
2005	-48.798	-47.523	-44.240	23.546	43.544	56.456	152.569	-4.187	-263.900	75.506	19.318
2006	-55.149	-51.440	-50.451	27.085	45.424	54.576	656.693	-17.113	-1007.287	274.993	69.349
2007	-67.646	-48.480	-40.230	20.623	40.443	59.557	50.792	-1.780	-103.039	27.563	6.858
2008	-69.214	-51.465	-46.576	25.139	41.654	58.346	113.699	-3.482	-193.137	49.310	12.173
2009	-81.955	-56.077	-58.361	34.111	43.243	56.757	-370.705	8.536	481.190	-115.162	-28.108

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Tabela 5.22 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Baixo São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_tme	DQ_con	DQ_agr	DQ_veg
	(mm)				(%)		(mm)				
1995	-29.621	-16.077	-23.426	15.915	46.720	53.280	-16.310	0.044	12.475	-0.721	-2.999
1996	-27.904	-16.298	-19.352	11.985	45.202	54.798	-29.018	0.105	30.197	-1.670	-6.981
1997	-27.147	-17.711	-24.286	15.687	48.555	51.445	-20.575	0.059	16.411	-0.860	-3.635
1998	-28.120	-17.016	-20.213	12.471	45.502	54.498	-30.289	0.091	30.893	-1.739	-6.698
1999	-27.798	-18.182	-21.894	13.185	47.898	52.102	-31.029	0.093	30.167	-1.628	-6.312
2000	-28.965	-19.357	-26.266	16.541	50.240	49.760	-23.343	0.060	18.263	-1.024	-3.681
2001	-25.939	-19.006	-20.928	11.853	47.749	52.251	-56.169	0.201	62.744	-3.438	-12.413
2002	-24.561	-19.297	-20.041	10.882	47.465	52.535	-134.386	0.496	166.188	-8.803	-32.654
2003	-23.563	-19.046	-14.695	6.216	44.520	55.480	12.189	-0.077	-27.149	1.393	5.165
2004	-24.230	-19.572	-21.478	12.696	44.866	55.134	-58.702	0.192	64.588	-3.160	-11.698
2005	-26.730	-20.493	-27.112	17.792	45.477	54.523	-25.110	0.059	20.059	-0.929	-3.398
2006	-29.939	-21.945	-30.487	20.087	47.389	52.611	-24.512	0.055	17.647	-0.780	-2.810
2007	-38.251	-20.843	-24.456	15.501	42.963	57.037	-38.544	0.118	36.717	-1.592	-5.655
2008	-39.026	-21.599	-28.278	18.915	43.349	56.651	-26.587	0.071	21.096	-0.872	-3.071
2009	-43.696	-22.344	-35.242	25.725	42.593	57.407	-19.019	0.038	11.454	-0.443	-1.546

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Apesar de todas as variáveis auxiliarem no comportamento das vazões, quando a contribuição é muito pequena pode haver uma interferência no modelo construído. Dessa forma, foi feita outra simulação considerando apenas as variáveis mais relevantes em todas as regiões da bacia, sendo elas a precipitação e consumo de água. O comportamento das vazões observadas e modeladas dessa nova simulação são apresentados da Figura 5.40 à Figura 5.42, os resultados foram comparados com as vazões simuladas considerando todas as variáveis.

A partir da análise gráfica, percebe-se que no Alto São Francisco (Figura 5.40) a vazão modelada utilizando apenas a precipitação e consumo humano possui o mesmo comportamento da vazão simulada com todas as variáveis. Não houve alteração de comportamento das vazões mudando as variáveis utilizadas para esse trecho. Assim como na primeira simulação, a vazão modelada obteve um comportamento muito similar à vazão observada, sendo que a partir do ano de 2007 a variabilidade da vazão modelada foi superior à da vazão observada.

No Médio São Francisco (Figura 5.41) percebe-se que a vazão modelada considerando a precipitação e consumo de água foi subestimada em relação à simulação com todas as variáveis, sendo que, em anos mais recentes, ambas as vazões modeladas obtiveram o mesmo comportamento. Em relação à vazão observada, a vazão modelada obteve um comportamento oposto. Quando houve um aumento na variabilidade da vazão observada, a vazão modelada reduziu, e vice-versa. Apenas nos anos de 1998 e 2005 houve um ponto de coincidência entre as vazões.

Por fim, no Baixo São Francisco (Figura 5.42) a vazão modelada com todas as variáveis obteve valores superestimados em relação à vazão utilizando a precipitação e consumo de água, até o ano de 2003. A partir de 2004, as vazões modeladas obtiveram um mesmo comportamento. Assim como na primeira simulação, não houve boa aderência entre as vazões observadas e simuladas nesse trecho da bacia; portanto, é necessário analisar com cautela os resultados obtidos.

De uma forma geral, não houve um ajuste melhor entre as vazões observadas e simuladas com a nova simulação realizada. Acredita-se, nesse caso, que a exclusão de algumas variáveis não influenciou no novo modelo construído.

Figura 5.40 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Alto São Francisco

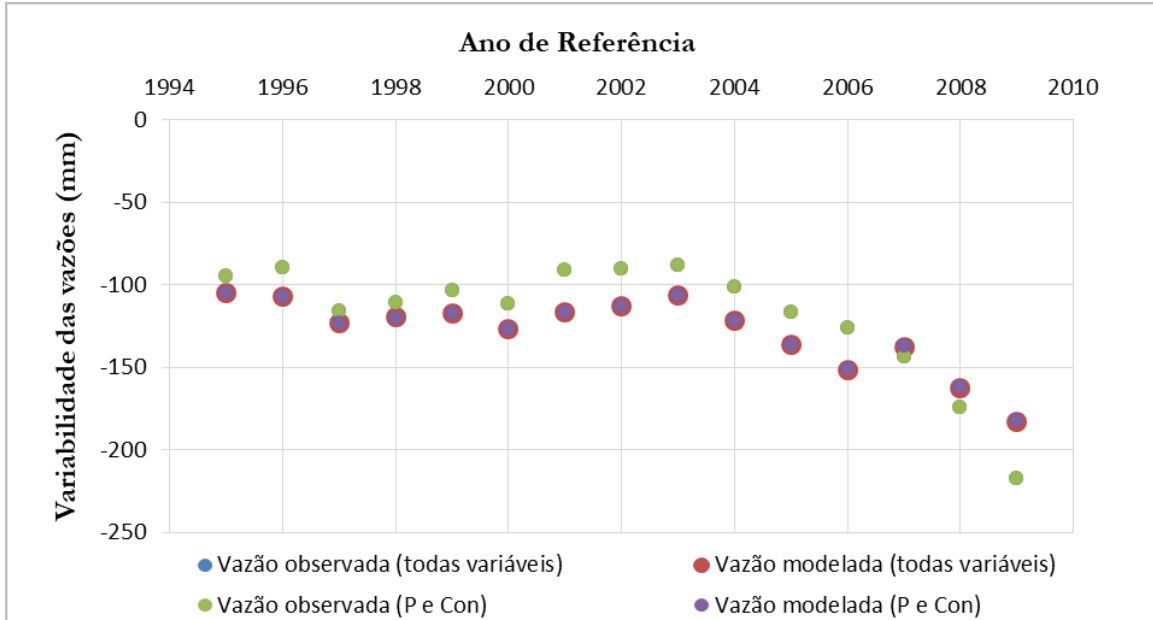


Figura 5.41 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Médio São Francisco

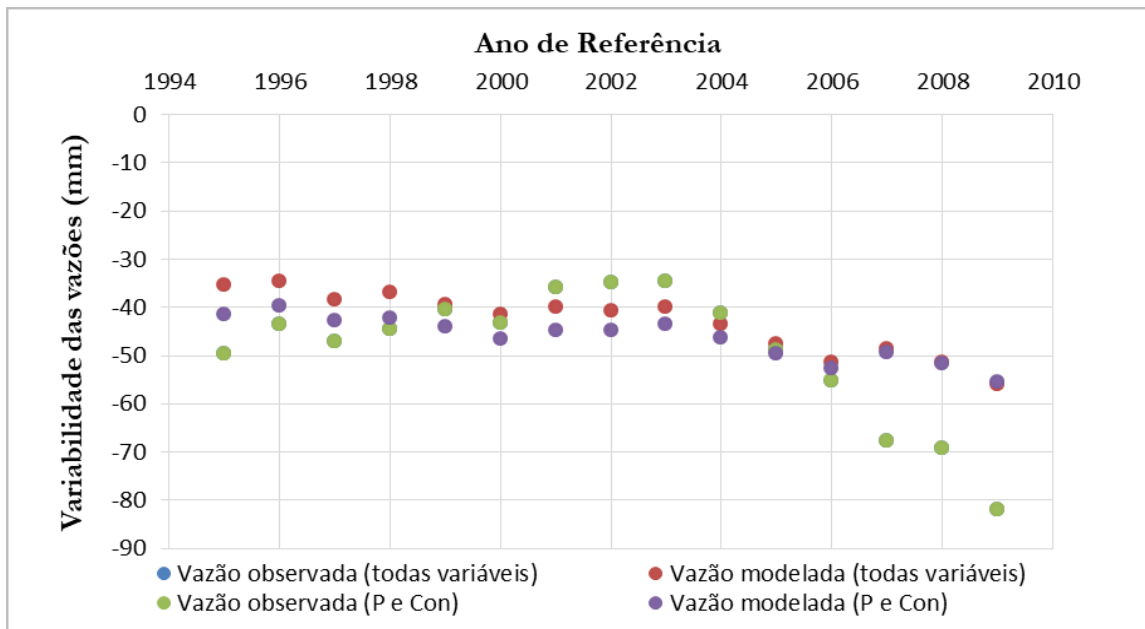
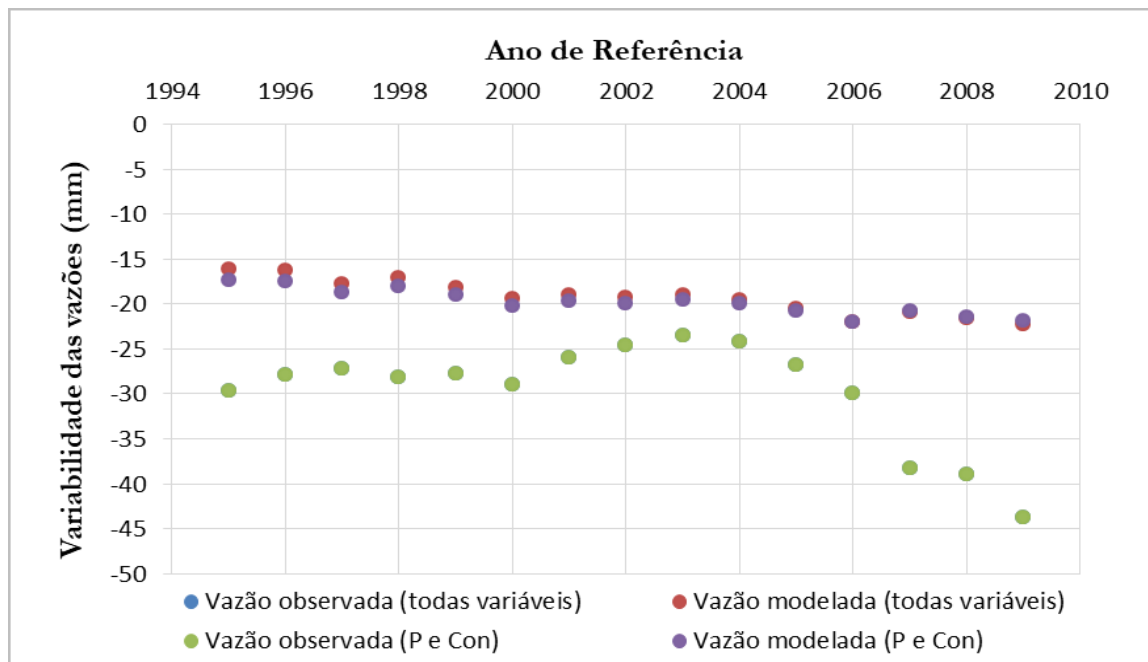


Figura 5.42 - Comparação entre as vazões observadas e simuladas no Baixo São Francisco



Após analisar o comportamento das vazões, foi realizada a decomposição para entender qual fator (climático ou antrópico) teve uma maior contribuição na variabilidade das vazões (da Figura 5.43 à Figura 5.45). Assim como na primeira simulação, as contribuições dos fatores tiveram o mesmo comportamento. No Alto São Francisco (Figura 5.43) o fator determinante da variabilidade das vazões foram as variáveis climáticas, que nesse caso é representado apenas pela precipitação. Outro fator que merece destaque é que, em anos como 1995, 1996 e 2003, a contribuição entre ambos os fatores foi muito próxima; a partir do ano de 2004, houve um aumento expressivo da contribuição dos fatores climáticos. Possivelmente, esse comportamento observado pode estar relacionado ao fato de que a precipitação influenciou muito mais do que o consumo de água no comportamento das vazões. A redução nas vazões não acompanhou a mesma escala de aumento do consumo de água (em termos relativos e em termos absolutos), o que implica que o comportamento das vazões deve ser explicado pela diminuição da precipitação.

Diferente do que foi observado no Alto São Francisco, no Médio (Figura 5.44) e Baixo São Francisco (Figura 5.45) o fator que teve uma maior contribuição no comportamento das vazões foi o fator antrópico, que nesse caso é representado pelo consumo de água.

Figura 5.43 - Decomposição da variabilidade das vazões no Alto São Francisco

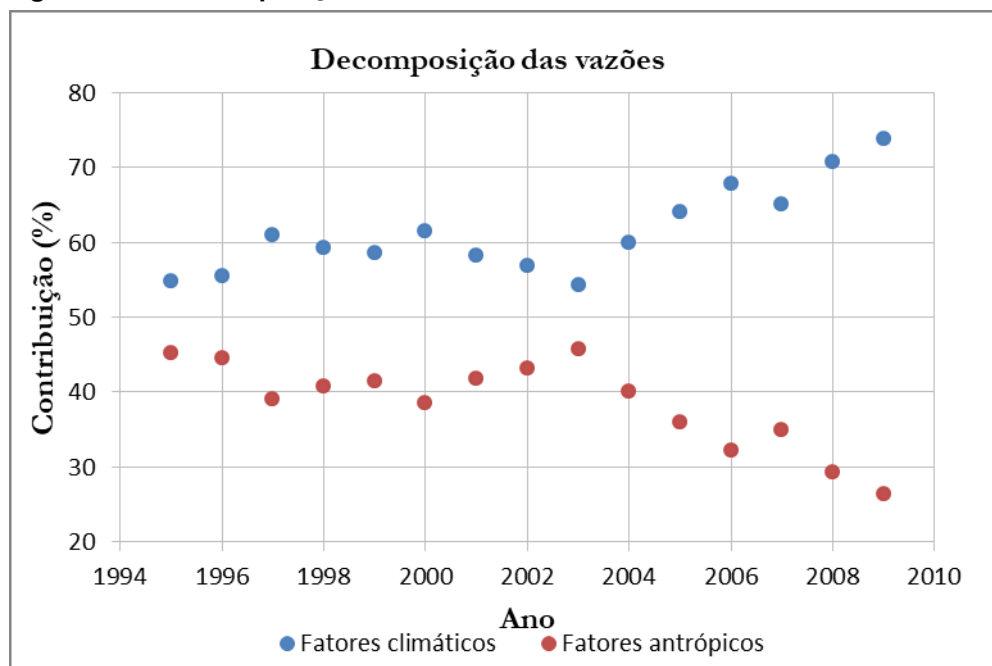


Figura 5.44 - Decomposição da variabilidade das vazões no Médio São Francisco

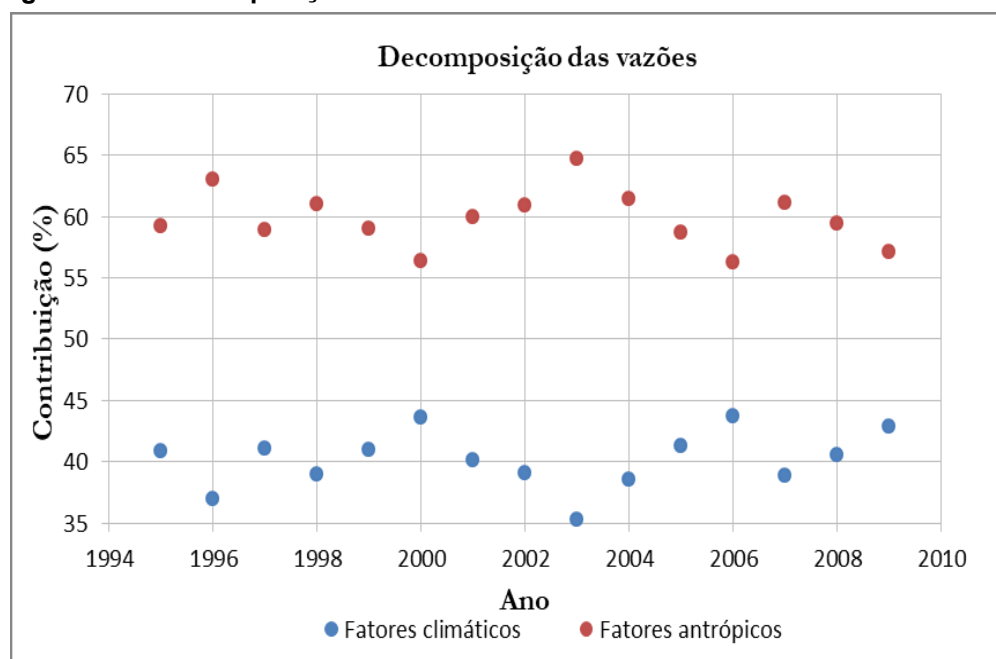
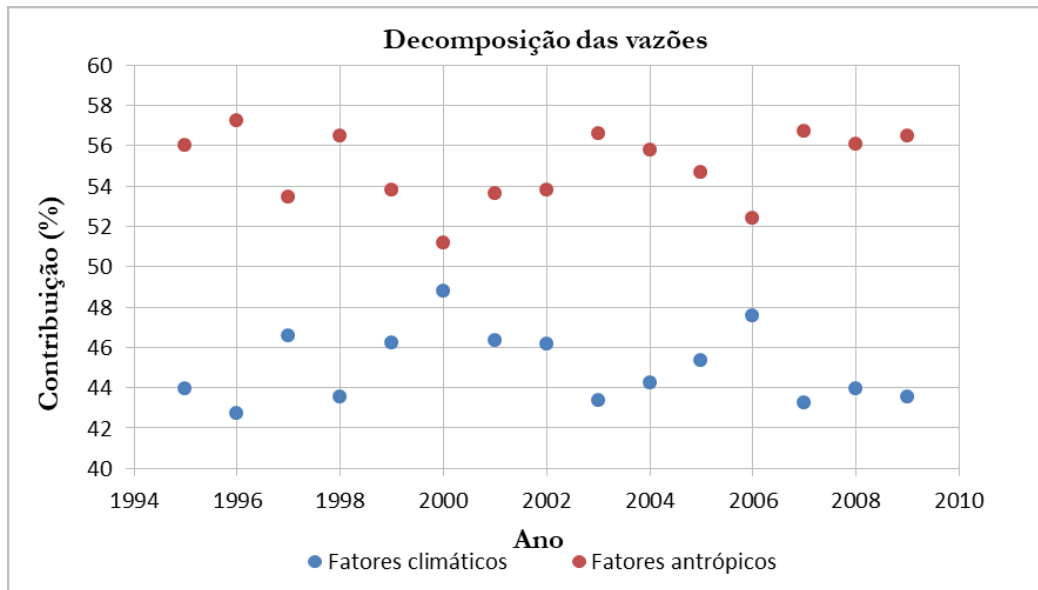


Figura 5.45 - Decomposição da variabilidade das vazões no Baixo São Francisco



A partir da Figura 5.46 à Figura 5.48 observa-se que em todos os trechos fisiográficos da bacia o componente DQ_c1 contribui para uma redução nas vazões, sendo que no Alto São Francisco (Figura 5.46) essa contribuição é muito maior quando comparada aquelas das demais regiões. Já o componente DQ_c2 contribui de forma a aumentar as vazões em todas as regiões, sendo que o comportamento encontrado no Médio (Figura 5.47) e Baixo São Francisco (Figura 5.48) são muito próximos. Próximo ao ano de 2003 observa-se que os dois componentes possuem uma maior divergência em todos os trechos da bacia.

Além de calcular a contribuição de cada componente do fator climático (DQc), também foram comparados os valores de DQ_c1 e DQ_c2 na simulação com todas as variáveis e na simulação com as variáveis precipitação e consumo de água. Em todos os trechos analisados houve uma similaridade entre os componentes de todas as simulações; portanto, não houve alteração no comportamento com a exclusão de variáveis climáticas e antrópicas.

Figura 5.46 – Decomposição da contribuição climática no trecho Alto São Francisco

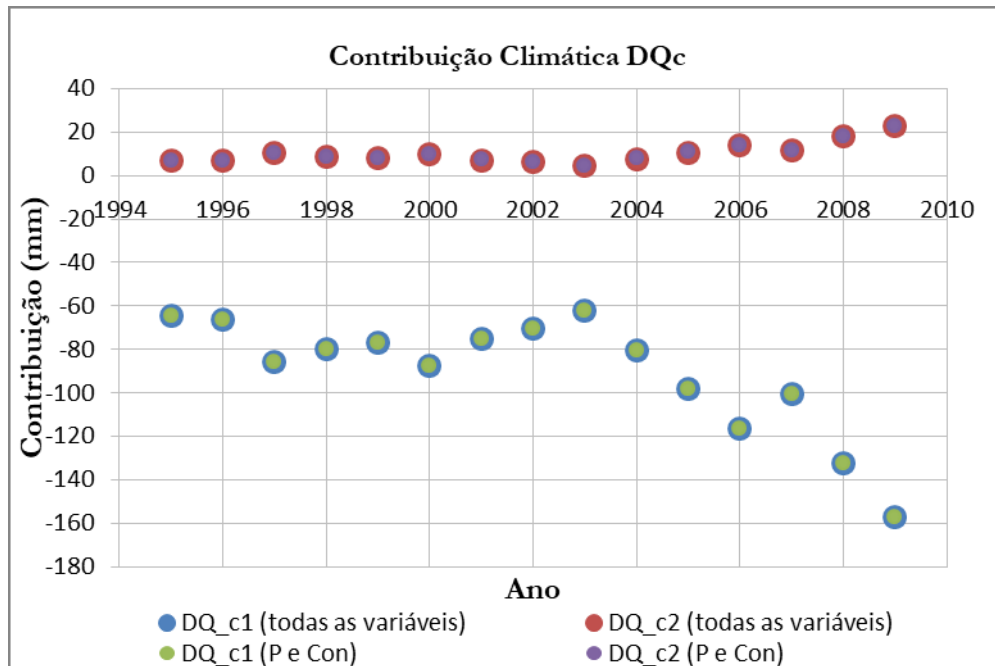


Figura 5.47 – Decomposição da contribuição climática no trecho Médio São Francisco

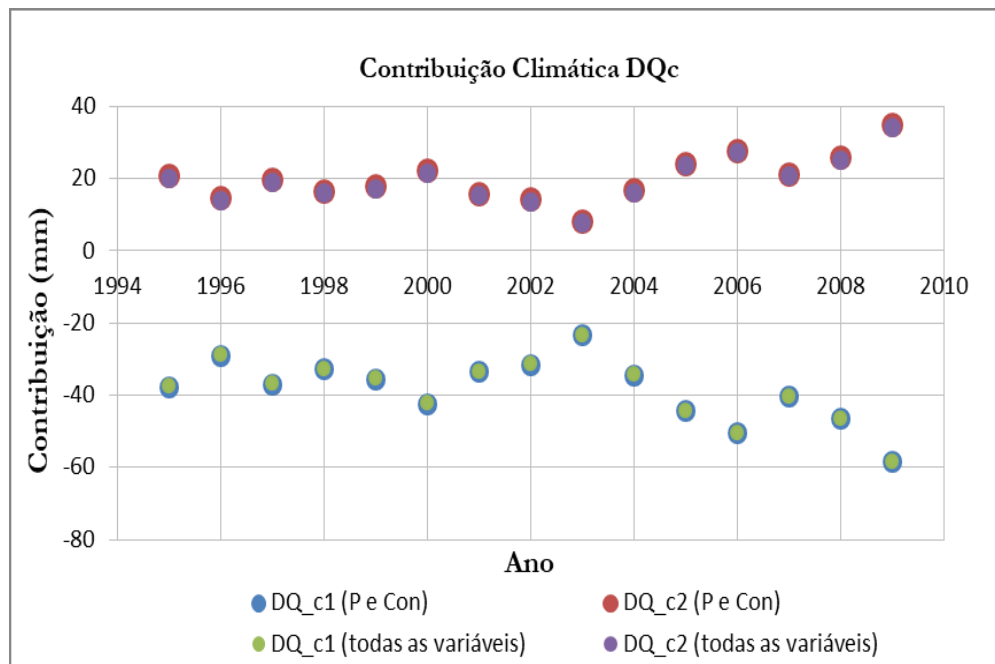
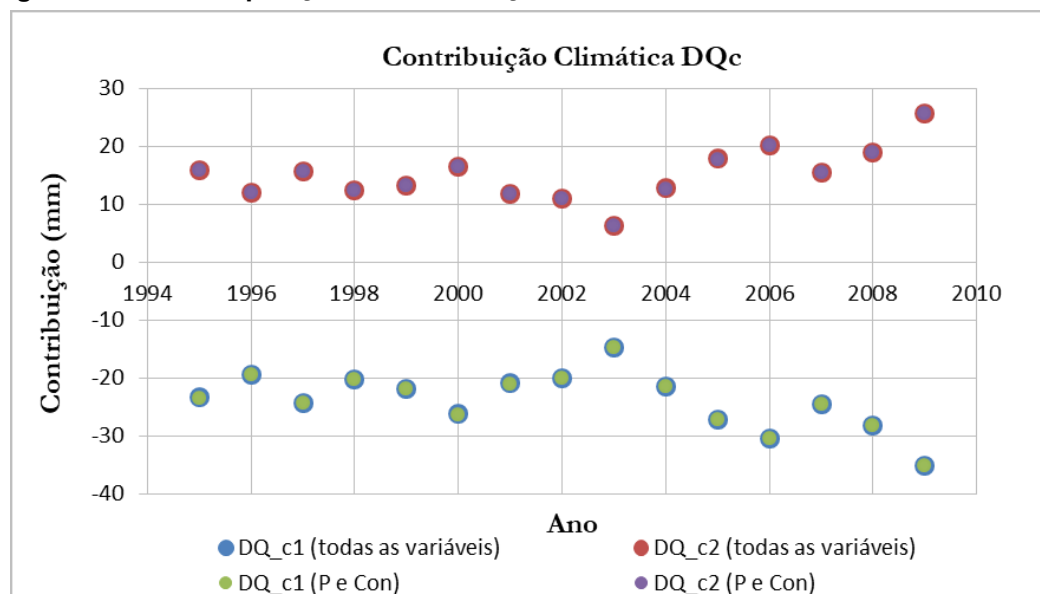


Figura 5.48 - Decomposição da contribuição climática no trecho Baixo São Francisco



Após analisar a contribuição dos componentes climáticos foi necessário entender qual a contribuição das variáveis utilizadas (precipitação e consumo de água) no comportamento das vazões (da Figura 5.49 à Figura 5.51).

A partir da análise gráfica do Alto (Figura 5.49) e Médio São Francisco (Figura 5.50) percebe-se que a precipitação contribui para o aumento das vazões, enquanto o consumo de água contribui para a redução das vazões. No Alto São Francisco o comportamento observado entre as variáveis é mais uniforme do que no trecho do Médio São Francisco. A partir do ano de 2004 há uma mudança de comportamento entre as variáveis, com um aumento da contribuição positiva da precipitação nas vazões e um aumento da contribuição negativa do consumo de água nas vazões. No Médio São Francisco há uma grande variação na contribuição individual das variáveis, sendo que em alguns anos a contribuição entre elas é muito próxima. Tanto nos trechos Alto e Médio São Francisco percebe-se que em anos mais recentes há um grande salto entre as contribuições dessas variáveis.

Por sua vez, no Baixo São Francisco (Figura 5.51), os comportamentos da precipitação e do consumo de água são muito próximos, exceto no ano de 2002, no qual eles são bem divergentes um do outro. Diferente do que foi encontrado nas outras regiões, o consumo de água contribui para o aumento das vazões, enquanto a precipitação contribui para a redução das vazões. De um modo geral, nesse trecho

da bacia não há uma grande diferença entre a contribuição dessas variáveis no comportamento das vazões.

Figura 5.49 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Alto São Francisco

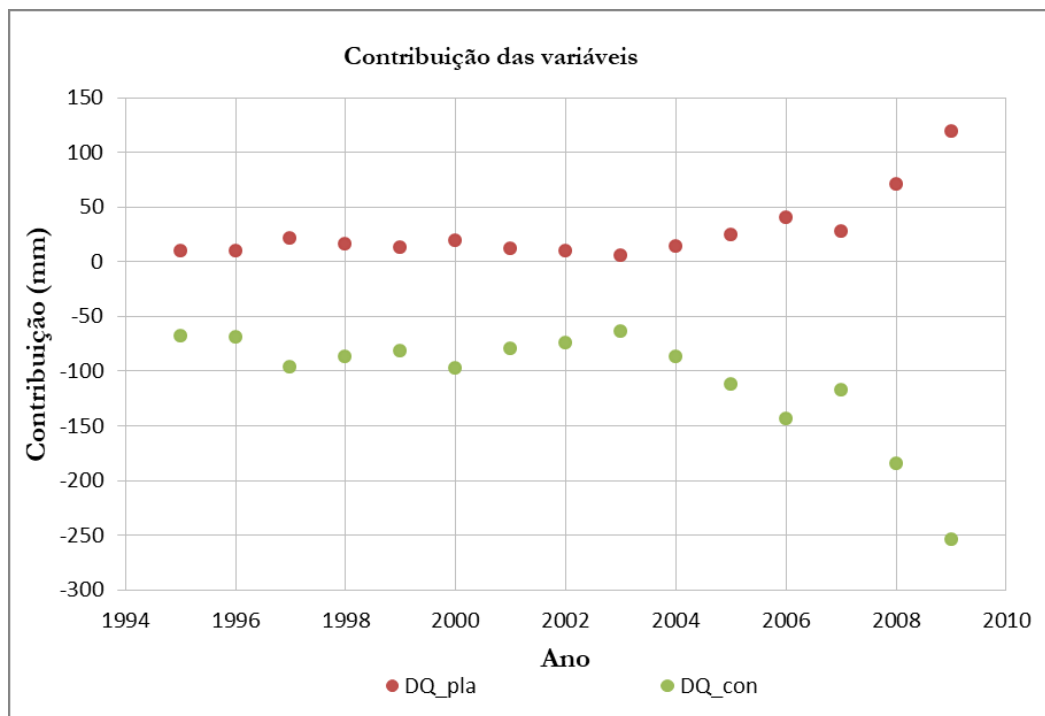


Figura 5.50 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Médio São Francisco

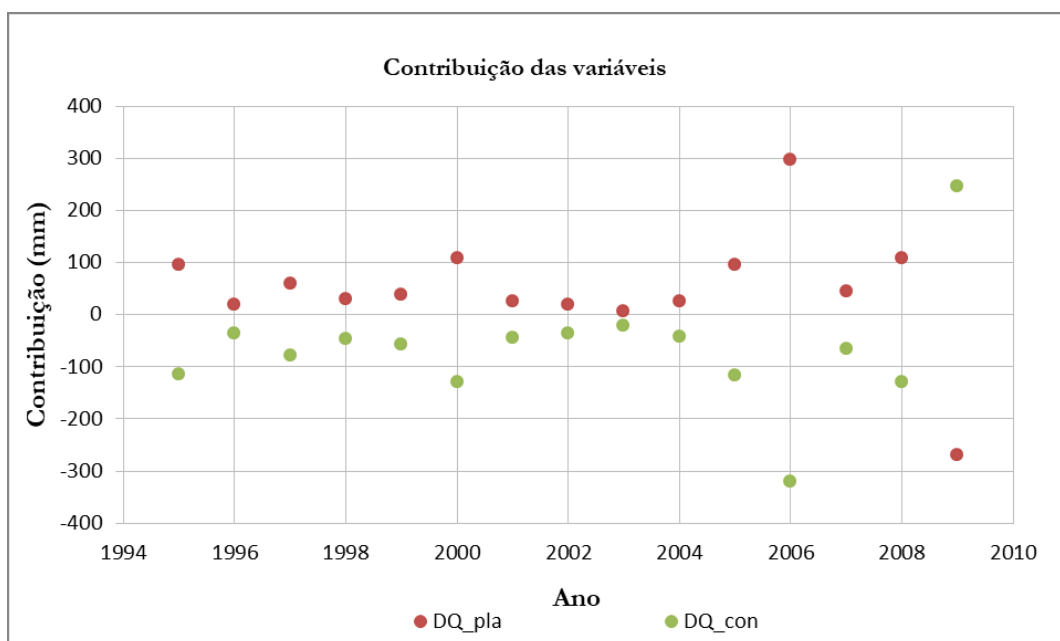
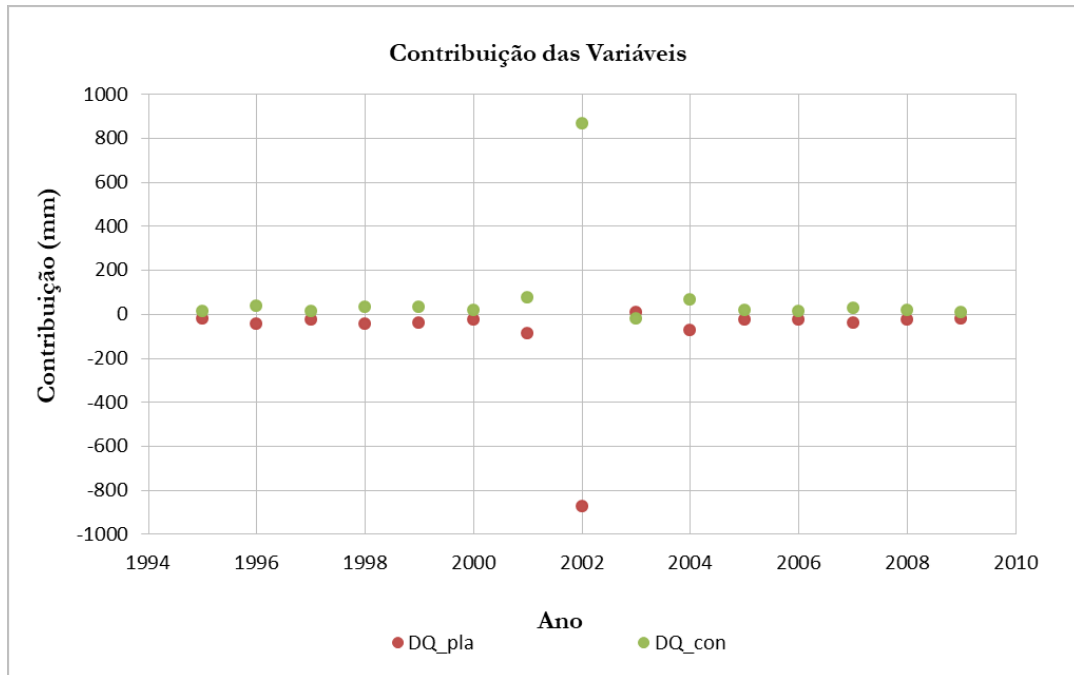


Figura 5.51 - Contribuição individual das variáveis no comportamento das vazões no Baixo São Francisco



Após analisar graficamente a contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões, também foi obtida a contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial (DQ_c1), a contribuição climática causada pelo parâmetro “w” (DQ_c2), e a contribuição de cada variável analisada estimada pelo método de decomposição baseado na equação de Fu juntamente com a vazão média anual observada (DQobs) e modelada (DQmod) em diferentes janelas de tempo (Tabela 5.23 a Tabela 5.25).

Tabela 5.23 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Alto São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_con
	(mm)				(%)		(mm)	
1995	-94.801	-104.677	-64.509	7.112	54.833	45.167	10.163	-67.560
1996	-89.964	-107.013	-66.311	6.931	55.489	44.511	10.111	-69.491
1997	-115.980	-123.279	-85.602	10.472	60.943	39.057	20.882	-96.012
1998	-110.553	-119.950	-79.987	8.840	59.314	40.686	15.738	-86.885
1999	-103.348	-117.714	-76.764	7.904	58.497	41.503	13.291	-82.151
2000	-111.374	-127.187	-87.735	9.616	61.420	38.580	19.040	-97.159
2001	-90.993	-116.620	-75.145	7.175	58.283	41.717	11.758	-79.728
2002	-90.027	-113.043	-70.590	6.310	56.863	43.137	9.554	-73.834
2003	-88.480	-106.357	-62.327	4.538	54.335	45.665	5.956	-63.745
2004	-101.175	-121.636	-80.680	7.807	59.911	40.089	13.891	-86.765
2005	-116.964	-136.202	-97.928	10.720	64.029	35.971	24.425	-111.633
2006	-126.284	-151.290	-116.396	13.826	67.797	32.203	40.641	-143.211
2007	-143.809	-136.961	-100.598	11.390	65.134	34.866	27.942	-117.150
2008	-174.667	-161.613	-132.318	18.008	70.731	29.269	70.268	-184.578
2009	-217.161	-182.342	-156.966	22.544	73.720	26.280	119.423	-253.846

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Tabela 5.24 – Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Médio São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_con
	(mm)				(%)		(mm)	
1995	-49.510	-41.445	-37.780	20.859	40.827	59.173	96.306	-113.227
1996	-43.482	-39.738	-29.124	14.423	36.994	63.006	19.976	-34.677
1997	-47.025	-42.851	-37.091	19.479	41.100	58.900	59.558	-77.170
1998	-44.502	-42.114	-32.949	16.525	39.000	61.000	29.615	-46.039
1999	-40.495	-44.007	-35.704	17.661	41.001	58.999	38.380	-56.423
2000	-43.180	-46.630	-42.500	22.145	43.651	56.349	109.127	-129.482
2001	-35.931	-44.723	-33.635	15.712	40.076	59.924	25.399	-43.322
2002	-34.892	-44.787	-31.649	14.160	39.050	60.950	18.850	-36.339
2003	-34.708	-43.433	-23.539	8.202	35.313	64.687	6.323	-21.660
2004	-41.267	-46.409	-34.513	16.614	38.570	61.430	25.000	-42.900
2005	-48.798	-49.557	-44.404	23.955	41.264	58.736	95.055	-115.504
2006	-55.149	-52.727	-50.592	27.524	43.750	56.250	297.402	-320.470
2007	-67.646	-49.313	-40.317	21.159	38.850	61.150	45.061	-64.219
2008	-69.214	-51.614	-46.646	25.697	40.587	59.413	108.359	-129.308
2009	-81.955	-55.350	-58.404	34.658	42.901	57.099	-269.484	245.738

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição

climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Tabela 5.25 - Contribuição dos fatores climáticos e antrópicos na variabilidade das vazões no Baixo São Francisco

Ano	DQobs	DQmod	DQ_c1	DQ_c2	DQc	DQh	DQ_pla	DQ_con
	(mm)				(%)		(mm)	
1995	-29.621	-17.402	-23.586	15.938	43.951	56.049	-19.710	12.062
1996	-27.904	-17.454	-19.463	12.004	42.735	57.265	-44.557	37.098
1997	-27.147	-18.734	-24.411	15.691	46.551	53.449	-24.102	15.381
1998	-28.120	-18.017	-20.311	12.471	43.517	56.483	-42.622	34.782
1999	-27.798	-19.059	-21.987	13.178	46.215	53.785	-39.654	30.846
2000	-28.965	-20.193	-26.372	16.519	48.791	51.209	-26.342	16.490
2001	-25.939	-19.742	-21.001	11.846	46.370	53.630	-86.163	77.009
2002	-24.561	-19.990	-20.105	10.874	46.177	53.823	-873.639	864.408
2003	-23.563	-19.602	-14.732	6.227	43.392	56.608	10.875	-19.381
2004	-24.230	-20.011	-21.528	12.679	44.224	55.776	-73.941	65.091
2005	-26.730	-20.757	-27.163	17.752	45.336	54.664	-26.078	16.668
2006	-29.939	-22.030	-30.529	20.046	47.586	52.414	-24.726	14.243
2007	-38.251	-20.798	-24.481	15.486	43.251	56.749	-37.825	28.829
2008	-39.026	-21.398	-28.298	18.899	43.927	56.073	-25.742	16.342
2009	-43.696	-21.933	-35.255	25.710	43.520	56.480	-18.422	8.876

DQobs: variação da vazão média anual observada, DQmod: variação da vazão média anual modelada; DQ_c1: variação da contribuição climática relacionada aos impactos das mudanças climáticas causadas pela precipitação e evaporação potencial; DQ_c2: variação da contribuição climática causada pelo parâmetro “w”; DQc: variação da contribuição climática; DQh: variação da contribuição antrópica; DQ_pla: variação da contribuição da precipitação; DQ_tme: variação da contribuição da temperatura; DQ_con: variação da contribuição do consumo de água; DQ_agr: variação da contribuição da agricultura; DQ_veg: variação da contribuição da vegetação.

Os resultados obtidos com a segunda simulação (precipitação e consumo de água) foram bem próximos aos obtidos com a simulação de todas as variáveis. Apesar de algumas variáveis terem pouca interferência no comportamento das vazões, a ausência das mesmas não interferiu no modelo construído.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método de decomposição mostram que a mudança climática é o fator determinante para a redução da vazão no Alto São Francisco, já no Médio e Baixo São Francisco, as atividades antrópicas se destacam. No geral, as mudanças climáticas afetam o escoamento não apenas alterando as variáveis hidrológicas (precipitação, temperatura e evaporação potencial), mas também alterando as características das bacias hidrográficas representadas pelo parâmetro “w”; enquanto os impactos das atividades humanas

na vazão são exercidos principalmente por meio da alteração das características das bacias hidrográficas.

Muitos estudos relataram a tendência crescente ou decrescente das vazões em uma ou várias bacias, porém, não há um consenso de qual fator tem um maior impacto no comportamento das vazões. Estudos realizados em várias partes do mundo afirmam que os fatores antrópicos têm um maior peso na variabilidade das vazões, enquanto outros discordam que esse fator seja o mais preponderante (JIANG *et al.*, 2015; MWANGI *et al.*, 2016; DEY & MISHRA, 2017; LI *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2017b; XU *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019; DORNELES, 2021). No entanto, quase não há estudos que se concentraram em analisar quais fatores interferem no comportamento das vazões na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Existem algumas incertezas na variação do escoamento e na contribuição dos fatores neste estudo. Neste trabalho a mudança nas vazões foi atribuída às atividades antrópicas e às mudanças climáticas. No entanto, as mudanças climáticas na verdade contêm duas partes: variabilidade climática e mudança climática antropogênica (ARMAL *et al.*, 2018). A variabilidade climática está relacionada às características naturais do clima e pode ser representada por fatores climáticos, como a Oscilação Interdecadal do Pacífico (IPO), a Oscilação Decadal do Pacífico (DOP), a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) (GERGIS & HENLEY, 2017; GERSHUNOV & CAYAN, 2003). Já a mudança climática antropogênica é a mudança de condições climáticas causadas por atividades antrópicas (COOK *et al.*, 2013). Na estrutura atual deste estudo, é difícil separar os impactos da variabilidade climática das mudanças climáticas antropogênicas. Com mais investigações sobre a variabilidade climática e fatores climáticos, trabalhos futuros poderão fazer o uso dessas variáveis para quantificar os impactos da variabilidade climática.

Além disso, é importante ressaltar que neste trabalho foi feita a suposição de não haver mudança na água subterrânea e no armazenamento de água na bacia. No entanto, pesquisadores relataram que os armazenamentos de água (LI *et al.*, 2016) ou água subterrânea (SZILAGYI *et al.*, 2013; FAN, 2015) variaram significativamente, e são sensíveis às mudanças no clima (MAXWELL *et al.*, 2008) e

na vegetação (BEARUP *et al.*, 2014). Portanto, com essa suposição as relações Budyko podem ser afetadas pela variação do fluxo de água subterrânea e no armazenamento de água (CONDON & MAXWELL, 2016); no entanto, espera-se que, em escala anual, seu efeito seja limitado.

Alguns trabalhos encontrados na literatura (WANG, 2014; FATICHI *et al.*, 2016; DEY & MISHRA, 2017) destacam que apesar das equações do tipo Budyko apresentarem bons resultados em diversas regiões, negligenciar o armazenamento em escala temporal pode gerar erros consideráveis aos resultados dependendo do comportamento hidrológico da região e do uso das reservas subterrâneas. Um trabalho realizado em 265 rios na Austrália obteve bons resultados para alguns pontos, outros pontos foram insatisfatórios principalmente devido ao fato do método negligenciar o armazenamento (ZHANG *et al.*, 2008). Outro exemplo que inclui dificuldade quanto às simplificações deste método é a aplicação em regiões onde há irrigação intensa, pois pode afetar a quantificação da evapotranspiração real sendo necessário um incremento no valor associado a esta variável (DEY & MISHRA, 2017).

Outro fator que merece atenção é a estimativa do parâmetro “ w ”, esse parâmetro é geralmente interpretado como uma propriedade integrativa (ZHANG *et al.*, 2004) e configura-se como um desafio crítico que determina a precisão dos resultados. Um número estudos foi conduzido para investigar a relação do parâmetro “ w ” com alguns fatores como topografia, cobertura vegetal ou propriedade do solo (JIANG *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2004). No entanto, associações físicas ou empíricas inequívocas e conclusivas relacionada a esses fatores ainda não foram obtidas até o momento (GUDMUNDSSON *et al.*, 2016). Otsuki (2015) em seu estudo na bacia hidrográfica do Rio São Francisco encontrou diferenças nos padrões de “ w ”, sendo que as bacias localizadas no trecho mais alto, que possui suas nascentes no estado de Minas Gerais, apresentaram “ w ” menores e comportamento mais homogêneo em relação às demais. As bacias do médio e baixo São Francisco apresentaram “ w ” mais elevados, principalmente aquelas localizadas no estado da Bahia e norte de Minas Gerais, afluentes pela margem direita do rio principal.

Embora alguns estudos tenham analisado a incerteza das equações do tipo Budyko atribuindo uma distribuição ao parâmetro “ w ” (GUDMUNDSSON *et al.*, 2016; SINGH & KUMAR, 2015), a incerteza das análises das equações de Budyko ainda são raras e ignoram correlações espaciais e interações entre covariáveis. O escoamento em regiões adjacentes é frequentemente inter-relacionado como resultado de condições climáticas, atividades econômicas e sociedades semelhantes (GUDMUNDSSON *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2004). A exclusão da correlação espacial nas equações de Budyko pode diminuir a confiabilidade e a robustez dos resultados preditivos das equações de Budyko.

Apesar de algumas incertezas neste estudo, tem-se que considerar a importância da utilização de variantes representativas das atividades antrópicas, como o uso da água. A grande maioria dos estudos encontrados na literatura se concentra em entender como o comportamento das vazões é alterado pela interferência humana considerando apenas na mudança de uso e cobertura do solo, negligenciando os impactos antrópicos diretos, como o uso da água. Devido à evolução da economia, a expansão dos centros urbanos e o aumento populacional, há uma intensificação dos usos dos recursos hídricos. Assim, o uso da água é um fator que pode gerar impactos de grande magnitude sobre o escoamento dos cursos d’água e, portanto, esse componente não deve ser desconsiderado em estudos dessa magnitude. A utilização dessa variável complementa ainda mais o estudo que poderá auxiliar na gestão de recursos hídricos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho propôs-se um estudo com o intuito de caracterizar o padrão de variabilidade espacial e temporal da vazão média anual da bacia hidrográfica do rio São Francisco, associando tal comportamento com variáveis climáticas e antrópicas. O objetivo desta pesquisa é investigar como as variáveis nas equações do tipo Budyko evoluíram com as mudanças climáticas e as atividades humanas, estabelecendo as relações dos parâmetros com os fatores do clima e das atividades antrópicas. A partir dessa relação, o método de decomposição (JIANG *et al.*, 2015) foi empregado para separar os impactos das mudanças climáticas e das atividades antrópicas no comportamento das vazões. A estrutura desenvolvida foi aplicada à bacia hidrográfica do rio São Francisco, um dos mais importantes cursos d'água do Brasil, que tem sido significativamente influenciado tanto pelas variáveis climáticas quanto pelas constantes mudanças de uso da água e cobertura do solo.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que as vazões possuem tendência de redução com o passar dos anos, porém não foi possível identificar um padrão de mudança de comportamento na precipitação. Nos dados de temperatura, evapotranspiração foi observado um aumento significativo em todas as regiões da bacia. Nas atividades antrópicas foi observado um aumento na área de agricultura em todas as regiões da bacia; essa expansão é principalmente composta pela ampliação da agropecuária e das áreas agrícolas de cultivo. Devido a esse comportamento, constatou-se uma redução das áreas de vegetação natural. Associado ao aumento das áreas agricultáveis e o aumento populacional observou-se um aumento significativo no consumo de água.

No tocante ao comportamento das séries de precipitação e vazão, observou-se que o comportamento decrescente das séries de vazão não ocorreu em paralelo ao decréscimo da precipitação na bacia. As tendências de crescimento na evapotranspiração podem ser justificadas pelo aumento da agricultura irrigada na abrangente expansão das áreas de atividade agropecuária ao longo de toda a bacia. Além da evapotranspiração, possivelmente o comportamento encontrado nas vazões também pode estar associado às outras variáveis analisadas no estudo, como a agricultura e vegetação natural.

Neste trabalho, apresentou-se inicialmente uma estrutura baseada na equação de Fu com parâmetros variáveis no tempo para avaliar os impactos das mudanças climáticas e atividades humanas na vazão. A relação entre o parâmetro “ w ” em cada equação do tipo Budyko e as variáveis das condições climáticas e atividades antrópicas foi construída para explicar o desempenho da simulação do escoamento médio anual. Com base nessa relação, o método de decomposição foi empregado para separar e quantificar as contribuições das mudanças climáticas e atividades antrópicas na diminuição da vazão média anual na bacia hidrográfica do rio São Francisco com base na análise de covariáveis de “ w ”.

De acordo com a hipótese de Budyko, para médias de longo período o balanço hídrico seria formado pelas variáveis vazão, evapotranspiração real e precipitação desconsiderando a variação de armazenamento da bacia. Partindo desta premissa em um primeiro momento foram utilizadas todas as variáveis climáticas (precipitação, temperatura) e antrópicas (área de agricultura, área de vegetação natural, uso da água) para quantificar a variabilidade das vazões. Posteriormente, foi realizada outra simulação considerando apenas a precipitação e uso da água, variáveis que tiveram uma maior contribuição no comportamento das vazões. A partir de ambas as simulações, observou-se que os resultados obtidos com a segunda simulação (precipitação e consumo de água) foram bem próximos daqueles da simulação de todas as variáveis. Apesar de algumas variáveis terem pouca interferência no comportamento das vazões, a ausência das mesmas não interferiu no modelo construído.

A partir da aplicação da equação de Fu e dos modelos regionais para o cálculo de “ w ”, foram estimadas as séries anuais e de longo período de E e Q para as regiões estudadas. Na escala média de longo período, os resultados encontrados foram bons para a região do Alto São Francisco, enquanto no Médio e Baixo os resultados não foram satisfatórios. As análises realizadas neste trabalho conseguiram identificar e quantificar os impactos das modificações antrópicas e climáticas no comportamento das vazões na bacia do rio São Francisco. Esses impactos evidenciam uma redução das vazões frente às variações do clima e das atividades antrópicas entre 1985 e 2019. Entre as três regiões fisiográficas avaliadas, a

componente antrópica foi proeminente no Médio e Baixo São Francisco, com variações negativa da vazão associada a essa componente atingindo valores próximos a 59% no Médio e 57% no Baixo, de contribuição antrópica no comportamento das vazões. Esse comportamento retratou bem a forte modificação antrópica realizada na BHSF entre 1985 e 2019.

Diferente do que foi observado nessas regiões, o Alto São Francisco obteve uma maior influência das mudanças climáticas no comportamento das vazões, cerca de 73%. Pelos resultados obtidos foi possível observar que tanto os fatores climáticos quanto antrópicos influenciaram no comportamento das vazões, porém há um forte indicativo que os impactos das atividades humanas no comportamento das vazões são maiores na bacia em estudo. Possivelmente, isso se deve ao fato de que a atividade agrícola (pastagens e estabelecimentos agropecuários) ocupa uma parcela considerável do solo em toda a bacia. Ademais, na bacia estão localizados três reservatórios que têm papel fundamental na regularização das vazões do rio São Francisco, promovendo o controle de cheias e alterando o ciclo hidrológico da bacia.

Como evidenciado, os fatores antrópicos possuem grande influência no ciclo hidrológico da BHSF, até mesmo maiores que os fatores climáticos. Além disso, tendo em vista as consequências diretas e indiretas das modificações antrópicas do uso e cobertura do solo, é indispensável que o planejamento territorial das bacias hidrográficas seja incorporado na gestão dos recursos hídricos. Esse planejamento se pauta, principalmente, na compreensão dos impactos dessas modificações nos processos hidrológicos da região, norteados ações para preservação da bacia e mitigação desses impactos, garantindo a proteção desses recursos para gerações futuras e atuais.

Apesar de os resultados viabilizarem o cumprimento do objetivo geral deste trabalho, é necessário destacar que uma série de fatores, como: distribuição espacial dos postos ao longo da bacia, inexistência de postos, excesso de dados faltantes nas séries e número limitado de estações hidrometeorológicas; podem interferir nos resultados. Embora existam diversas estações com muitos anos de registro de dados hidrológicos na bacia a grande maioria ainda apresenta várias falhas nesses registros, interrupções de coleta de dados por longo período de tempo e até mesmo

de forma definitiva, não sendo possível, muitas vezes, o uso de séries com grandes períodos em localidades específicas, como no Médio e Baixo São Francisco.

Outro fator que merece atenção é a fonte de dados utilizada para o cálculo da evapotranspiração, precipitação e evolução do uso da água. Nos dados de evapotranspiração e precipitação foram utilizados os dados de Xavier *et al.* (2016) no período de 1985 a 2015, após 2015 os dados de Evapotranspiração de Referência de 2016 a 2019 foram estimados pela temperatura máxima por meio de regressão linear simples e os dados de precipitação foram estimados a partir da interpolação pelo método IDW dos dados de postos pluviométricos localizados na bacia em estudo. O fato de ter sido utilizado duas fontes de dados para o cálculo dessas variáveis podem interferir nos resultados obtidos.

Em relação aos dados de uso da água, foi utilizado o relatório da ANA (2019), sendo esse estudo um compilado de dados de outras pesquisas. É difícil avaliar a confiabilidade desses dados, pois esses dependem de diversos fatores, como: a estimativa de coeficientes, preenchimento de base de dados, metodologia de cálculo utilizada e a medição de réguas. Mesmo que as estimativas estejam corretas, é difícil afirmar que as retiradas de água para irrigação tenham influenciado ou não as vazões observadas, pois é possível que as retiradas tenham sido feitas em horários distintos daqueles em que é feita a leitura da régua. Devido a esses elementos citados anteriormente, pode ocorrer uma redução na confiabilidade e na precisão das variáveis hidroclimáticas, como a evapotranspiração, temperatura, precipitação e vazão.

Devido a isso, para estudos futuros, recomenda-se modelar melhor a regulação dos reservatórios seja pela evapotranspiração ou pela mudança da quantidade de água da operação do reservatório. Ademais, seria interessante explicar o comportamento encontrado nas vazões associando com a variabilidade climática. Outro fator importante para estudos futuros é buscar novas bases de dados tanto de evapotranspiração potencial como real para incorporar às análises e até mesmo outras variáveis climáticas e antrópicas para agregar ao modelo.

Trabalhos futuros também poderão avaliar estatisticamente a divisão da bacia do rio São Francisco em grupos hidrológicamente homogêneos, de modo a desenvolver, para cada conjunto de bacias, modelos regionais mais representativos e obter assim melhores estimativas principalmente nas séries anuais. Poderão ser mais bem estudados também as incertezas associadas às estimativas de E e Q e como as incertezas amostrais provenientes da estimativa de " w " se propagam na aplicação da metodologia.

Alguns estudos citados nesta tese buscaram avaliar a variação do parâmetro " w " da equação de Budyko no tempo, uma análise nesse sentido enriqueceria bastante o entendimento desse método. É de suma importância compreender melhor o potencial de armazenamento desta bacia, e aprimorar o estudo de uma possível incorporação desse armazenamento no método do Budyko.

REFERÊNCIAS

- ABERA, W.; TAMENE, L.; ABEGAZ, A.; SOLOMON, D. Understanding climate and land surface changes impact on water resources using Budyko framework and remote sensing data in Ethiopia. **Journal of Arid Environments**, v. 167, p. 56-54, 2019.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 9648 – **Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário** – Procedimento, Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- AHIABLAME, L.; SHESHUKOV, A. Y.; RAHMANI, V.; MORIASI, D. Annual baseflow variations as influenced by climate variability and agricultural land use change in the Missouri River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 188–202, 2017.
- AHMAD, I.; TANG, D.; WANG, WANG, T.; WANG, M.; WAGAN, B. Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. **Advances in Meteorology**, p. 15, 2015.
- AHN, K. H.; MERWADE, V. Quantifying the Relative Impact of Climate and Human Activities on Streamflow. **Journal of Hydrology**, v. 515, p. 257-266, 2014.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RA ES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO – **Irrigation and Drainage Paper**, v. 56, p. 300, 1998.
- ALEXAKIS, D. D.; GRILLAKIS, M. G.; KOUTROULIS, A. G.; AGAPIOU, A.; THEMISTOCLEOUS, K.; TSANIS, I. K.; MICHAELIDES, S.; PASHIARDIS, S.; DEMETRIOU, C.; ARISTEIDOU, K.; RETALIS, A.; TYMVIOS, F.; HADJIMITSIS, D.G. GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, p. 413–426, 2014.
- AMBRIZZI, T.; REHBEIN, A.; DUTRA, L. M. M.; CRESPO, N. M. **Mudanças climáticas e a sociedade**, p. 25. São Paulo. 2021.
- AMIN, M. Z. M.; SHAABAN, A. J.; ERCAN, A.; ISHIDA, K.; KAVVAS, M. L.; CHEN, Z. Q.; Jang, S. Future climate change impact assessment of watershed scale hydrologic processes in Peninsular Malaysia by a regional climate model coupled with a physically-based hydrology models. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 12–22, 2017.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. **Cadernos de Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2005, 134p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2009**. Brasília: ANA, 2009, 204 p.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2010** / Agência Nacional de Águas (ANA) - Brasília: ANA, 2010.

ANA/CGEE, ANA – Agência Nacional de Águas; CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **A questão de água no Nordeste**. Brasília, 2012.

ANA, Agência Nacional de Águas. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013): **síntese executiva com apreciação das deliberações do CBHSF aprovadas na III Reunião Plenária de 28 a 31 de julho de 2004**. Brasília: ANA, 142 p., 2005. ANA, 2013.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Brasília: ANA, 2017, 177 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. 2019. Brasília: ANA, p. 75, 2019.

ANDRADE, A. R. S.; GODOY NETO, A. H.; CRUZ, A. F. DA S.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F. DOS; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 126-145, 2018.

ANDRADE, M. P. de.; RIBEIRO, C. B. de M. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL)**. Brasília: ANEEL, 2017.

ANIL, A. P.; RAMESH, H. Analysis of climate trend and effect of land use land cover change on Harangi streamflow, South India: a case study. **Sustainable Water Resources Management**, v. 3, n. 3, p. 257–267, 2017.

ARAÚJO, G. J. F.; SILVA, M. M. Crescimento econômico no Semiárido Brasileiro: o caso do polo frutícola Petrolina/Juazeiro. **Caminhos de Geografia Uberlândia**, v. 14, n. 46, p. 246–264, 2013.

ARMAL, S.; DEVINENI, N.; KHANBILVARDI, R. Trends in Extreme Rainfall Frequency in the Contiguous United States: Attribution to Climate Change and Climate Variability Modes. **Journal of Climate**, v. 31, n. 1, p. 369–385, 2018.

ARROYO, E. M. V. Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade da geração termelétrica a carvão mineral no Brasil às mudanças climáticas. **Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012, 176 p.

BAO, Z.; ZHANG, J.; WANG, G.; FU, G.; HE, R.; YAN, X.; ZHANG, A. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? **Journal of Hydrology**, v. 460–461, p. 117–129, 2012.

BARBOSA, E. B. M.; ROSA, M. M.; VIJAYKUMAR, N. L.; BOLZAN, M. J. A.; TOMASELLA, J. Caracterização por Ondeletas de Processos Físicos Não Lineares na Micro-bacia Amazônica, **INPE**, São José dos Campos, 2004.

BASISTHA, A.; ARYA, D. S.; GOEL, N. K. Analysis of historical changes in rainfall in the Indian Himalayas. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 555-572, 2009.

BATES, B. C.; KUNDZEWICZ, Z. W.; WU, S.; PALUTIKOF, J. P. Climate Change and Water. **Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat**, Geneva, 210 pp. 2008.

BEARUP, L.A.; MAXWELL, R.M.; CLOW, D.W.; MCCRAY, J.E. Hydrological effects of forest transpiration loss in bark beetle-impacted watersheds. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 481– 486, 2014.

BLÖSCHL, G.; GAÁL, L.; HALL, J.; KISS, A.; KOMMA, J.; NESTER, T.; PARAJKA, J.; PERDIGÃO, R. A.; PLAVCOVÁ, L.; ROGGER, M.; SALINAS, J. L.; VIGLIONE, A. Increasing river floods: fiction or reality? **Water**, v. 2, n. 4, p. 329–344, 2015.

BOLZAN, M. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

BOONWICHAI, S.; SHRESTHA, S.; BABEL, M. S.; WEESAKUL, S.; DATTA, A. Evaluation of climate change impacts and adaptation strategies on rainfed rice production in Songkhram River Basin, Thailand. **Science of The Total Environment**, v. 652, p. 189–201, 2019.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 3- 23, 1982.

BOSMANS, J. H. C.; VAN BEEK, L. P. H.; SUTANUDJAJA, E. H.; BIERKENS, M. F. P. Hydrological impacts of global land cover change and human water use. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5603–5626, 2017.

BRACKEN, C., HOLMAN, K.D., RAJAGOPALAN, B., MORADKHANI, H. A Bayesian hierarchical approach to multivariate nonstationary hydrologic frequency analysis. **Water Resources Research**, v. 54, p. 377–384, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Plano Nacional de Recursos Hídricos: **Síntese executiva**. Brasília, DF, 2006. 135 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - **Estudo de Impacto Ambiental**. Vol I a IX. Jul.2004. Agrar, JP Meio Ambiente, Ecology Brasil, Ecology and Environment do Brasil.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil: **relatório final dos coeficientes técnicos de recursos hídricos das atividades industrial e agricultura**. [S.l. : s.n.], 2011.

BUANAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. Dinâmica da economia e da agropecuária no Matopiba. Brasília: **Ipea**, 2017. 64 p.

BUDYKO, M. I. Evaporation under natural conditions. Israel Program for Scientific Translations, **Washington**, 1963.

BUDYKO, M. I. Climate and Life. Academic, **New York**, 1974, p. 508.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., SALES, M.M., SOUZA, N.M., MELO, M.T.S. (Org.). Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: **FINATEC**, 2006. 464p.

CARVALHO, E. R. D. **Estratégia para a redução da emissão de dióxido de carbono gerada pelo consumo de energia em segmentos industriais brasileiros**. 2016.

CASTRILLON, L. C. R. Modelagem Conceitual de Processos Hidrológicos com Base em Analogia Com as Hipóteses de Budyko. **Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos**, Publicação PTARH.DM-160/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p, 2014.

CASTRO, C. N.; PEREIRA, C. N. Revitalização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco: histórico, diagnóstico e desafios. Brasília: **IPEA**, 2019. 363 p.

CAVALCANTI, A. C.; FILHO, J. C. A.; DOS SANTOS, J. C. P. Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas – Potencial de Terras para Irrigação. Recife: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Solos**, 2012.

CGEE; ANA. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Agência Nacional de Águas. **A Questão da Água no Nordeste**. Brasília: CGEE, 2012.

CHANG, Y.; LEE, M. A.; LEE, K. T.; SHAO, K. T.. Adaptation of fisheries and mariculture management to extreme oceanic environmental changes and climate variability in Taiwan. **Marine Policy**, v. 38, p. 476-482, 2013.

CHAVES, E. B.; DA SILVA, M. G.; LANDIM, A. A.; BITENCOURT, N. D. F. C.; LONDERO, P.; CARVALHO, A. C. Emissões dos Gases de Efeito Estufa do Sistema Produtivo do Arroz Alagado. **Anais do Salão Internacional de Ensino**. v 8. n. 2. Rio Grande do Sul. Pesquisa e Extensão. 2017.

CHOKKAVARAPU, N.; MANDLA, V. R. Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models: a review toward future climate change impact estimation. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 12, 2019.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, Publishing Company, USA. 1988.

CODEVASF, **Análise de solo**. Laboratório Embrapa, Petrolina-PE, 2011.

CODEVASF. **Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba**. 2015. Disponível em: <www.codevasf.gov.br/osvales>.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, 2011.

CONDON, L.E.; MAXWELL, R.M. Analyzing the impact of groundwater flow and storage changes on Budyko relationships across the continental US. **Hydrology and Earth System Sciences**. 2016.

COOK, J.; NUCCITELLI, D.; GREEN, S.A.; RICHARDSON, M.; WINKLER, B.; PAINTING, R. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 24024–24027, 2013.

COSTA, J. A.; SILVA, D. F. DA. Distribuição espaço-temporal do Índice de anomalia de chuva para o Estado do Ceará. **Revista brasileira de Geografia**, v. 50, n. 4, p. 9–57, 2017.

COULIBALY, P.; BALDWIN, C. K. Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 164-174, 2005.

DELGADO, A.; HERZOG, H. J. A simple model to help understand water use at power plants. **Massachusetts Institute of Technology: Energy Institute**, 2012.

DENWOOD, M. J. Runjags: an R package providing Interface utilities, model templates, parallel computing methods and additional distributions for MCMC models in JAGS. **Journal of Statistical Software**, v. 71, p. 1–25, 2016.

DEY, P.; MISHRA, A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 278–290, 2017.

DINPASHOH, Y.; JHAJHARIA, D.; FAKHERI-FARD, A.; SINGH, V. P.; KAHYA, E. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. **Journal of Hydrology**, v. 399, p. 422–433, 2011.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2014**. Brasília, 2014.

DONOHUE, R. J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. R. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrol. Earth System Science*, v. 11, n. 2, p. 983–995, 2007.

DONOHUE, R. J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. M. “Assessing the Differences in Sensitivities of Runoff to Changes in Climatic Conditions Across a Large Basin.” **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 6, p. 234–244, 2011.

DORNELES, G. Atribuição das mudanças na vazão média de longo período devido às atividades humanas e alterações no clima. **Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p, 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2006.

FÉLIX, A. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; MELO, D. F.; FURTADO, D. A.; SANTOS, A. M. Análise Exploratória dos Impactos das Mudanças Climáticas na Produção Vegetal No Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n.1. Maringá (PR). 2020.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Outlook Fiesp 2025: projeções para o agronegócio brasileiro**. São Paulo: FIESP, 2015.

FRANÇA, B. T.; ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C. B. M.; HIPPERT, H. S. Dinâmica do uso do solo e alterações na vazão na bacia do Rio São Francisco no início do Séc. XXI. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 18, 2021.

FU, B. On the calculation of the evaporation from land surface (in Chinese). **Scientia Atmospherica Sinica**, v. 5, n. 1, p. 23–31, 1981.

GALVÍNCIO, J. D. Impactos dos eventos El Niño na precipitação da Bacia do rio São Francisco. **Dissertação de Mestrado em Meteorologia**, Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba (PB), 117p, 2000.

GAO H.; HRACHOWITZ M.; SRIWONGSITANON N.; FENICIA F.; GHARARI S.; SAVENIJE H. H. G. Accounting for the influence of vegetation and landscape improves model transferability in a tropical savannah region. **Water Resources Research**, v. 52, p. 7999–8022, 2016.

GARDIMAN, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2012.

GASHAW, T.; TULU, T.; ARGAW, M.; WORQLUL, A. W. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Science of The Total Environment**, 619-620, 1394–1408, 2018.

GERGIS, J.; HENLEY, B. J. Southern Hemisphere rainfall variability over the past 200 years. **Climate Dynamics**, v. 48, p. 2087–2105, 2017.

GERSHUNOV, A.; CAYAN, D. R. Heavy daily precipitation frequency over the contiguous United States: sources of climatic variability and seasonal predictability. **Journal of Climate**, v. 16, p. 2752–2765, 2003.

GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, v. 79, p. 336–60, 2006.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, n. 5, p. 561–566, 2004.

GUDMUNDSSON, L.; GREVE, P.; SENEVIRATNE, S. I. The sensitivity of water availability to changes in the aridity index and other factors—A probabilistic analysis in the Budyko space. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 13, p. 6985-6994, 2016.

HAMED, K. H. Exact distribution of the Mann–Kendall trend test statistic for persistent data. **Journal of Hydrology**, v. 365, n. 1, p. 86-94, 2009.

HAMED, K. H.; RAO, R. A modified Mann-Kendall trend test for auto-correlated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1, p. 182-196, 1998.

HARTMANN, D. L.; TANK, A. M. G. K.; RUSTICUCCI, M.; ALEXANDER, L. V.; BRÖNNIMANN, S.; CHARABI, Y.; DENTENER, F. J.; DLUGOKENCKY, E. J.; EASTERLING, D. R.; KAPLAN, A. SODEN, B. J.; THORNE, P. W.; WILD, M.; ZHAI, P. M.. Atmosphere and Surface. In IPCC. Climate Change 2013: The physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 159-254, 2013.

HEGERL, G. C.; ZWIERS, F. W. Understanding and attributing climate change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, p. 663–745, 2007.

HIRSCH, R. M.; RYBERG, K. R. Has the magnitude of floods across the USA changed with global CO² levels? Has the magnitude of floods across the USA changed with global. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n. 1, p. 1–9, 2012.

HUANG, M.; ZHANG, L.; GALLICHAND, J. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 2599–2609, 2003.

HUANG, Y.; WANG, H.; XIAO, W. H.; CHEN, L. H.; ZHOU, Y. Y.; SONG, X. Y.; WANG, H. J. Contributions of climate change and anthropogenic activities to runoff change in the Hongshui River, Southwest China. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2018.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. PMDBBS – **Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite**. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, p.1-267, 2009. ISSN 0103-6157

IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. Uso de água em termoelétricas. **Série Termoeletricidade em foco**. São Paulo: IEMA, 2016, 34 p.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Dados históricos. Publicado em 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change Second Assessment Climate Change 1995. **A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1995.

IPCC – Summary for Policymakers, in Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by M. L. PARRY, O. F. CANZIANI, J. P. PALUTIKOF, P. J. VAN DER LINDEN AND C. E. HANSON, pp. 7-22, **Cambridge University Press, Cambridge**, UK. 2007.

IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. STOCKER, T. F.; D. QIN, G. -K.; PLATTNER, M.; TIGNOR, S. K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V. BEX AND P. M. MIDGLEY. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change 2016: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2016: **Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. FIELD, C. B. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1-32, 2016. Disponível em: <www.ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WG2AR5_SPM_FINAL.pdf>.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press New York, 1989.

JIANG, C.; XIONG, L.; WANG, D.; LIU, P.; GUO, S.; XU, C. Y. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 326–338, 2015.

JINGJING, F.; QIANG, H.; DENG FENG, L. Identification of impacts of climate change and direct human activities on streamflow in Weihe River Basin in Northwest China. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 4, 2017.

JUNIOR, D. S. R., CERQUEIRA, C. M., VIEIRA, R. F., & MARTINS, E. S. Budyko's Framework and Climate Elasticity Concept in the Estimation of Climate Change Impacts on the Long-Term Mean Annual Streamflow. **World Environmental and Water Resources Congress**, 2013.

KARLEN, D. L.; KRAMER, L. A.; JAMES, D. E.; BUHLER, D. D.; MOORMAN, T. B.; BURKART, M. R. Fieldscale watershed evaluations on deep-loess soils: 2. Hydrologic responses to different agricultural land management systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 54, n. 4, p.705–10, 1999.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 120 P. 1975.

KHINTCHINE, A. Korrelations theorie der stationären stochastischen Prozesse, **Mathematische Annalen**, v. 109, p. 604–615, 1934.

KIM, S.; YU, X. Analysis of Dam Inflow Variation Using the Hydrological Sensitivity Method in a Trans-Boundary River Basin: Case Study in the Korean Peninsula. **Water**, v. 11, n. 2, p. 395, 2019.

KOLMOGOROV, A. N. Über die analytischen Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. **Mathematische Annalen**, n. 104, p. 415–458, 1931. [English translation, pp. 62–108, Kluwer Acad., Dordrecht, Netherlands, 1992].

KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. **Fondo de Cultura Económica**. México. 1948. 479p.

KOUTSOYIANNIS, D. Reconciling hydrology with engineering. **Hydrology Research**, v. 45, p. 2–22, 2014.

KOUTSOYIANNIS, D. Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, p. 3899–3932, 2020.

KOUTSOYIANNIS, D.; MONTANARI, A. Negligent killing of scientific concepts: the stationarity case. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 8, p. 1174–1183, 2015.

KOUTSOYIANNIS, D. Rethinking Climate, Climate Change, and Their Relationship with Water. **Water**, v. 13, n. 6, p. 849, 2021.

KUNDZEWICZ, Z. W.; MATA, L. J.; ARNELL, N. W.; DÖLL, P.; KABAT, P.; JIMÉNEZ, B.; MILLER, K. A.; OKI, T.; SEM, Z. AND I.A. Shiklomanov, 2007: Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210. 2007.

LACERDA, A.; F. O Estudo de Uso e Cobertura do Solo para a bacia hidrográfica do rio Carinhanha (BA/MG). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 1, p. 072-085, 2020.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P.; SOUZA, D. L. De. Caracterização Ambiental das Áreas com Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais na Região do Matopiba - Brasil. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**: 2014.

LEE, S.; KIM, S. Quantification of Hydrological Responses Due to Climate Change and Human Activities over Various Time Scales in South Korea. **Water**, v. 9, n. 1, p. 34, 2017.

LEVENE, H. Robust Test for Equality of Variances, inl. O. et al., ed., '**Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotteling**', Stanford University Press, California, United States, p.278–292, 1960.

LIANG, K.; LIU, C.; LIU, X.; SONG, X. Impacts of climate variability and human activity on streamflow decrease in a sediment concentrated region in the Middle Yellow River. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27, n. 7, p. 1741–1749, 2013.

LI, D.; PAN, M.; CONG, Z.; ZHANG, L.; WOOD, E. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework. **Water Resources Research**, v. 49, n. 2, p. 969–976, 2013.

LI, K.Y.; COE, M.T.; RAMANKUTTY, N.; DE JONG, R. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. **Journal of Hydrology**, v. 337, p. 258–268, 2007a.

LI, L. J.; ZHANG, L.; WANG, H.; WANG, J.; YANG, J. W.; JIANG, D. J.; LI, J. Y.; QIN, D. Y. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 3485–3491, 2007b.

LI, Y.; CHANG, J.; LUO, L.; WANG, Y.; GUO, A.; MA, F.; FAN, J. Spatiotemporal impacts of land use land cover changes on hydrology from the mechanism

perspective using SWAT model with time-varying parameters. **Hydrology Research**, v. 50, n. 1, p. 244–261, 2019.

LI, Y.; LIANG, K.; BAI, P.; FENG, A.; LIU, L.; DONG, G. The spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and the contribution of its climatic factors in the Loess Plateau, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, p. 1–14, 2016.

LI, Z.; NING, T.; LI, J.; YANG, D. Spatiotemporal variation in the attribution of streamflow changes in a catchment on China's Loess Plateau. **Catena**, v. 158, p. 1–8, 2017.

LUCAS, M. C.; KUBLIK, N.; RODRIGUES, D. B. B.; MEIRA NETO, A. A.; ALMAGRO, A.; MELO, D. de C. D.; ZIPPER, S. C.; OLIVEIRA, P. T. S. Significant Baseflow Reduction in the Sao Francisco River Basin. **Water**, v. 13, n. 1, p. 2, 2020.

LUO, W.; TAYLOR, M.; PARKER, S. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from england and wales. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 28, n. 7, p. 947–959, 2008.

MALLAT, S. **A wavelet tour of signal processing**. 3 ed. Burlington: Academic Press / Elsevier, 851 p, 2008.

MANETA, M. P.; TORRES, M.; WALLENDER, W. W.; VOSTI, S.; KIRBY, M.; BASSOI, L. H.; RODRIGUES, L. N. Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, p. 1191-1200, 2009.

MANN, H. B. The econometric society. **Econometrica**, v.13, n.3, p.245- 259. 1945.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 1069-1079, 1997.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável**, 2012. (Nota técnica).

MARIANI RODRIGUES, RAFAEL. Tendências climáticas regionais e variabilidades do campo de salinidade da Baía de Todos os Santos (NE Brasil). **Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica**. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2019.

MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 1054-1061, 2011.

MAXWELL, R. M.; KOLLET, S. J. Interdependence of groundwater dynamics and land-energy feedbacks under climate change. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 665–669, 2008.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 53–64, 2009.

MENKE, A. B., CARVALHO JUNIOR, O. A. DE, GOMES, R. A. T., MARTINS, É. DE S., & OLIVEIRA, S. N. DE. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA - Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 21, p. 3, 315–326, 2009.

MILLIMAN, J. D.; FARNSWORTH, K. L.; JONES, P. D.; XU, K. H.; SMITH, L. C. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. **Global and Planetary Change**, v. 62, p. 187–194, 2008.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Brasil Projeções do Agronegócio 2010/2011 a 2020/2021**. Brasília: MAPA, 2011.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco** / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. P. 148.

MOLION, L. C. B. Desmistificando o aquecimento global. **Intergeo**, v. 5, p. 13-20, 2007.

MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

MWANGI, H. M.; JULICH, S.; PATIL, S. D.; MCDONALD, M. A.; FEGER, K. H. Modelling the impact of agroforestry on hydrology of Mara River Basin in East Africa. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 18, p. 3139-3155, 2016.

NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. 1ª ed. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007.

NEMUS, **Gestão e Requalificação Ambiental. Relatório de Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Salvador, 2015.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.

NOBRE, G.; JONGMAN, B.; AERTS, J.; WARD, P. J. The role of climate variability in extreme floods in Europe. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 8, 2017.

NUNES, L. M. S.; SANTOS, T. O. Mudanças Climáticas e Seus Impactos na Dinâmica Global. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. UFC. 2019.

OKI, D. S.; WOLFF, R. H.; PERREAULT, J. A. Effects of surface-water diversion on streamflow, recharge, physical habitat, and temperature, Na⁻ Wai Eha⁻, Maui, Hawaii. **Scientific Investigation Report**, p. 154, 2010. Washington D.C.: U.S. Geological Survey

OLIVEIRA, G.; TUROLLA, F. Política econômica do segundo governo FHC: mudança em condições adversas. **Tempo social**, v. 15, n. 2, p. 195-217, 2003.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional** – SIN. 2003.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS) **Estimativas das Vazões para as Atividades de Uso Consuntivo da Água em Bacias do Sistema Interligado Nacional** – SIN. Brasília: ONS: FAHMA-DZETA: ANA: ANEEL: MME, 2005.

OTSUKI, R. G. Estimativa de Séries Anuais de Evapotranspiração Real e Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico com Base nas Hipóteses de Budyko. **Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos**, Publicação PTARH.DM-170/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p, 2015.

PBMC - PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇA CLIMÁTICA. **Mudança climática e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudança climática**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 2016. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio_UM_v9_09.12.16.pdf>.

PENEREIRO, J. C.; FERREIRA, D. H. L. Testes estatísticos e questões ambientais no ensino de engenharia: uma aplicação em climatologia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 31, p. 25-44, 2012.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente**, v.11, n.6 p.615-622, 2007.

PERCIVAL, D. P. On estimation of the wavelet variance. **Biometrika**, v. 82, n. 3, p. 619-631, 1995.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, London, v.28, n. 2, p. 126-135, 1979.

PIKE, J. G. The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate, **Journal of Hydrology**, v. 2, n. 2, p. 116–123, 1964.

PLANO DECENAL DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO – PBHSF (2004-2013) – **Resumo Executivo**. 2004.

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO 2016-2025. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**, p. 520, 2016.

POLADE, S. D.; PIERCE, D. W.; CAYAN, D. R.; GERSHUNOV, A.; DETTINGER, M. D. The Key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. **Scientific Reports**, v. 4, p. 4364-4372, 2014.

QIU, L.; PENG, D.; XU, Z.; LIU, W. “Identification of the impacts of climate changes and human activities on runoff in the upper and middle reaches of the Heihe River basin, China,” **Journal of Water and Climate Change**, v. 7, n. 1, p. 251–262, 2016.

RAO, A. R.; HAMED, K. H.; CHEN, H. L. Nonstationarities in Hydrologic and Environmental Time Series. **Kluwer Academic Publishers: The Netherlands**, p. 362, 2003.

R CORE TEAM (2016). R: A language and environment for statistical computing. R **Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. **Water Resources Research**, v. 47, n. 12, 2011.

SALATI, E.; CAMPANHOL, T.; VILA NOVA, N. Tendências das Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. Relatório 4, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília, 2007.

SALMORAL, G.; WILLAARTS, B. A.; TROCH, P.A.; GARRIDO, A. Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin. **Spain Science of the Total Environment**, v. 504, p. 258–268, 2015.

SANTOS, A.; LOPES, P. M. O.; SILVA, M. V.; JARDIM, A. M. R. F.; MOURA, G. B. A.; FERNANDES, G. S. T.; SILVA, D. A. O.; SILVA, J. L. B.; ROGRIGUES, J. A. M.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Causes and consequences of Seasonal changes in the water flow of the São Francisco river in the semiarid of Brazil. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 8, p. 100, 2020.

SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. DE M. M.; TORRENCE, C. A Transformada Wavelet e sua Aplicação na Análise de Séries Hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, 2013.

SANTOS, E. H. M.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.8, p.826–834, 2010.

SANTOS, L. C. M.; MATOS, H. R.; SCHAFFER-NOVELLI, Y.; CUNHA-LIGNON, M.; BITENCOURT, M. D.; KOEDAM, N.; DAHDOUNH-GUEBAS, F. Anthropogenic activities on mangrove areas (São Francisco River Estuary, Brazil Northeast): A GIS-based analysis of CBERS and SPOT images to aid in local management. **Ocean and Coastal Management**, v. 89, p. 39-50, 2014.

SANTOS, V. J.; CALIJURI, M. L.; ASSIS, L. C. Land cover changes implications in energy flow and water cycle in São Francisco Basin, Brazil, over the past 7 decades. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 3, p. 83, 2022.

SCHEWE, J; SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; KABAT, P. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **PNAS**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SCHUELER, T. R. **Controlling Urban Runoff: A practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs**. 1987.

SCHULTE, J. A.; NAJJAR, R. G.; LEE, S. Salinity and Streamflow Variability in the Mid-Atlantic Region of the United States and its Relationship with Large-scale Atmospheric Circulation Patterns, **Journal of Hydrology**, v. 550, p. 65–79, 2017.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. **Advances in Water Resources**, v. 77, p. 17–36, 2015a.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. The importance of prewhitening in change point analysis under persistence. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, n. 2, p. 763–777, 2015b.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G.; LOMBARDO, F. Untenable nonstationarity: An assessment of the fitness for purpose of trend tests in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 111, p. 132–155, 2018.

SHAHID, M.; RAHMAN, K. U.; BALKHAIR, K. S.; NABI, A. Impact assessment of land use and climate changes on the variation of runoff in Margalla Hills watersheds, Pakistan. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 5, 2020.

SILVA, D. Efeito de José e Noé nas Cotas do Rio São Francisco. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v. 28, p. 66-76, 2013.

SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. da S.; COSTA, J. M. F. da; MARTINS, E. S. P. R.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C. Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River 118 Basin, Brazil. **Water**, v. 13, n. 3, p. 332, 2021.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.

SILVA, D. A. O.; SILVA, J. L. B.; SILVA, T. S. S.; SANTOS, P. R.; LOPES, I.; SANTOS, C. G. Impacto da alteração do uso do solo usando dados orbitais no baixo São Francisco. **Revista Ambientale**, v. 10, n. 3, p. 71-85, 2018.

SINGH, R.; KUMAR, R. Vulnerability of water availability in india due to climate change: a bottom-up probabilistic Budyko analysis. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 22, p. 9799–9807, 2015.

SILVA, V. D. P. R.; SILVA, M. T.; SINGH, V. P.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M.; BRAGA, A. C. R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**, v. 162, p. 166-176, 2018.

SOBRAL, M. C.; ASSIS, J. M. O.; OLIVEIRA, C. R.; SILVA, G. N.; MORAIS, M.; CARVALHO, R. M. CAMINHA. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco – Brasil. **Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 12, n. 3, p.95-106, 2018.

SOUZA, C. M., JR.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; G. FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, p. 2735, 2020.

STILLWELL, A.S.; KING, C.W.; WEBBER, M,E; DUNCAN, I.J.; HARDBERGER, A. The Energy-Water Nexus in Texas. **Ecology and Society**, v. 16(1), n 2, 2011.

SUN, Y.; TIAN, F.; YANG, L.; HU, H. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catch-ment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods. **Journal of Hydrology**, v. 508, p. 170–180, 2014.

SZILAGYI, J.; ZLOTNIK, V.A.; JOZSA, J. Net recharge vs. Depth to groundwater relationship in the Platte River Valley of Nebraska, United States. **Groundwater**, v. 51, p. 945–951, 2013.

TIAN, L.; JIN, J.; WU, P.; NIU, G. Quantifying the Impact of Climate Change and Human Activities on Streamflow in a Semi-Arid Watershed with the Budyko Equation Incorporating Dynamic Vegetation Information. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1781, 2018.

TORABI HAGHIGHI, A.; DARABI, H.; SHAHEDI, K.; SOLAIMANI, K.; KLØVE, B. A Scenario-Based Approach for Assessing the Hydrological Impacts of Land Use and Climate Change in the Marboreh Watershed, Iran. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 25, p. 41-57, 2020.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 01, p. 61-78, 1998.

TORRES, R. R. **Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul**. TESE (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FHR358>>

TOMER, M. D.; SCHILLING, K. E. A Simple Approach to Distinguish Land-Use and Climate-Change Effects on Watershed Hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 376, n. 2, p. 24-33, 2009.

TUCCI, C. E. M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Brasília: **Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas**, 150p, 2002.

TURC, L. Le bilan d'eau des sols: Relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. **Annales Agronomiques**, v. 5, p. 491– 595, 1954.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Cenários para a Pecuária de Corte Amazônica**. Belo Horizonte: Ed. IGC/UFMG, p. 146, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Irrigation water requirements. **Technical Release**. n. 21, 1970.

VALENÇA, M.; HOLZ, J.; KIRILLOS, D. A água do Rio São Francisco está sumindo. **In Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos**. Brasília, 2015.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Corregó Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.55-64, 2010.

VON STORCH, H. Misuses of statistical analysis in climate research. In: *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*. 2o. ed. Berlin: **Springer Berlin Heidelberg**, p. 11–26, 1995.

WADA, Y.; VAN BEEK, L. P. H.; WANDERS, N.; BIERKENS, M. F. P. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 3, p. 034036, 2013.

WANG, D.; HEJAZI, M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts. **Water Resources Research**, v. 47, n. 10, 2011.

WANG, D.; TANG, Y. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models. **Geophysical Research Letters**, v. 41, p. 4569–4577, 2014.

WANG, S.; ZHANG, Z.; MCVICAR, T. R.; GUO, J.; TANG, Y.; YAO, A. Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: Assessing three complementary approaches. **Journal of Hydrology**, vol. 507, p. 63–74, 2013.

WANG, X. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. **Advances in Water Resources**, v. 71, p. 209–218, 2014.

WANG, W.; ZOU, S.; SHAO, Q.; XING, W.; CHEN, X.; JIAO, X.; LUO, Y.; YONG, B.; YU, Z. The analytical derivation of multiple elasticities of runoff to climate change and catchment characteristics alteration. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1042–1056, 2016.

WASKO, C.; SHARMA, A. Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2017.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. [S.l.]: **John Wiley & Sons**, 2007. 37–45 p.

WILLIAMS, C. A.; REICHSTEIN, M.; BUCHMANN, N.; BALDOCCHI, D.; BEER, C.; SCHWALM, C.; SCHAEFER, K. Climate and vegetation controls on the surface water balance: Synthesis of evapotranspiration measured across a global network of flux towers. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, 2012.

WU, L.; WANG, Y.; GAO, J.; LI, X. Deep adaptive feature embedding with localsample distributions for person re-identification. **Pattern Recognition**, 2017a.

WU, C.; YE, P. J. F.; XU, K.; HU, B. X.; HUANG, G.; WANG, P. Modeling water balance using the Budyko framework over variable timescales under diverse climates. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1–33, 2017b.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

XIA, J.; ZENG, S. D.; DU, H.; ZHAN, C. S. Quantifying the effects of climate change and human activities on runoff in the water source area of Beijing, China. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, p. 1794-807, 2014.

XU, S.; QIN, M.; DING, S.; ZHAO, Q.; LIU, H.; LI, C.; YANG, X.; LI, Y.; YANG, J.; JI, X. The Impacts of Climate Variation and Land Use Changes on Streamflow in the Yihe River, China. **Water**, v. 11, n. 5, p. 887, 2019.

XU, X.; YANG, D.; YANG, H.; LEI, H. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin, **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 530– 540, 2014.

YANG, D.; SUN, F.; LIU, Z.; CONG, Z.; NI, G.; LEI, Z. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis, **Water Resource Research**, v. 43, 2007.

YANG, L.; FENG, Q.; YIN, Z.; WEN, X.; SI, J.; LI, C.; DEO, R. C. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 5, p. 1100–1112, 2017.

YANG, Y.; TIAN, F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China. **Journal of Hydrology**, v. 374, n. 3, p. 373–383, 2009.

YE, X. C.; ZHANG, Q.; LIU, J.; LI, X. H.; XU, C. Y. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. **Journal of Hydrology**, v. 494, p. 83–95, 2013.

YEH, H. F.; TSAO, J. Hydrological Response to Natural and Anthropogenic Factors in Southern Taiwan. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 1981, 2020.

YUE, S.; PILON, P. J.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, v. 16. p. 1807–1829. 2002.

YUE, S.; WANG, C. Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. **Water Resources Research**, v.38, n. 6, 2002.

ZENG, S. D.; XIA, J.; DU, H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River basin. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, p. 401-413, 2014.

ZHANG, J. Y.; WANG, G. Q.; PAGANO, T. C.; JIN, J. L.; LIU, C. S.; HE, R. M.; LI, Y. L. Using hydrologic simulation to explore the impacts of climate change on runoff in the Huaihe River Basin of China. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, p. 1393–1399, 2013.

ZHANG, Q.; LIU, J. Y.; SINGH, V. P.; GU, X. H.; CHEN, X. H. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, **China Hydrological Processes**, v. 30, p. 2562-76, 2016.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources Research**, v. 37, p. 701-708, 2001.

ZHANG, L.; NAN, Z.; YU, W.; ZHAO, Y.; XU, Y. Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models. **Science of the Total Environment**, v. 622, p.1016-1028, 2018.

ZHANG, L.; POTTER, N.; HICKEL, K.; ZHANG, Y.; SHAO, Q. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – model development and testing. **Journal of Hydrology**, v. 360, p. 117–131, 2008.

ZHANG, L.; ZHAO, F. F.; BROWN, A. E. Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia. **Hydrological Earth System Science**, v. 16, p. 2109–2121, 2012.

ZHANG, X.; DONG, Q.; COSTA, V.; WANG, X. A hierarchical Bayesian model for decomposing the impacts of human activities and climate change on water resources in China. **Science of The Total Environment**, v. 665, p. 836-847, 2019.

ZHANG, X.; ZWIERS, F. W. Comment on Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test by Sheng Yue and Chun Yuan Wang. **Water Resources Research**, n.40, 2004.

ZHANG, Y.; GUAN, D.; JIN, C.; WANG, A.; WU, J.; YUAN, F. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 410, p. 239–247, 2011.

ZHANG, Y. K.; SCHILING, K. E. Effects of Land Cover on Water Table, Soil Moisture, Evapotranspiration, and Groundwater Recharge: A Field Observation and Analysis. **Journal of Hydrology**, v. 319, n.1, p 328-338, 2006.

ZHAO, F.; ZHANG, L.; XU, Z.; SCOTT, D. F. Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow. **Water Resources Research**, v. 46, 2010.

ZHENMEI, M.; SHAOZHONG, K.; LU, Z.; LING, T.; XIAOLING, S. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 239-249, 2008.

ZHONG, D.; DONG, Z.; FU, G.; BIAN, J.; KONG, F.; WANG, W.; ZHAO, Y. Trend and change points of streamflow in the Yellow River and their attributions. **Journal of Water and Climate Change**, 2020.

ZHOU, S.; YU, B.; HUANG, Y.; WANG, G. The complementary relationship and generation of the Budyko functions. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 6, 2015.

ZUO, D. P.; XU, Z. X.; WU, W.; ZHAO, J.; ZHAO, F. F. Identification of streamflow response to climate change and human activities in the Wei River Basin, China. **Water Resources Management**, v. 28, n. 3, p. 833–8551, 2014.

ANEXO I – Análises de séries temporais

Prewhitening

Uma das principais dificuldades inerente à aplicação dos testes estatísticos na detecção de mudanças ocorre quando as séries são correlacionadas serialmente. A presença de correlação temporal positiva (negativa) resulta em rejeição da hipótese com uma frequência maior (menor) do que a estabelecida pelo nível de significância do teste (VON STORCH, 1995). Isso se deve à relação existente entre a variância da estatística do teste com o grau de autocorrelação da série (YUE *et al.*, 2002).

De forma a limitar a influência da correlação temporal em séries temporais, Von Storch (1995), Yue *et al.* (2002), Yue & Wang (2002), Serinaldi & Kilsby (2015b) propuseram um filtro, *prewhitening*, para remover um componente da correlação temporal, no caso, um processo auto-regressivo lag-1, x_t , dado por:

$$\begin{cases} y_t = \rho' x_t + \Delta' \cdot 1_{\{t > \tau\}} \\ x_t = \rho' x_{t-1} + \varepsilon_t' \end{cases} \quad (I.1)$$

Em que $1_{\{t > \tau\}}$ é o indicador da função; ρ é o coeficiente de autocorrelação lag-1; x_t e x_{t-1} são observações registradas nos tempos t e $t-1$; e ε são resíduos não correlacionados.

Para remover o efeito da autocorrelação nos dados, a metodologia pode ser realizada através dos seguintes passos:

Etapa 1: O teste é aplicado aos dados originais. Se o valor da estatística de teste não for significativo, pode-se concluir que não há evidência para rejeitar a hipótese nula.

Etapa 2: Se o valor da estatística for significativo, a posição τ do possível ponto de mudança é usada para dividir a série temporal em duas sub-séries (antes e depois de τ), a diferença das medianas ou médias, $\hat{\mu}_b$ e $\hat{\mu}_a$, das duas sub-séries é calculado como $\hat{\Delta}' = \hat{\mu}_b - \hat{\mu}_a$ e usado para remover a mudança de etapa seguinte:

$$x_t = y_t - \hat{\Delta}' \cdot 1_{\{t > \tau\}} \quad (1.2)$$

Etapa 3: O valor da autocorrelação de lag-1 ρ de x_t é estimado por:

$$\hat{\rho} = \frac{\frac{1}{(T-1)} \sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \hat{\mu})(Y_{t+1} - \hat{\mu})}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Y_t - \hat{\mu})^2}, \quad \text{em que} \quad \hat{\mu} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Y_t \quad (1.3)$$

Depois de obter o coeficiente de autocorrelação, a estrutura AR (1) é removida para obter séries não correlacionadas (ε'_t):

$$\varepsilon'_t = x_t - \hat{\rho}^* x_{t-1} \quad (1.4)$$

em que: $\hat{\rho}^*$ é a estimativa corrigida de viés de ρ ; e ε'_t é a série não correlacionada.

Etapa 4: A mudança de etapa e os resíduos ε'_t são combinados por:

$$\varepsilon''_t = \hat{\Delta}' \cdot 1_{\{t > \tau\}} + \frac{\varepsilon'_t}{1 - \hat{\rho}^*} \quad (1.5)$$

Em seguida, o teste é aplicado às séries para avaliar a significância da mudança nos dados.

Teste de Mann Kendall

O teste Mann-Kendall é um teste não paramétrico (MANN, 1945; KENDALL, 1975), sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para a detecção de tendências em séries hidrometeorológicas. É um dos métodos estatísticos mais difundidos na literatura (YUE *et al.*, 2002; AHMAD *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019; TORABI *et al.*, 2020). Trata-se de um método que emprega a amostra completa em sua formulação. Além da independência entre os elementos de uma amostra, o teste se baseia no pressuposto de que a probabilidade de ocorrência desses elementos é a mesma.

Seja uma série temporal de observações, x_1, x_2, \dots, x_n , Mann (1945) propôs para hipótese nula, H_0 , que o dado é de uma população onde as variáveis aleatórias são

independentes e igualmente distribuídas. A hipótese alternativa, H_1 , é que os dados seguem uma tendência monotônica no tempo. A estatística do teste é dada por:

$$S = \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (1.6)$$

em que

$$\text{Sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } X_j > X_k \\ 0 & \text{se } X_j = X_k \\ -1 & \text{se } X_j < X_k \end{cases} \quad (1.7)$$

Kendall (1975) mostra que S é normalmente distribuída, e a média e a variância de S , para uma situação na qual pode haver valores iguais nos valores de x , são calculadas pelas equações a seguir:

$$E[S_i] = 0$$

$$\text{Var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (1.8)$$

em que n é o tamanho da série temporal, p é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados e t_j é o número de dados com valores iguais num certo grupo j .

Usando a equação (1.7), um valor positivo de S indica tendência positiva na qual a medida de tendência central aumentam com o tempo. Por outro lado, um valor negativo de S indica uma tendência negativa. Sabendo-se que S é normalmente distribuído e tem média zero e variância dada pela equação (1.8), pode-se checar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero. Se S é significativamente diferente de zero, H_0 pode ser rejeitada para certo nível de significância apontando para a existência de tendência (H_1 é aceita).

Em um teste bilateral para tendência, H_0 não deve ser rejeitada se $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$, $F_N \left(Z_{\frac{\alpha}{2}} \right) = \frac{\alpha}{2}$ sendo F_N o valor de distribuição normal cumulativa e α o nível de significância do teste.

Entretanto, quando os dados da amostra são serialmente correlacionados, é afetada a capacidade do teste de Mann-Kendall de avaliar corretamente o significado da tendência, o que aumenta a probabilidade de detectar tendências quando, na verdade, não existem ou vice-versa.

Nesse sentido, levando em consideração a influência que a autocorrelação tem na distribuição dos dados, Hamed & Rao (1998) desenvolveram o teste de Mann-Kendall modificado. Nessa versão do teste, o problema de autocorrelação é tratado por meio de um ajuste no valor da variância. A variância modificada é dada por:

$$V^*(S) = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (1.9)$$

em que $V(S)$ é a variância da estatística de teste (1.8) Mann-Kendall para a amostra original; e n/n^* é o fator de correção devido à existência da autocorrelação na amostra, dado por:

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_s \quad (1.10)$$

em que n é o número real de observações, n^* é o tamanho efetivo da amostra para contabilizar a autocorrelação nos dados, e ρ_s é a função de autocorrelação da classificação das observações.

No teste Mann-Kendall modificado a autocorrelação entre a classificação das observações ρ_s é avaliada depois de subtrair a tendência. Apenas valores significativos de ρ_s são utilizados para calcular o fator de correlação de desvio n/n^* , pois a variância de S é subestimada quando os dados são autocorrelacionados positivamente (BASISTHA *et al.*, 2009). Segundo Rao *et al.* (2003), deve-se

considerar apenas a autocorrelação significativa dos dados e o número de defasamento (lags) pode ser limitado a 3.

Teste de Pettitt

É um teste não paramétrico em que se verifica se duas amostras x_1, \dots, x_t e x_{t+1}, \dots, x_N pertencem à mesma população (PETTIT, 1979). Essa estatística é capaz de localizar o ponto de mudança brusca nas médias da série histórica (*changing point*), e tem sido amplamente aplicada em diversos estudos para detectar mudanças abruptas em séries temporais climáticas e hidrológicas (XU *et al.*, 2014; GAO *et al.*, 2016; LEE & KIM 2017; KIM & YU, 2019; SHAHID *et al.*, 2018; SHAHID *et al.*, 2020).

A estatística de teste conta o número de vezes que o valor da primeira amostra excede o valor da segunda amostra. A hipótese nula (H_0) do teste de Pettitt admite ausência de um ponto de mudança na série, contra a alternativa (H_1) que existe um ponto de mudança. A estatística de teste é definida como:

$$K_T = \max_{a \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (1.11)$$

na qual,

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1.12)$$

em que:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

Logo, a estatística $U_{t,T}$ é calculada para valores de $1 \leq t \leq T$, e a estatística K_T do teste é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$. Essa estatística localiza o ponto em que houve uma mudança brusca na média de uma série temporal (PENNEREIRO & FERREIRA, 2012), e sua significância é avaliada por meio da seguinte equação:

$$P \cong 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (I.14)$$

na qual P é o nível de significância; K_T é o valor crítico; e T é o número de anos da série histórica. Quando P é menor do que o nível de significância estabelecido, a hipótese nula é rejeitada.

Teste de Levene

O teste de Levene é utilizado para testar a condição de homogeneidade de variâncias (LEVENE, 1960). Suponha que sejam tomadas $k \geq 2$ amostras aleatórias independentes entre si, $X_{i1}, \dots, X_{in_i}, i = 1, \dots, k$. A amostra i representa uma coleção de n_i variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid) com distribuição G_i , com média μ_i e variância σ_i^2 para G_i , μ_i e σ_i^2 desconhecidos. A hipótese nula de igualdade de variâncias,

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \quad i = j = 1, \dots, k$$

é testada contra a hipótese alternativa que nem todas as variâncias são iguais,

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \quad \text{para algum } i \neq j, j = 1, \dots, k$$

Os desvios absolutos das variáveis X_{ij} são denotados com relação às médias amostrais dos grupos $\bar{X}_i = n_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$ por $Z_{ij} = |X_{ij} - \bar{X}_i|, j = 1, \dots, n_i, i = 1, \dots, k$. A estatística do teste é definida por:

$$w = \frac{(n - k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad (I.15)$$

em que $\bar{Z}_i = n_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}$, $\bar{Z} = n^{-1} \sum_{i=1}^k n_i \bar{Z}_i$ e $n = \sum_{i=1}^k n_i$.

O teste de Levene rejeita a hipótese nula se $W > F_{(K-1, N-k), (1-\alpha)}$, na qual $F_{(K-1, N-k), (1-\alpha)}$ representa o quantil de ordem $1 - \alpha$ da distribuição $F_{(K-1, N-k)}$ e α é o nível de significância do teste.

Análise espectral (wavelet)

A análise da transformada *wavelet* vem se tornando uma ferramenta bastante utilizada para a análise de variações locais de séries temporais, uma vez que os sistemas físicos apresentam características não estacionárias em várias frequências (BOLZAN, 2004; COSTA & SILVA, 2017).

Wavelets, ψ , são funções usadas na decomposição de um sinal ou série temporal. A transformada *wavelet* pode ser considerada uma técnica de transformação de um sinal, no domínio do tempo, para um domínio chamado tempo escala, definindo as diferentes componentes do espectro de frequência do sinal (resolução); tal processo é conhecido como multiresolução (TORRENCE & COMPO, 1998; BOLZAN, 2004). Essa forma de representação do sinal fornece uma estrutura simples para a interpretação física das informações fornecidas pelo sinal analisado. Em diferentes resoluções, os detalhes de um sinal mostram diferentes estruturas físicas do mesmo.

Uma função *wavelet*, ψ , é uma função de média igual à zero, a qual é dilatada por meio de um parâmetro de escala (s) e transladada por um parâmetro de posição (u) (TORRENCE & COMPO, 1998).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1.16)$$

$$\psi_{u,s}[x(t)] = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (1.17)$$

O parâmetro “ u ” está relacionado com a localização da janela, na medida em que essa se desloca através do sinal, correspondente à informação do tempo no domínio transformado. O deslocamento de uma função *wavelet* significa simplesmente atrasar ou avançar o início da onda ao longo do comprimento da série. A escala “ s ” é um parâmetro relacionado com a informação da frequência do sinal. Cada escala corresponde a uma determinada banda de frequências e define a largura da janela.

Na escala s e na posição u , a transformada *wavelet* $W(u, s)$ é obtida por meio da equação (MALLAT, 2008):

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (1.18)$$

O asterisco (*) da função *wavelet* indica o conjugado complexo da função. A transformada *wavelet* mede as variações tempo-frequência de componentes espectrais de determinado sinal com diferentes resoluções tempo-frequência. Em outras palavras, ela correlaciona um sinal $x(t)$ com a função *wavelet* no tempo u e na escala s , $\psi_{u,s}$. O termo “ $|s|^{-1/2}$ ” é um fator de escala que garante a conservação da energia à medida que se expande ou comprime a *wavelet* mãe. Essa transformada é chamada de contínua porque os parâmetros de escala e de deslocamento assumem valores com discretização contínua.

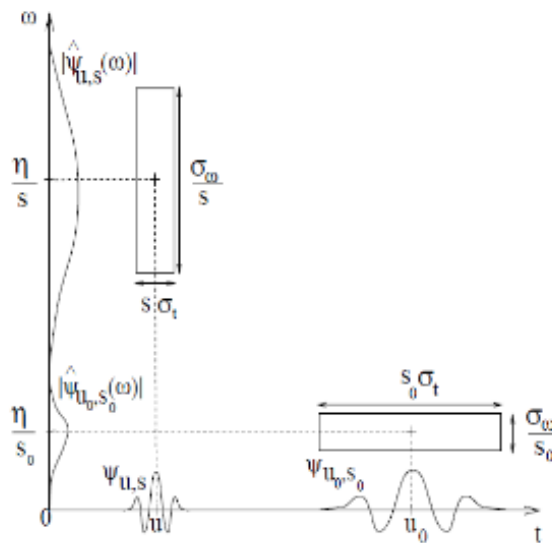
Aplicando-se a equação de Percival (1995), é possível escrever a transformada (Equação 1.18) como uma integração no domínio das frequências.

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{u,s}^* t(dt) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(\omega) \hat{\psi}_{u,s}^*(\omega) d\omega \quad (1.19)$$

O coeficiente da *wavelet* $W(u, s)$ depende do valor do sinal $x(t)$ e da transformada de Fourier do sinal $\hat{x}(\omega)$, na região espaço-temporal em que a “energia” de $\psi_{u,s}$ e a transformada de Fourier da função *wavelet* $\hat{\psi}_{u,s}$ se concentram (MALLAT, 2008).

Um núcleo da transformada *wavelet*, ou o ponto em torno do qual o resultado da transformada é representado, é mostrado no espectro da *wavelet* na Figura 1.

Figura 0.1 - Espaços tempo-frequência de duas wavelets $\Psi_{u,s}$ e Ψ_{u_0,s_0} .



Fonte: MALLAT, 2008.

Na figura o eixo das abcissas é representado pelo tempo, enquanto no eixo das ordenadas, as frequências; a transformada *wavelet* é representada, simbolicamente, por um retângulo, centrado no ponto $(u, \eta/s)$. O tempo e a frequência são espalhados proporcionalmente à escala e o seu inverso $1/s$, respectivamente. À medida que s varia, a altura e largura do retângulo variam, porém mantendo a área constante. O valor da energia do sinal, representado pelo valor do módulo da transformada, usualmente é representado em uma escala de cores.

De acordo com Morettin (1999), esse tipo de função apresenta três propriedades específicas que merecem destaque; admissibilidade, impossibilidade de divergência e a condição dos primeiros momentos de se anularem.

Uma função *wavelet* pode ser dilatada e transladada construindo uma família de outras versões de uma mesma função, podendo dessa forma ser chamada de *mother wavelet* (*wavelet* mãe), por dar uma forma base a essas outras versões. Na literatura (TORRENCE & COMPO, 1998) encontra-se a descrição de várias famílias de funções *wavelets*; dentre elas, Morlet (Equação 1.20), Paul (Equação 1.21) e DOG (Equação 1.22) são bastante utilizadas.

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}} \quad (1.20)$$

$$\psi_0(\eta) = \frac{2^m i^m m!}{\sqrt{\pi(2m)!}} (1 - i\eta)^{-(m+1)} \quad (1.21)$$

$$\psi_0(\eta) = \frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}} \left(\frac{d^m}{d\eta^m}\right) e^{-\frac{\eta^2}{2}} \quad (1.22)$$

Em que: ω_0 é a frequência adimensional; η é o tempo adimensional; m é a derivada.

A forma da função *wavelet* a ser escolhida é muito importante; de acordo com Torrence & Compo (1998), quatro fatores devem ser analisados para a escolha do tipo de função mais adequada ao problema encontrado:

1. Base da função *wavelet*: Ortogonal ou não-ortogonal – Na análise ortogonal, produz-se um espectro *wavelet* que contém blocos discretos, o que é útil para o processamento de sinais na medida em que resulta em uma representação mais compacta; para a análise de séries históricas, uma alternância aperiódica da série histórica produz um espectro diferente; já uma análise não-ortogonal é altamente redundante em escalas maiores, onde o espectro em períodos adjacentes é fortemente correlacionado; a transformada não-ortogonal é útil para análises de séries históricas e séries em que são esperadas variações na amplitude das *wavelets* suaves e contínuas.

2. Função *wavelet*: Complexa ou real – Uma função *wavelet* complexa retornará informação sobre a amplitude e a fase, sendo melhor para capturar comportamento oscilatório; uma função real retorna apenas uma única componente e pode ser usada para isolar picos ou descontinuidades.

3. Largura – A resolução de uma função *wavelet* é determinada pelo balanço entre a largura no espaço real e a largura no espaço de Fourier; uma função precisa no tempo terá uma boa resolução no tempo, porém uma resolução pobre na frequência; ao contrário, uma função menos precisa no tempo terá boa resolução na frequência.

4. Forma – A função *wavelet* deve refletir o tipo de característica das séries históricas. Para séries com mudanças abruptas e descontinuidades pontuais, são

recomendadas funções do tipo Haar, ou semelhantes, enquanto para variações suaves pode ser apropriada uma função também mais suave, como a Morlet.

Cabe salientar que esses vários tipos de funções de *wavelets* apresentam certa dificuldade para sua aplicação, visto que a escolha de uma tipologia recai, até certo ponto, no campo da parcimônia. Nesse sentido, Torrence & Compo (1998) afirmam que se o objetivo da análise é a construção de um espectro, sendo que a escolha da função não é crítica, uma vez que, qualitativamente, o resultado do uso de diferentes funções não é significativamente diferente.