

Caluan Rodrigues Capozzoli

**INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO DE MARGEM NO COMPORTAMENTO
HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof^a Dr^a Andréa de Oliveira Cardoso

Santo André – SP

2018

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rodrigues Capozzoli, Caluan

Influência da vegetação de margem no comportamento hidrológico da
bacia do rio Paraíba do Sul / Caluan Rodrigues Capozzoli. — 2018.

167 fls. : il.

Orientadora: Andrea de Oliveira Cardoso

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Santo André,
2018.

1. Modelagem hidrológica. 2. Cobertura da superfície. 3. Uso do
solo. 4. Áreas de proteção permanente. 5. Serviços ambientais. I.
Oliveira Cardoso, Andrea de. II. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia Ambiental, 2018. III. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 02 de maio de 2018.

Assinatura do autor: Le R Pozzoli

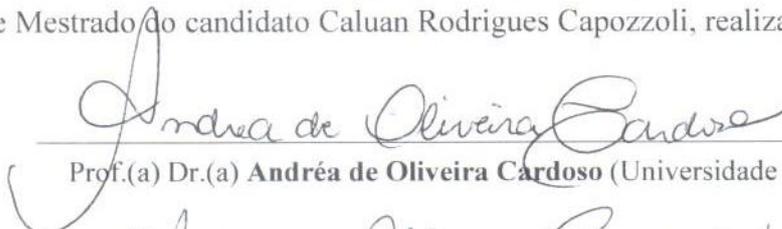
Assinatura do orientador: André de Oliveira Cardoso



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
pgcta@ufabc.edu.br

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Caluan Rodrigues Capozzoli, realizada em 12 de março de 2018:


Prof.(a) Dr.(a) **Andréa de Oliveira Cardoso** (Universidade Federal do ABC) – Presidente


Prof.(a) Dr.(a) **Benedito Cláudio da Silva** (Universidade Federal de Itajubá) – Membro Titular


Prof.(a) Dr.(a) **Vitor Vieira Vasconcelos** (Universidade Federal do ABC) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Daniel Andrés Rodriguez** (Universidade Federal do Rio de Janeiro) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **María Cleofé Valverde Brambila** (Universidade Federal do ABC) – Membro Suplente

Aos meus pais, Rosana e Wanderley, e meus irmãos Cauai e Arethuza.

Agradecimentos

Desde a primeira reunião para começar a iniciação científica até a última revisão da dissertação de mestrado, não me lembro de uma única oportunidade em que eu não tenha sido recebido com muita disposição, paciência e entusiasmo em sua sala. Por todo o ensinamento e pelo exemplo de docente que levarei para sempre comigo agradeço à Prof^a. Dr^a. Andrea de Oliveira Cardoso.

Aos amigos do CPRM/4º/5º andar frente por todo apoio, incentivo e pelas discussões hidrológicas/geológicas de alto nível (e alto fator de impacto rs!).

À Denise Romeu Filgueiras, cuja presença em minha vida foi determinante para que pudesse vislumbrar outra realidade.

*“Nasceram flores num canto de um quarto escuro
Mas eu te juro, são flores de um longo inverno”*

(6 minutos - Otto)

Resumo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul está localizada na região sudeste do Brasil, entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Além da população urbana e rural existente na bacia, o rio Paraíba do Sul é utilizado para abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro. O uso do solo na bacia é predominantemente de pecuária leiteira, onde o manejo inadequado do solo tem afetado a qualidade e a quantidade de água na bacia. Dada a importância socioeconômica da bacia do rio Paraíba do Sul, neste trabalho foi utilizado o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH para avaliar a influência da vegetação de margem no comportamento hidrológico da bacia. O modelo foi calibrado e verificado para o período de 2005 a 2015 considerando a condição atual de cobertura da superfície da bacia. Uma vez calibrado o modelo, foram elaborados cenários de uso do solo considerando diferentes larguras de vegetação florestal (APP) ao longo das margens do rio Paraíba do Sul e de seus afluentes. Os cenários consideram os valores de APP correspondentes ao que deveria ser aplicados por lei (30 m, 50 m, 100 m e 200 m) e também valores de APP de 300 m a 1000 m. Os cenários foram comparados com a condição atual da bacia em termos de vazão média anual, vazão crítica, vazão máxima diária anual (VMA), e frequência de ocorrência de extremos de vazão muito alta e muito baixa. O modelo representa adequadamente o processo de transformação de chuva em vazão da bacia e os resultados dos cenários indicam redução da vazão média anual em função do aumento da APP; redução da VMA em função do aumento da APP. Para a análise de frequência de extremos, a ocorrência de vazões da categoria muito alta durante o período chuvoso da bacia (outubro a março) diminui em função do aumento da faixa de APP, enquanto que a ocorrência de eventos de vazão muito alta nos meses secos (especialmente em agosto) aumenta em função do aumento da APP. A frequência de vazões da categoria muito baixa aumenta com o aumento da APP nos meses chuvosos, enquanto que nos meses secos a frequência de vazões muito baixa diminui com o aumento da APP.

Abstract

The Paraíba do Sul river basin is located in the southeast region of Brazil, across the states of São Paulo, Rio de Janeiro and Minas Gerais. In addition to urban and rural population in the basin, Paraíba do Sul river supplies water to Rio de Janeiro metropolitan region. Land-use in the basin is predominantly dairy farming, where inadequate soil management has affected the quality and quantity of water in the basin. Due to the socioeconomic importance of the Paraíba do Sul river basin, the MGB-IPH distributed hydrological model was used to evaluate the influence of the riparian vegetation on the hydrologic behavior of the basin. The model was calibrated and verified for the period from 2005 to 2015 considering the current condition of land cover. After calibrating the model, land use scenarios were developed considering different widths of forest vegetation along the banks of the Paraíba do Sul (PPA) and its tributaries. The scenarios consider PPA values corresponding to what should be applied by law (30 m, 50 m, 100 m and 200 m) and also PPA values from 300 m to 1000 m. These scenarios were compared with the current condition of the basin in terms of annual average flow, critical flow, annual maximum daily flow (AMF), and frequency of occurrence of very high and very low flow extremes. The model represents adequately the rainfall-runoff transformation in the basin, and scenarios results indicate a reduction in the average annual flow rate due to the increase of the PPA; reduction of AMF due to the increase in PPA. Extreme frequency analysis indicates that occurrence of very high flow rates during the rainy period of the basin (October to March) decreases due to increase in PPA, while the occurrence of very high flow events in the dry months (especially in August) increases as the PPA increases. The frequency of very low flow category in rainy months increases with PPA, whereas in the dry months very low flow frequency decreases with PPA increase.

Lista de Figuras

Figura 1: Gráfico desenvolvido por Bayer (2014), comparando os resultados de simulações do MGB para vazão média anual em função do percentual de desmatamento em três bacias hidrográficas distintas com os resultados de estudos observacionais em diversas bacias experimentais pareadas.....	29
Figura 2: Fluxograma de funcionamento do modelo MGB-IPH.....	31
Figura 3: Localização da bacia do rio Paraíba do Sul.	32
Figura 4: Hidrografia da bacia do rio Paraíba do Sul com seus principais afluentes.	33
Figura 5: Localização das estações fluviométricas utilizadas nas etapas de calibração e verificação da simulação de vazão.	37
Figura 6: Distribuição espacial das estações pluviométricas e climatológicas utilizadas.	38
Figura 7: Mapa de solos da bacia do rio Paraíba do Sul produzido a partir de mapas de solo do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, complementado com o mapa de solos do Brasil.....	41
Figura 8: Mapa de classes de cobertura da superfície da bacia do rio Paraíba do Sul.	45
Figura 9: Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul.	47
Figura 10: Relevo da bacia gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) corrigido.	48
Figura 11: Comparação entre a rede de drenagem gerada para utilização no modelo, construída com base em um modelo digital de elevação (MDE) corrigido e a disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA).	49
Figura 12: Disposição espacial dos parâmetros Nash (R^2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog), relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e Correlação de Pearson (r) para o período de calibração do modelo.....	61
Figura 13: Disposição espacial dos parâmetros Erro Viés (V), Erro Quadrático Médio (ERQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de calibração do modelo.	62
Figura 14: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 580990000: Santa Branca e localização do posto na bacia.....	63
Figura 15: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 581282000 – UHE Jaguari Jusante e localização do posto na bacia.	64

Figura 16: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58520000 – Sobraji e localização do posto na bacia.	65
Figura 17: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58630002 – Anta e localização do posto na bacia.	66
Figura 18: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II localização do posto na bacia. Os círculos indicam depleções atípicas que podem estar associadas com erros na vazão observada.	67
Figura 19: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58974000 – Campos – Ponte Municipal localização do posto na bacia.	68
Figura 20: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de calibração.	69
Figura 21: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de calibração.	70
Figura 22: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de calibração. .	71
Figura 23: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de calibração.	72
Figura 24: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de calibração.	73
Figura 25: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de calibração.	74
Figura 26: Disposição espacial dos parâmetros Nash (R2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog), relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e Correlação de Pearson (r) para o período de verificação do modelo.	76
Figura 27: Disposição espacial dos parâmetros Erro Viés (V), Erro Quadrático Médio (ERQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de verificação do modelo.	77
Figura 28: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58099000 – Santa Branca e localização do posto na bacia	78
Figura 29: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 581282000 – UHE Jaguari Jusante e localização do posto na bacia.	79
Figura 30: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58520000 – Sobraji e localização do posto na bacia.	80
Figura 31: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58630002 – Anta e localização do posto na bacia.	81

Figura 32: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II e localização do posto na bacia.	82
Figura 33: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58974000 – Campos – Ponte Municipal e localização do posto na bacia.	83
Figura 34: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de verificação.	84
Figura 35: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de verificação.	85
Figura 36: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de verificação.	86
Figura 37: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de verificação.	87
Figura 38: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de verificação.	88
Figura 39: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de verificação.	89
Figura 40: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santa Branca.	91
Figura 41: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Santa Cecília Jusante.	92
Figura 42: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Sobraji.	92
Figura 43: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Anta.	93
Figura 44: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Santo Antônio de Pádua II.	93
Figura 45: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Campos – Ponte Municipal.	94

Figura 46: Vazão máxima anual (a) para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santa Branca. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).....	95
Figura 47: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto UEL Santa Cecília. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).	96
Figura 48: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Sobraji. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).....	97
Figura 49: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Anta. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).	98
Figura 50: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santo Antônio de Pádua II. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).	99
Figura 51: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Campos. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).....	100
Figura 52: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santa Branca.	102
Figura 53: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto UEL Santa Cecília.	102
Figura 54: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Sobraji.....	103
Figura 55: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Anta.	103

Figura 56: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santo Antônio de Pádua II.....	104
Figura 57: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Campos.	104
Figura 58: Vazão Q95 para todo o período de simulação, no cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária.	107
Figura 59: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Santa Branca.....	109
Figura 60: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto UEL Santa Cecília.	111
Figura 61: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Sobraji.	113
Figura 62: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Anta.	115
Figura 63: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Santo Antônio de Pádua II.	117
Figura 64: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Anta.	119

Lista de Tabelas

Tabela 1: Estações utilizadas para calibração e verificação do modelo. Em negrito as estações utilizadas para avaliação das funções objetivo durante a calibração. A letra entre parênteses após o nome do posto indica se o posto é de vazão natural (N) ou observada (O).	36
Tabela 2: Estações climatológicas utilizadas.....	38
Tabela 3: Grupos de solos presentes na bacia do rio Paraíba do Sul.....	41
Tabela 4: Agrupamento dos tipos de solos de acordo com característica de capacidade de infiltração.....	42
Tabela 5: Agrupamento em classes dos tipos de uso e cobertura contidos na bacia do rio Paraíba do Sul, resultante da complementação do mapa disponibilizado pela CEIVAP com o mapa de uso e cobertura da terra do IBGE.....	44
Tabela 6: Percentual de área ocupada pelos diferentes tipos de cobertura de superfície na bacia do rio Paraíba do Sul.....	44
Tabela 7: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) da bacia determinadas pelo cruzamento da capacidade de infiltração do solo com a classe de cobertura da superfície.....	46
Tabela 8: Estações utilizadas para avaliação das funções objetivo durante a calibração.....	53
Tabela 9: Tabela de contingência utilizada para determinação de acertos e negativos corretos do modelo.....	55
Tabela 10: Valores das funções objetivo Nash (R2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog) e relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e dos parâmetros de avaliação Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de calibração do modelo (01/01/2005 até 31/12/2009). As estações em negrito foram utilizadas para calibração do modelo.	59
Tabela 11: Valores das funções objetivo (R2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog) e relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e dos parâmetros de avaliação Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de verificação do modelo (01/01/2010 até 31/12/2015). As estações em negrito foram utilizadas para calibração do modelo.	75

Tabela 12: Percentuais de cada unidade de resposta hidrológica (URH) para cada cenário de recomposição de margem. As URHs 1, 2 e 3 são cobertura do tipo Agrícola em solo de permeabilidade baixa, média e alta, respectivamente; 3,4 e 5 são cobertura do tipo Floresta em solo de permeabilidade baixa, média e alta, respectivamente. A URH 7 representa as áreas semi-impermeáveis e a URH número 8 a água. 90

Tabela 13: Limiares de vazão muito alta (percentil 85%) mensal determinados com base na simulação de controle 120

Tabela 14 – Limiares de vazão muito baixa (percentil 15%) mensal determinados com base na simulação de controle 121

Lista de abreviaturas

ANA – Agência Nacional de águas

APP – Área de Proteção Permanente (*Permanent Preservation Areas* – PPA)

ASI – Área Semi-Impermeável

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

CF – Código Florestal

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IAF – Índice de Área Foliar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MA – Vazão Muito Alta

MB – Vazão Muito Baixa

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB – Modelo de Grandes Bacias

N – Vazão Normal

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

VIC-2L – 2 Layer Variable Infiltration Capacity

UEL – Usina Elevatória

UHE – Usina Hidrelétrica

URH – Unidades de Resposta Hidrológica

VMA – Vazão Máxima Diária Anual

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. Código florestal brasileiro	22
2.2. Influência das mudanças de cobertura da terra na resposta hidrológica.....	24
2.3. Modelagem hidrológica de grandes bacias	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Área de estudo	31
3.2. Dados	34
3.2.1.Dados de Vazão	35
3.2.2.Dados de Precipitação	37
3.2.3.Dados atmosféricos	37
3.3. Determinação das Unidades de Resposta Hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul	39
3.3.1.Solos da bacia do rio Paraíba do Sul	39
3.3.2.Cobertura da superfície da bacia do rio Paraíba do Sul.....	43
3.4. Pré-processamento dos dados	47
3.4.1.Correção do Modelo Digital de Elevação	47
3.4.2.Processamento das direções e de acumulação de fluxo da área	48
3.4.3.Geração da rede de drenagem da área de interesse	49
3.4.4.Delimitação das bacias e sub-bacias hidrográficas.....	50
3.5. Calibração e verificação do modelo	50
4. RESULTADOS.....	58
4.1. Resultados da calibração do modelo	58
4.2 Verificação do modelo.....	72
4.3. Simulação e avaliação dos cenários de área de proteção permanente	89
4.3.1.Vazão média anual.....	90
4.3.2.Vazão Máxima Diária Anual	94
4.3.3.Vazão Q_{95}	101
4.3.4.Frequência de Extremos de Vazão.....	108
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	122
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXO A	134
ANEXO B	136
ANEXO C	138
ANEXO D.....	150
ANEXO E.....	162
ANEXO F.....	165

1. Introdução

Abrangendo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, com uma população de mais de 5 milhões de habitantes distribuídas em 180 municípios em uma área de aproximadamente 55.000 km², a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul apresenta um cenário de conflitos pelo uso da água. A bacia possui rios de domínio federal e sua área de drenagem abrange diversas hidrelétricas, importantes polos industriais e populacionais do país, com diversos tipos de disputa pelo uso. Nesse contexto, o conhecimento do comportamento hidrológico ao longo da bacia é fundamental para racionalizar o uso dos recursos hídricos disponíveis.

Entre os conflitos que ocorrem pelo uso da água na bacia, destaca-se o desvio das águas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu com a finalidade de geração de energia e abastecimento de cerca de nove milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O vertimento das águas do Paraíba do Sul para o Guandú é feito desde a década de 50.

Uma das principais questões que envolvem o processo de vertimento das águas do Paraíba do Sul para bacia do Guandú é o abastecimento das cidades situadas no trecho imediatamente a jusante da transposição até a confluência com os rios Paraíba (mineiro) e Piabanha. Nesse trecho, se a vazão defluída é muito baixa, o abastecimento das cidades é comprometido tanto em quantidade quanto em qualidade (UFRJ/LABHID, 2001).

No auge da crise hídrica que atingiu os estados da região Sudeste entre 2013 e 2015, o conflito pelo uso da água na bacia do rio Paraíba do Sul levou a uma das situações de maior repercussão na imprensa, quando foi considerada a transposição de águas do trecho paulista da bacia do rio Paraíba do Sul para o sistema Cantareira (que abastece cerca de 6,5 milhões de pessoas na região metropolitana de São Paulo). Tal fato acirrou o conflito pela água da bacia e a questão foi resolvida no Supremo Tribunal Federal (AMORA, 2014). Apesar do acordo que permitiu iniciar as obras da transposição, a mesma foi embargada em junho de 2017, por problemas no licenciamento ambiental.

O uso do solo na bacia do Rio Paraíba do Sul durante o século XVIII foi predominantemente voltado para o cultivo de café, porém o manejo inadequado do solo e desmatamento da vegetação nativa tornaram as terras pouco produtivas para agricultura e gradativamente o uso da bacia voltou-se para a, ainda predominante, pecuária leiteira. Mais

recentemente o crescimento urbano da bacia foi estimulado e atualmente 87% da população está em áreas urbanas da bacia. Apesar da paisagem de pastagens ainda dominar a bacia, as práticas de uso intensivo, com frequentes e sucessivas queimadas sem se preocupar com a conservação do solo, dos mananciais e da diversidade biológica, acarretam em baixa produtividade e representam um enorme desperdício de recursos naturais, especialmente a água da bacia, que é afetada em quantidade e qualidade pelo manejo de solo inadequado (UFRJ/LABHID, 2002).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), apresenta entre seus fundamentos que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar os usos múltiplos e que a gestão deve ser descentralizada com a participação da sociedade, do poder público e dos usuários. Em seus objetivos, a PNRH destaca o uso racional e integrado dos recursos hídricos e a necessidade de garantir disponibilidade hídrica para o presente e futuro. Para alcançar os objetivos propostos pela PNRH é importante que o gerenciamento dos recursos hídricos leve em conta os aspectos sociais, físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica, sendo indispensável nesse sentido a realização de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento que forneçam subsídios para a tomada de decisão.

O uso da modelagem hidrológica pode contribuir para aprimoramento da gestão de recursos hídricos. Tundisi (2014) destaca que o desenvolvimento de modelos matemáticos e ecológicos para simular futuros impactos em recursos hídricos superficiais e subterrâneos e nas bacias hidrográficas deve ser estimulado em universidades e institutos de pesquisa e que a modelagem matemática é necessária para tornar a gestão de recursos hídricos mais eficiente.

No contexto da gestão de recursos hídricos, a modelagem hidrológica pode ser aplicada para diferentes situações como a previsão de cheias, disponibilidade hídrica, comportamento de contaminantes em cursos d'água, transporte de sedimentos, funcionamento e dimensionamento de estruturas hidráulicas, entre outros. De acordo com o objetivo da aplicação, diferentes tipos de modelos, com diferentes parâmetros de entrada e saída podem ser utilizados.

Os modelos hidrológicos são geralmente classificados como empíricos ou físicos, sendo que os modelos físicos podem ainda ser desdobrados em concentrados e distribuídos (Tucci, 1998). Modelos empíricos não possuem um conceito físico em sua formulação, em geral são modelos baseados em análises estatísticas, como regressões lineares e correlações, ou então modelos baseados em redes neurais artificiais. O desenvolvimento de um modelo

empírico é relativamente mais simples do que a de um modelo físico, porém ele trás pouca informação a respeito das relações entre os processos hidrológicos da bacia e, em algumas situações, um conhecimento prévio dessas relações é necessário para escolha das variáveis preditoras utilizadas no modelo.

Os modelos físicos procuram estabelecer, por meio de equações físicas, as relações entre os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Quando essas relações são estabelecidas sem se preocupar com a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, o modelo é considerado concentrado.

Um exemplo de modelo concentrado é o modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) descrito por Lopes *et al.* (1981), trata-se de um modelo de transformação de chuva em vazão, que considera que a chuva, evaporação e os parâmetros de calibração se comportam homogeneamente ao longo da área de bacia. A vantagem deste tipo de modelo é que, quando comparado com um modelo distribuído, a quantidade de variáveis de entrada é menor e o processo de calibração é simplificado, porém o modelo ainda é limitado para a representação espacial dos processos hidrológicos que ocorrem ao longo da bacia. Uma tentativa de melhor representar os processos hidrológicos de uma bacia de interesse utilizando um modelo concentrado é dividir a bacia em sub-bacias menores, aplicar o modelo em cada sub-bacia e, posteriormente, integrar o resultado de cada uma delas.

Os modelos distribuídos, por sua vez, consideram a variação espacial dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, permitindo uma melhor compreensão desses fenômenos. Outra possibilidade que se apresenta com o uso de modelos distribuídos é uma melhor compreensão da influência dos padrões de cobertura e uso do solo no comportamento hidrológico da bacia, permitindo a simulação de cenários hipotéticos de uso e ocupação e seus impactos no regime hidrológico da bacia.

1.1. Objetivos

Dada a importância socioeconômica da bacia do rio Paraíba do Sul e suas particularidades fisiográficas e climáticas, considera-se essa área relevante para o desenvolvimento de estudo de comportamento hidrológico. Nesse contexto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência da vegetação de margem no comportamento hidrológico da bacia do Rio Paraíba do Sul utilizando modelo hidrológico distribuído.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- Avaliar a capacidade do modelo em representar os processos hidrológicos da bacia hidrográfica;
- Avaliar a capacidade do modelo em representar cenários alternativos de uso do solo para a bacia hidrográfica, partindo do estabelecido de acordo com a legislação ambiental e ampliando as áreas de cobertura vegetal.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Código florestal brasileiro

No Brasil a proteção de áreas de vegetação nativa é normatizada de acordo com a Lei Federal nº 12.651, de 2012, conhecida como Código Florestal Brasileiro (CF), que estabelece *“normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos.”* (BRASIL, 2012).

O primeiro código florestal brasileiro foi criado em 1934 com o objetivo de normatizar o uso do recurso florestal. Estabelecia as florestas como um bem jurídico de interesse comum, reconhecendo o interesse social nas florestas nacionais e determinava que as propriedades rurais reservassem 25% de sua propriedade como área de preservação da vegetação nativa (SAUER E FRANÇA, 2012).

Desde então, diversas versões do Código Florestal Brasileiro foram redigidas até a versão atual de 2012. A importância da vegetação nativa para proteção do solo e das águas aparece na Lei Federal 4.771, de 1965, que estabeleceu a áreas de preservação permanente (APP), além do conceito de reserva legal. Os valores e percentuais de ambas foram modificados diversas vezes ao longo do tempo.

De acordo com Sauer e França (2012), duas medidas tomadas em 2008 com o objetivo de estimular a regularização ambiental das propriedades rurais pressionaram a reformulação do Código Florestal Brasileiro para chegar à atual versão. A primeira dessas medidas foi a exigência de comprovação da regularidade ambiental das propriedades situadas no bioma Amazônico para ter acesso a linhas de financiamento rural. A segunda foi a incidência de multas e responsabilização criminal, pela Lei Federal n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Lei de Crimes Ambientais), para aqueles que não regularizassem suas propriedades rurais.

A atual versão do Código Florestal Brasileiro define, no seu artigo 3º, inciso III, áreas de reserva legal como uma área mínima inserida em uma propriedade ou posse rural que deve ser preservada, com o objetivo de garantir o uso econômico sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e

promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa.

No mesmo artigo 3º, no inciso II, do Código Florestal Brasileiro, as APP são definidas como área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com diversas a funções ambientais, entre elas a de preservar os recursos hídricos. Os critérios atualmente utilizados para definição de APP que são pertinentes para o trabalho desenvolvido nesta pesquisa se referem aos apresentados no artigo 4º da Lei Federal 12.651, de 2012, para delimitação de APP nas margens de cursos d'água, sendo estes:

“Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:

I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de:(Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012).

a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;

b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;”

Além dos cursos d'água, o código florestal prevê a existência de áreas de proteção permanente em outras situações, mas que não estão no escopo deste trabalho. Deste modo, o termo área de proteção permanente ou APP será utilizado no decorrer deste trabalho para se referir à faixa de vegetação natural preservada ao longo dos cursos d'água.

Outra consideração que deve ser feita é que, por questões práticas, os cenários de recomposição não levam em conta o disposto na seção II do CF que dispõe sobre as áreas rurais consolidadas (áreas que foram desmatadas para uso rural até o dia 22 de julho de 2008) em APP e que prevê faixas de APP de margem menores ou até inexistente de acordo com o uso da área rural consolidada e do tamanho da propriedade.

2.2. Influência das mudanças de cobertura da terra na resposta hidrológica

Ao longo do ciclo hidrológico, a água passa pelos processos de evaporação, transpiração, precipitação, interceptação, infiltra no solo e escoam em subsuperfície e ao longo de rios ou no subterrâneo, sendo que mudanças na cobertura da superfície interferem direta ou indiretamente nesses componentes do ciclo hidrológico. Compreender os impactos da mudança da cobertura da superfície na disponibilidade hídrica é um problema de grande interesse na hidrologia, em particular os impactos hidrológicos da conversão de florestas tropicais para outros tipos de uso da terra, tipicamente agrícolas, como cultivos anuais ou pastagens.

Tucci e Clarke (1997) destacam que para compreender o impacto das alterações de cobertura no escoamento é importante conhecer o tipo de cobertura existente na bacia antes da modificação, o uso da superfície após a modificação e o método utilizado para modificação da cobertura. De acordo com Collischonn (2001), essas distinções são necessárias para que não sejam feitas associações equivocadas entre a mudança ocorrida na área e o impacto no escoamento superficial. O autor utiliza como exemplo um trabalho que mostra recargas maiores em uma situação de solo exposto do que em cobertura por grama onde provavelmente a capacidade de infiltração do solo foi mantida constante. A condição de desmatamento que proporciona a diminuição da infiltração está associada com práticas de manejo que compactam a porção superficial do solo, o que não ocorreu no experimento apresentado pelo autor.

Dentro dos aspectos importantes, determinar o impacto da modificação da interceptação (da cobertura vegetal) sobre o escoamento é relevante em regiões em desenvolvimento (TUCCI E CLARKE, 1997). A interceptação da chuva em florestas é maior e o volume interceptado nas folhas das plantas pode posteriormente ser evaporado e, havendo energia disponível para evaporação, a planta pode continuar perdendo umidade para atmosfera na forma de transpiração, sendo a combinação de ambos os processos denominada evapotranspiração (TUCCI E CLARKE, 1997). Em regiões onde o período chuvoso coincide com o período de maior evapotranspiração, ou seja, onde o período de maiores volumes interceptados coincide com o período de maior energia para evapotranspiração, a influência da vegetação é mais acentuada (COLLISCHONN, 2001; ZHANG *et al.*, 2017).

O trabalho de Zhang *et al.* (2017) destacou que os estudos que têm como objetivo avaliar o impacto de mudanças de uso do solo no escoamento das bacias hidrográficas

possuem diferentes tipos de metodologias de acordo com a escala de trabalho e com a disponibilidade de dados para realização do estudo. Segundo os autores, os estudos de impacto da mudança de cobertura na resposta hidrológica podem ser conduzidos utilizando bacias experimentais pareadas (bacias de até 100 km²) que consiste em comparar as mudanças na vazão de uma bacia de controle (sem alteração da cobertura) com outra em que a cobertura é alterada e a bacia de controle é utilizada para eliminar as variações que não são decorrentes da mudança de cobertura. A abordagem que utiliza bacias quase-pareadas é semelhante à anterior, porém é aplicada para bacias maiores, com maiores heterogeneidades de cobertura e/ou climática onde uma bacia com maior nível de alteração da cobertura é comparada com bacias vizinhas com menor ou nenhum nível de alteração da cobertura. Em bacias com poucas informações sobre o meio físico, métodos estatísticos são bem aceitos e em locais com maior disponibilidade de informações e monitoramento hidrológico, modelos hidrológicos podem ser utilizados para prever a resposta hidrológica devido a alterações na cobertura.

A partir da compilação de resultados de diversas publicações que avaliam a influência da cobertura de superfície no comportamento hidrológico em diversas bacias do mundo todo, Zhang *et al.* (2017) resumem algumas generalidades que são observadas nesses estudos. Tanto para bacias que os autores consideram pequenas (<1000 km²) quanto para grandes bacias (≥1000 km²), os incrementos na vazão anual são maiores quanto maior for o percentual de desmatamento. Para o caso de recomposição da vegetação, a vazão média anual diminui conforme o aumento da recomposição, sugerindo que o incremento nas vazões anuais ocasionado pelo desmatamento está associado com a diminuição da evapotranspiração e da interceptação. Os autores também destacam a maior sensibilidade de grandes bacias para mudanças de cobertura e a maior sensibilidade para mudanças de cobertura em bacias onde a quantidade de precipitação é limitada em relação à disponibilidade para evaporação, quando comparadas com bacias onde a entrada (precipitação) e saída (evaporação) são equilibradas e àquelas onde a evaporação é limitada em relação à precipitação.

Costa *et al.* (2003) utilizaram dados observacionais para a avaliação de impactos de mudança de superfície na bacia do rio Tocantins, comparando estatisticamente o regime de chuva da bacia com o regime de vazão, observando que tendências na vazão não ocorriam na precipitação, sugerindo que o aumento da vazão média anual e nos picos de vazões máximas estariam associadas com o avanço da área agrícola sobre as áreas de vegetação nativa.

Ainda que possível, o desenvolvimento deste tipo de estudo depende da disponibilidade de dados para avaliação da área e conhecimento do histórico de uso e

ocupação da área também para um período longo de tempo com um padrão de modificação conhecido. Somado a isso, os impactos hidrológicos de mudanças de cobertura em larga escala são muito mais complexos do que na micro-escala e fatores como custo e impacto ambiental fazem com que a aplicação da metodologia utilizada em pequenas bacias experimentais não seja viável para estudos de grandes bacias e nesse caso, a utilização de modelos é o mais adequado (COSTA, 2005).

Diversos modelos têm sido utilizados para a avaliação do impacto de mudança da superfície na resposta hidrológica (COLLISCHONN, 2001; VIOLA *et al.*, 2012; PEREIRA, 2013; RODRIGUEZ e TOMASELLA, 2016). Uma aplicação do MGB para avaliação dos impactos da mudança de uso e cobertura do solo é mostrada em Caram (2010), que estudou o impacto da mudança de uso do solo para a bacia do rio Piracicaba onde houve um crescimento da área urbana com redução da área de pastagem e aumento do plantio de cana-de-açúcar entre 1972 e 2008. Os resultados mostraram que se as condições de uso do solo de 1972 tivessem sido mantidas, seriam observados menores picos nas vazões máximas, bem como diminuição das vazões médias e mínimas.

Para a mesma bacia, Silva (2014) avaliou cenários de recomposição das áreas de proteção permanente de margem de cursos d'água e de topo de morro, utilizando o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Foi observada redução nos picos de máxima e aumento das vazões médias no período de recessão.

Bayer (2014) utilizou o modelo MGB para avaliação do impacto da mudança de uso do solo na bacia do rio Paraná. Nesse trabalho foram detectadas reduções na interceptação e evapotranspiração da bacia e aumento na vazão média de longo termo da bacia, na vazão de pico e nas vazões mínimas.

2.3. Modelagem hidrológica de grandes bacias

Modelos hidrológicos permitem interpolar e extrapolar (especialmente e temporalmente) informações obtidas em poucos pontos, possibilitando o entendimento do comportamento hidrológico de uma região onde não há monitoramento. Funcionam, portanto, como uma ferramenta de integração, sem a qual dificilmente se consegue uma visão completa e dinâmica dos complexos processos envolvidos em um sistema ambiental (ROSMAN, 2001). Em alguns casos, além da compreensão dos processos hidrológicos, os modelos podem ser utilizados para prever o comportamento de uma variável hidrológica em

função de outra(s). Por exemplo, a previsão de vazão em função da precipitação observada na bacia.

Existem diversos tipos de modelos de simulação hidrológica que vão desde modelos empíricos, com poucas variáveis de entrada e calibração relativamente simples; modelos concentrados, que apresentam base física, mas que não consideram sua variação espacial; até modelos físicos e distribuídos, conforme descrito por Collischon (2001), com alto grau de detalhamento dos processos hidrológicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. A escolha de um determinado modelo para representação dos processos hidrológicos depende essencialmente do objetivo do estudo e do nível de detalhamento (espacial e temporal) das informações sobre os processos hidrológicos da bacia em estudo. De acordo com Linsley *et al.* (1988), a maioria dos modelos distribuídos e de base física foi desenvolvida para solucionar problemas de engenharia usuais em pequenas bacias (da ordem de 100 a 1000 km² de área) como determinação de cotas de inundação, dimensionamento de pontes e reservatórios, entre outros.

Os primeiros modelos hidrológicos de grandes escala (para bacias com área maior que 10.000 km²) buscavam avanços na compreensão dos fluxos verticais de calor e evapotranspiração para integração em modelos de circulação geral da atmosfera (LIANG *et al.* 1994), havendo ainda poucos modelos hidrológicos de grande escala para simulação de fluxos horizontais. Entretanto, Nijssen *et al.* (1997) destacam que o desenvolvimento e validação de modelos de grande escala com boa representação do fluxo horizontal é importante pois: a vazão é uma variável que pode ser medida com relativa facilidade e integradora dos processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica e que pode servir como base para avaliar o desempenho de modelos de circulação geral quando estes estiverem acoplados com modelos hidrológicos; com o aperfeiçoamento dos modelos de previsão do tempo, principalmente para previsões de longo prazo, haverá condições de realizar previsões de vazão de longo prazo utilizando modelos hidrológicos que estejam preparados para serem integrados com modelos de circulação geral.

Uma das primeiras iniciativas de modelagem de simulação de escoamentos e fluxos horizontais em grande escala foi o modelo VIC-2L (*2-Layer Variable Infiltration Capacity* - LIANG *et al.*, 1994; NIJSSEN *et al.*, 1997) que atualmente tem sido integrado com modelos de circulação geral da atmosfera para simular os processos hidrológicos em condição de mudança climática (DEMARIA *et al.*, 2013; BENNETT *et al.*, 2012). Outros modelos têm sido testados para modelagem de escoamento em grandes bacias e posteriormente acoplados

com módulos que permitam a representação e o entendimento de outras variáveis hidrológicas como parâmetros de qualidade da água (PANAGOPOULOS *et al.*, 2011), simulação de alterações no padrão de uso do solo (YANG *et al.*, 2011), impacto da retirada de água no regime de vazões (YANG *et al.*, 2010).

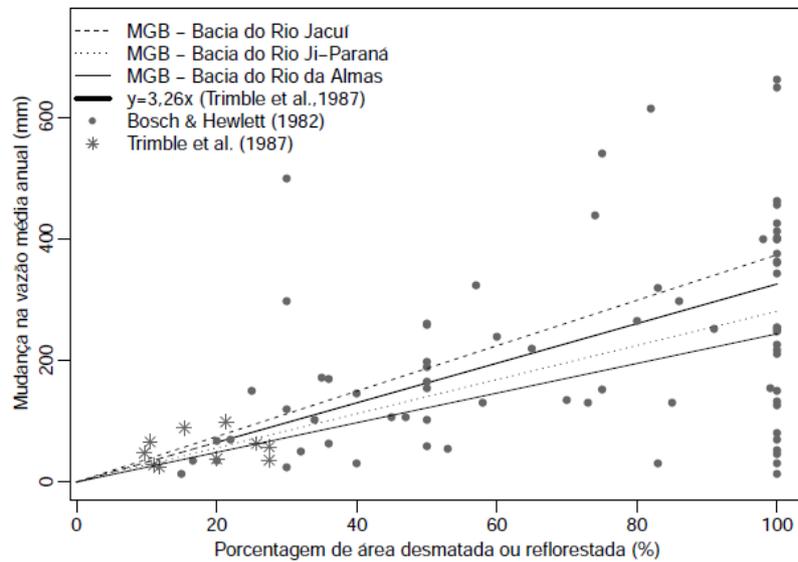
O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), descrito por Collischonn (2001), mostrou bons resultados na representação de processos hidrológicos das bacias do rio Taquari-Antas, Uruguai, rio Taquari (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN e TUCCI, 2005), rio Piracicaba (CARAM, 2010) e rio Ibicuí (ADAM e COLLISCHONN, 2013).

Em trabalhos mais recentes, além de representar espacialmente e temporalmente os processos hidrológicos da bacia estudada, o MGB-IPH tem apresentado bons resultados na representação de processos mais específicos. Paiva *et al.* (2013) acoplaram um módulo hidrodinâmico ao MGB-IPH para representação do nível da água nas planícies de inundação da bacia Amazônica. Na bacia do rio São Francisco, dados de previsão de chuva por conjuntos foram utilizados como entrada de precipitação no modelo que apresentou como saída a previsão de vazão (FAN *et al.*, 2014) e também para simulação de cenários de mudanças climáticas na bacia do rio Ibicuí (ADAM e COLLISCHONN, 2013).

Especificamente para estudos de mudança de cobertura da vegetação, Bayer (2014) apresenta uma análise de sensibilidade do MGB para mudança de uso da terra em termos de vazões médias anuais. Nessa análise foram avaliadas três diferentes bacias hidrográficas brasileiras, com características fisiográficas distintas.

Partindo-se da condição de cobertura 100% florestal nas bacias, foram realizadas sucessivas simulações considerando a substituição progressiva da cobertura florestal por cobertura de pastagem até que toda a área da bacia estivesse coberta por pastagem. Em cada uma das simulações a vazão média anual no exutório das bacias foi calculada e os resultados obtidos foram plotados juntamente com os resultados de estudos em bacias experimentais existentes na literatura. O gráfico do referido estudo que sintetiza parte dos resultados encontrados é mostrado na Figura 1. As simulações são coerentes com os estudos em bacias experimentais e indicam que os cenários simulados pelo modelo são capazes de representar o comportamento hidrológico da bacia em cenários de mudança de cobertura.

Figura 1: Gráfico desenvolvido por Bayer (2014), comparando os resultados de simulações do MGB para vazão média anual em função do percentual de desmatamento em três bacias hidrográficas distintas com os resultados de estudos observacionais em diversas bacias experimentais pareadas.



Fonte: Bayer (2014).

3. Materiais e Métodos

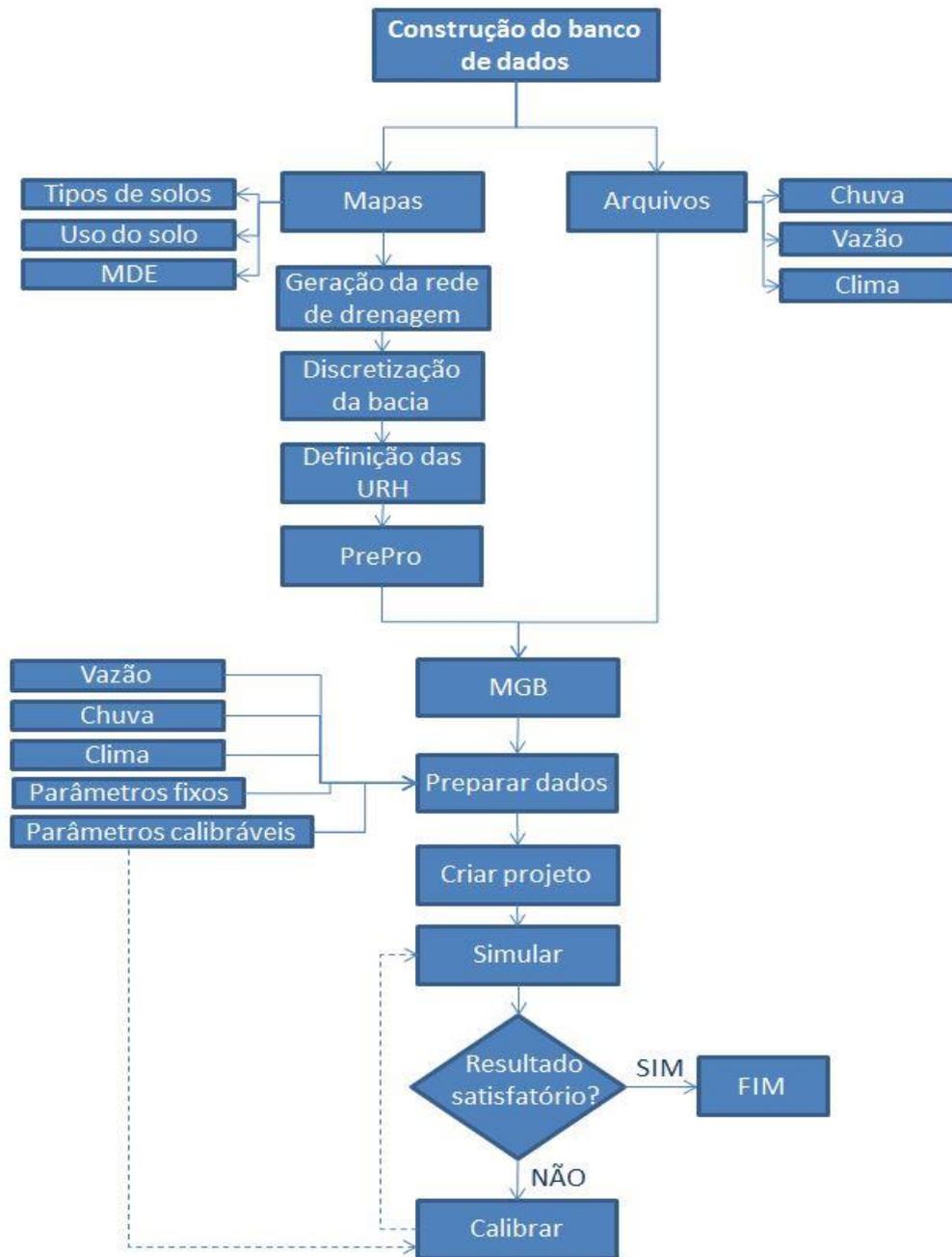
Neste estudo o modelo MGB-IPH, versão 2015, foi utilizado para simulação hidrológica na bacia do rio Paraíba do Sul em escala diária. Visto que, além da precipitação, características físicas como área e forma do relevo influenciam no processo de transformação de chuva em vazão (ZAKIA, 1998) a aplicação de um modelo hidrológico para uma nova região implica em uma nova calibração e validação do modelo para região estudada.

O modelo é gratuito e está disponível na página do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). O modelo é composto pelos módulos de balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem.

O MGB-IPH funciona basicamente em dois módulos. No primeiro módulo de pré-processamento (PrePro), as informações de tipo e uso do solo, sintetizadas na forma de Unidades de Resposta Hidrológica (URH), são associadas com as características topográficas da bacia, obtidas a partir de um modelo digital de elevação (MDE). No segundo módulo são preparadas as variáveis de entrada (chuva, vazão e clima/atmosféricos) parâmetros fixos e calibráveis do modelo. Estes são integrados no projeto de simulação e então é realizada a simulação. Uma vez realizada a simulação, é possível avaliar se o resultado está dentro do esperado (valores simulados coerentes com o observado). Caso o resultado não seja satisfatório, os parâmetros calibráveis podem ser alterados, uma nova simulação feita e realizada a comparação entre o simulado e observado, sendo que este passo pode ser repetido quantas vezes forem necessárias até que haja um bom ajuste entre os hidrogramas simulado e observado.

O detalhamento sobre o cruzamento das informações de tipo e uso de solo, as informações topográficas necessárias para o pré-processamento, dados de entrada, parâmetros fixos e calibráveis são apresentadas em itens específicos desta seção. Uma descrição detalhada das equações utilizadas pelo modelo pode ser obtida em Collischonn (2001) e Collischonn *et al.* (2007). A Figura 2 apresenta um esquema de funcionamento do modelo.

Figura 2: Fluxograma de funcionamento do modelo MGB-IPH.



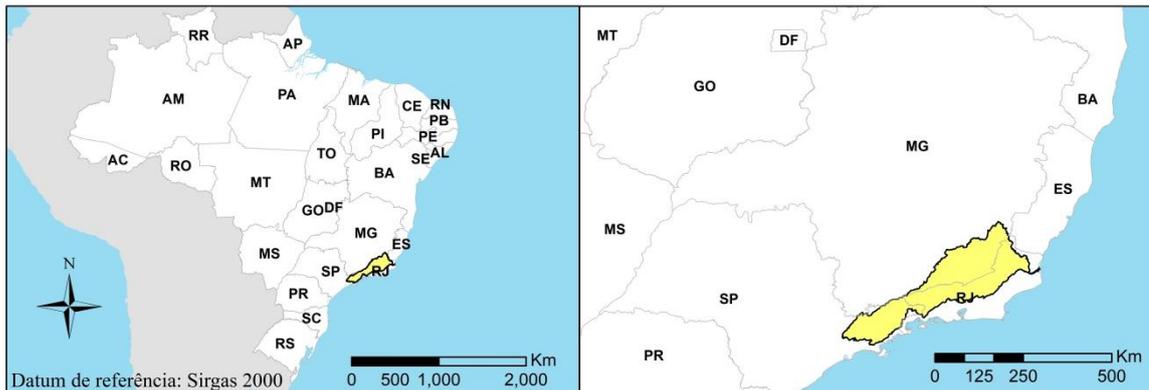
Fonte: Instituto de Pesquisa Hidráulicas - IPH (2015).

3.1. Área de estudo

O rio Paraíba do Sul é formado pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna no Estado de São Paulo e percorre cerca de 1.130 km até sua foz no Oceano Atlântico, em São

João da Barra no Estado do Rio de Janeiro. A área de drenagem da bacia, mostrada na Figura 3, é de aproximadamente 55.000 km², localizada entre as latitudes 20°26 e 23°38 sul e longitudes 41° e 46°30 oeste, e compreende os estados de São Paulo (aproximadamente 24% da área da bacia), Rio de Janeiro (aproximadamente 41% da área da bacia) e Minas Gerais (aproximadamente 35% da área da bacia).

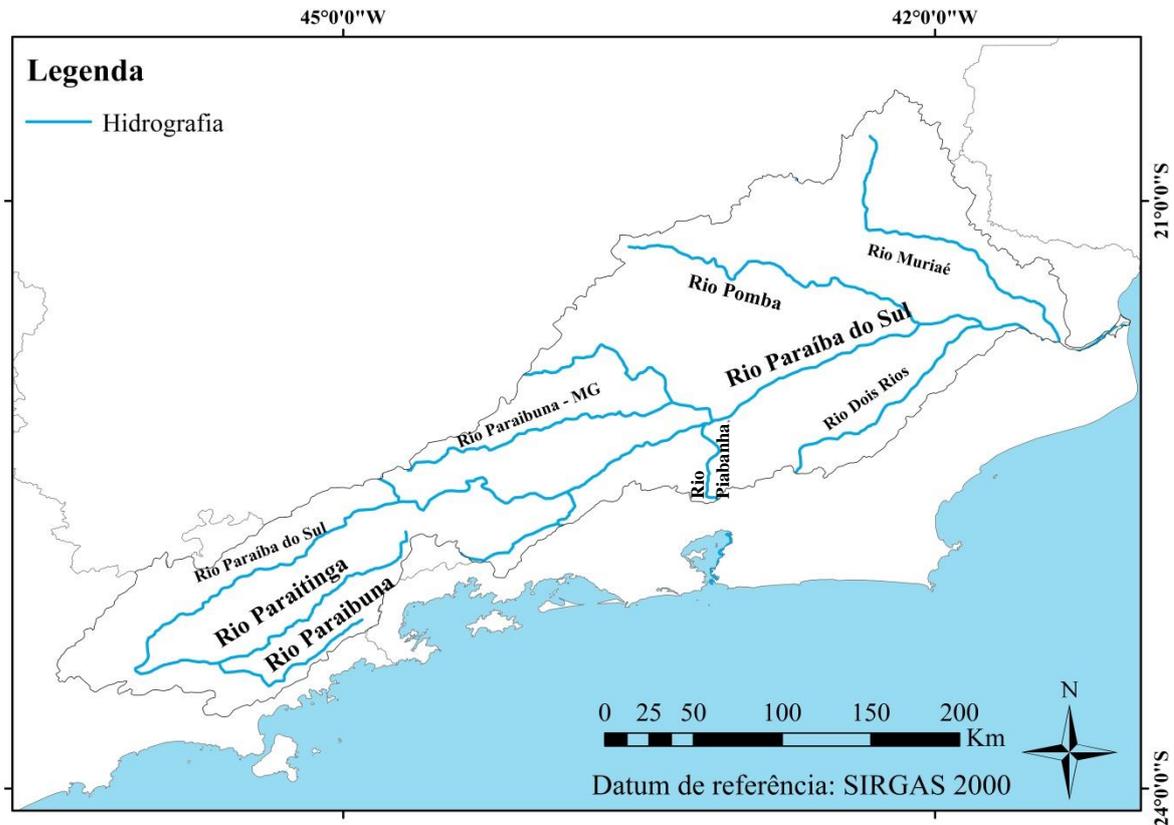
Figura 3: Localização da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao longo do seu percurso até a foz o rio Paraíba do Sul recebe importantes afluentes tanto pela margem esquerda quanto pela margem direita (Figura 4). Pela margem esquerda desatacam-se os rios Paraíba Mineiro, Pomba e Muriaé, cujas sub-bacias representam boa parte da área de drenagem total da bacia do rio Paraíba do Sul e que interceptam os estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. Pela margem direita, os rios Piabanha e Dois Rios, no estado do Rio de Janeiro, são os afluentes mais importantes.

Figura 4: Hidrografia da bacia do rio Paraíba do Sul com seus principais afluentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A bacia está situada em uma região de relevo acidentado, de montanhoso a colinoso, com uma área mais extensa de planície próxima a foz (CAMPOS, 2001), sendo limitada a noroeste pela Serra da Mantiqueira, que separa a bacia do Paraíba do Sul das bacias dos rios Grande e Doce; e a sudeste pela Serra do Mar, que separa a bacia do Paraíba do Sul da bacia litorânea formada por pequenos rios que correm para o Oceano Atlântico.

A bacia costuma ser dividida em quatro trechos de acordo com suas características fisiográficas e são descritas, de acordo com Marengo e Alvez (2005), da seguinte forma:

- Alto Paraíba do Sul: Compreende o trecho de 317 km entre a nascente até a altura do município de Guararema (SP), que está a 572 m de altitude. Neste trecho ocorrem declives mais acentuados com declividade média de 4,9 m/km;
- Médio Superior Paraíba do Sul: Apresenta declividade de 0,19 m/km, onde o rio escoar em um trecho sinuoso e meandrante, característico de áreas de várzea e deposição sedimentar, entre Guararema (SP) e Cachoeira Paulista (SP).

- Médio Inferior Paraíba do Sul: Entre Cachoeira Paulista (SP), na altitude de 515m, e São Fidélis (RJ), a 20 m acima do nível do mar, o rio Paraíba do Sul percorre 480 km encaixado em leito predominantemente rochoso, com trechos encachoeirados e declividade média de 1 m/km.
- Baixo Paraíba do Sul: Entre São Fidélis (RJ) e a foz em São João da Barra, o rio percorre 95 km com declividade de 0,22 m/km, atravessando uma extensa área de Planície.

O clima da região é caracterizado como subtropical quente, com marcante sazonalidade caracterizada por verões chuvosos, onde a precipitação acumulada dos meses de dezembro e janeiro varia entre 200 e 250 mm/mês e invernos secos.

O relevo da região confere à bacia do rio Paraíba do Sul características orográficas particulares. As escarpas das serras se opõem frontalmente à direção dos ventos das correntes de circulação atmosférica e faz com que as precipitações pluviométricas aumentem na proporção direta da altitude sendo que as serras do Mar e da Mantiqueira são bem mais pluviosas que o litoral e o vale do Paraíba do Sul (DAVIS e NAGHETTINI, 2000). Nenhuma outra serra do território nacional exerce tanta influência no sentido do acréscimo de precipitações quanto as serras do Mar e da Mantiqueira (NUNES *et al.*, 2009).

3.2. Dados

Foram utilizados dados pluviométricos de acumulado de chuva diário distribuídos ao longo de toda a bacia e também de pontos próximos nas bacias adjacentes, dados fluviométricos de vazão naturalizada média diária e de vazão observada média diária distribuída ao longo da bacia, além de dados diários de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação. A seleção das estações foi feita de acordo com a disponibilidade de dados no período de estudo.

Os dados de chuva acumulada diária e vazão observada média diária foram obtidos no portal *hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA), os dados de vazão natural média diária foram obtidos no portal do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e os dados meteorológicos foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

É pertinente salientar os diferentes tipos de vazão utilizados neste trabalho. A vazão natural média diária refere-se à vazão que ocorreria em determinado ponto na bacia se não houvesse nenhum tipo de interferência antrópica na bacia para regularização das vazões ou

captação de água. Tratam-se de séries históricas de vazão reconstruídas pelo ONS, com base em informações de chuva e vazões (afluente e defluente) dos reservatórios.

A vazão observada diária se refere às vazões que são obtidas a partir de leituras do nível do rio em uma determinada seção e da relação cota-vazão (curva-chave) estabelecida através de medições de descarga líquida em diferentes cotas para aquela seção.

Neste trabalho serão utilizadas as denominações *vazão natural* para a vazão natural média calculada pelo ONS e *vazão observada* para a vazão observada média diária obtida dos postos de monitoramento fluviométrico pertencentes à rede hidrometeorológica da ANA. A necessidade de utilização de duas bases de dados distintas é justificada na próxima seção.

Para o objetivo proposto neste trabalho foi selecionado o período entre janeiro de 2005 e dezembro de 2015 para o estudo. Este período foi escolhido levando em consideração a data dos mapeamentos disponíveis de uso e ocupação da bacia (entre 2010 e 2012) que foram utilizados para determinação do mapa de URH da bacia, conforme será explanado posteriormente. Dessa forma, o período de calibração e validação do modelo foi escolhido de modo a compreender um período coerente com as características de cobertura da superfície da bacia. A utilização de um período mais extenso onde as características de cobertura da superfície são distintas da atual poderia conduzir à calibração dos parâmetros das URH com valores que não seriam representativos da realidade da bacia.

3.2.1. Dados de Vazão

Os postos utilizados neste estudo são indicados na Tabela 1, diferenciando os postos de vazão natural e vazão observada. Em negrito são destacados os postos utilizados para avaliação das funções objetivo durante a calibração. O critério de seleção dos postos utilizados para avaliação das funções objetivo durante a calibração é explanado no item 3.5 deste trabalho.

Como pode ser observado na Figura 5, os postos de vazão natural não contemplam toda a área de drenagem da bacia, especialmente para a região mais a jusante. Observando os incrementos de área de drenagem, o último ponto de vazão natural (Porto Velho do Cunha) possui uma área de drenagem de 34.400 km². Após a entrada de importantes afluentes pela margem esquerda (rio Pomba e Muriaé) e direita (rio Dois Rios), a área de drenagem do ponto de vazão observada mais a jusante da bacia (Campos – Ponte Municipal) aumenta consideravelmente (55.700 km²).

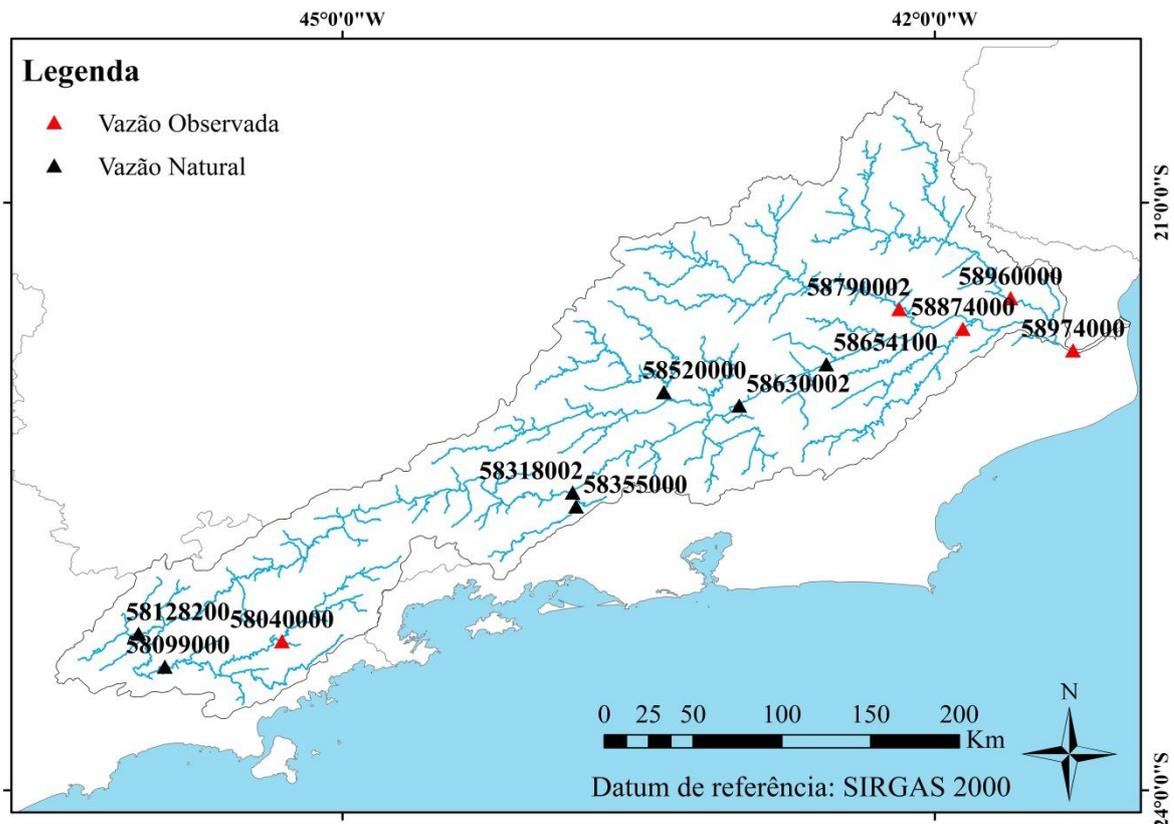
Para avaliar o comportamento do modelo calibrado tanto no rio Paraíba do Sul quanto em seus afluentes, foram acrescentados os pontos de vazão observada Santo Antônio de Pádua II (último ponto de vazão observada na bacia do rio Pomba), Cardoso Moreira (último ponto de vazão observada na bacia do rio Muriaé), Dois Rios (último ponto de vazão observada antes do rio Dois Rios desaguar no Paraíba do Sul) e Campos – Ponte Municipal (último ponto de vazão observada no rio Paraíba do Sul antes de desaguar no oceano).

Tabela 1: Estações utilizadas para calibração e verificação do modelo. Em negrito as estações utilizadas para avaliação das funções objetivo durante a calibração. A letra entre parênteses após o nome do posto indica se o posto é de vazão natural (N) ou observada (O).

Código	Nome	Área de drenagem (Km²)
58040000	São Luís do Paraitinga (O)	1.950
58099000	Santa Branca (N)	4.940
58128200	UHE Jaguari Jusante (N)	1.300
58318002	UEL Santa Cecília Jusante (N)	16.700
58520000	Sobraji (N)	3.640
58630002	Anta (N)	32.700
58654100	Porto Velho do Cunha (N)	34.400
58790002	Santo Antônio de Pádua II (O)	8.210
58874000	Dois Rios (O)	3.120
58960000	Cardoso Moreira – Rv (O)	7.210
58974000	Campos - Ponte Municipal (O)	55.700

Fonte: Agência Nacional de Águas

Figura 5: Localização das estações fluviométricas utilizadas nas etapas de calibração e verificação da simulação de vazão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2. Dados de Precipitação

Para selecionar as estações do estudo foi considerado um buffer de 25 km da bacia onde, de acordo com o inventário da ANA, existem 379 estações pluviométricas em operação pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Dentro deste conjunto de estações, foram selecionadas 106 estações que apresentaram séries com menos de 10% de dados faltantes.

3.2.3. Dados atmosféricos

O modelo MGB utiliza também como entrada dados meteorológicos de temperatura média, umidade relativa do ar, insolação, vento e pressão atmosférica. O programa possui um

banco com médias climatológicas para estas variáveis, sendo possível utilizar este banco ou entrar com dados provenientes de fontes externas.

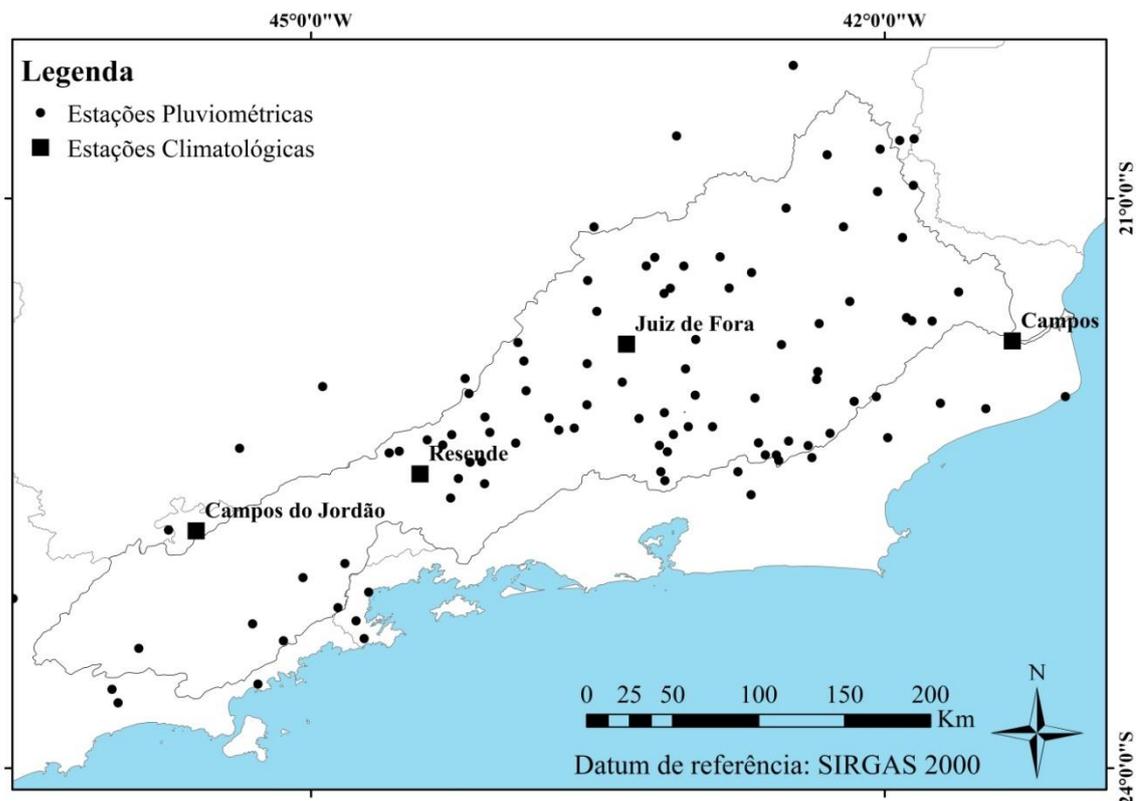
Neste trabalho foram utilizados os dados diários de quatro estações climatológicas do INMET com dados disponíveis para o período de interesse (Tabela 2). As estações sem dados disponíveis para o período de estudo para qualquer uma das variáveis meteorológicas foram descartadas. A Figura 6 mostra a localização dos postos pluviométricos e das estações climatológicas utilizadas neste trabalho.

Tabela 2: Estações climatológicas utilizadas.

Código INMET	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)
83692	Juiz de Fora	-21,77	-43,35	940
83698	Campos	-21,75	-41,33	11,20
83714	Campos do Jordão	-22,75	-45,60	1642
83738	Resende	-22,45	-44,43	440

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia

Figura 6: Distribuição espacial das estações pluviométricas e climatológicas utilizadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3. Determinação das Unidades de Resposta Hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Conforme mencionado no início desta seção, o modelo MGB trabalha com o conceito de URH, que são áreas da bacia que possuem combinações semelhantes de solo e cobertura de superfície que são determinantes para definir o seu comportamento hidrológico (BEVEN, 2001; COLLISCHONN *et al.*, 2007). A URH vai definir como será a resposta a processos hidrológicos que incluem balanço de água no solo, balanço de energia, evapotranspiração, interceptação e infiltração e que definirão a geração de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo da bacia (PAIVA *et al.*, 2013). No modelo, a bacia é discretizada de acordo com a escala e a resolução das informações de cobertura e solo disponíveis, e então cada célula de área da bacia será adotada uma das URH possíveis.

Uma característica dos modelos que trabalham com o conceito de URH é reduzir o número de parâmetros a serem calibrados. Assim, tanto as características de cobertura da superfície e de tipo de solo da bacia precisam ser agrupadas, de modo a gerar um número limitado de URH. Nas próximas seções são mostrados os tipos de solos e de cobertura existentes na bacia e detalhado o modo de agrupamento para reduzir o número de parâmetros de calibração.

3.3.1. Solos da bacia do rio Paraíba do Sul

As informações do tipo de solo mostradas na Figura 7 foram obtidas pela composição dos mapas de solo da bacia do rio Paraíba do Sul produzido pelo Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – CEIVAP e do mapa de solos do Brasil produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (SANTOS, 2011).

O mapa produzido pela CEIVAP é disponibilizado na escala 1:1.000.000, enquanto que o mapa de solos do Brasil é disponibilizado na escala de 1:5.000.000. A complementação foi necessária, pois o mapa disponibilizado pela CEIVAP se refere somente a área de drenagem definida pelo comitê e há pequenas diferenças existentes entre as fronteiras da bacia utilizada no mapa de solos da CEIVAP e os limites utilizados neste trabalho que, conforme será detalhado a frente, foi derivado de um modelo digital de elevação.

A maior parte da bacia é composta por Latossolos que predominam em toda a porção norte da bacia e na região do Alto Paraíba do Sul. Os Latossolos são solos bem evoluídos, profundos, muito porosos, bastante permeáveis e geralmente bem drenados.

Os Argissolos acompanham praticamente todo o curso do rio Paraíba do Sul, com exceção do trecho do Médio Paraíba do Sul. São solos profundos, bem drenados e evoluídos, apresentando mobilização de argila na camada superficial. No trecho do Médio Paraíba do Sul há ocorrência de Gleissolos acompanhando o percurso do rio. Trata-se de solos de textura arenosa, hidromórficos, ricos em matéria orgânica. São solos mais recentes, oriundos da deposição de sedimentos do período quaternário.

Os Cambissolos são os mais frequentes nas partes altas da bacia, com presença tanto na Serra do Mar, quanto na Serra da Mantiqueira, onde acompanham boa parte do limite da bacia. Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos e, por esse motivo, de características orientadas de acordo com origem. Em geral são pouco profundos ou rasos.

Os tipos de solos menos expressivos na bacia são os Neossolos, Planossolos e Organossolos. Os Neossolos também são solos recentes, que carregam características do material de origem, em geral rasos assentados diretamente sobre a rocha. Ocorrem de forma mais esparsa na bacia, em regiões de várzea do rio Paraíba do Sul, e de seus afluentes, especialmente na região mais a leste da bacia nas proximidades dos rios Pomba e Muriaé.

Com ocorrência limitada a uma pequena área no extremo leste da bacia, os Planossolos possuem concentração intensa de argila em subsuperfície. Em geral, são pouco permeáveis.

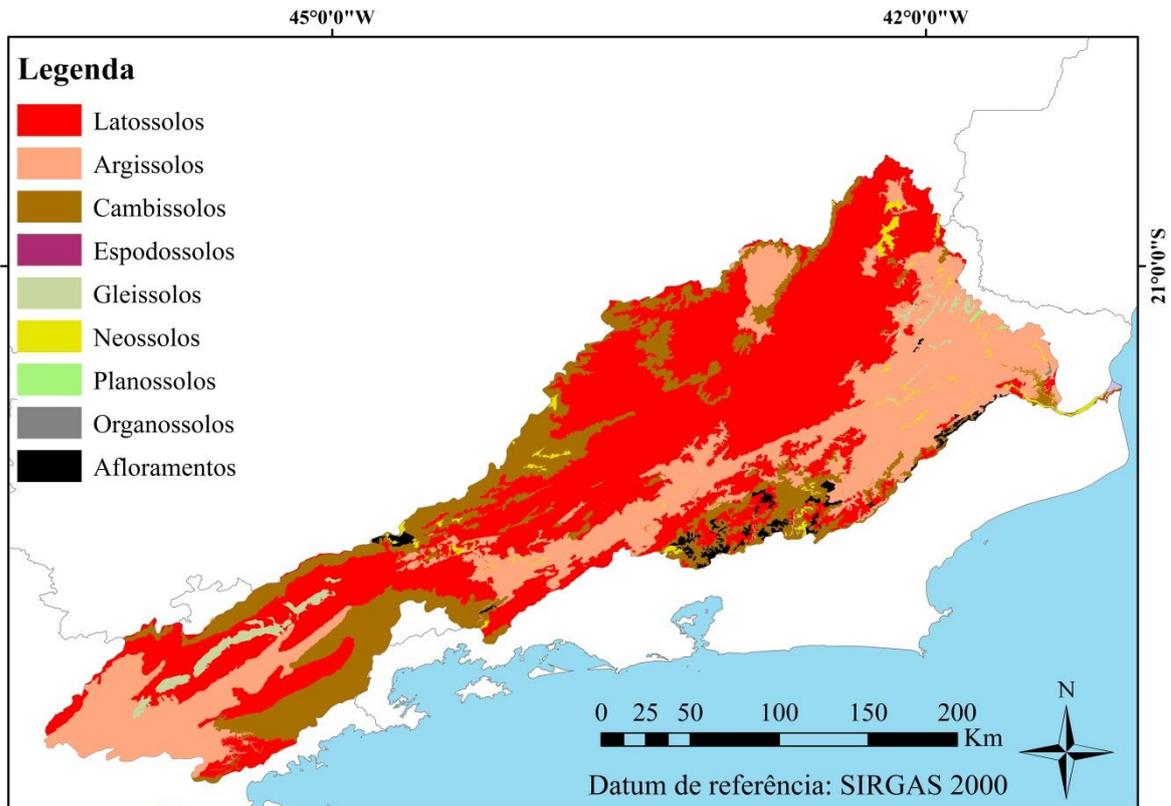
Os Organossolos, que também estão limitados à parte mais a leste da bacia, são solos hidromórficos, geralmente formados pela acumulação de material orgânico sobre sedimentos quaternário, sendo muito mal drenados e de ocorrência em região de afloramento do lençol freático. A Tabela 3 apresenta o percentual ocupado por cada um dos tipos de solos presentes na bacia.

Tabela 3: Grupos de solos presentes na bacia do rio Paraíba do Sul.

Solos	Área (%)
Latosolos	48,22%
Argissolos	29,49%
Cambissolos	18,36%
Gleissolos	1,49%
Neossolos	1,15%
Planossolos	0,04%
Espodossolos	0,03%
Organossolos	0,02%
Afloramentos	1,08%
Água	0,11%

Fonte: Elaborada pelo autor. Extraído a partir de Santos (2011)

Figura 7: Mapa de solos da bacia do rio Paraíba do Sul produzido a partir de mapas de solo do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, complementado com o mapa de solos do Brasil.



Fonte: Adaptado de Santos (2011).

Os diferentes tipos de solo que compõe a bacia podem ser agrupados de acordo com a sua capacidade de geração de escoamento superficial. O agrupamento realizado neste trabalho é semelhante ao que foi realizado por Fan *et al.* (2015) onde, de acordo com os autores, a definição das classes é subjetiva e tem como principal objetivo agrupar solos com características semelhantes do ponto de vista de resposta hidrológica, mais especificamente, a capacidade de drenagem e de armazenamento dos solos.

Os solos mais profundos e bem drenados possuem alta capacidade de infiltração e armazenamento de água, enquanto que solos pouco profundos e mal drenados possuem baixa capacidade de infiltração e armazenamento. Nesse sentido, as classes de solos originalmente existentes foram reduzidas às seguintes classes, de acordo com a capacidade de infiltração: maior, intermediária e menor (Tabela 4).

Tabela 4: Agrupamento dos tipos de solos de acordo com característica de capacidade de infiltração.

Tipo de solo	Descrição	Capacidade de infiltração
Latossolos	Solos minerais, não hidromórficos, avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, muito profundos, elevada permeabilidade, acentuadamente drenados	Maior
Argissolos	Não hidromórficos, em geral profundos, bem drenados	Intermediária
Cambissolos	Solos minerais, não hidromórficos, pouco evoluídos, em geral pouco profundos ou rasos	Menor
Neossolos	Solos minerais, pouco desenvolvidos, rasos,	Menor
Planossolos	Solos minerais, geralmente hidromórficos, condição de drenagem ruim	Menor
Organossolos	Hidromórficos, muito mal drenados	Menor
Espodossolos	Solos minerais, hidromórficos, arenosos	Menor
Gleissolos	Solos minerais, hidromórficos, recentes, pouco evoluídos	Menor

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos mapas de solo, como pode ser observado anteriormente, além dos tipos de solos, haviam áreas delimitadas com o tipo “Água” e “Afloramento”, que, como será explanado posteriormente, são regiões onde a URH não foi definida pelo cruzamento de classe de solo e de cobertura da superfície.

3.3.2. Cobertura da superfície da bacia do rio Paraíba do Sul

Para elaboração do mapa de cobertura da superfície mostrado na Figura 8 foi utilizado o mapa de cobertura da bacia produzido e disponibilizado pelo CEIVAP, complementado pelo mapa de cobertura da terra de 2012 produzido pelo IBGE na escala 1:1.000.000 (IBGE, 2015). A necessidade de complementação do mapa da bacia se deu por conta de pequenas divergências entre o limite da bacia utilizado para produção do mapa do CEIVAP e o limite da bacia utilizado neste trabalho (gerado a partir de um MDE e de um ponto de exutório no local do último ponto de monitoramento fluviométrico da bacia).

Para a cobertura da superfície, as áreas com características superficiais semelhantes, do ponto de vista de resposta hidrológica, foram agrupadas em uma mesma classe. Por exemplo, áreas de floresta preservada, floresta em regeneração foram agrupadas na classe “Floresta”, áreas agrícolas e de pastagem foram agrupadas na classe “Agrícola”. As classes de cobertura definidas para este trabalho foram Floresta, Agrícola, Áreas Semi-Impermeáveis (ASI) e Água. A Tabela 5 apresenta as descrições de uso e cobertura dos mapas de referência e a classe em que foram enquadrados.

Tabela 5: Agrupamento em classes dos tipos de uso e cobertura contidos na bacia do rio Paraíba do Sul, resultante da complementação do mapa disponibilizado pela CEIVAP com o mapa de uso e cobertura da terra do IBGE.

Tipo de uso e cobertura da superfície	Classe
Área Urbanizada ¹²	Área Semi-Impermeável (ASI)
Área Artificial ²	
Floresta Estacional ¹	Floresta
Floresta Ombrófila ¹	
Vegetação Arbórea Densa ¹	
Vegetação Arbórea Esparsa ¹	
Mosaico de Vegetação Florestal com Áreas Agrícolas ²	
Silvicultura ²	
Vegetação Florestal ²	
Área agrícola ¹	Agrícola
Campos/Pastagens ¹	
Área Agrícola ²	
Mosaico de agropecuária com remanescente florestais ²	
Mosaico de vegetação campestre com áreas agrícolas ²	
Pastagem Natural ²	
Vegetação Campestre ²	
Corpo Hídrico ¹	Água
Corpo de água continental ²	

¹ Nomenclatura utilizada pela CEIVAP para designar os tipos de uso e cobertura existentes na bacia.

² Nomenclatura utilizadas pelo IBGE para designar os tipos de uso e cobertura existentes na bacia.

Fonte: Adaptado de CEIVAP (2011) e IBGE (2015)

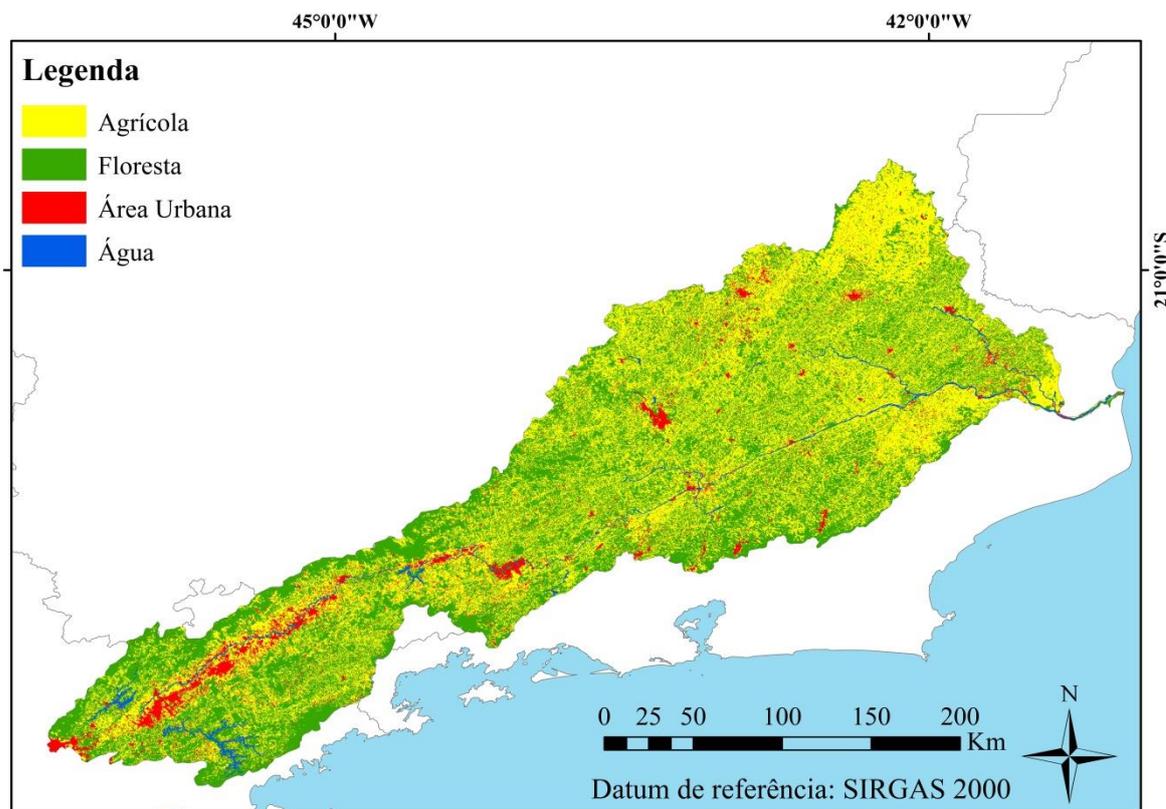
A Tabela 6 e a Figura 8 apresentam respectivamente, o percentual de área ocupada e o mapa do tipo de cobertura da superfície de acordo com a classificação adotada.

Tabela 6: Percentual de área ocupada pelos diferentes tipos de cobertura de superfície na bacia do rio Paraíba do Sul.

Tipo de Cobertura	Área (%)
Água	1,85%
Agrícola	49,70%
Área Semi Impermeável	5,36%
Floresta	43,70%

Fonte: Adaptado de CEIVAP (2011) e IBGE (2015)

Figura 8: Mapa de classes de cobertura da superfície da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Elaborada pelo autor. Extraído a partir das informações de CEIVAP (2011) e IBGE (2015).

Pelo cruzamento das classes de cobertura do solo com as classes de solo, foram definidas 8 diferentes URH para a bacia. As URH foram nomeadas de modo a identificar a classe de cobertura e a classe de solo de sua origem, por exemplo, uma região com cobertura florestal em solo com maior capacidade de infiltração foi definida como sendo uma região com a URH “Floresta com maior capacidade de infiltração” ou uma região com cobertura de classe Agrícola com baixa capacidade de infiltração foi definida como sendo a URH “Agrícola com baixa capacidade de infiltração”. A exceção do cruzamento para definição de URH ocorre quando no mapa de solos ou de cobertura ocorre uma das seguintes classes: Água ou Áreas Semi-Impermeáveis.

Para estas classes o tipo de solo vai exercer menor influência na definição da resposta hidrológica, ou seja, a variação nos processos hidrológicos que podem ocorrer comparando, por exemplo, uma ASI em solo de baixa ou alta capacidade de infiltração é pequena, pois a cobertura (de baixa capacidade de infiltração) é preponderante na resposta

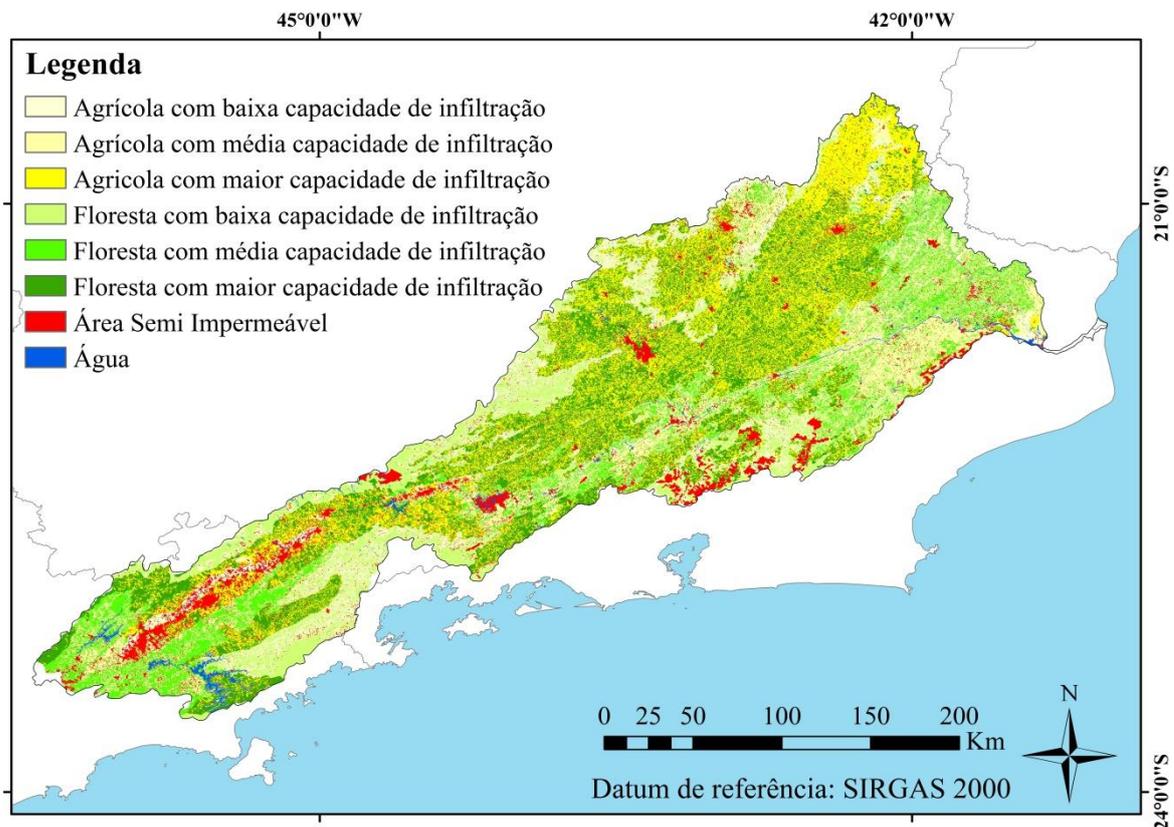
hidrológica desta unidade. A Tabela 7 mostra as URH construídas com base no cruzamento entre os grupos de tipos de solo e de cobertura da superfície e a Figura 9 o mapa das URH ao longo de toda área de estudo.

Tabela 7: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) da bacia determinadas pelo cruzamento da capacidade de infiltração do solo com a classe de cobertura da superfície.

Nº	Unidade de Resposta Hidrológica (URH)	Área (%)
1	Agrícola com baixa capacidade de infiltração	8,00%
2	Agrícola com média capacidade de infiltração	15,1%
3	Agrícola com maior capacidade de infiltração	25,1%
4	Floresta com baixa capacidade de infiltração	11,9%
5	Floresta com média capacidade de infiltração	11,9%
6	Floresta com maior capacidade de infiltração	20,3%
7	Área Semi-Impermeável	6,3%
8	Água	1,4%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9: Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Elaborada pelo autor.

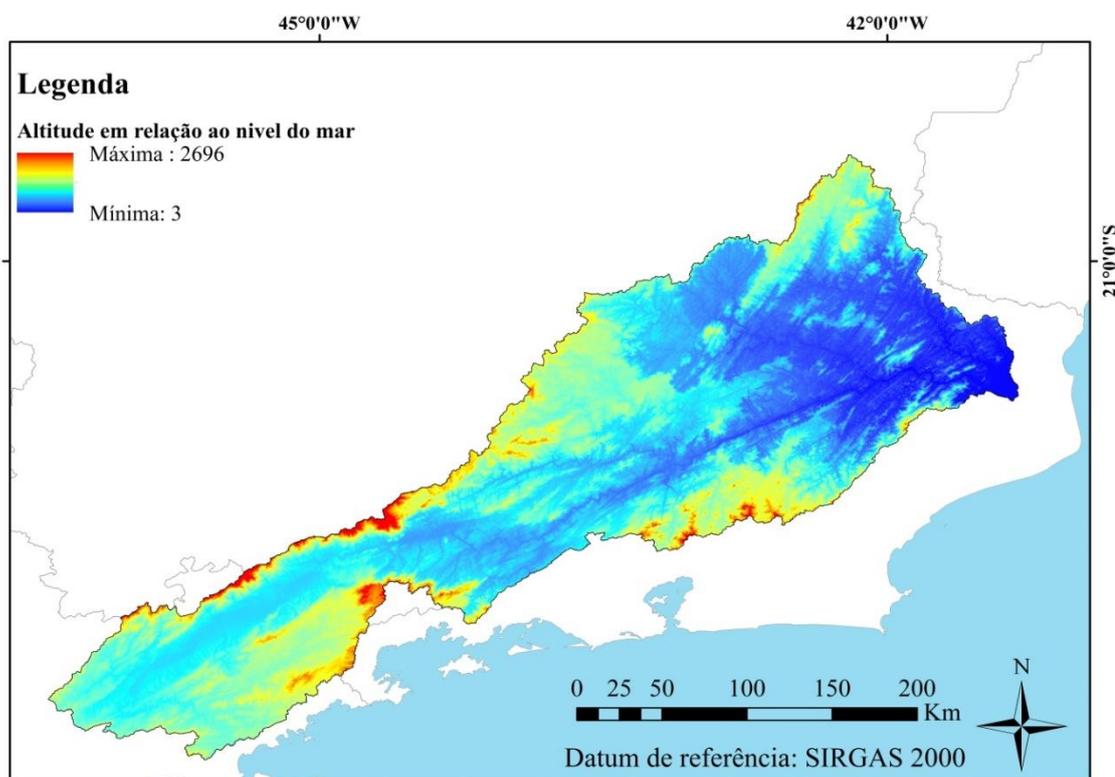
3.4. Pré-processamento dos dados

Nesta etapa os dados da área de estudo são preparados para entrada no módulo de simulação do MGB. O procedimento de Pré-processamento consiste em: correção MDE utilizado, processamento das direções e de acumulação de fluxo da área, definição da rede de drenagem da bacia, delimitação da bacia e das sub-bacias hidrográficas. A descrição de cada uma das etapas é apresentada nos próximos itens.

3.4.1. Correção do Modelo Digital de Elevação

Neste trabalho foi utilizado o MDE gerados a partir do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponível em (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) com resolução de aproximadamente 90 metros, sendo que a correção de possíveis depressões existentes foi feita utilizando o algoritmo *Modify Heuristic Search* do MGB. A apresenta o relevo da bacia gerado a partir do MDE corrigido.

Figura 10: Relevo da bacia gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) corrigido.



Fonte: CGIAR – United States Geological Survey.

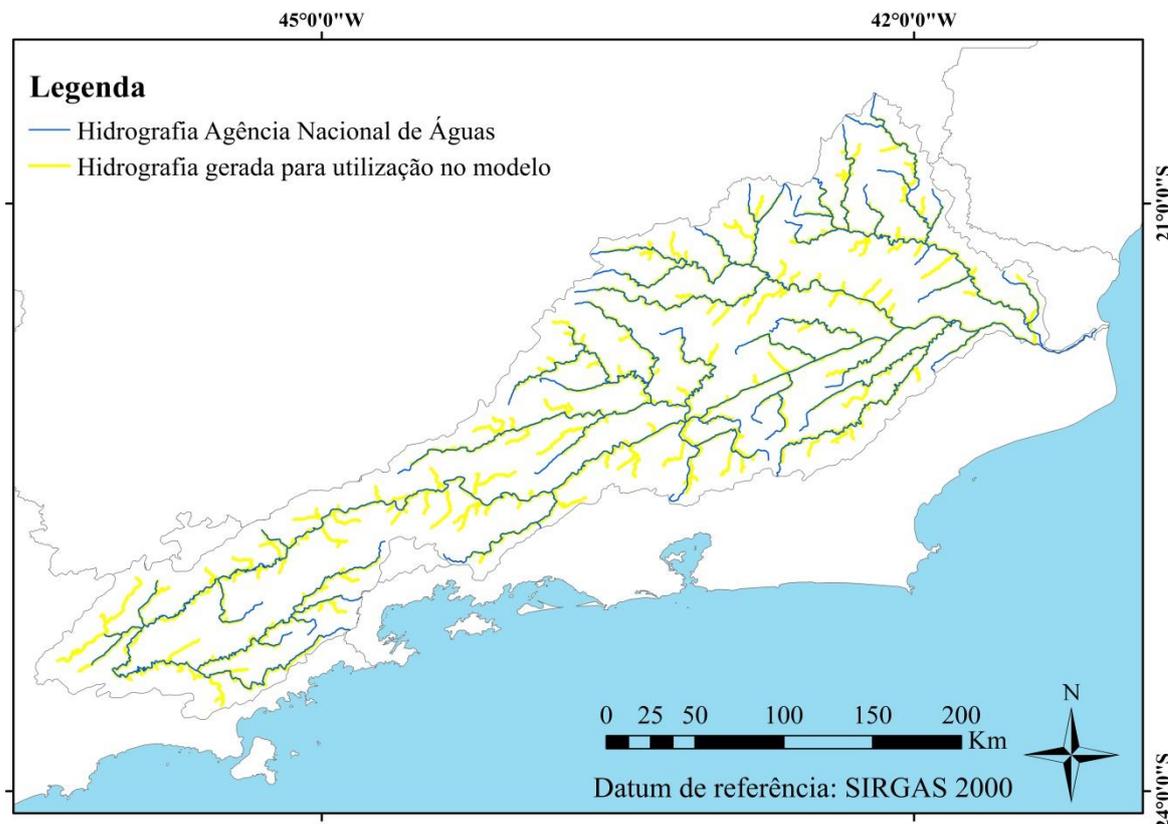
3.4.2. Processamento das direções e de acumulação de fluxo da área

O processamento das direções de fluxo utiliza a informação de altitude do MDE corrigido para definir as direções de fluxo, atribuindo para cada célula do raster de direção de fluxo um valor que indica o sentido do fluxo. Em seguida, é criado outro raster que se baseia na informação de direção do fluxo para indicar em cada célula um valor que corresponde ao número de células de direção que estão drenando para a célula do raster de acumulação de fluxo.

3.4.3. Geração da rede de drenagem da área de interesse

A partir do raster que representa a acumulação de fluxos na área de estudo, é possível obter a rede de drenagem da área. Isso pode ser feito definindo um número mínimo de células necessário para que passe a existir a linha de drenagem ou definindo uma área de drenagem mínima para que exista a linha de drenagem. Neste trabalho foram testados valores mínimos de células para gerar a rede de drenagem e cada rede gerada foi comparada qualitativamente com os cursos d'água inventariados da rede de drenagem disponibilizada pela ANA em escala 1:250.000 até se obter uma rede que fosse compatível com a área de estudo. A Figura 11 mostra um comparativo da rede utilizada neste trabalho e a rede de drenagem da Agência Nacional de Águas e observa-se que a rede gerada é coerente com os cursos d'água inventariados. A figura também utiliza a delimitação da bacia gerada a partir do MDE, cuja definição será detalhada na seção seguinte.

Figura 11: Comparação entre a rede de drenagem gerada para utilização no modelo, construída com base em um modelo digital de elevação (MDE) corrigido e a disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA).



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas.

3.4.4. Delimitação das bacias e sub-bacias hidrográficas

Para definir a área da bacia hidrográfica é necessário indicar o ponto de exutório da bacia. Feito isso, toda a área onde o escoamento converge para o ponto definido será considerada como sendo a área da bacia. Neste caso, o ponto de exutório foi considerado como sendo onde está localizada a estação fluviométrica de Campos – Ponte Municipal (código ANA 58974000), última estação fluviométrica em funcionamento no rio Paraíba do Sul antes de desaguar no Oceano Atlântico.

A definição de sub-bacias para simulação no MGB é opcional, sendo que a definição de sub-bacias possibilita separar regiões da bacia que apresentem comportamento hidrológico distinto. A separação em sub-bacias permite que se definam diferentes valores de calibração para os parâmetros de uma mesma URH. Por exemplo, a separação em sub-bacias permite

que a URH “Floresta com alta capacidade de infiltração” tenha valores diferentes de capacidade de armazenamento no solo (W_m) para cada sub-bacia.

Permitir que uma mesma URH assumisse diferentes valores para os parâmetros de calibração de acordo com a sub-bacia pode contribuir para um bom ajuste dos hidrogramas, porém pode levar o modelo a uma parametrização otimizada, mas que não possui significado físico (principalmente quando utilizado algoritmo de calibração automática do modelo). Para aplicação proposta neste trabalho é fundamental que os parâmetros do modelo tenham coerência física com o esperado para as URH definidas, este problema também pode ocorrer quando se utiliza um número muito alto de URH. Desta forma, optou-se por não dividir a bacia em sub-bacias, utilizando uma única parametrização para as oito URH definidas para bacia.

3.5. Calibração e verificação do modelo

A calibração do modelo consiste na determinação iterativa de valores para os parâmetros calibráveis que permitam o melhor ajuste dos hidrogramas simulados e observados em um determinado período de tempo. Por sua vez, a verificação consiste em analisar se o ajuste feito no período de calibração se mantém para um outro período posterior (como é o caso deste trabalho) ou anterior ao da calibração. Neste trabalho, o período de calibração é de 01/01/2005 até 31/12/2009 e a verificação de 01/01/2010 até 31/12/2015.

O MGB possui dez parâmetros calibráveis, sendo eles: Capacidade de armazenamento de água no solo (W_m), forma da relação entre armazenamento e saturação (b), drenagem subterrânea (K_{bas}), drenagem subsuperficial (K_{int}), índice de porosidade do solo (XL), controle de fluxo ascendente (CAP), armazenamento residual (W_c) e os parâmetros relacionados com o tempo de retardo do modelo de reservatório linear simples superficial (C_s), subsuperficial (C_i) e do escoamento de base (C_b).

O parâmetro W_m depende do tipo de solo e da cobertura existente sobre o solo e pode ser estimado com base na porosidade e na profundidade do solo. Pode ser definido como a capacidade de absorver a água oriunda da precipitação gerando pouco ou nenhum escoamento superficial (Collischon, 2001).

O parâmetro b é importante para controlar o escoamento superficial que ocorre antes do solo estar saturado, ou seja, este parâmetro controla o escoamento superficial que pode ocorrer antes que a capacidade de armazenamento do solo seja atingida (COLLISCHON,

2001). É importante para eventos de chuva de curta duração, mas de intensidade suficiente para que ocorram pequenas cheias.

Kint é o parâmetro que controla a quantidade de água que escoar em subsuperfície.

XL controla a forma da curva de redução da drenagem subsuperficial do solo. Depende da textura do solo e é utilizado na geração do escoamento subsuperficial (Neto, 2006).

Para o caso do tempo de reservatório superficial e subsuperficial, os parâmetros Cs e Ci, respectivamente, representam uma correção do tempo de retardo calculado pela fórmula de Kirpich (1940) que no modelo estima o tempo de concentração de uma célula utilizando a largura da célula como o comprimento do canal principal e a diferença de altura entre os pontos mais altos e mais baixos da célula (COLLISCHON, 2001; NETO, 2006).

O parâmetro Cb, referente ao tempo de retardo do reservatório subterrâneo, é estimado com base na observação do período de recessão de hidrogramas em alguns pontos da bacia, de acordo com a equação 1:

$$C_b = - \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{FR}}{Q_{IR}}\right)} \quad (1)$$

Onde ND é o número de dias do período de recessão do hidrograma, Q_{IR} é a vazão no início da recessão e Q_{FR} é a vazão no final da recessão.

Como exposto anteriormente, neste trabalho foi realizada uma única parametrização para todos os parâmetros de calibração do modelo (W_m , b , K_{bas} , K_{int} , XL , CAP , W_c , C_s , C_i e C_b).

Assim, o modelo foi calibrado manualmente, alterando os valores dos parâmetros calibráveis. O ajuste do modelo foi verificado visualmente, comparando os hidrogramas simulado e observado e avaliando o desempenho das seguintes funções objetivo: coeficiente de Nash (R^2), coeficiente de Nash para o logaritmo das vazões (R_{log}) e a relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV).

O R^2 é calculado pela equação 2 e pode assumir qualquer valor igual ou menor do que 1. Entende-se que quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 melhor será o ajuste do hidrogramas calculado com o observado, particularmente o ajuste das vazões nos períodos de cheia, sendo considerados bons os ajustes maiores que 0,75 e aceitáveis ajustes entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001; NETO, 2006; SILVA *et al.*, 2008; FAN *et al.*, 2014).

$$R_2 = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

Onde $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no tempo t , $Q_{cal}(t)$ é a vazão simulada pelo modelo no tempo t e $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão observada média.

Para o R_{log} , dado pela equação 3, o entendimento é semelhante ao do coeficiente anterior, porém dando maior peso aos erros de vazões mínimas e pode ser utilizado para avaliar se os períodos secos estão sendo adequadamente simulados no modelo.

$$R_{log} = 1 - \frac{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{cal}(t)))^2}{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \overline{\ln(Q_{obs})})^2} \quad (3)$$

A relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV), obtida através da equação 4, pode assumir qualquer valor sendo que seu principal objetivo é avaliar se perdas de água associadas à evapotranspiração estão sendo bem calculadas (COLLISCHONN, 2001). De acordo com Pereira *et al.* (2016), se $|\Delta V| \leq 10\%$, o desempenho do modelo pode ser considerado muito bom; o desempenho é bom quando $10\% < |\Delta V| \leq 15\%$; e não satisfatório se $|\Delta V| > 25\%$.

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \quad (4)$$

As funções objetivo apresentadas são calculadas no próprio MGB e, para o caso de modelos hidrológicos, são amplamente utilizadas para avaliar a calibração (COLLISCHONN, 2007; PEREIRA *et al.*, 2016).

A Tabela 8 mostra as estações utilizadas para a avaliação das funções objetivos citadas. A escolha das estações foi baseada no tipo de posto, tamanho da área de drenagem a montante do local do posto e distribuição dos postos na bacia.

Quanto ao tipo da estação, optou-se por utilizar somente estações de vazão natural para a calibração, pois, diferente das séries de vazão observada, além da observação hidrológica, informações sobre vertimentos e regularizações são levadas em conta no cálculo da vazão natural para que esta represente o comportamento mais próximo do que ocorreria se não houvesse regularizações e/ou retiradas de água. O oposto ocorre nas vazões observadas, que podem ser influenciadas por regularizações e/ou retiradas de água que ocorram a montante do posto de monitoramento e podem não ser representativas do processo natural de transformação de chuva em vazão na bacia.

Definido que seriam utilizadas as vazões naturais para calibração, foram selecionados os postos com maior área de drenagem e distribuídos ao longo da bacia, tanto no rio principal quanto em seus afluentes, de modo que a calibração fosse representativa de toda a bacia.

Tabela 8: Estações utilizadas para avaliação das funções objetivo durante a calibração.

Código	Nome	Área de drenagem (Km²)
58099000	Santa Branca	4.940
58318002	UEL Santa Cecília Jusante	16.700
58520000	Sobraji	3.640
58630002	Anta	32.700
58654100	Porto Velho do Cunha	34.400

Fonte: Agência Nacional de Águas.

Para complementar a avaliação da calibração do modelo foram calculados os parâmetros Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) e também a Acurácia (A) do modelo.

O coeficiente r é utilizado para avaliar a capacidade do modelo em reproduzir a variabilidade do conjunto de dados observados e é calculado de acordo com a equação 5, onde n é o número de observações.

$$r = \frac{\left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum [(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)}) (Q_{cal}(t) - \overline{Q_{cal}(t)})]}{\sqrt{\left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum [(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)})]^2} \sqrt{\left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum [(Q_{cal}(t) - \overline{Q_{cal}(t)})]^2}} \quad (5)$$

O Erro Viés (Equação 6) permite quantificar o erro sistemático do modelo, indicando superestimativa ou subestimativa realizada pelo modelo, quando apresentar valores positivo e negativo, respectivamente.

$$V = \frac{1}{n} \sum (Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t)) \quad (6)$$

O REQM quantifica o erro médio do modelo, considerando as diferenças quadráticas e ressalta os erros extremos do modelo (equação 7).

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t))^2} \quad (7)$$

A equação 8 mostra o EA, que quantifica a amplitude erro do modelo, através da média dos módulos das diferenças.

$$EA = \frac{1}{n} \sum |Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t)| \quad (8)$$

O erro relativo quantifica a razão entre o erro absoluto e os valores observados (equação 9).

$$ER = \frac{1}{n} \sum \frac{|Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t)|}{Q_{obs}(t)} \quad (9)$$

O parâmetro A permite avaliar o comportamento do modelo para diferentes categorias de vazões e é interessante para avaliar o comportamento do modelo em diferentes intervalos de valores e períodos de interesse. Por exemplo, para avaliar se o modelo representa adequadamente eventos de vazão acima de um determinado valor em um mês considerado chuvoso.

Neste trabalho a acurácia do modelo foi calculada para cinco categorias, definida mensalmente, a partir dos dados observados, de acordo com os quantis sugeridos por Xavier e Xavier (1999).

De acordo com Xavier e Xavier (1999), esse método apresenta a vantagem de não ser dependente da hipótese da normalidade da distribuição. Para definição dos quantis, determina-se o valor de vazão Q_k^m correspondente ao k -ésimo percentil dos valores de vazão diária para o mês m (considera-se todos os meses m), um determinado valor de vazão diária q do mês m será classificado da seguinte forma:

Vazão muito baixa (MB), se $q \leq Q_{0,15}^m$;

Vazão baixa (B), se $Q_{0,15}^m < q \leq Q_{0,35}^m$;

Vazão normal (N), se $Q_{0,35}^m < q \leq Q_{0,65}^m$;

Vazão alta (A), se $Q_{0,65}^m < q \leq Q_{0,85}^m$;

Vazão muito alta (MA), se $Q_{0,85}^m < q$.

Uma vez definidos os limiares de vazão (q) que delimitam cada uma das categorias consideradas (MB, B, N, A, MA) para cada mês do ano, utilizando as vazões diárias observadas, a acurácia do modelo em um dado posto fluviométrico é calculada comparando a

série de vazões diárias simulada com a observada, considerando o limiar do mês correspondente e da categoria considerada. Neste caso, o parâmetro A é obtido através da equação 10, considerando o cálculo de acertos e negativos corretos do modelo, que são determinados para cada um dos dias de simulação de acordo com a tabela de contingência (Tabela 9) mostrada a seguir.

Tabela 9: Tabela de contingência utilizada para determinação de acertos e negativos corretos do modelo.

		Valor observado está dentro da categoria analisada?	
		Sim	Não
Valor calculado está dentro da categoria analisada?	Sim	Acertos	Alarmes Falsos
	Não	Falhas	Negativos Corretos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Calcula-se a acurácia por categoria e mês a partir da seguinte equação:

$$\text{Acurácia} = \frac{\text{Acertos} + \text{Negativos corretos}}{\text{Número total de dias de simulação}} \quad (10)$$

A avaliação da acurácia mensal por categoria permite conhecer a capacidade do modelo em simular diferentes faixas da distribuição dos dados de vazão, avaliar se o mesmo é capaz de reproduzir extremos, além de conhecer se há diferenças mensais ou sazonais.

Em complemento, para avaliar a capacidade de resposta do modelo para mudanças de uso da terra, verificando o comportamento da vazão para os parâmetros que caracterizam o tipo de cobertura da superfície, foi realizada uma análise sensibilidade do modelo, testado parâmetros fixos, de acordo com a metodologia de Bayer (2014). Os parâmetros analisados foram: índice de área foliar (IAF), resistência superficial (r_s), albedo (α) e altura média da vegetação (h).

3.6. Simulação e avaliação dos cenários de área de proteção permanente

Uma vez calibrado o modelo com a distribuição atual das URH da bacia, foram elaborados cenários de uso do solo considerando diferentes larguras de APP ao longo do rio Paraíba do Sul e de seus afluentes. Os cenários consideram os valores de APP correspondentes ao que deveria ser aplicado por lei ao longo dos cursos d'água da bacia 30 m, 50 m, 100 m e 200 m e também valores de APP de 300 m a 1000 m, com incremento de 100 metros entre os cenários.

Os cenários foram construídos utilizando o mapa de solos utilizado neste estudo (Figura 7) e o mapa de cobertura atual da bacia a partir do qual foram realizados *buffers* nos cursos d'água existentes de acordo com as larguras de APP de cada cenário. Então, o novo mapa de cobertura considerando a largura da APP é cruzado com o mapa de solos da bacia, gerando o mapa de URH do cenário correspondente. No anexo A desta dissertação as figuras A1 e A2 ilustram a configuração espacial das URH em cada um dos cenários.

Para avaliação dos cenários, os mesmos serão comparados com a simulação que representa a situação atual da bacia, denominada como cenário de controle. A comparação é feita para o período de 2005 a 2015, utilizando os seguintes parâmetros:

- Vazão média anual – Para o período de 2005 a 2015 a vazão média anual é comparada com o resultado de cada cenário;
- Vazão de referência Q_{05} – No Brasil é utilizada em alguns estados como critério de referência para outorgas de uso da água. Corresponde ao valor de vazão diária que é igualado ou superado em 95% do tempo, cujas comparações considerarão os valores calculados utilizando as séries de vazão do cenário de controle e de cada um dos cenários de recomposição da vegetação de APP;
- Vazão máxima diária anual (VMA) – Refere-se à maior vazão registrada em um dia, no período de um ano. Foram comparadas as séries de VMA do cenário de controle e dos cenários de recomposição da vegetação de APP;
- Frequência de vazões nas categorias MB, B, N, A, MA – Foram definidos os limiares de cada uma das categorias (q) para cada mês (m) tomando como referência o cenário de controle. Então foi contabilizada a frequência de ocorrência de eventos em cada categoria de um determinado mês, tanto no cenário de controle (Fc_q^m) quanto nos cenários alternativos (Fa_q^m). O

resultado será comparado pela razão entre a frequência de ocorrência de uma dada categoria no cenário de controle e nos cenários alternativos (equação 11).

$$R_q^m(a) = \frac{Fa_q^m}{Fc_q^m} \quad (11)$$

Também foram analisadas as médias anuais de vazão de base e de evapotranspiração do modelo. Como estas análises não compreendem diretamente o objetivo principal deste trabalho, estas análises são mostradas no anexo E desta dissertação.

4. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados de ajuste do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Paraíba do Sul e os resultados das simulações dos cenários de APP. O primeiro e o segundo item são dedicados para os resultados de calibração e validação do modelo e os seguintes para análise dos cenários simulados.

4.1. Resultados da calibração do modelo

A calibração do modelo foi realizada utilizando o período de janeiro de 2005 até dezembro de 2009, de acordo com o procedimento descrito na seção 3.5 da metodologia. Os valores dos parâmetros fixos e de calibração de cada URH são mostrados no anexo B, sendo adotados para os parâmetros fixos os mesmos valores utilizados por Bayer (2014).

A Tabela 10 mostra os resultados dos parâmetros Nash (R2), Nash do logaritmo das vazões (R_{log}), Erro Volumétrico (ΔV), Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER).

Destaca-se que somente os três primeiros parâmetros (R2, R_{log} e ΔV) foram utilizados como função objetivo da calibração, ou seja, a parametrização do modelo foi feita buscando a otimização destes três parâmetros e então, após a obtenção de valores R2, R_{log} e ΔV considerados adequados para o modelo, foram calculados os parâmetros seguintes para complementar a avaliação da calibração.

Tabela 10: Valores das funções objetivo Nash (R2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog) e relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e dos parâmetros de avaliação Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de calibração do modelo (01/01/2005 até 31/12/2009). As estações em negrito foram utilizadas para calibração do modelo.

Código	Nome	R2	R _{log}	ΔV	r	V	REQM	EA	ER
58040000	São Luís do Paraitinga	0,49	0,55	-25%	0,77	-7,70	16,80	9,50	24%
58099000	Santa Branca	0,65	0,69	-16%	0,84	-12,6	30,50	19,00	21%
58128200	UHE Jaguari Jusante	0,21	0,23	-36%	0,68	-9,50	17,70	10,40	31%
58318002	UEL Santa Cecília Jusante	0,76	0,84	-11%	0,90	-31,0	100,10	59,60	19%
58520000	Sobraji	0,76	0,83	-9%	0,91	-6,60	22,90	12,70	14%
58630002	Anta	0,75	0,81	-21%	0,96	-130,6	198,30	137,0	19%
58654100	Porto Velho do Cunha	0,73	0,78	-23%	0,96	-149,9	221,40	155,0	20%
58790002	Sto Antônio de Pádua II	0,83	0,85	-7%	0,92	-9,80	44,10	24,80	17%
58874000	Dois Rios	0,64	0,79	23%	0,92	10,90	28,90	13,90	32%
58960000	Cardoso Moreira - Rv	0,80	0,72	-1%	0,92	-1,30	58,40	38,90	45%
58974000	Campos - Ponte Municipal	0,87	0,74	16%	0,95	122,5	247,90	187,30	32%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado na metodologia, coeficiente de Nash e Nash do logaritmo das vazões valores acima de 0,75 o ajuste do modelo pode ser considerado bom, entre 0,36 e 0,75, satisfatório e não satisfatório para valores abaixo de 0,36 e para o erro volumétrico erros de magnitude menor que 10% são considerados muito bons, entre 10% e 15%, bons, entre 15% e 25% satisfatório e insatisfatório quando a magnitude do erro volumétrico é maior que 25% .

O coeficiente de Nash é bom nos postos UEL Santa Cecília Jusante, Sobraji, Anta, Santo Antônio de Pádua II, Cardoso Moreira e Campos – Ponte Municipal; satisfatório nos postos São Luís do Paraitinga, Santa Branca, Porto Velho do Cunha e Dois Rios e não satisfatório no posto UHE Jaguari Jusante.

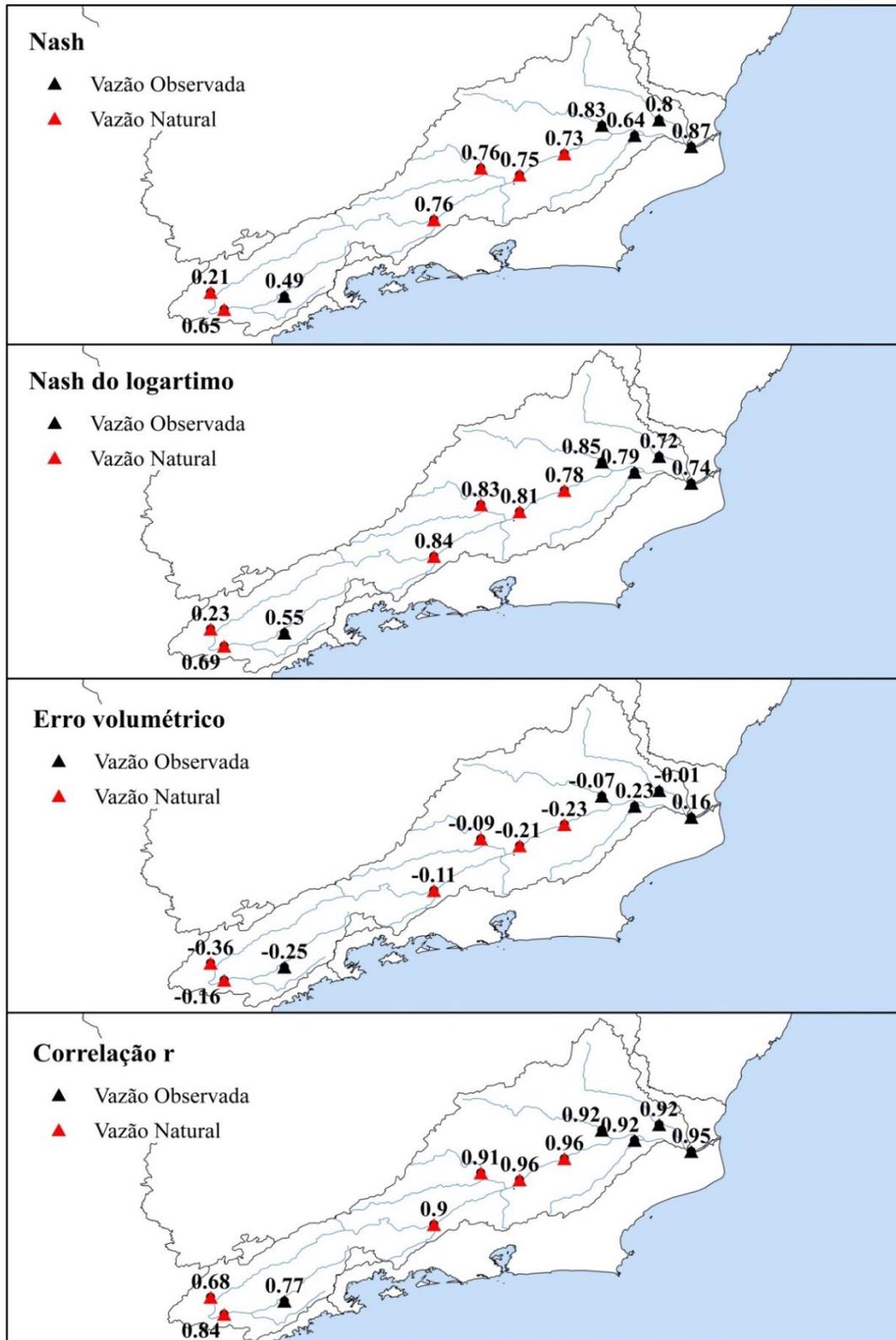
Também para o coeficiente de Nash do logaritmo das vazões o resultado foi bom em 6 pontos: UEL Santa Cecília Jusante, Sobraji, Anta, Porto Velho do Cunha, Santo Antônio de Pádua II e Dois Rios; satisfatório nos postos São Luís do Paraitinga, Santa Branca, Cardoso Moreira e Campos – Ponte Municipal e insatisfatório no posto UHE Jaguari Jusante.

O erro volumétrico é considerado muito bom em 3 pontos (Sobraji, Santo Antônio de Pádua II e Cardoso Moreira), bom em um 1 ponto (UEL Santa Cecília Jusante), satisfatório em 6 pontos (São Luís do Paraitinga, Santa Branca, Anta, Porto Velho do Cunha, Dois Rios e Campos – Ponte Municipal) e insatisfatório em 1 ponto (UHE Jaguari Jusante).

A Figura 12 e a Figura 13 mostram a localização dos pontos com o resultado de cada um dos coeficientes, indicando pontos com calibração satisfatória nas sub-bacias de três importantes afluentes do rio Paraíba do Sul bem como em locais na parte alta, média e baixa da bacia, indicando que para o período de calibração o resultado do modelo é representativo do comportamento hidrológico da bacia. O posto UHE Jaguari Jusante obteve o pior desempenho entre todos os postos analisados. O resultado desse posto pode estar relacionado com a pequena área de drenagem da bacia e também com incompatibilidades na representação das condições de uso e cobertura da bacia. Parte da área de drenagem a montante do posto UHE Jaguari Jusante é o lago da usina, que possui área variável conforme ocorrem elevações ou rebaixamentos no nível do reservatório.

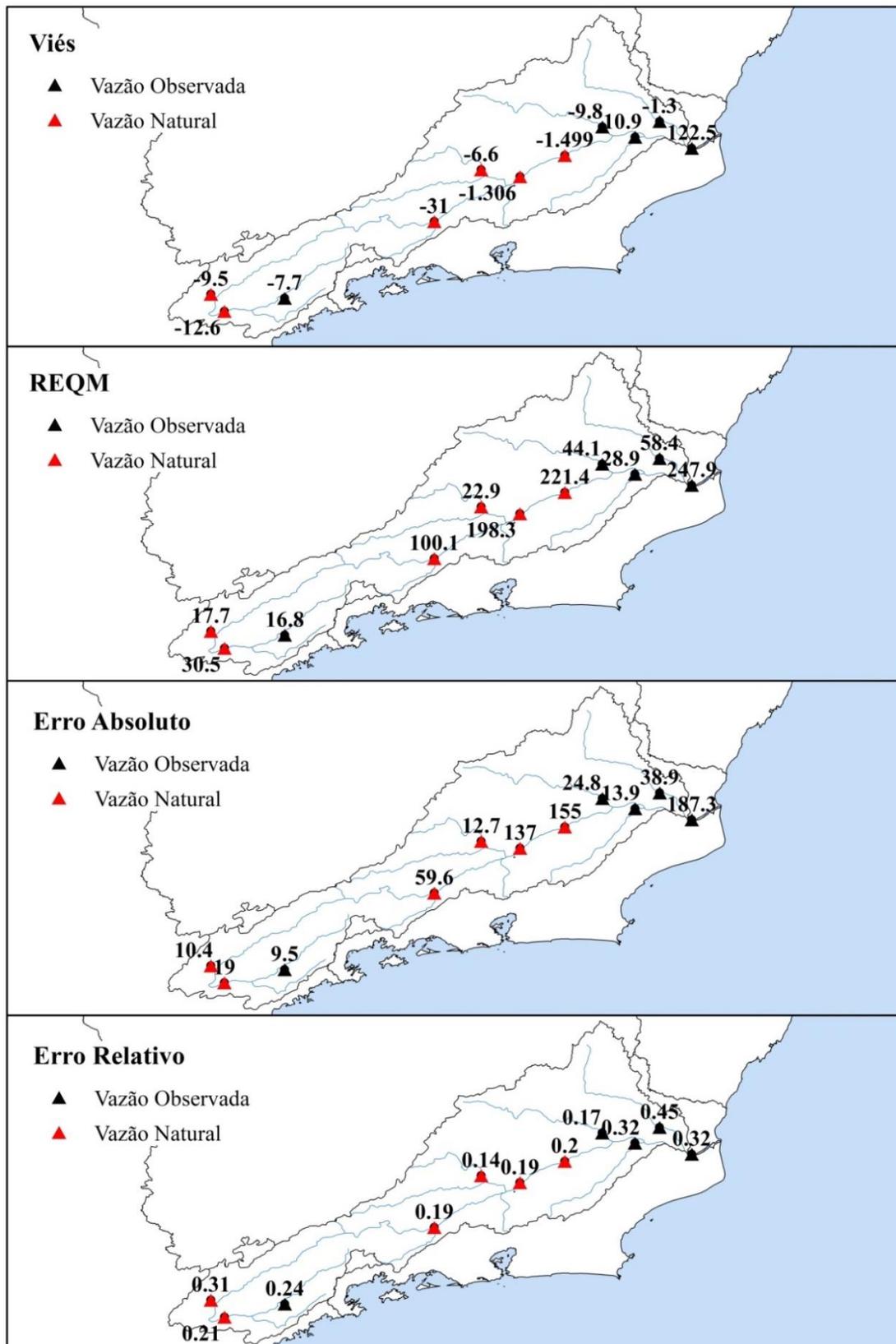
Os resultados da análise de sensibilidade do modelo, para avaliar a capacidade de resposta do modelo para mudanças de uso da terra na bacia em estudo concordaram com os encontrados por Bayer (2014), conforme mostrada no anexo F.

Figura 12: Disposição espacial dos parâmetros Nash (R^2), Nash para o logaritmo das vazões ($Rlog$), relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e Correlação de Pearson (r) para o período de calibração do modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13: Disposição espacial dos parâmetros Erro Viés (V), Erro Quadrático Médio (ERQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de calibração do modelo.



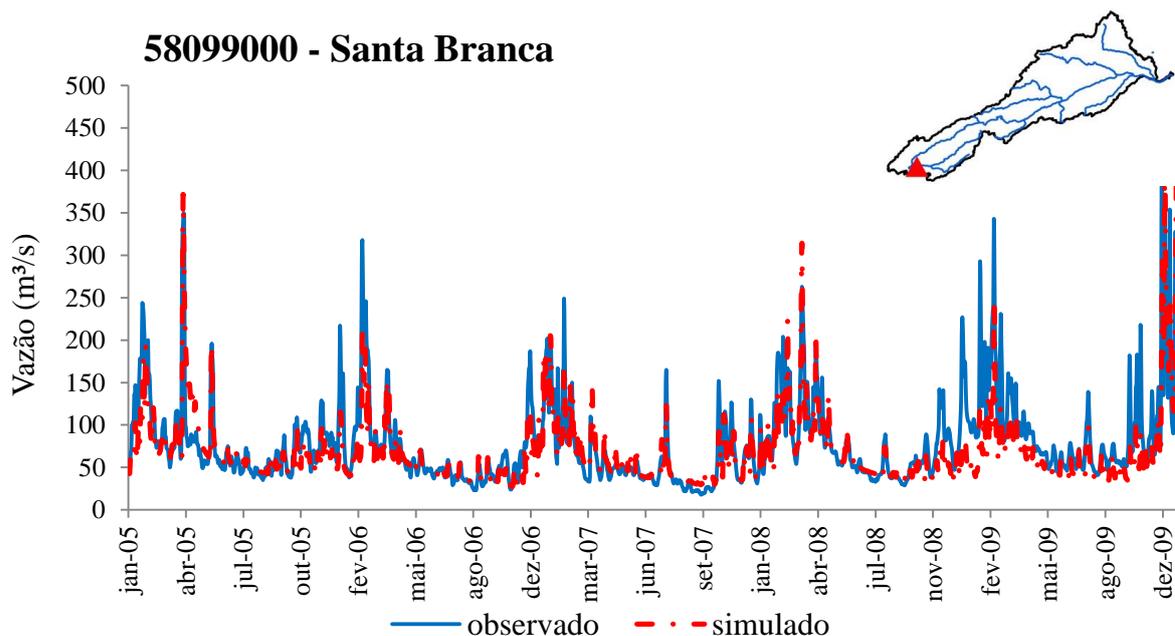
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os hidrogramas simulados também foram analisados visualmente em relação aos observados para cada um dos postos utilizados no estudo, sendo selecionados 6 hidrogramas para apresentação nesta seção.

O critério para seleção dos hidrogramas foi mostrar, além do hidrograma do posto mais a jusante de toda a bacia (58974000 – Campos - Ponte Municipal), um hidrograma da parte alta da bacia (58099000 – Santa Branca), o hidrograma do posto 58630002 – UEL Santa Cecília Jusante, onde é feito o vertimento do rio Paraíba do Sul para o abastecimento da RMRJ, um hidrograma do trecho médio (58630002 – Anta) e o hidrograma de dois importantes afluentes do rio Paraíba do Sul, (58520000 – Sobraji e 58790002 – Santo Antônio de Pádua II).

Os hidrogramas dos postos São Luís do Paraitinga (vazão observada), Santa Branca (vazão naturalizada) estão localizados no rio Paraitinga e no rio Paraíba do Sul, respectivamente. Em ambos os casos o ajuste do modelo é bom na maior parte do período e o modelo consegue representar bem o hidrograma até julho de 2008, a partir deste período as vazões simuladas perdem a aderência com o observado no posto fluviométrico. Os hidrogramas simulado e observado para Santa Branca são mostrados na Figura 14.

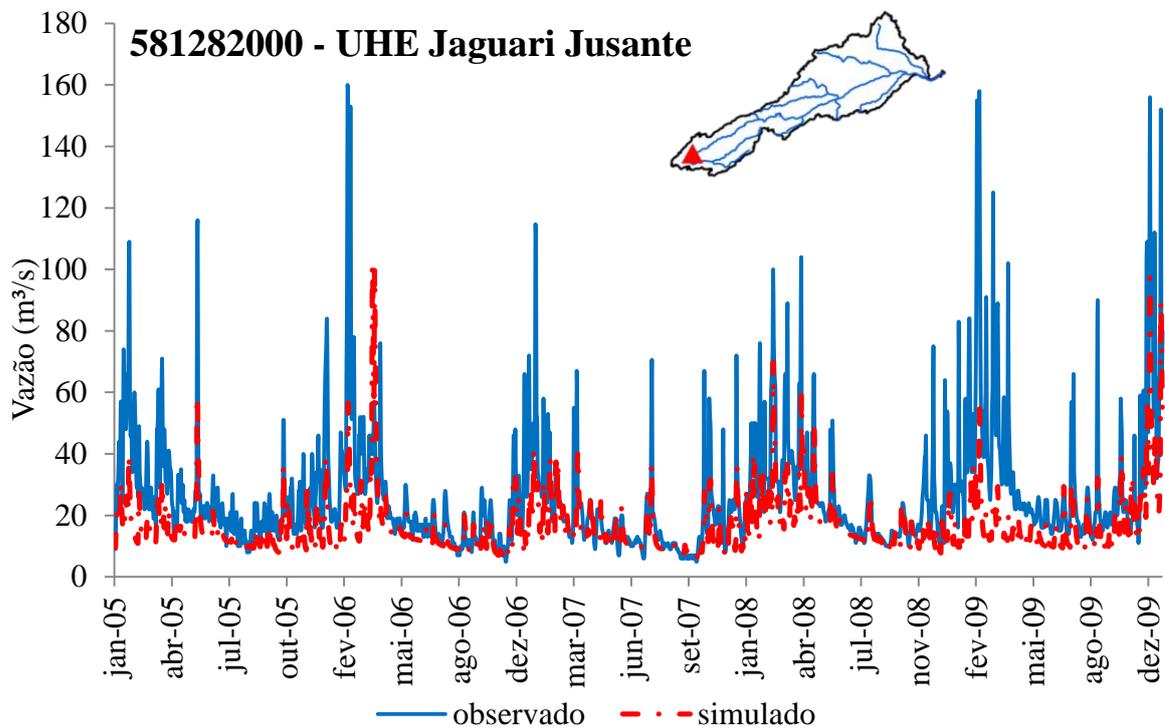
Figura 14: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 580990000 – Santa Branca e localização do posto na bacia



Fonte: Elaborada pelo autor.

O posto de vazão naturalizada Jaguari Jusante (Figura 15) está localizado no rio Jaguari, afluente do rio Paraíba do Sul pela margem esquerda. O hidrograma simulado apresenta pouca aderência, especialmente para representação de vazões de cheia. Destaca-se que este posto possui área de drenagem de aproximadamente 1.300 km², em uma região com baixa densidade de estações pluviométricas do alto Paraíba do Sul.

Figura 15: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 581282000 – UHE Jaguari Jusante e localização do posto na bacia.



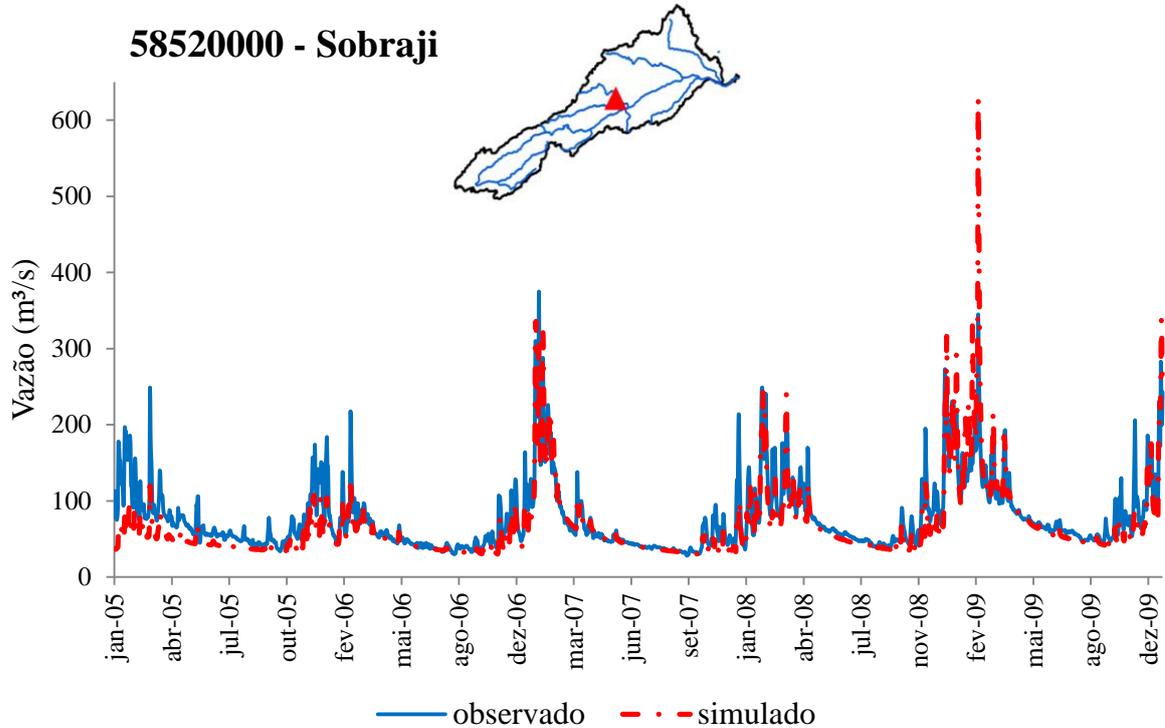
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com comportamento melhor dentre os analisados até o momento, o hidrograma simulado do posto de vazão naturalizada UEL Santa Cecília Jusante (não mostrado), localizado no médio Paraíba do Sul, consegue representar adequadamente a maior parte do comportamento esperado, especialmente nos períodos de recessão. Para as vazões altas, o modelo representa melhor os picos mais altos do que os intermediários.

O hidrograma simulado para o posto de vazões naturalizadas Sobraji (Figura 16), localizado no rio Paraibuna Mineiro, importante afluente do rio Paraíba do Sul pela sua margem esquerda, consegue representar adequadamente a variabilidade da vazão observada,

tanto em vazões máximas, mínimas e médias, durante todo o período de calibração do modelo.

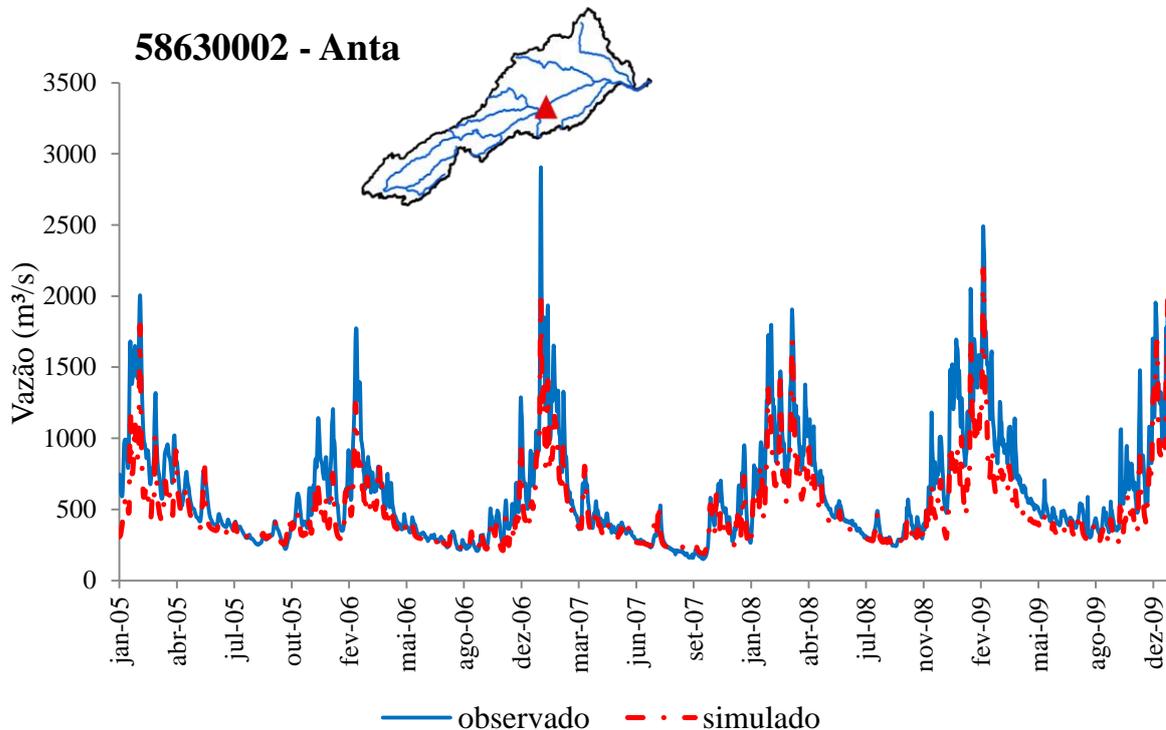
Figura 16: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58520000 – Sobraji e localização do posto na bacia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O posto de vazões naturalizadas Anta está localizado no rio Paraíba do sul (Figura 17), em seu trecho médio inferior e também apresenta resultados satisfatórios na comparação do simulado com o observado, durante todo o período de calibração, apesar de que em 2009 as vazões simuladas subestimam sistematicamente o observado.

Figura 17: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58630002 – Anta e localização do posto na bacia.

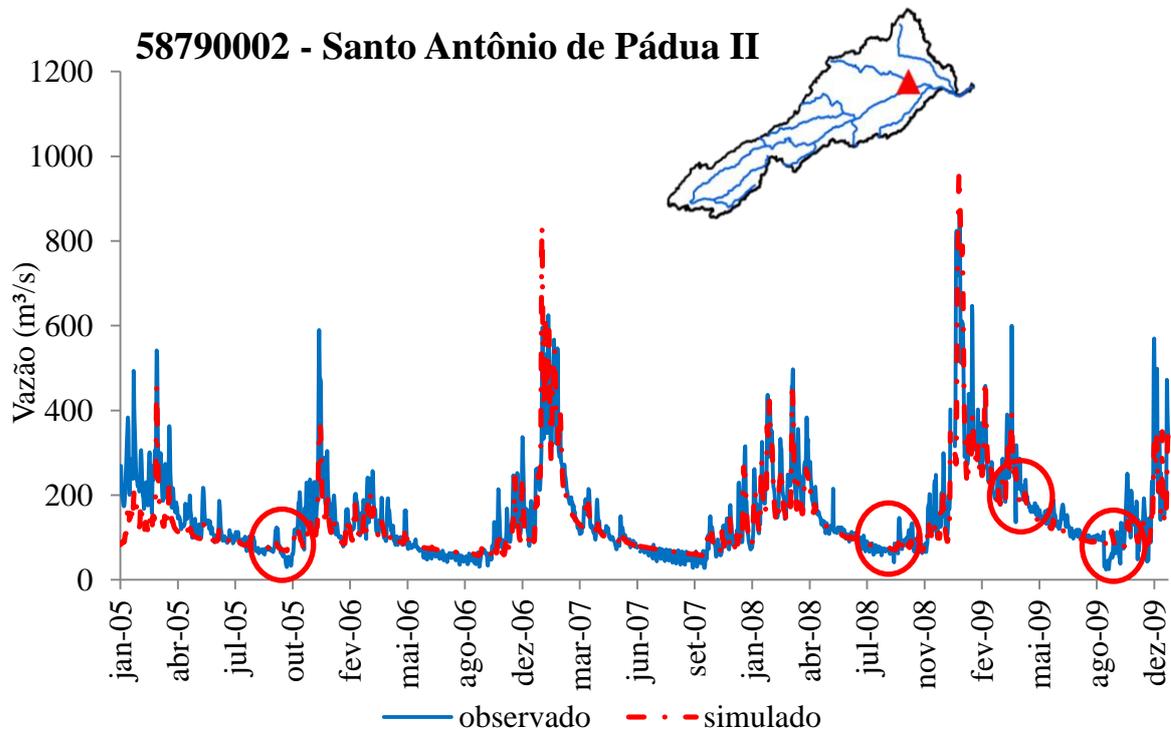


Fonte: Elaborada pelo autor.

O posto de vazões naturalizadas Porto Velho do Cunha (não mostrado) está localizado no trecho médio inferior do rio Paraíba do Sul. O hidrograma simulado possui bom ajuste para todo o período de calibração, apresentando padrão semelhante aos dois primeiros postos analisados, com menor aderência entre meados de julho/08 até dezembro de 2009.

A simulação para o posto de vazões observadas Santo Antônio de Pádua (Figura 18), localizado próximo da foz do rio Pombo, importante afluente do rio Paraíba do Sul pela margem esquerda, consegue representar bem a variabilidade da vazão para todo o período de calibração, tanto em vazões de estiagem quanto em vazões altas. Destaca-se que sendo este um posto de vazões observadas, algumas inconsistências entre simulado e observado, especialmente as depleções abruptas do hidrograma (destacado na figura), são possivelmente oriundas de erros na leitura de cotas realizada na estação e que são utilizadas para geração da vazão observada. Também nota-se uma maior capacidade de detecção de vazões elevadas a partir 2006.

Figura 18: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II localização do posto na bacia. Os círculos indicam depleções atípicas que podem estar associadas com erros na vazão observada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

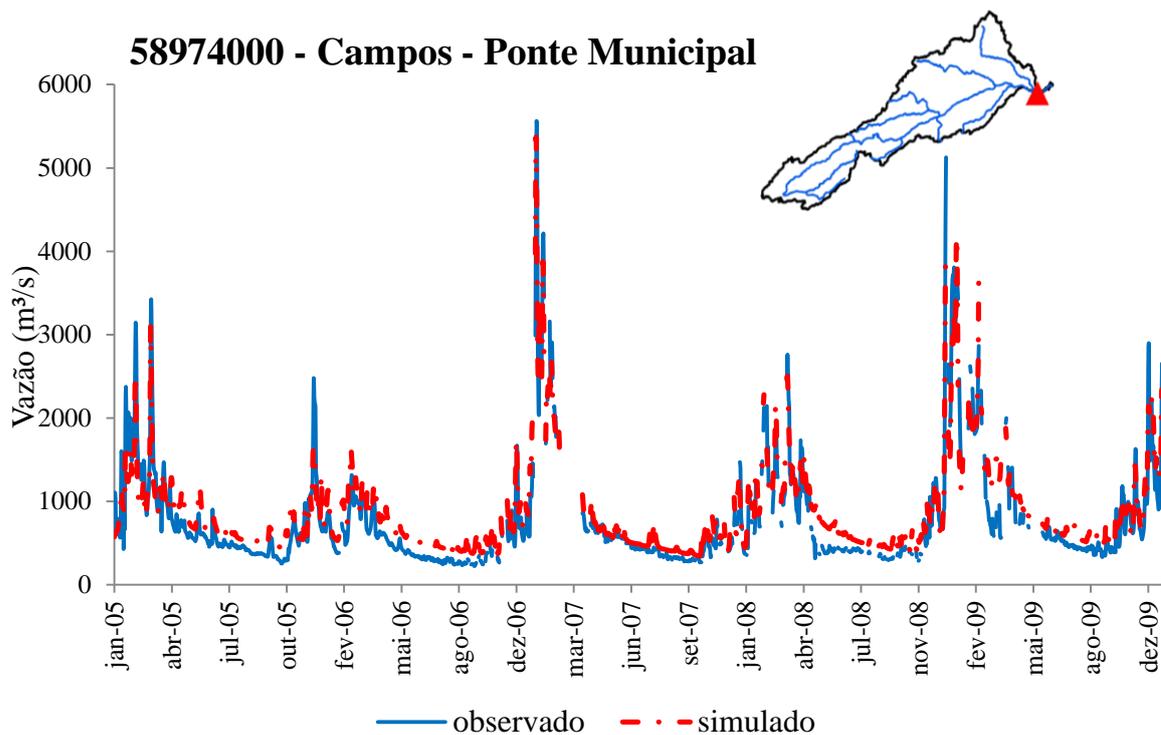
Para o posto Dois Rios (não mostrado), localizado no rio Dois Rios, afluente do rio Paraíba do Sul pela margem direita, as vazões simuladas conseguem representar bem o hidrograma das vazões observadas, apesar da ocorrência de algumas subestimativas das vazões máximas. O referido posto também é de vazões observadas. Em postos de vazão observada em geral há maior incerteza na vazão de cotas máximas, uma vez que a incerteza da curva-chave é maior para os extremos, especialmente os extremos mais altos.

O posto de vazões observadas Cardoso Moreira (não mostrado) está localizado próximo à foz do rio Muriaé, afluente do rio Paraíba do Sul pela margem esquerda. O hidrograma simulado para este posto não apresenta boa aderência com observado, superestimando as vazões de estiagem e subestimando as vazões altas em praticamente todo o período de calibração.

O último ponto de monitoramento fluviométrico da bacia antes do rio Paraíba do Sul desaguar no oceano é onde está localizado o posto de vazões observadas Campos - Ponte

Municipal (Figura 19). As vazões simuladas para este posto apresenta coerência com o observado, ocorrendo algumas superestimativas das vazões no período de recessão.

Figura 19: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58974000 – Campos – Ponte Municipal localização do posto na bacia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

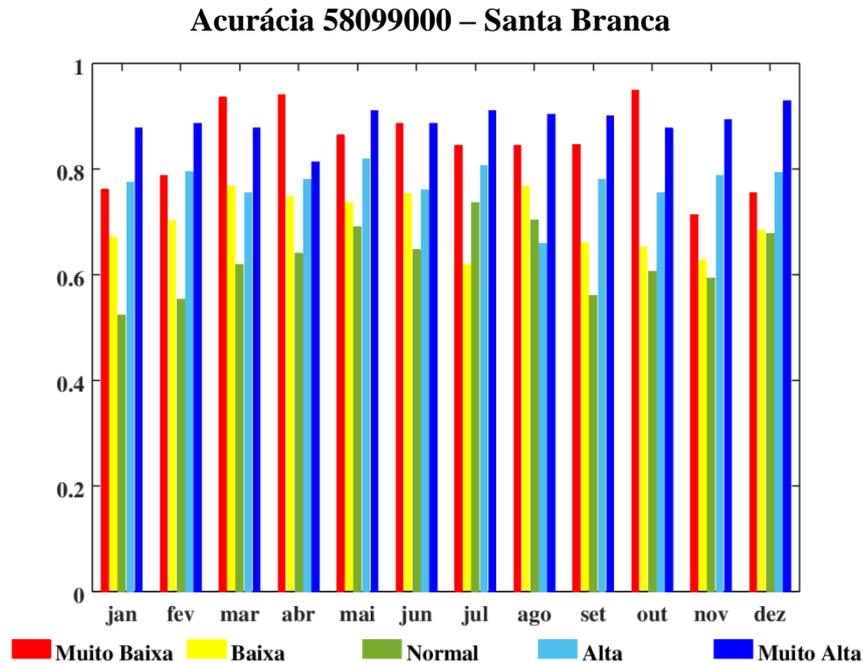
Com o objetivo de avaliar o comportamento do modelo em diferentes faixas de vazão e considerando a variação sazonal da vazão, foi verificada a acurácia mensal do modelo conforme descrito na metodologia deste trabalho.

Para São Luís do Paraitinga (não mostrado) o teste de acurácia indica melhores coeficientes para as vazões muito altas em todos os meses do ano. Durante os meses de estiagem, o modelo consegue representar melhor vazões normais do que extremos de vazão muito baixa.

O teste de acurácia para Santa Branca (Figura 20) indica que o modelo consegue representar melhor as vazões extremas (muito alta e muito baixa), durante praticamente todo ano. Para vazões muito altas em todos os meses do ano e para os meses de março a setembro, para o caso das vazões muito baixas o coeficiente de acurácia é acima de 0,80, ou seja, em

mais de 80% dos eventos analisados a simulação acerta se o evento pertence ou não a categoria de vazão.

Figura 20: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de calibração.

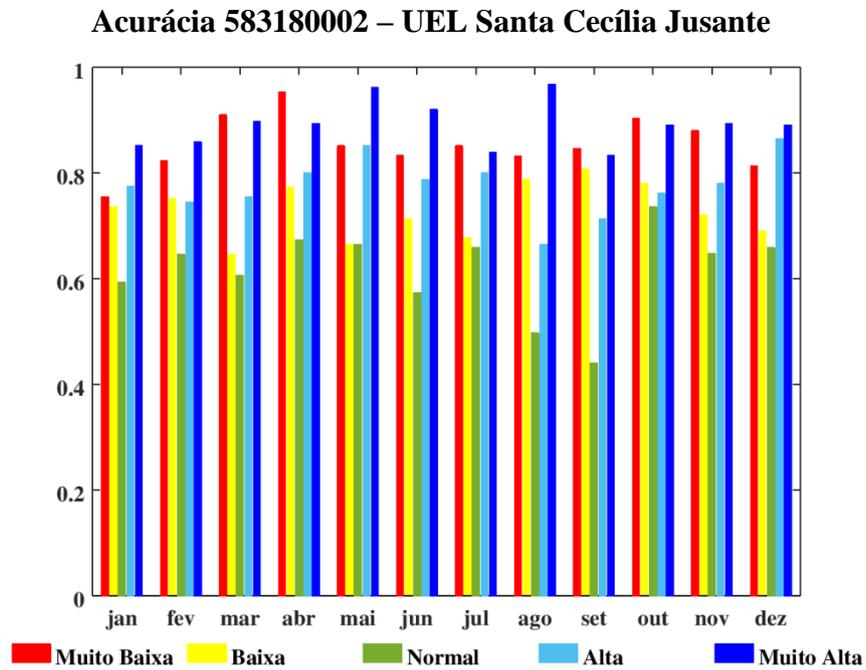


Fonte: Elaborada pelo autor.

No posto UHE – Jaguari Jusante (não mostrado) o modelo tem acurácia acima de 0,80 para vazões muito altas em todos os meses do ano, o resultado para as demais faixas são menores e variam de acordo com o mês do ano.

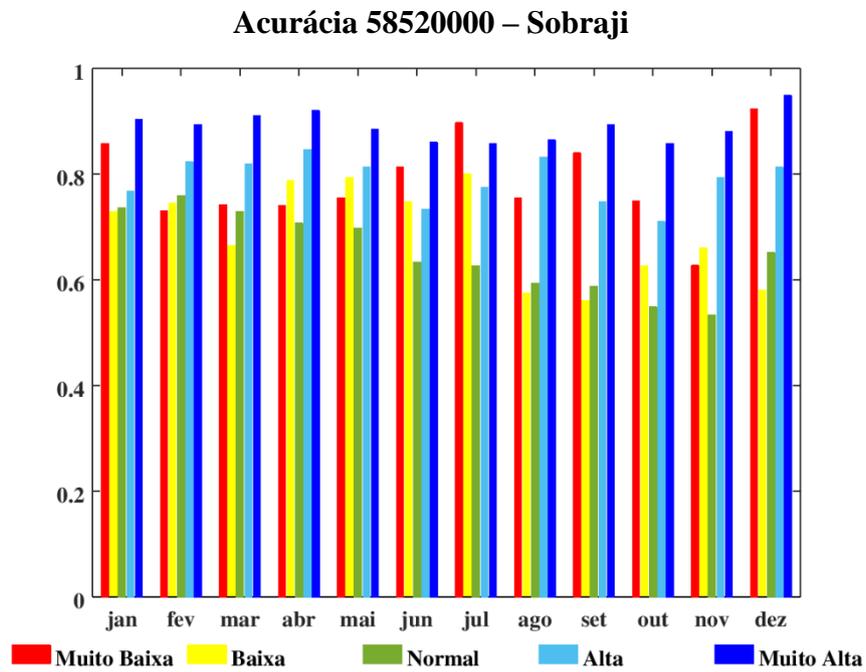
O resultado do posto UEL Santa Cecília Jusante (Figura 21) também indica que o modelo consegue representar melhor as vazões extremas (muito alta e muito baixa), durante praticamente todo ano. O coeficiente é acima de 0,80 para vazões muito altas em todos os meses do ano e, para o caso das vazões muito baixas, entre fevereiro e dezembro.

Figura 21: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de calibração.



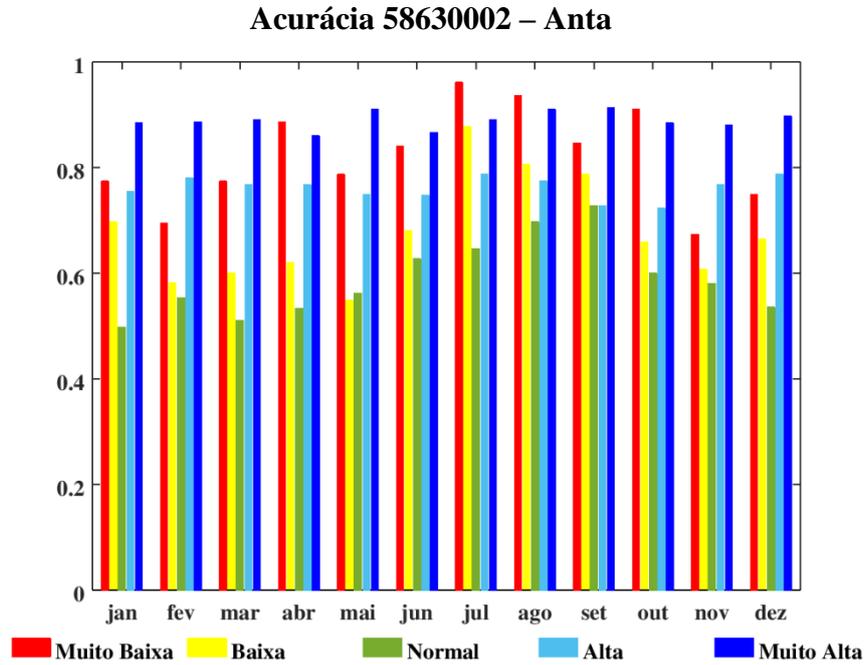
O resultado do posto Sobraji (Figura 22) mostra coeficiente acima de 0,80 para vazões muito altas em todos os meses do ano, o resultado para vazões muito baixas é melhor durante os meses de estiagem.

Figura 22: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de calibração.



Para o posto Anta (Figura 23), a acurácia é acima de 0,80 para vazões muito altas durante todos os meses do ano, as vazões muito baixas possuem coeficientes de acurácia mais altos nos meses de estiagem.

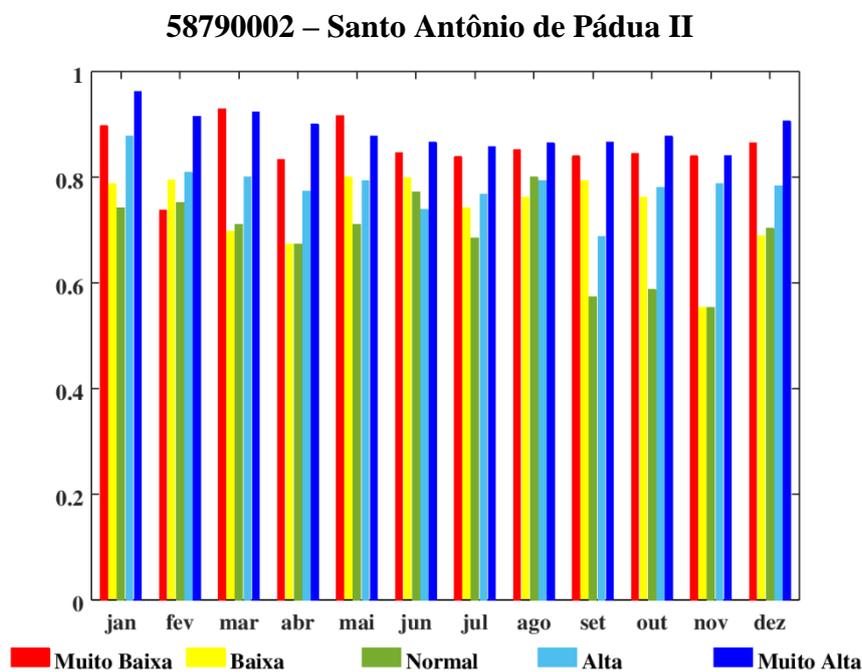
Figura 23: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de calibração.



O coeficiente de acurácia para Porto Velho do Cunha (não mostrado) é acima de 0,80 para todos os meses do ano, já as vazões muito baixas possuem acurácia mais alta durante os meses de junho a outubro.

O posto Santo Antônio de Pádua II (Figura 23) apresenta coeficientes de vazão muito baixa e muito alta acima de 0,80 para todos os meses do ano. Neste posto as faixas de vazão intermediárias também apresentam coeficientes maiores do que as estações anteriores.

Figura 24: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de calibração.



Diferente do observado nos postos analisados anteriormente, o posto Dois Rios (não mostrado) possui coeficientes de vazão muito baixa acima de 0,80 em todos os meses, enquanto que o mesmo não é observado na vazão muito alta, onde os coeficientes são acima de 0,80 entre outubro e abril e em julho.

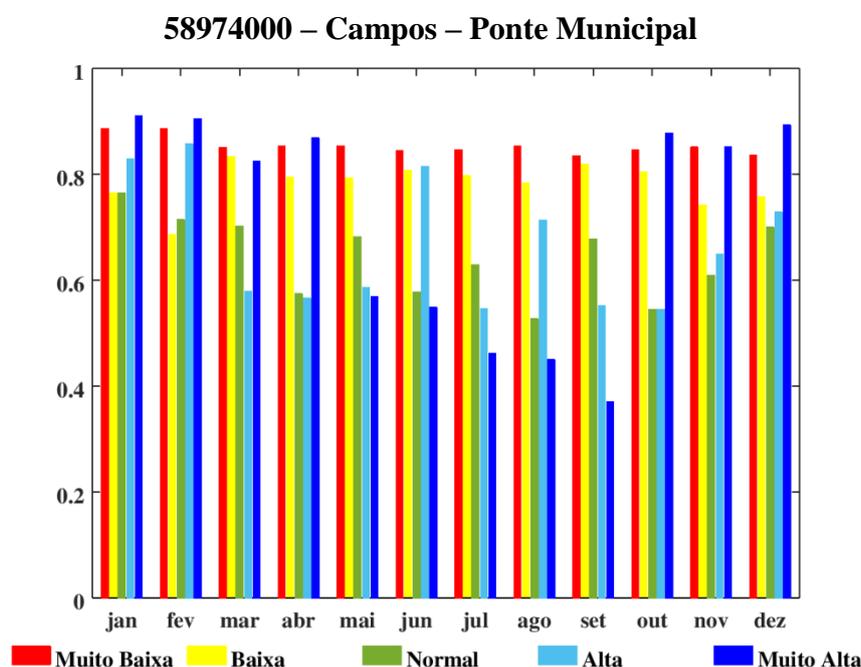
Resultado semelhante ao anterior é verificado no posto Cardoso Moreira (não mostrado), onde o resultado para vazões muito baixas é acima de 0,80 em todos os meses do ano, enquanto que o coeficiente de acurácia permanece acima de 0,80 entre outubro e junho, sendo consideravelmente baixo para as vazões muito altas nos meses de agosto e setembro.

Para o posto Campos – Ponte Municipal (Figura 25) a acurácia das vazões muito baixa é acima de 0,80 para todos os meses do ano e de outubro a abril para vazão muito alta.

De um modo geral, o resultado da acurácia para o período de calibração mostra que o modelo consegue representar bem os extremos (vazão muito baixa e muito alta) nos pontos onde o desempenho indicado pelos outros parâmetros foi bom. Ainda para estes pontos, nota-se que o modelo representa bem extremos de vazão alta durante os meses mais chuvosos (entre dezembro e março) e extremos de vazão baixa durante os meses mais secos da bacia (junho, julho e agosto).

O melhor resultado para os extremos é esperado para o teste de acurácia, uma vez que os extremos são limitados unilateralmente, admitindo como pertencente à classe muito baixa qualquer valor de vazão $q \leq Q_{0,15}^m$ e pertencente à classe de vazão muito alta qualquer valor de vazão $q > Q_{0,85}^m$, enquanto que nas classes intermediárias é necessário que o valor simulado pertença a um intervalo com limites bilaterais.

Figura 25: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de calibração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2. Verificação do modelo

Para verificação da calibração, foi utilizado o período de 01/01/2010 até 31/12/2015. A Tabela 11 mostra os resultados dos parâmetros utilizados para avaliação da simulação e a Figura 26 e a Figura 27 apresentam os valores dos coeficientes, indicando a posição de cada uma das estações. De modo geral os resultados obtidos para o período de verificação são satisfatórios e indicam que a calibração (realizada entre 2005 e 2009) é satisfatória.

O coeficiente de Nash foi bom para 8 postos (Santa Branca, UEL Santa Cecília Jusante, Sobraji, Anta, Porto Velho do Cunha, Santo Antônio de Pádua II, Cardoso Moreira e Campos – Ponte Municipal), satisfatório para 3 (São Luís do Paraitinga, UHE Jaguari Jusante

e Dois Rios). Para o coeficiente de Nash do logaritmo das vazões o resultado foi bom para 7 postos (Santa Branca, UEL Santa Cecília Jusante, Sobraji, Anta, Porto Velho do Cunha, Santo Antônio de Pádua II e Dois Rios) e satisfatório em 4 postos (São Luís do Paraitinga, UHE Jaguari Jusante, Cardoso Moreira e Campos – Ponte Municipal).

Nos postos 58790002 – Santo Antônio de Pádua II, 58874000 – Dois Rios, 58960000 – Cardoso Moreira, 58974000 – Campos – Ponte Municipal os parâmetros de avaliação foram ligeiramente inferiores àqueles calculados no período de calibração. Apesar da pequena variação, a avaliação para estes postos ainda é satisfatória e para todos os outros postos utilizadas no estudo os parâmetros apresentaram valores que indicam melhora do ajuste dos hidrogramas simulados e observados para o período de verificação.

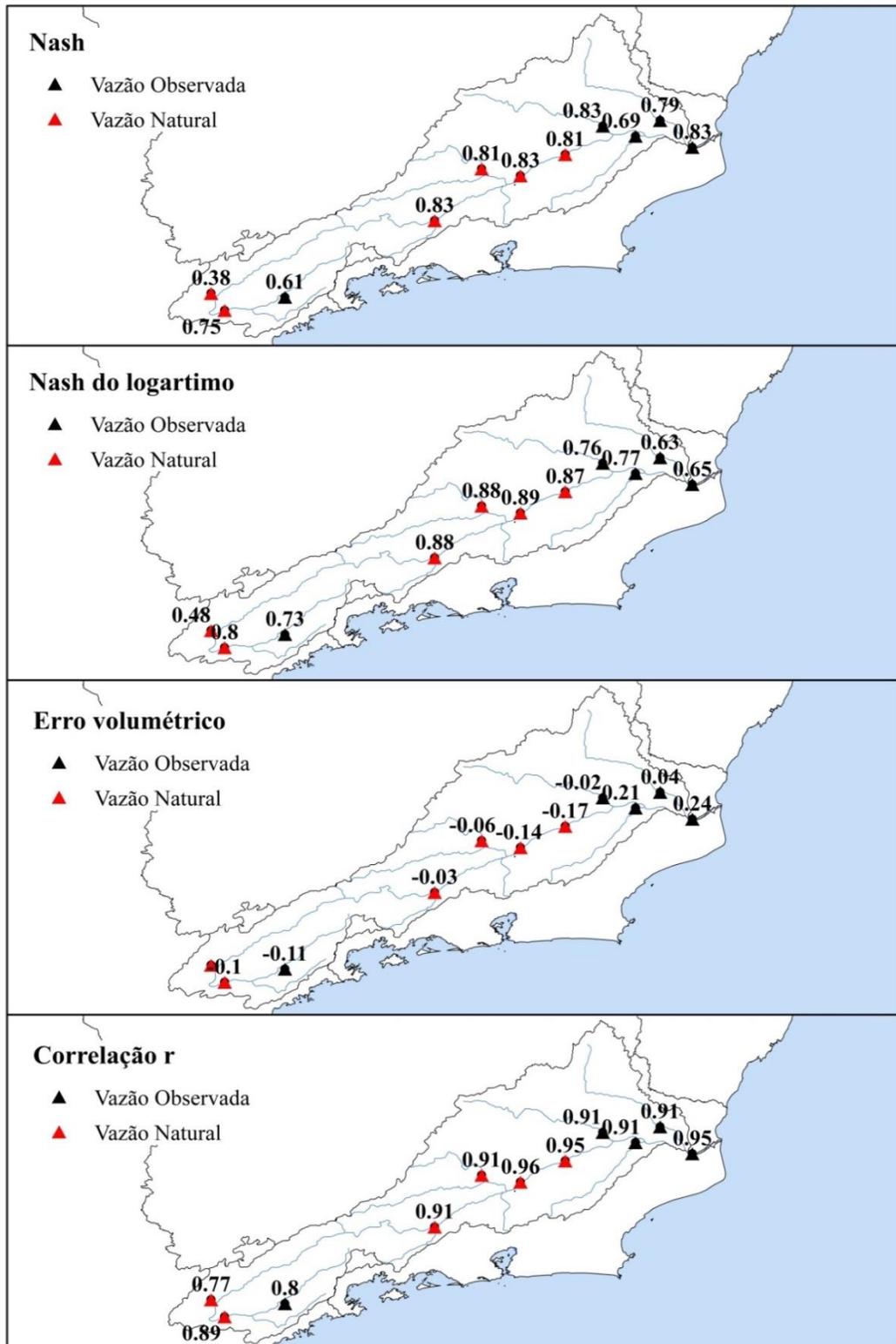
Para o posto UHE Jaguari Jusante, onde a calibração foi insatisfatória, o desempenho dos parâmetros melhorou e, ainda que satisfatório de acordo com a classificação adotada, o desempenho foi consideravelmente inferior aos demais postos.

Tabela 11: Valores das funções objetivo (R2), Nash para o logaritmo das vazões (Rlog) e relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e dos parâmetros de avaliação Correlação de Pearson (r), Erro Viés (V), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de verificação do modelo (01/01/2010 até 31/12/2015). As estações em negrito foram utilizadas para calibração do modelo.

Código	Nome	R2	R_{log}	ΔV	r	V	REQM	EA	ER
58040000	São Luís do Paraitinga	0,61	0,73	-11%	0,80	-3,11	13,60	7,32	23%
58099000	Santa Branca	0,75	0,80	-10%	0,89	-7,83	28,72	15,44	18%
58128200	UHE Jaguari Jusante	0,38	0,48	-31%	0,77	-7,86	15,77	8,79	28%
58318002	UEL Santa Cecília Jusante	0,83	0,88	-3%	0,91	-8,59	84,09	48,15	18%
58520000	Sobraji	0,81	0,88	-6%	0,91	-4,32	19,77	10,75	14%
58630002	Anta	0,83	0,89	-14%	0,96	-79,70	161,44	99,88	15%
58654100	Porto Velho do Cunha	0,81	0,87	-17%	0,95	-103,82	185,97	117,38	16%
58790002	Sto Antônio de Pádua II	0,83	0,76	-2%	0,91	-2,18	44,02	27,50	34%
58874000	Dois Rios	0,69	0,77	21%	0,91	8,82	25,84	12,14	33%
58960000	Cardoso Moreira - Rv	0,79	0,63	4%	0,91	4,35	53,70	35,78	64%
58974000	Campos - Ponte Municipal	0,83	0,65	24%	0,95	157,87	251,12	199,93	42%

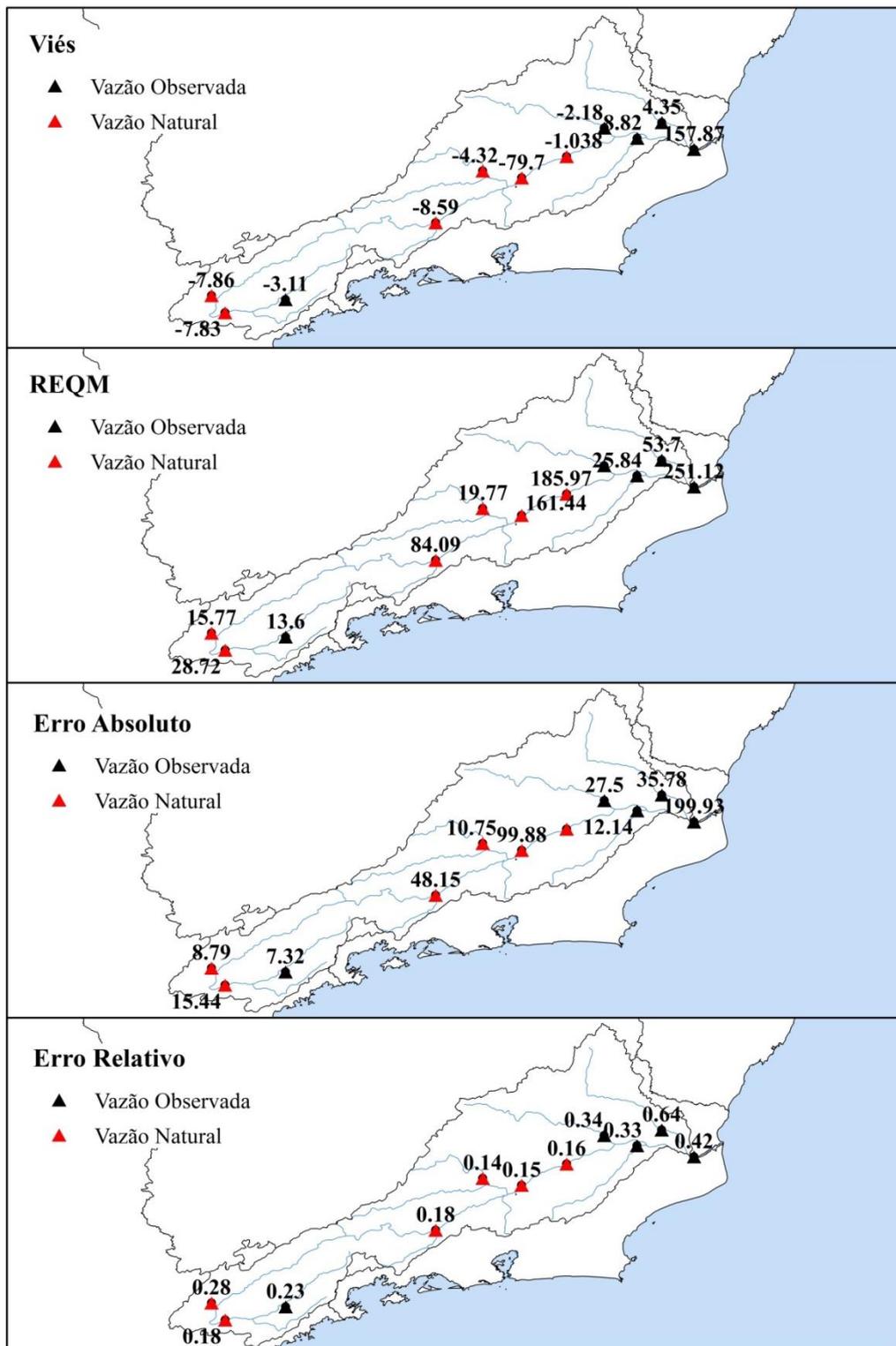
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26: Disposição espacial dos parâmetros Nash (R^2), Nash para o logaritmo das vazões ($Rlog$), relação entre vazões observadas e calculadas (ΔV) e Correlação de Pearson (r) para o período de verificação do modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27: Disposição espacial dos parâmetros Erro Viés (V), Erro Quadrático Médio (ERQM), Erro Absoluto (EA), Erro Relativo (ER) para o período de verificação do modelo.

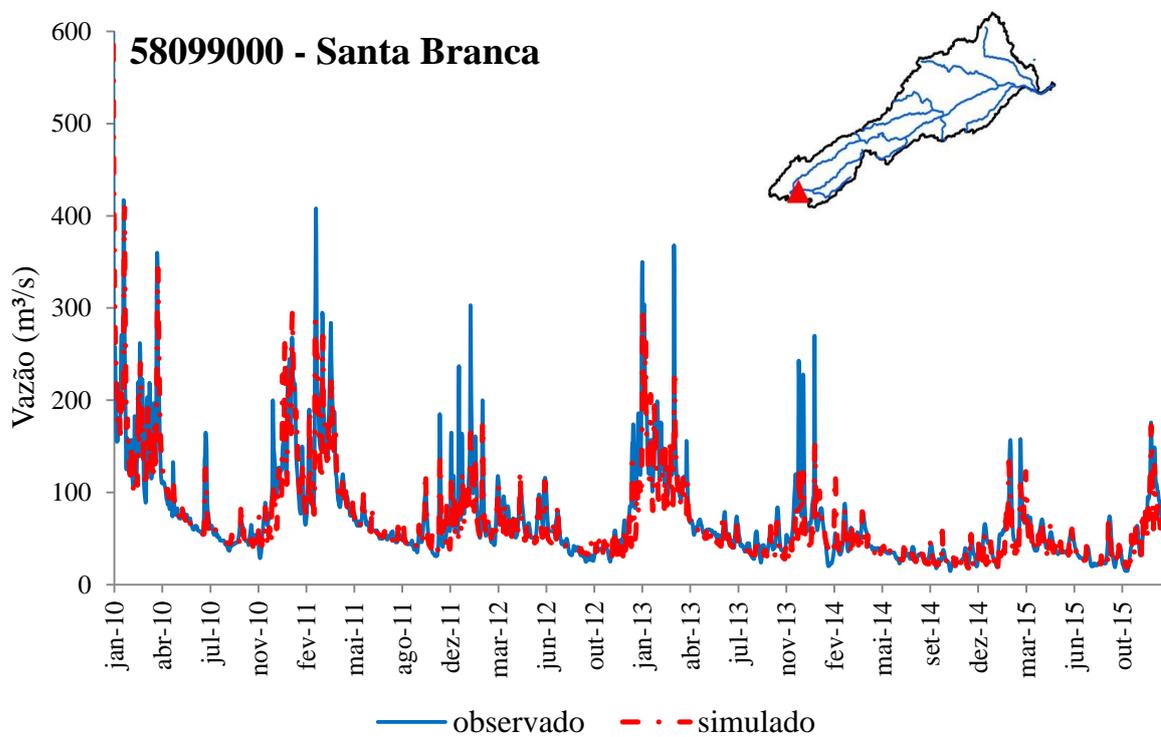


Fonte: Elaborada pelo autor.

O posto São Luís do Paraitinga apresenta hidrograma simulado visualmente melhor ajustado para o período de verificação, representando bem tanto recessões quanto vazões intermediárias e máximas durante todo o período de verificação.

Semelhante ao anterior, o ajuste para o posto Santa Branca (Figura 28) é melhor para o período de verificação, sendo que o modelo ainda subestima as vazões máximas.

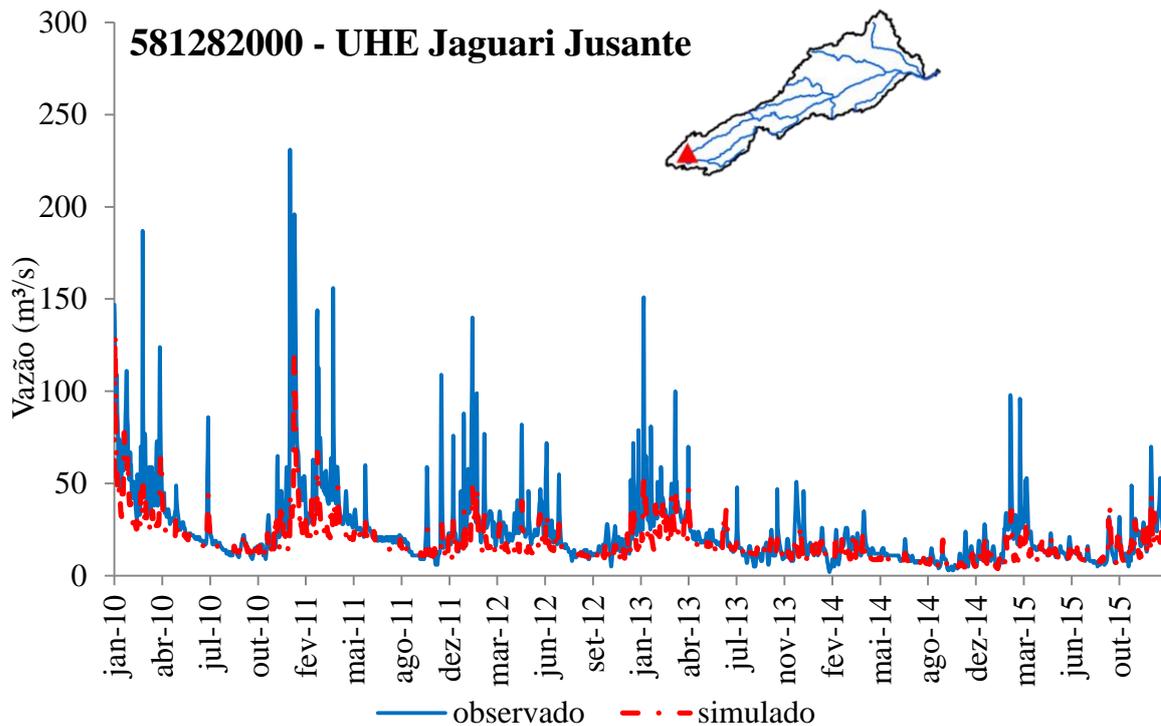
Figura 28: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58099000 – Santa Branca e localização do posto na bacia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar da melhora no ajuste, o posto UHE Jaguari Jusante (Figura 29) as vazões máximas e intermediárias simuladas são subestimadas durante todo o período, sendo que neste posto o desempenho dos parâmetros de calibração foi inferior aos demais postos analisados.

Figura 29: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 581282000 – UHE Jaguari Jusante e localização do posto na bacia.

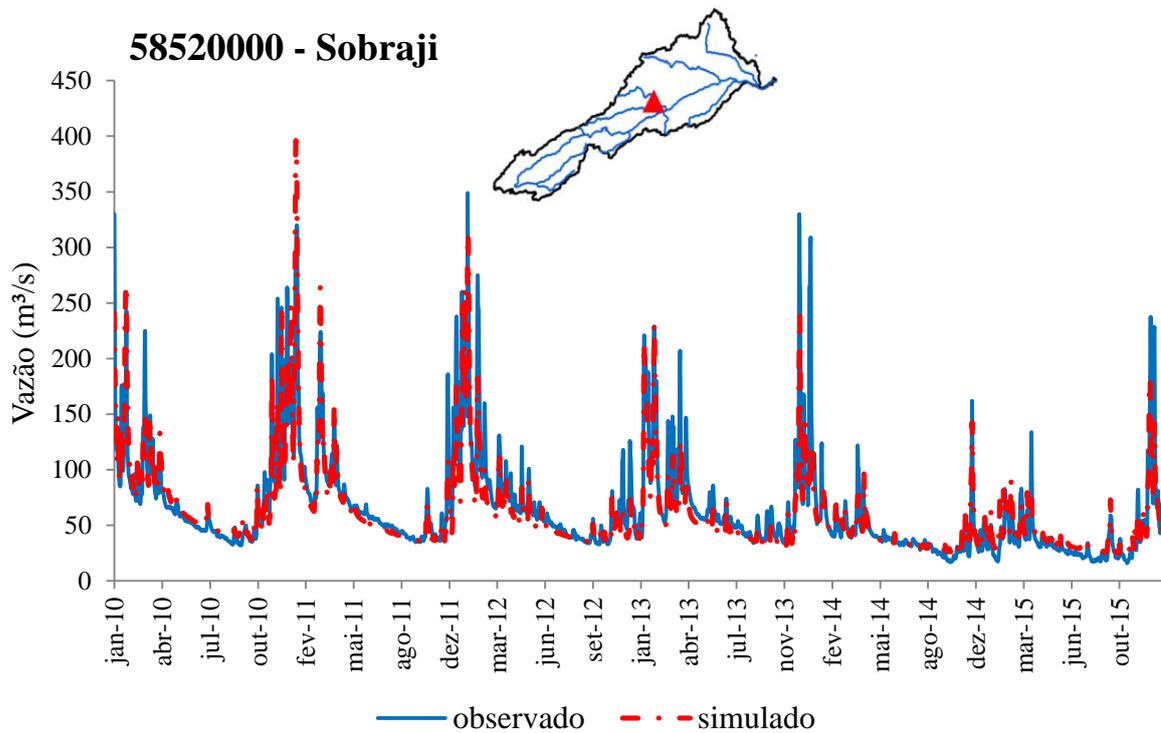


Fonte: Elaborada pelo autor.

O ajuste do hidrograma simulado para o posto UEL Santa Cecília Jusante (não motrado) apresenta pequena melhora no ajuste em relação ao período de calibração (que já apresentava um resultado satisfatório), simulando adequadamente o hidrograma observado durante todo o período de verificação.

O posto Sobraji (Figura 30) apresenta ajuste melhor do que no período de calibração, especialmente nas vazões baixas. Apesar de algumas subestimativas das vazões máximas o hidrograma simulado é representativo das vazões observadas no posto.

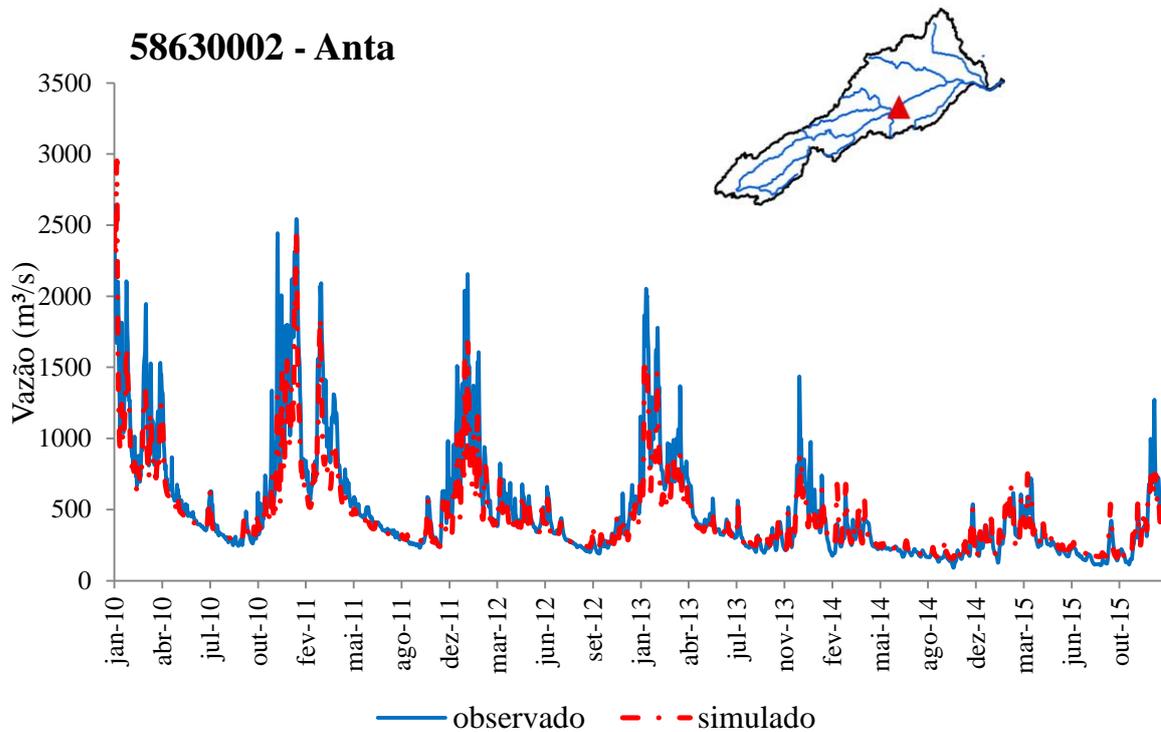
Figura 30: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58520000 – Sobraji e localização do posto na bacia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o período de calibração, os postos Anta (Figura 31) e Porto Velho do Cunha (não mostrado) apresentaram resultados satisfatórios, sendo que na verificação o ajuste do hidrograma foi ainda melhor, especialmente nas vazões baixas onde ocorriam subestimativas. Para o período de verificação, o modelo consegue representar bem em toda a amplitude de vazões de ambos os postos, tanto em vazões baixas quanto os picos de vazão durante o período chuvoso.

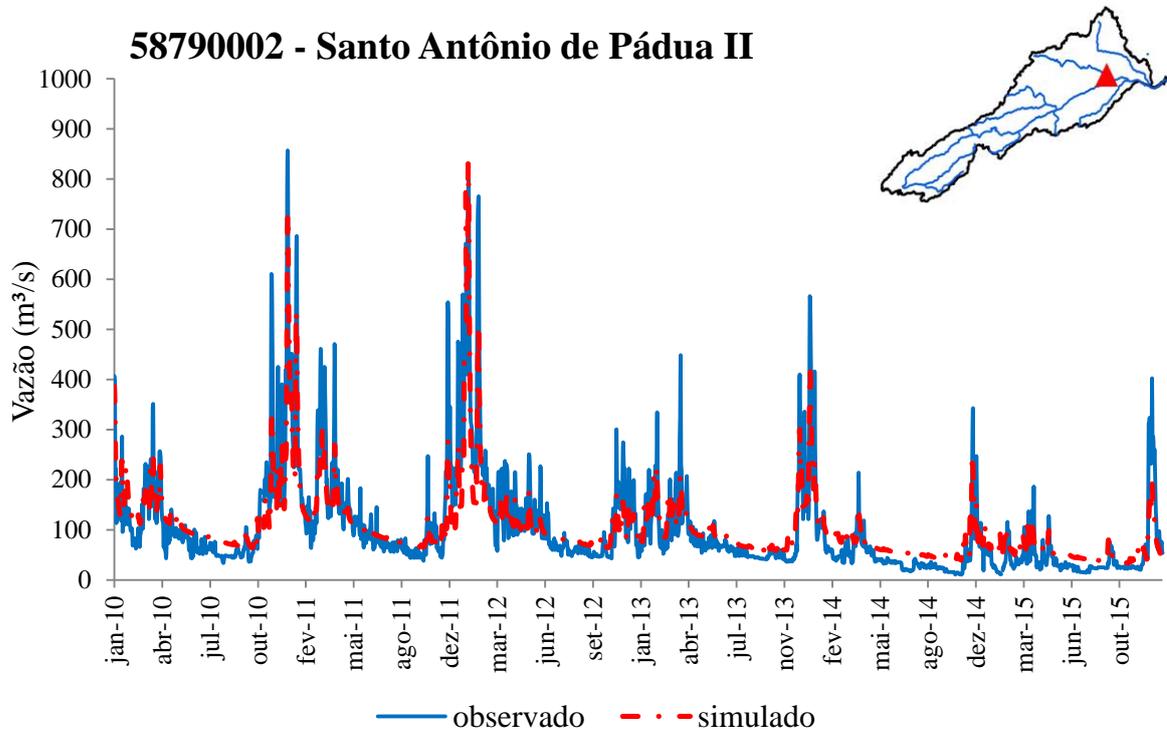
Figura 31: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58630002 – Anta e localização do posto na bacia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A aderência entre as vazões simuladas e observadas no posto Santo Antônio de Pádua II (Figura 32) diminuiu em relação ao período de calibração. No início do período de calibração o modelo consegue representar bem as vazões observadas, mas a partir de julho de 2013 o modelo tem dificuldade em representar as vazões observadas, especialmente no período de recessão do hidrograma, onde o modelo superestima sistematicamente as vazões.

Figura 32: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II e localização do posto na bacia.



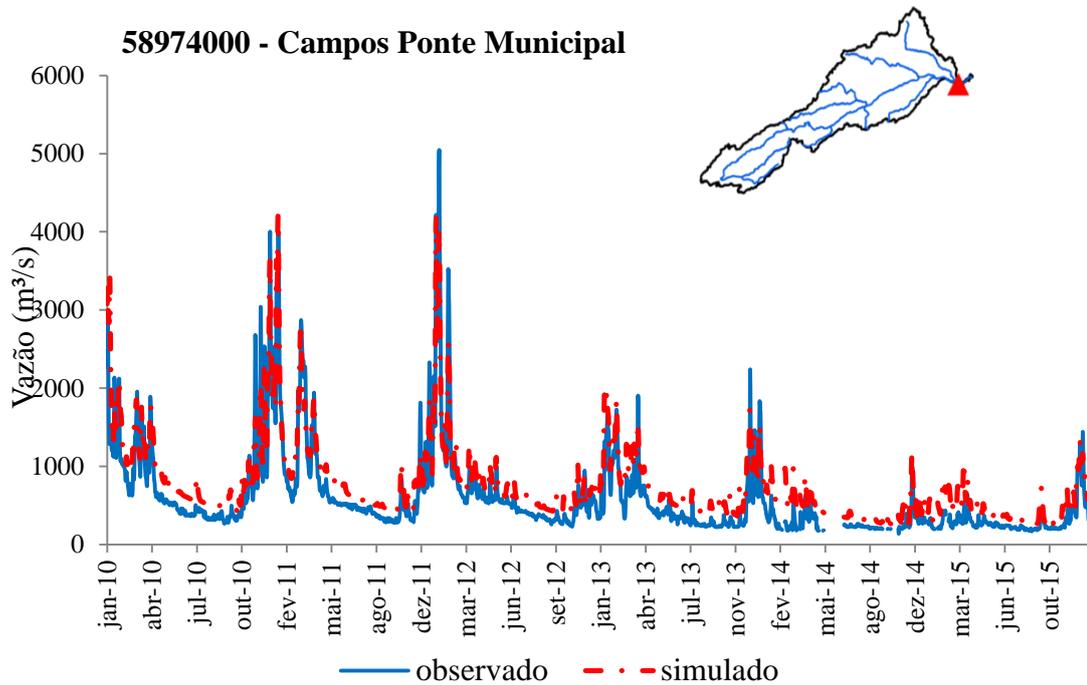
Fonte: Elaborada pelo autor.

O hidrograma simulado para o posto Dois Rios (não mostrado) é melhor para o período de verificação, onde o modelo consegue representar bem tanto vazões máximas quanto de recessões.

Para o posto de Cardoso Moreira (não mostrado) o resultado do período de verificação foi semelhante ao do período de calibração. O hidrograma simulado para este posto não apresenta boa aderência com observado, superestimando as vazões de estiagem e subestimando as vazões altas em praticamente todo o período de calibração.

O resultado do posto Campos – Ponte Municipal (Figura 33) também foi semelhante ao do período de calibração, onde as vazões simuladas são coerentes com o observado, ocorrendo algumas superestimativas das vazões no período de recessão.

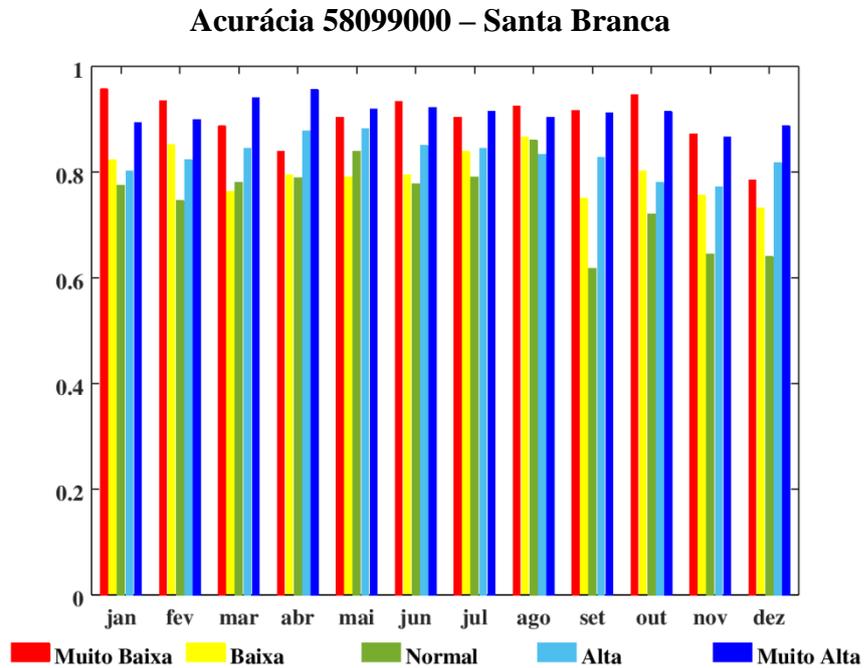
Figura 33: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58974000 – Campos – Ponte Municipal e localização do posto na bacia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos postos São Luís do Paraitinga e Santa Branca (Figura 34), a acurácia do modelo aumentou, especialmente nos extremos de vazão muito baixa. No posto São Luís do Paraitinga, com exceção do mês de junho, todos os outros apresentaram coeficiente acima de 0,80 para vazão muito baixa e muito alta e no posto Santa Branca, com exceção do mês de dezembro, todos os outros meses apresentaram coeficiente acima de 0,80 para vazões muito baixas e muito altas.

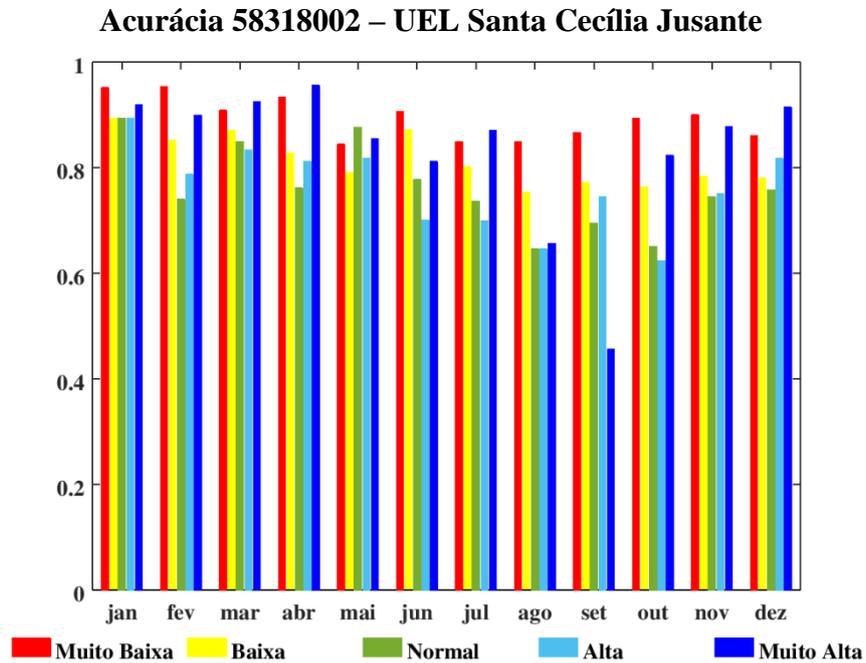
Figura 34: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de verificação.



O resultado para o posto UHE Jaguari Jusante (não mostrado) também foi consideravelmente melhor do que o do período de calibração, mantendo a acurácia acima de 0,80 para vazões muito altas e com considerável melhora nos coeficientes para vazões muito baixas, somente em março o coeficiente ficou abaixo de 0,80.

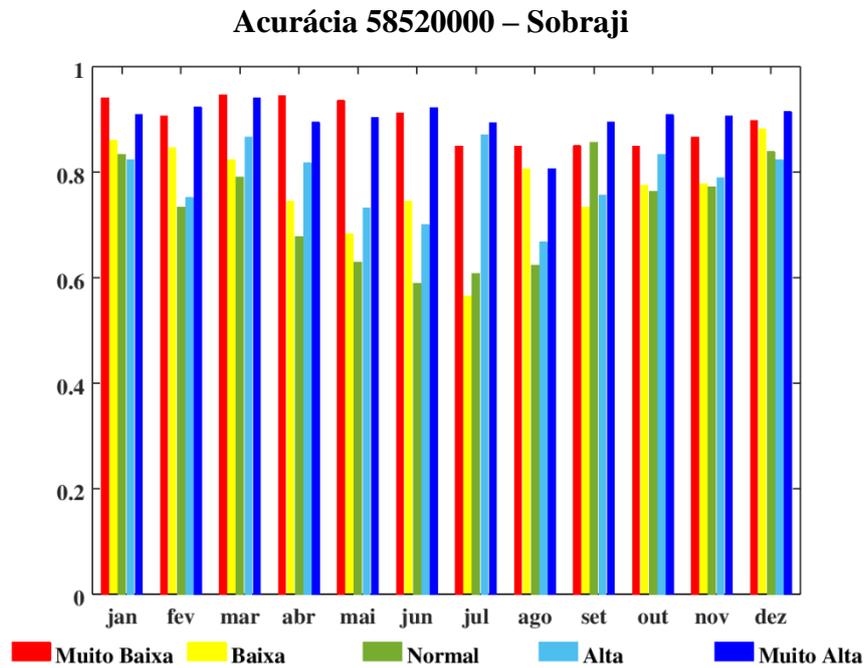
No posto UEL Santa Cecília Jusante (Figura 35) o resultado foi semelhante ao do período de calibração, sendo que somente nos meses de agosto e setembro a acurácia das vazões muito baixas foi abaixo de 0,80 e menor do que no período de calibração. Para todos os outros meses o resultado foi superior a 0,80 para extremos de vazão muito alta e muito baixa.

Figura 35: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de verificação.



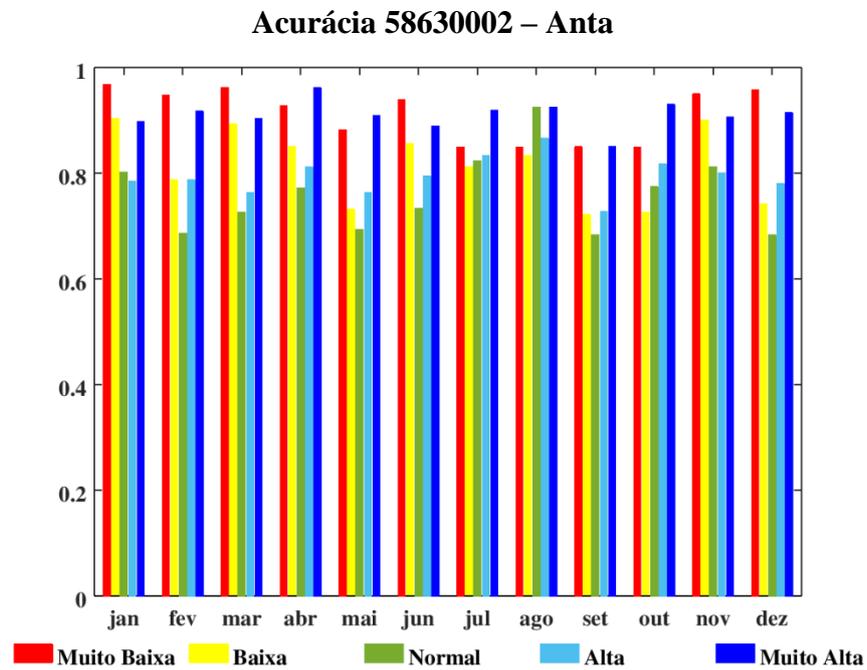
O resultado do posto Sobraji (Figura 36) mostra coeficiente acima de 0,80 para vazões muito altas em todos os meses do ano, sendo a acurácia para vazões muito baixas melhor durante os meses de estiagem, comparada à calibração.

Figura 36: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de verificação.



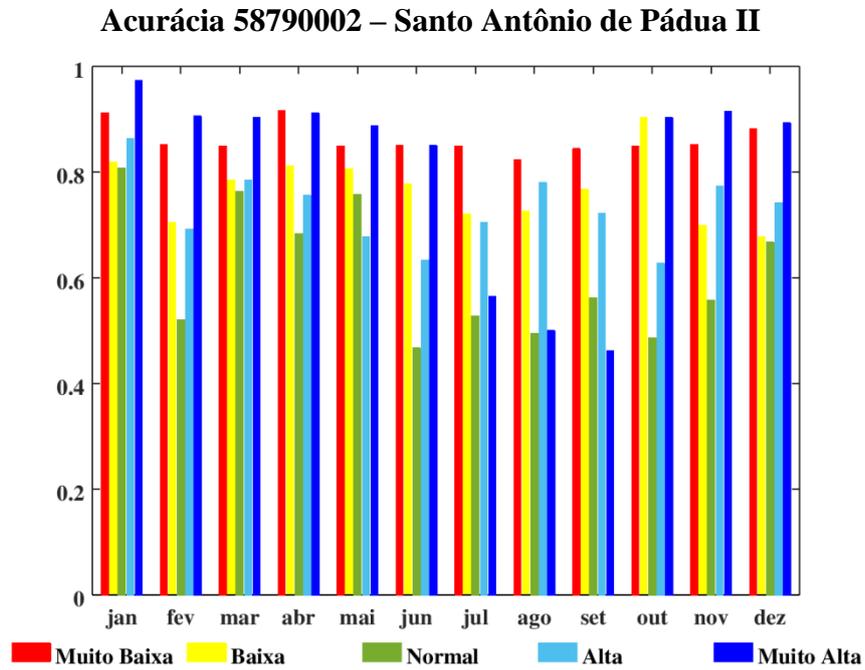
Também com melhora em relação ao período de calibração, a acurácia para os extremos de vazão muito alta e muito baixa do posto Anta (Figura 37) ficou acima de 0,80 em todos os meses. Destaca-se também uma considerável melhora nas classes de vazão intermediárias (baixa, normal e alta) para todos os meses do ano.

Figura 37: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de verificação.



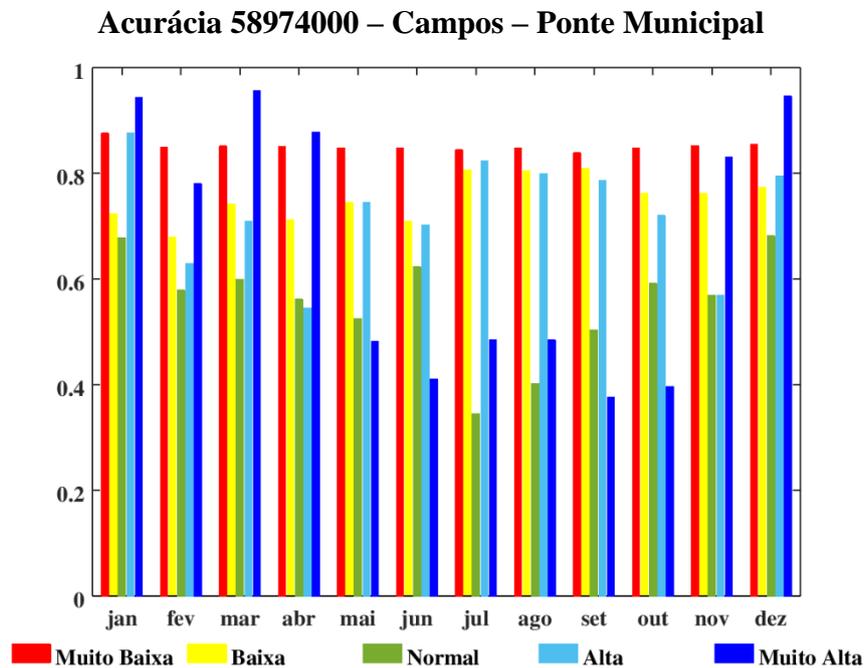
Para o posto Porto Velho do Cunha (não mostrado) houve aumento na acurácia das vazões muito baixas entre novembro e março e diminuição para vazões muito altas entre os meses de julho e setembro, em comparação com o período de calibração. Um padrão semelhante a este é observado para os postos Dois Rios e Santo Antônio de Pádua II (Figura 38).

Figura 38: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de verificação.



Os postos Cardoso Moreira (não mostrado) e Campos – Ponte Municipal (Figura 39) também apresentam uma descrição semelhante ao anterior, porém com redução da acurácia das vazões muito altas entre julho e outubro.

Figura 39: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de verificação



4.3. Simulação e avaliação dos cenários de área de proteção permanente

Nesta seção são mostrados os resultados dos cenários de recomposição da vegetação para os cenários propostos. A Tabela 12 mostra o percentual de cada classe de URH para condição atual da bacia e para cada um dos cenários elaborados. A condição atual possui 48,2% de cobertura agrícola e 44,1% de cobertura florestal e, na condição de maior recomposição da vegetação de margem (1000 m de faixa de APP), a área com cobertura florestal aumenta em 10,8% e a área de cobertura agrícola reduz 9,5% em relação à condição atual da bacia.

Tabela 12: Percentuais de cada unidade de resposta hidrológica (URH) para cada cenário de recomposição de margem. As URHs 1, 2 e 3 são cobertura do tipo Agrícola em solo de permeabilidade baixa, média e alta, respectivamente; 3,4 e 5 são cobertura do tipo Floresta em solo de permeabilidade baixa, média e alta, respectivamente. A URH 7 representa as áreas semi-impermeáveis e a URH número 8 a água.

URH	Original	30	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	8,0%	7,9%	7,9%	7,8%	7,6%	7,5%	7,3%	7,2%	7,0%	6,9%	6,7%	6,6%	6,5%
2	15,1%	15,0%	15,0%	14,8%	14,4%	14,1%	13,7%	13,4%	13,1%	12,7%	12,4%	12,0%	11,7%
3	25,1%	24,9%	24,8%	24,6%	24,1%	23,6%	23,2%	22,7%	22,2%	21,8%	21,4%	20,9%	20,5%
4	11,9%	11,9%	12,0%	12,1%	12,3%	12,5%	12,7%	12,9%	13,1%	13,2%	13,4%	13,6%	13,7%
5	11,9%	12,0%	12,1%	12,3%	12,7%	13,1%	13,5%	13,9%	14,3%	14,7%	15,1%	15,4%	15,8%
6	20,3%	20,5%	20,6%	20,9%	21,4%	21,9%	22,5%	23,0%	23,5%	24,0%	24,5%	25,0%	25,4%
7	6,3%	6,2%	6,2%	6,1%	6,0%	5,8%	5,7%	5,6%	5,4%	5,3%	5,2%	5,1%	4,9%
8	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A avaliação será apresentada a partir da análise comparativa do controle e cenários através da vazão média anual, vazão máxima diária anual, vazão de referência Q_{95} e a frequência de vazões nas categorias MB (muito baixa) e MA (muito alta). A análise foi limitada a avaliação das categorias extremas (MB e MA), pois nestas categorias o teste de acurácia indica que o desempenho do modelo é melhor em relação as outras categorias de vazão, além da importância de se avaliar as alterações nas vazões extremas.

Serão mostrados nesta seção os postos onde a calibração e verificação do modelo foram melhores, pois para estes casos o cenário de controle é mais representativo da condição observada na bacia para o período de estudo.

4.3.1. Vazão média anual

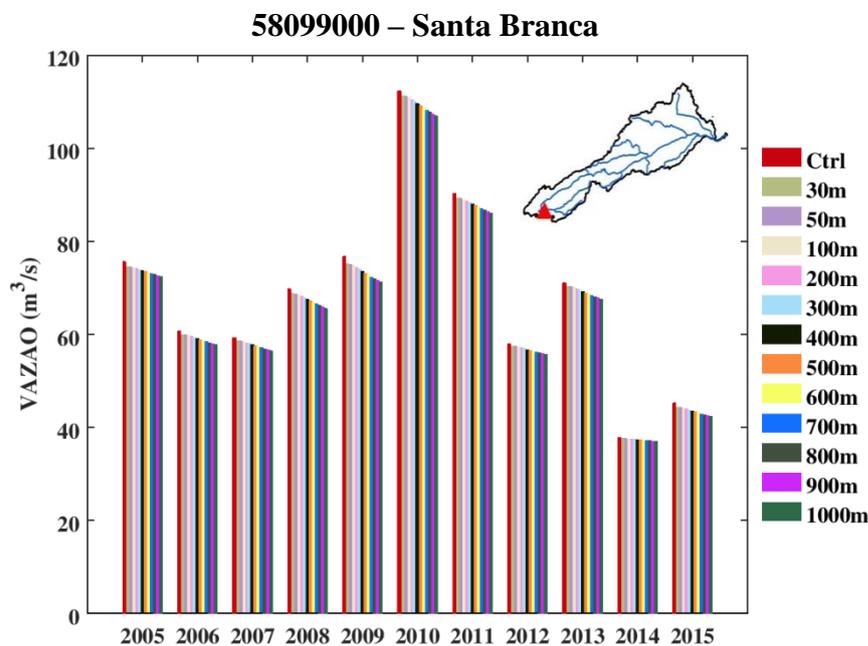
O comportamento da vazão média anual foi semelhante para todos os postos analisados. Os resultados dos cenários indicam redução da vazão média anual em função do aumento da faixa de APP ao longo dos cursos d'água (Figura 40 a Figura 45) e em todos os pontos analisados, a magnitude da redução não é constante ao longo dos anos de simulação dos cenários.

Comparando a magnitude de redução da vazão média nos anos de 2014 e 2015 com a magnitude de redução da vazão média no ano de 2010 é possível notar que as reduções nos

anos de maior vazão média anual, que foram mais chuvosos na bacia, a redução é mais acentuada do que nos anos de menor vazão média anual. Os anos de 2014 e 2015 são anos reconhecidamente como os anos de uma das estiagens mais severas registradas em toda a região sudeste do Brasil, onde está a bacia do rio Paraíba do Sul (MARENGO *et al.*, 2015). Este resultado indica que a resposta hidrológica ao tipo de cobertura existente na margem, em termos de vazão média anual, também é dependente do total precipitado na bacia.

A explicação teórica para isso é que a vegetação aumenta a capacidade de infiltração e de armazenamento por interceptação e então uma parcela maior da precipitação é infiltrada e evaporada reduzindo o escoamento superficial. Nos anos em que o total pluviométrico são excepcionalmente baixos, como é o caso dos anos de 2014 e 2015, a maior capacidade de armazenamento promovida pela vegetação tem pouca influência no regime de vazão da bacia.

Figura 40: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santa Branca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Santa Cecília Jusante.

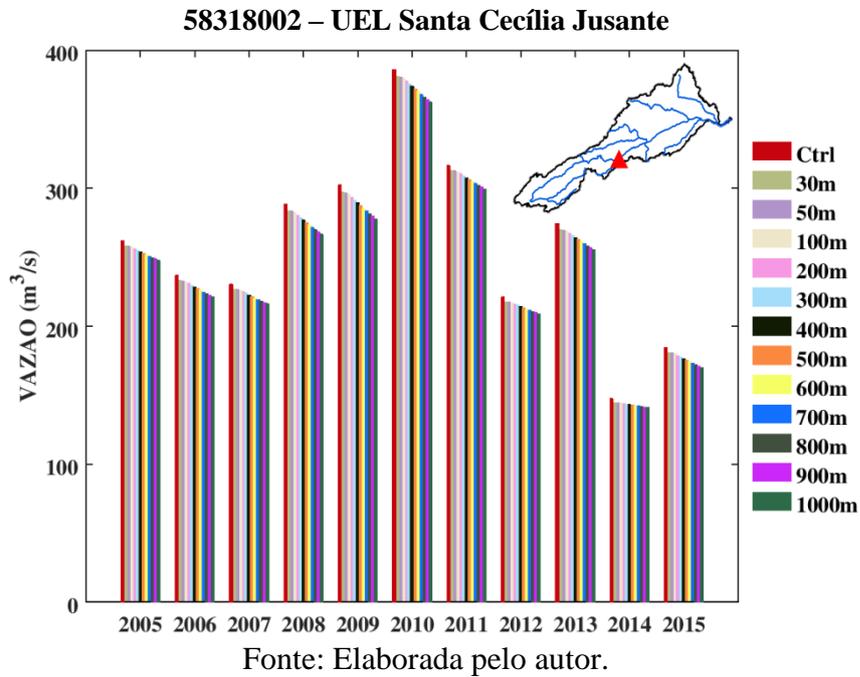


Figura 42: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Sobraji.

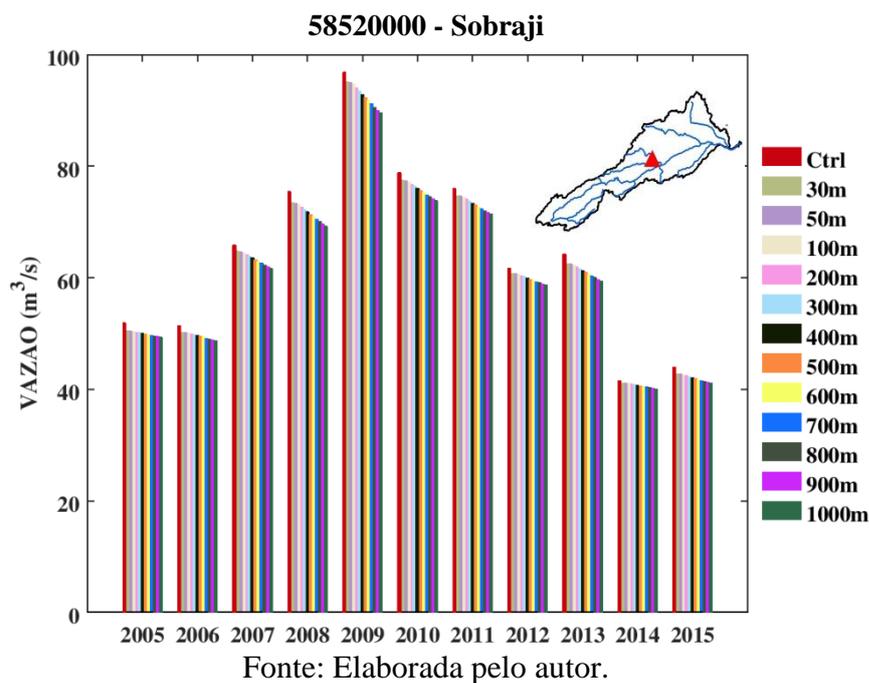


Figura 43: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Anta.

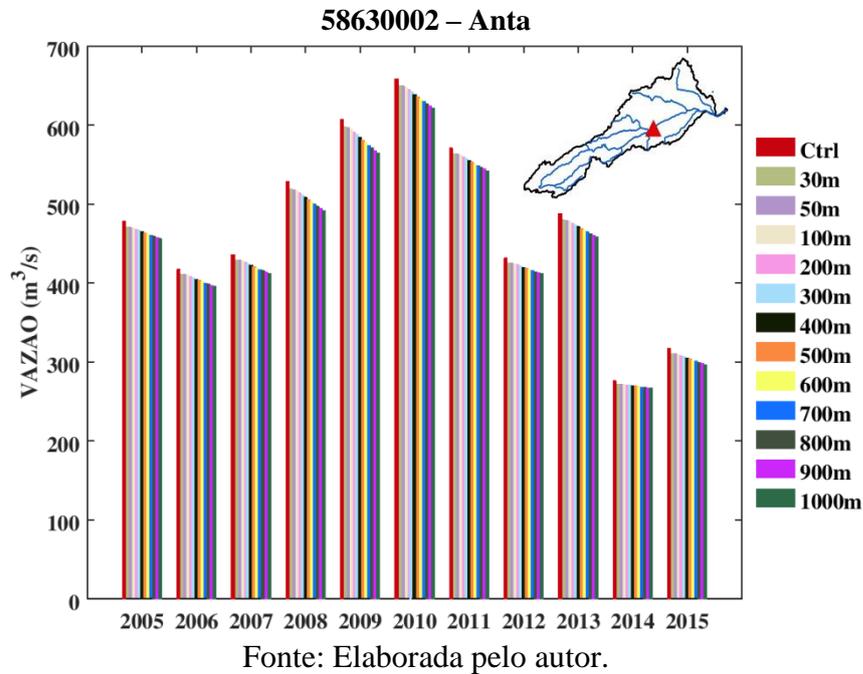


Figura 44: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Sto. Antônio de Pádua II.

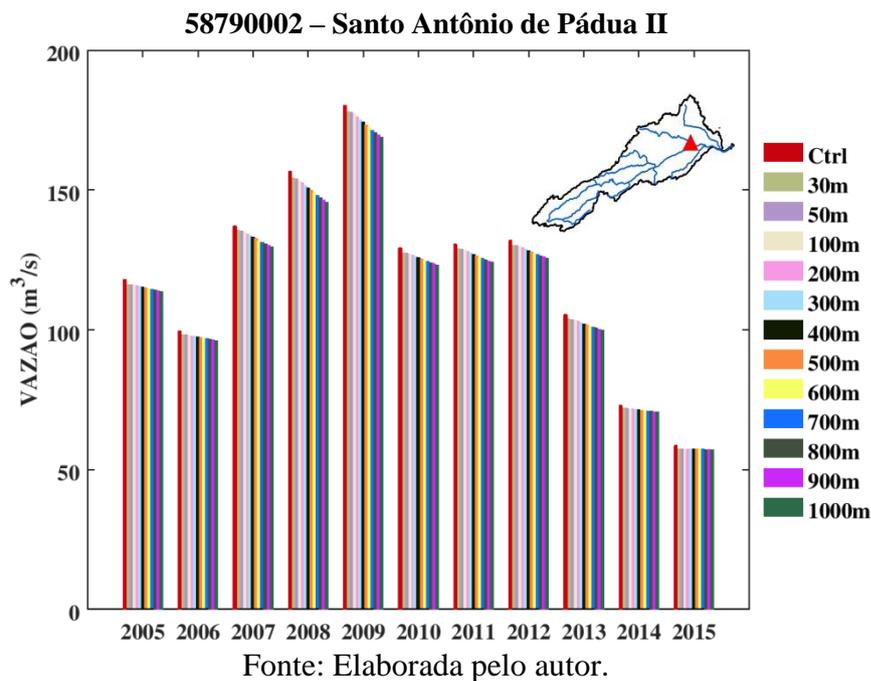
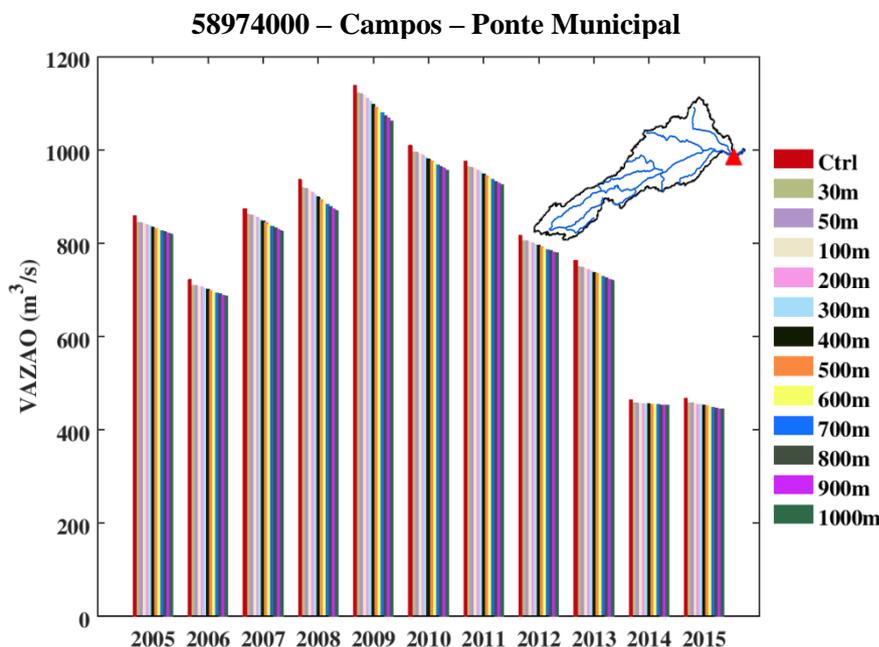


Figura 45: Vazão média anual para o cenário de controle (Ctrl na legenda) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m, no posto Campos – Ponte Municipal.



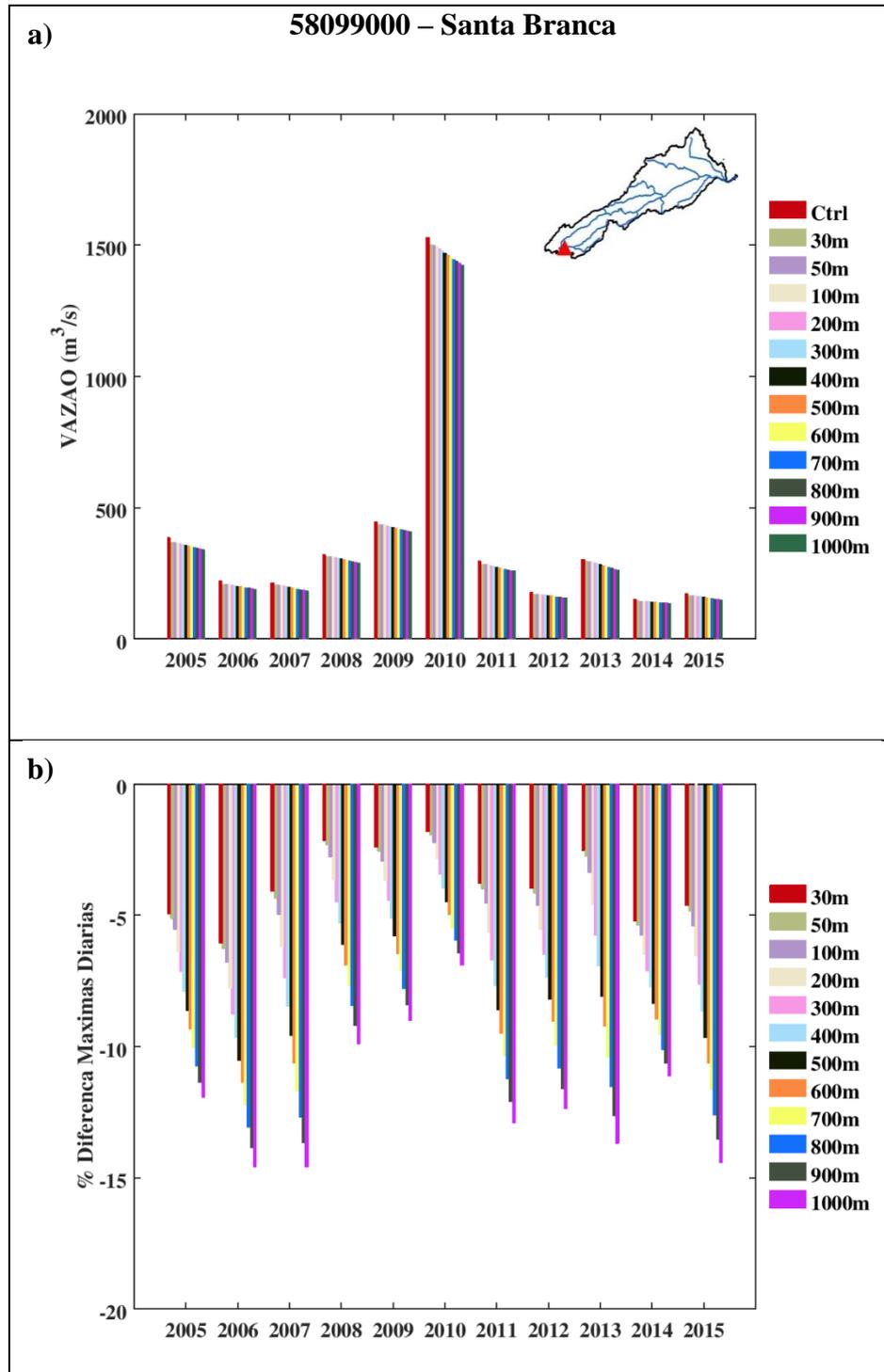
4.3.2. Vazão Máxima Diária Anual

Para cada ano de simulação também foi determinada a vazão máxima diária anual (VMA) tanto para o controle quanto para cada um dos cenários de recomposição da vegetação (Figura 46 a Figura 51).

De um modo geral, verifica-se para os postos avaliados, que a VMA é menor quanto maior a largura da APP e a magnitude da redução é variável anualmente. Nos anos em que a magnitude da VMA é mais alta, o percentual de redução nos cenários é menor, enquanto que quando a VMA é mais baixa, a redução é percentualmente maior. Este resultado é coerente, pois as condições de drenagem da bacia são preponderantes na atenuação de picos em eventos de cheia de menor porte enquanto que em cheias excepcionais o efeito de atenuação dos picos é menor (TUCCI e CLARKE, 1997).

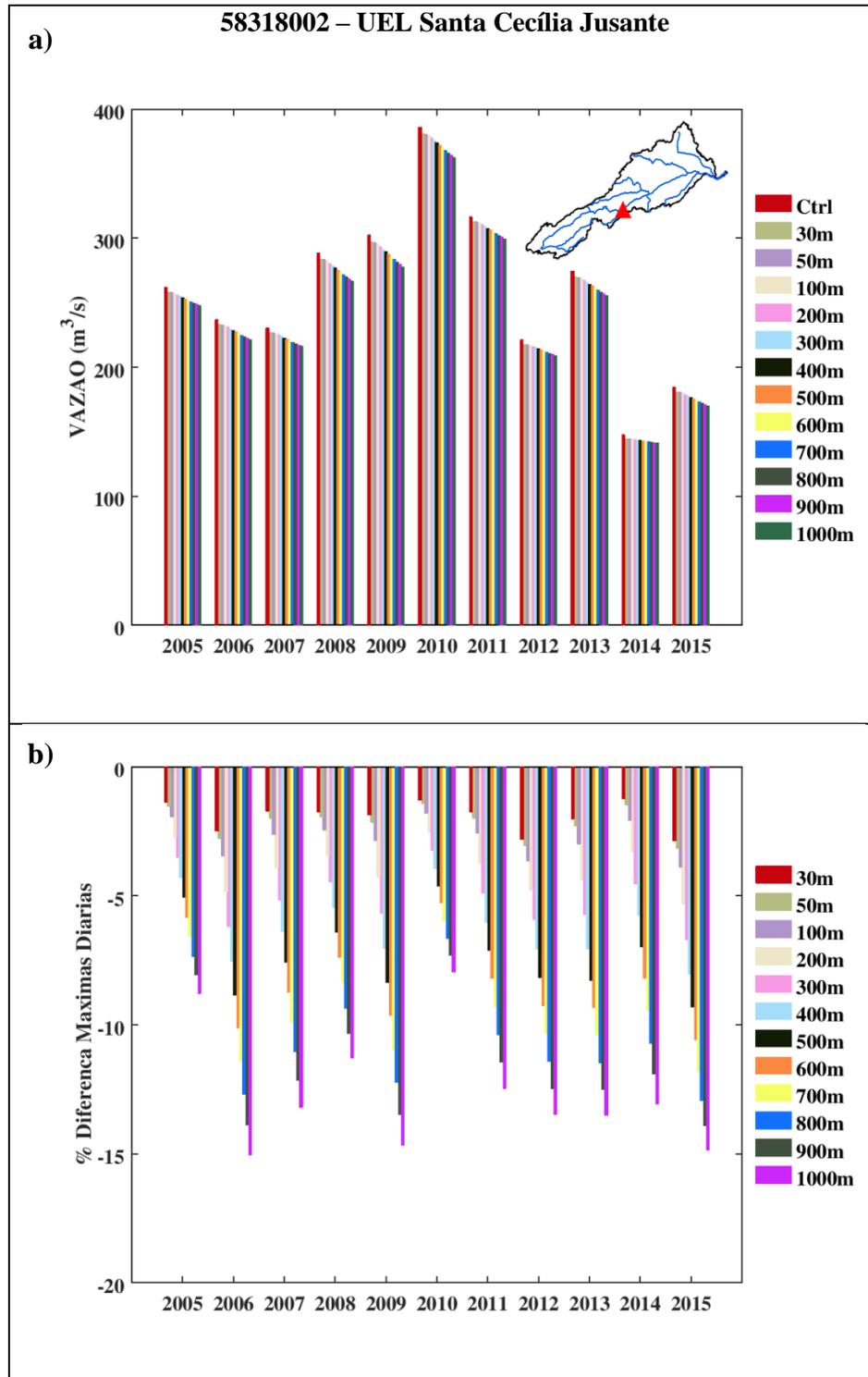
Os posto Sobragi, localiza no rio Paraibuna, na parte média da bacia apresenta um maior percentual de redução para cenários de maior largura de APP (Figura 48).

Figura 46: Vazão máxima anual (a) para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m e 1000m no posto Santa Branca. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



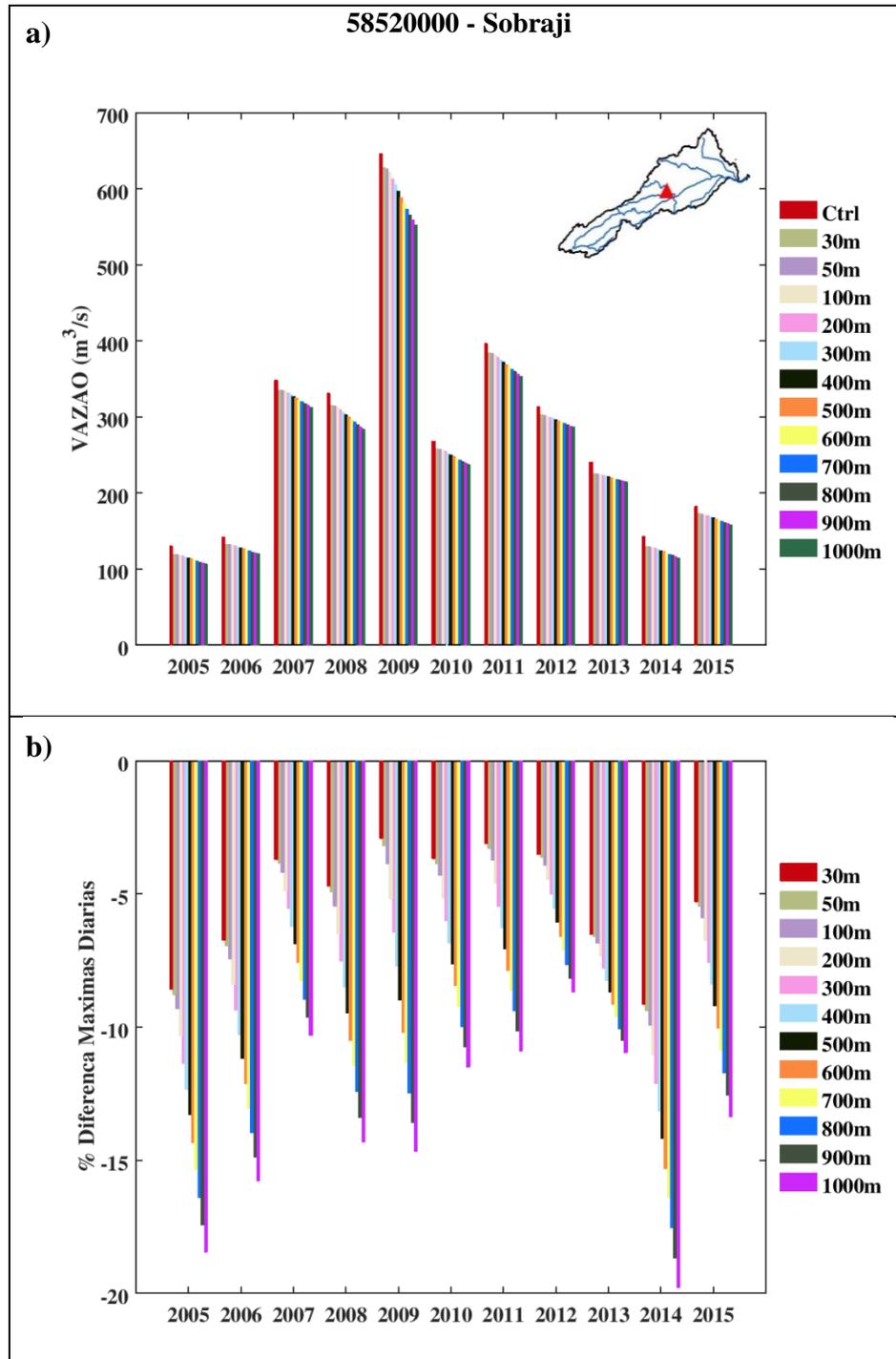
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m e 1000m no posto UEL Santa Cecília. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



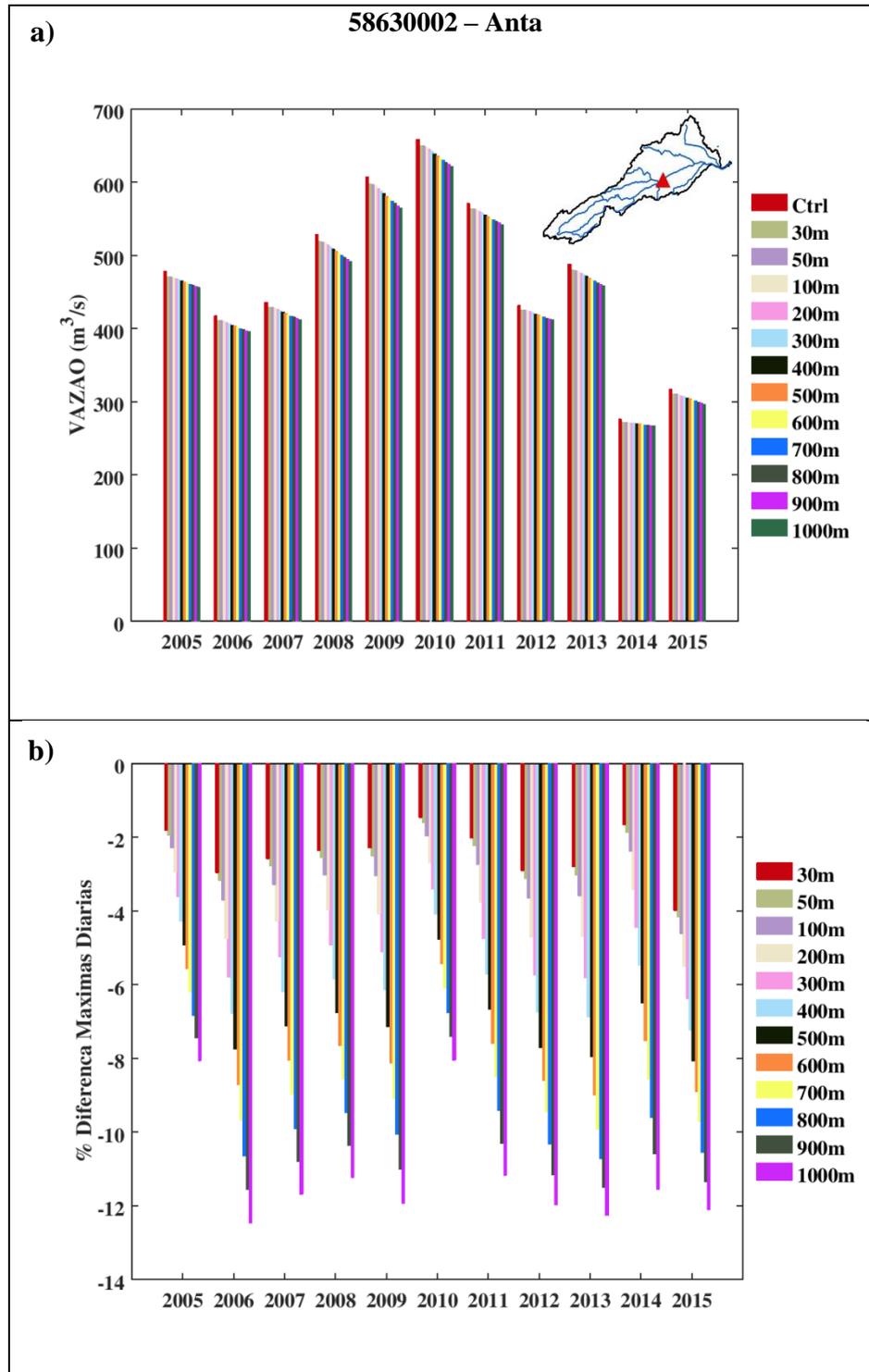
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Sobraji. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



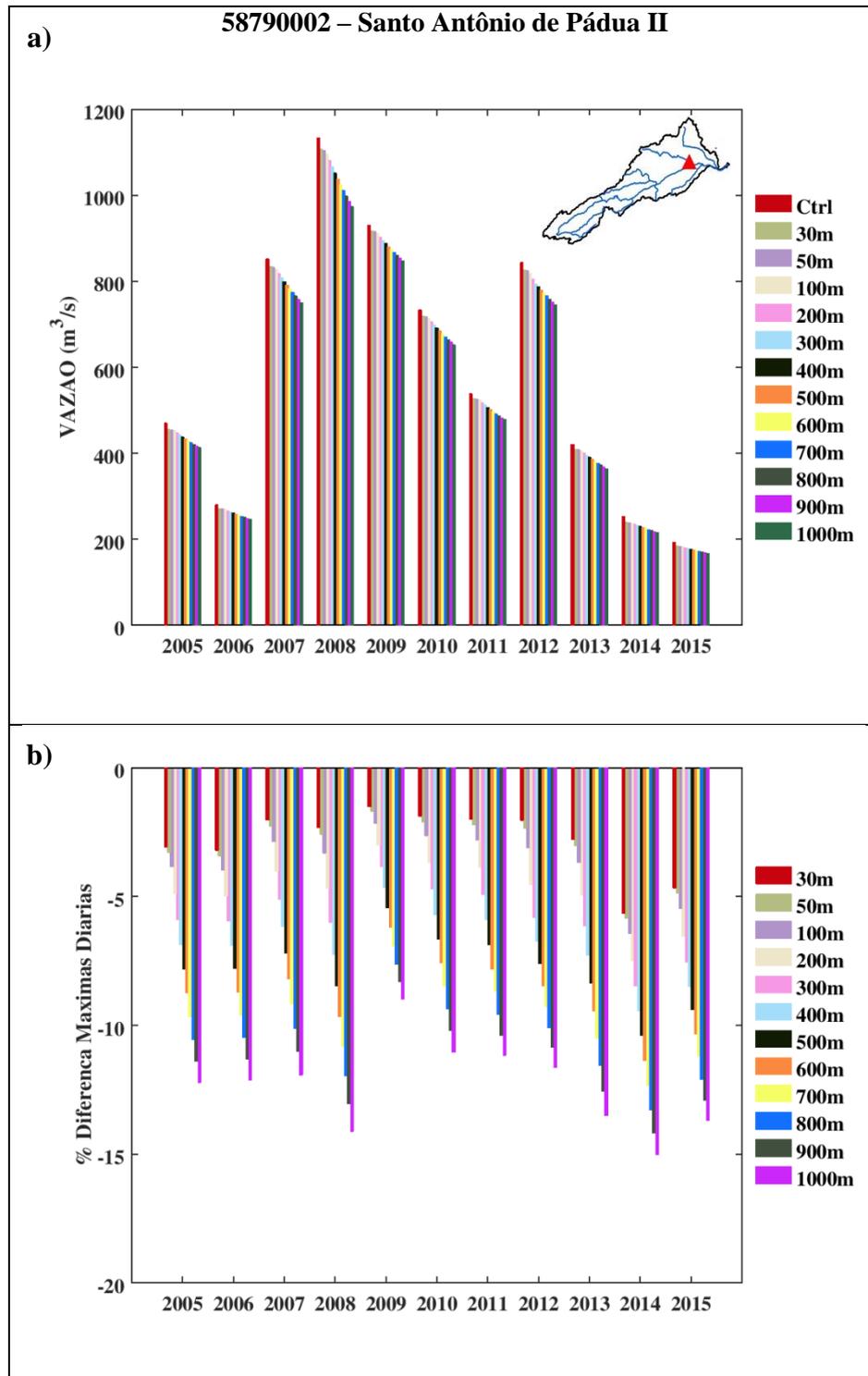
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Anta. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



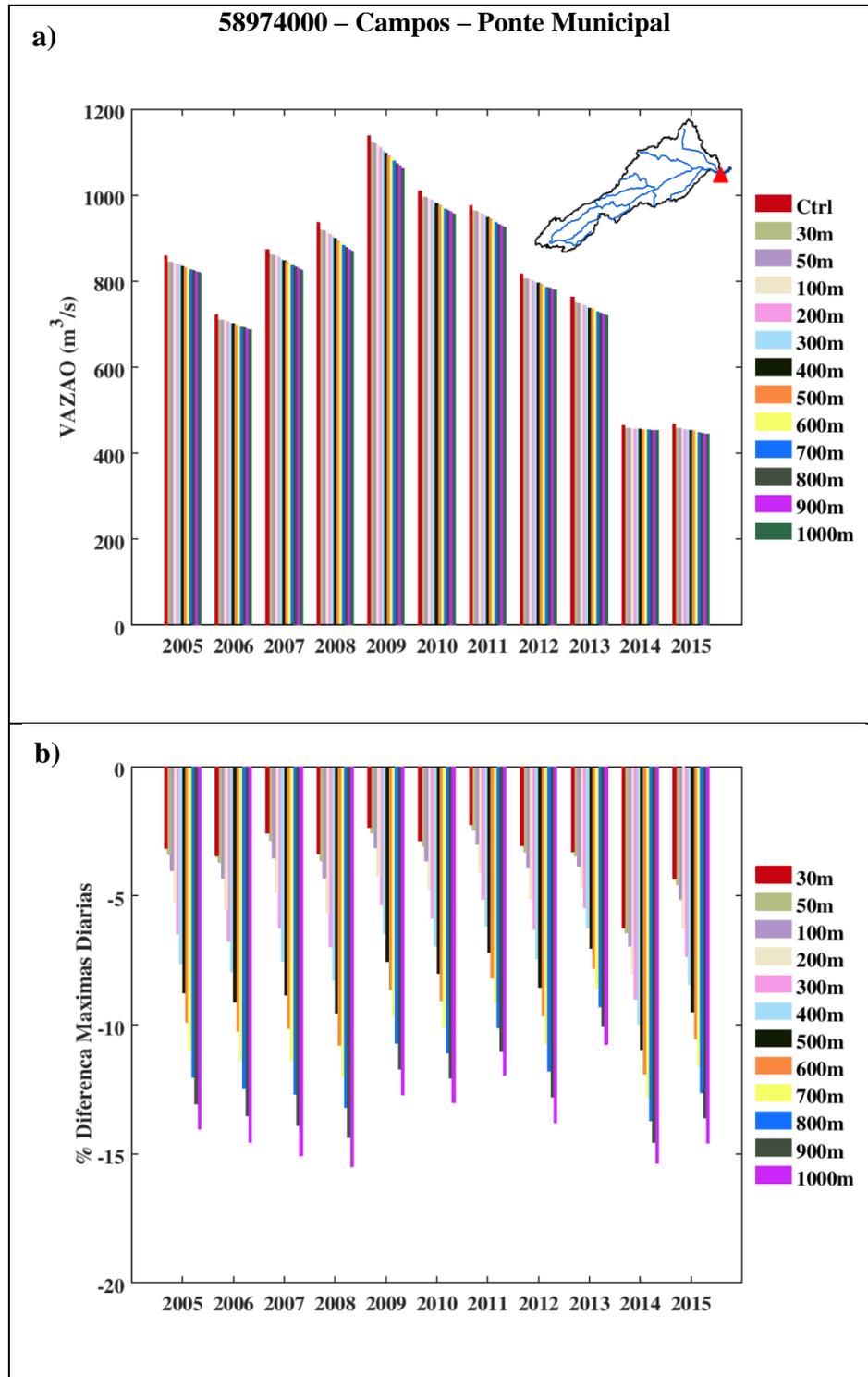
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santo Antônio de Pádua II. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51: Vazão máxima anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Campos. Percentual de redução em relação ao cenário de controle (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3. Vazão Q_{95}

A vazão de referência Q_{95} é utilizada em diversos Estados como referência para outorga do uso de água e se refere a vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo para um determinado ponto de monitoramento fluviométrico. Neste trabalho foi determinado o valor da Q_{95} para cada ano de simulação (Figura 52 a Figura 57) e a Q_{95} do período todo (2005 a 2015), tanto no controle quanto nos cenários de recomposição da vegetação.

Para a Q_{95} , os resultados foram mais variados em relação aos anteriores. No posto Santa Branca (alto Paraíba do Sul) observa-se que entre o controle e os cenários há uma diferença inicial positiva que ocorre em todos os anos de avaliação. A resposta da Q_{95} não apresenta um padrão como nos casos anteriores, em alguns anos a resposta é de aumento em função do aumento da área de vegetação ripária (2006, 2007, 2008, 2010, 2011), nos anos de 2005, 2012, 2013, 2014 e 2015 a resposta é muito semelhante em todos os cenários e no ano de 2009 a resposta é de redução da Q_{95} em função do aumento da área de vegetação. Para o posto Sobraji o resultado foi semelhante ao apresentado no posto Santa Branca.

Nos postos UEL Santa Cecília e Anta (trecho médio da bacia) a diferença inicial em relação ao cenário de controle é negativa, porém a tendência de aumento do valor da Q_{95} em função do aumento da área de vegetação faz com que sejam iguais ou maiores do que no cenário de controle. Ainda assim, as variações em relação ao cenário de controle são pequenas. Para o posto UEL Santa Cecília, a maior variação (2009) indica aumento de aproximadamente 3% em relação ao cenário de controle e no posto Anta o ano com maior variação é 2010, indicando um aumento de aproximadamente 4% no valor da Q_{95} em relação ao cenário de controle.

A comparação da Q_{95} no cenário de controle com os cenários de recomposição para o posto Santo Antônio de Pádua II indica aumento da Q_{95} em função do aumento da área de vegetação ripária. Em 2006, 2008 e 2013 a Q_{95} no cenário de controle é maior do que os primeiros cenários e, à medida que a largura da faixa de vegetação ripária aumenta, o valor da Q_{95} dos cenários igualam e superam a Q_{95} do cenário de controle. Nos demais anos a Q_{95} é maior já nos primeiros cenários.

Para o posto Campos, o resultado também indica aumento da Q_{95} em função do aumento da área de vegetação ripária, ainda assim com incrementos pequenos em relação ao cenário de controle, o ano com diferenças mais acentuadas é 2007 indicando um aumento de 3% (cenário de 30m) a 5% (cenário de 1000m).

Figura 52: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santa Branca.

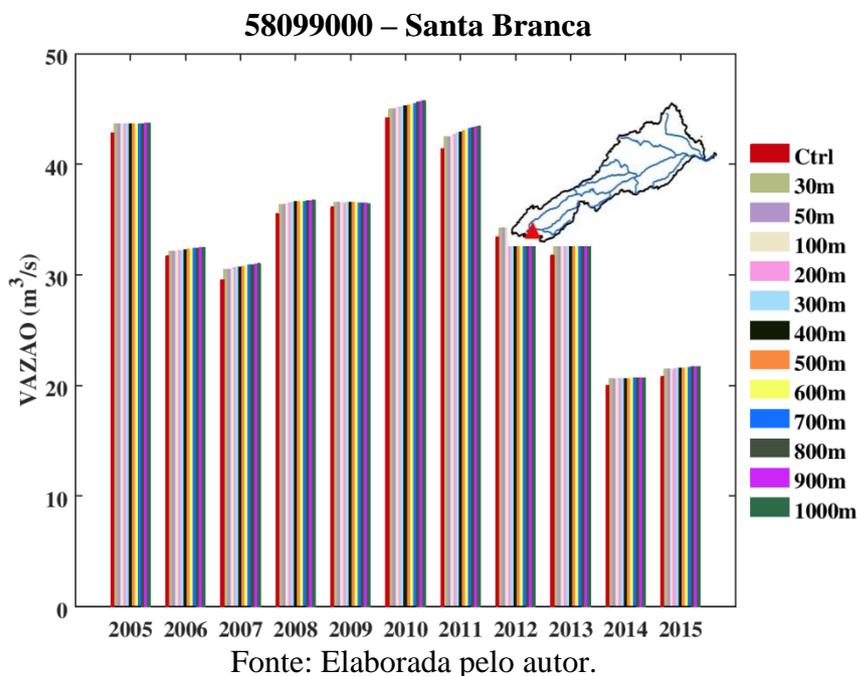


Figura 53: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto UEL Santa Cecília.

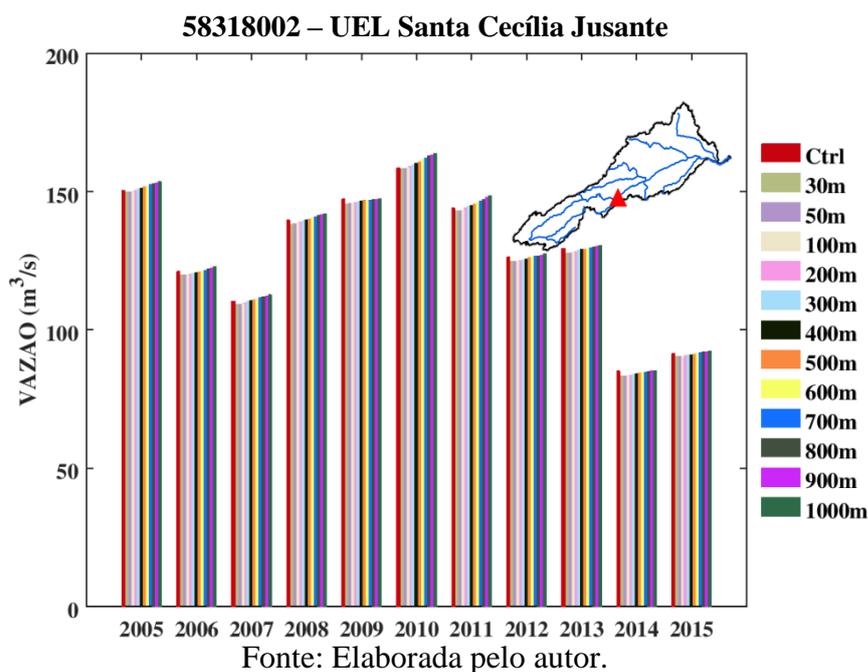
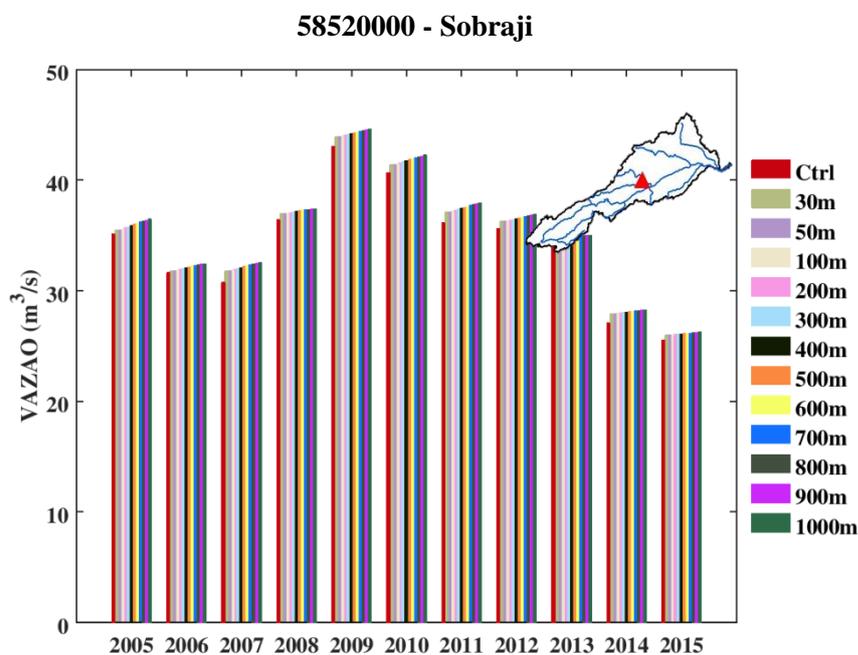
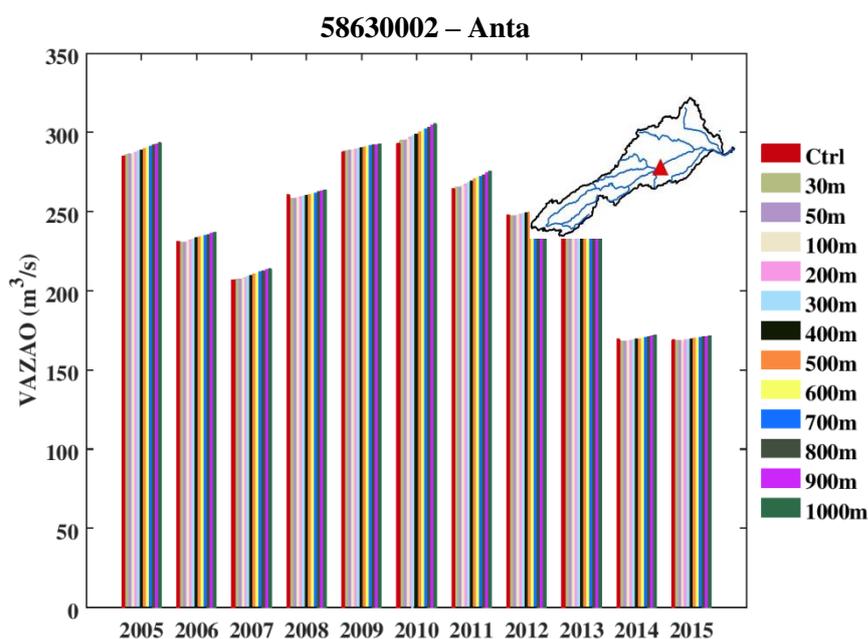


Figura 54: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Sobraji.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Anta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Santo Antônio de Pádua II.

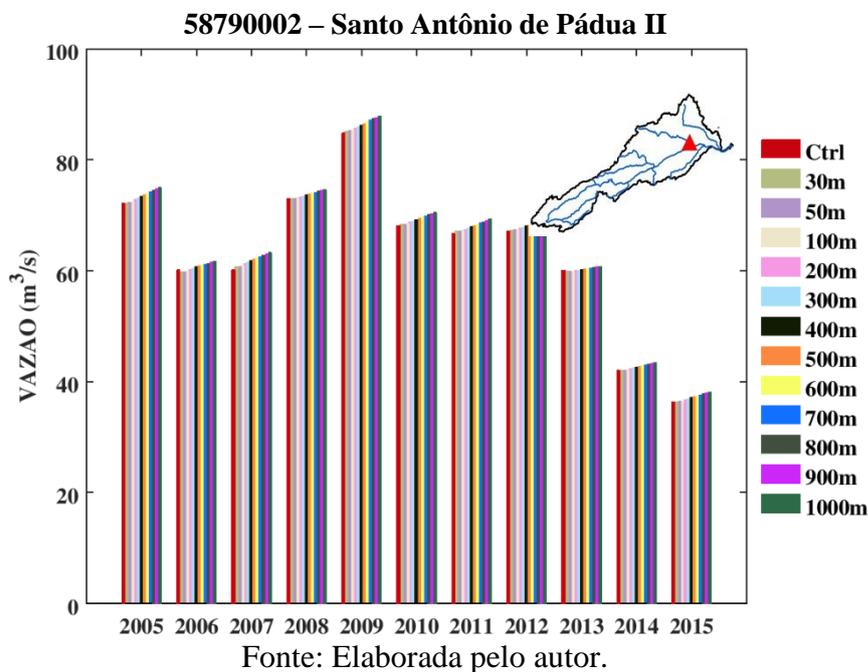
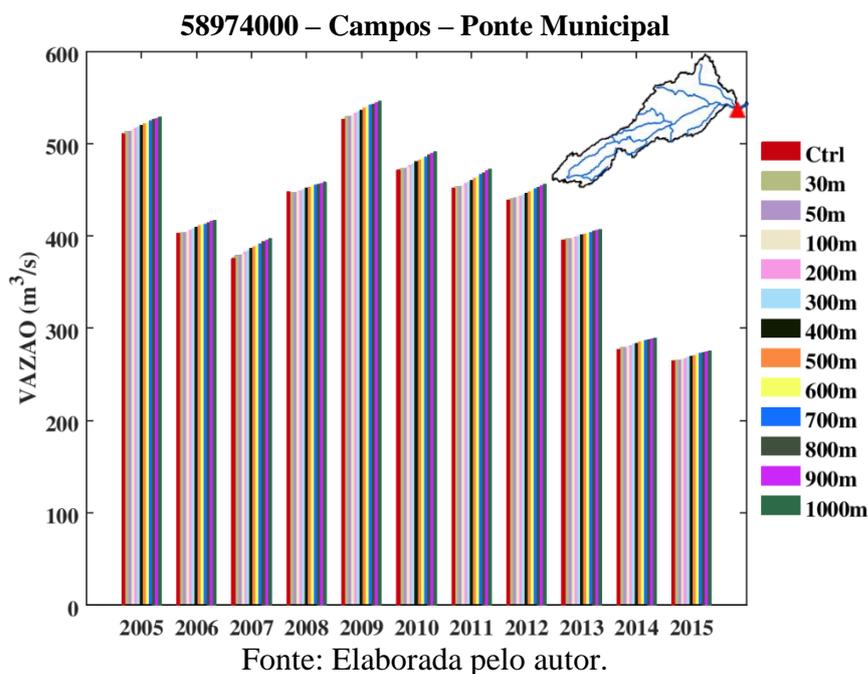


Figura 57: Vazão Q95 anual para o cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária de 30m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900 m e 1000m no posto Campos.



Os resultados obtidos para Q_{95} em cada um dos anos de simulação é divergente do resultado encontrado em outros trabalhos utilizando modelos distribuídos para simulação de mudança de cobertura de superfície, que indicam que a recomposição da vegetação tem impacto de redução das vazões mínimas (VIOLA, 2008; CARAM, 2010) e conseqüentemente na vazão Q_{95} (BAYER, 2014). No entanto, trabalhos em bacias experimentais apontam para uma condição semelhante à observada no presente estudo, onde a vazão de base é maior na situação em que há cobertura florestal (NEVES, 2011). De acordo com Vasconcelos (2017), as características hidrogeológicas das áreas, somadas ao tipo de cobertura e de solo, condicionam a resposta hidrológica. Especificamente sobre a capacidade de manutenção de escoamento de base, o autor destaca que latossolos e cambissolos sobre aquíferos fraturados (que é a condição da bacia do rio Paraíba do Sul) são mais favoráveis para a manutenção das vazões de base.

Os resultados da vazão Q_{95} foram analisados calculando a Q_{95} para o período todo (2005 a 2015) para o controle e para cada um dos cenários propostos (Figura 58). Para este caso, o posto Santa Branca indica que o valor da Q_{95} é maior para os cenários, que possuem valor praticamente constante para todas as faixas de vegetação, do que na simulação de controle. O posto Sobraji apresenta resultado semelhante ao posto Santa Branca.

No posto UEL – Santa Cecília o resultado é diferente e indica que o valor de simulação do controle é maior que os primeiros cenários, sendo que o valor da Q_{95} aumenta em função do aumento da faixa de APP, ainda assim, mesmo no cenário que considera 1000 m de faixa de vegetação o valor da Q_{95} ainda é menor do que no cenário de controle.

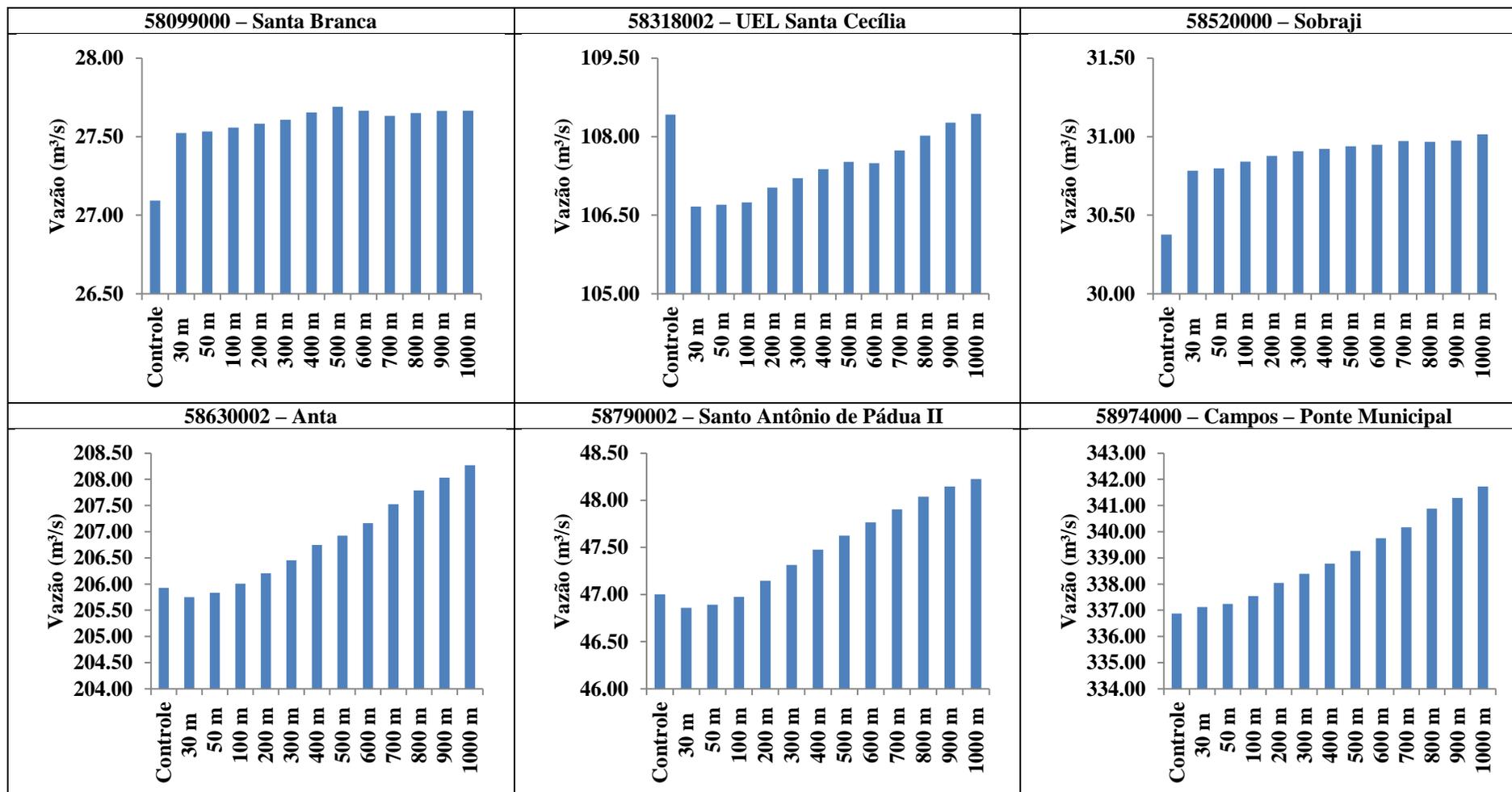
Os dois postos seguintes, Anta e Santo Antônio de Pádua II, têm comportamento similar, indicando que o valor da Q_{95} aumenta em função do aumento da faixa de APP, sendo que nos primeiros cenários a Q_{95} é menor do que no cenário de controle e é superado para faixas de vegetação maiores e no posto Campos – Ponte Municipal o comportamento é semelhante, porém com o valor da Q_{95} já maior que o controle no primeiro cenário.

Convém destacar que os resultados desta seção, mostram variações que são muito pequenas em relação ao comportamento do cenário de controle, onde os maiores percentuais de variação em relação à simulação de controle são da ordem de 5% a 6% de diferença.

Os resultados com variações pequenas em relação ao cenário de controle devem ser analisados com mais cautela, uma vez que o cenário de controle é uma representação do regime hidrológico atual da bacia. Convém destacar ainda que ambos os extremos (máximos e mínimos) são pontos de maiores incertezas no monitoramento hidrológico e que implicam em

incertezas na calibração do modelo e, especificamente para o modelo aplicado, a representação de escoamento de base é a parte do modelo com maiores simplificações, o que acrescenta incerteza no resultado da simulações para vazões baixas.

Figura 58: Vazão Q95 para todo o período de simulação, no cenário de controle (Ctrl) e nos cenários que consideram recomposição da vegetação ripária.



Fonte: Elaborada pelo autor.

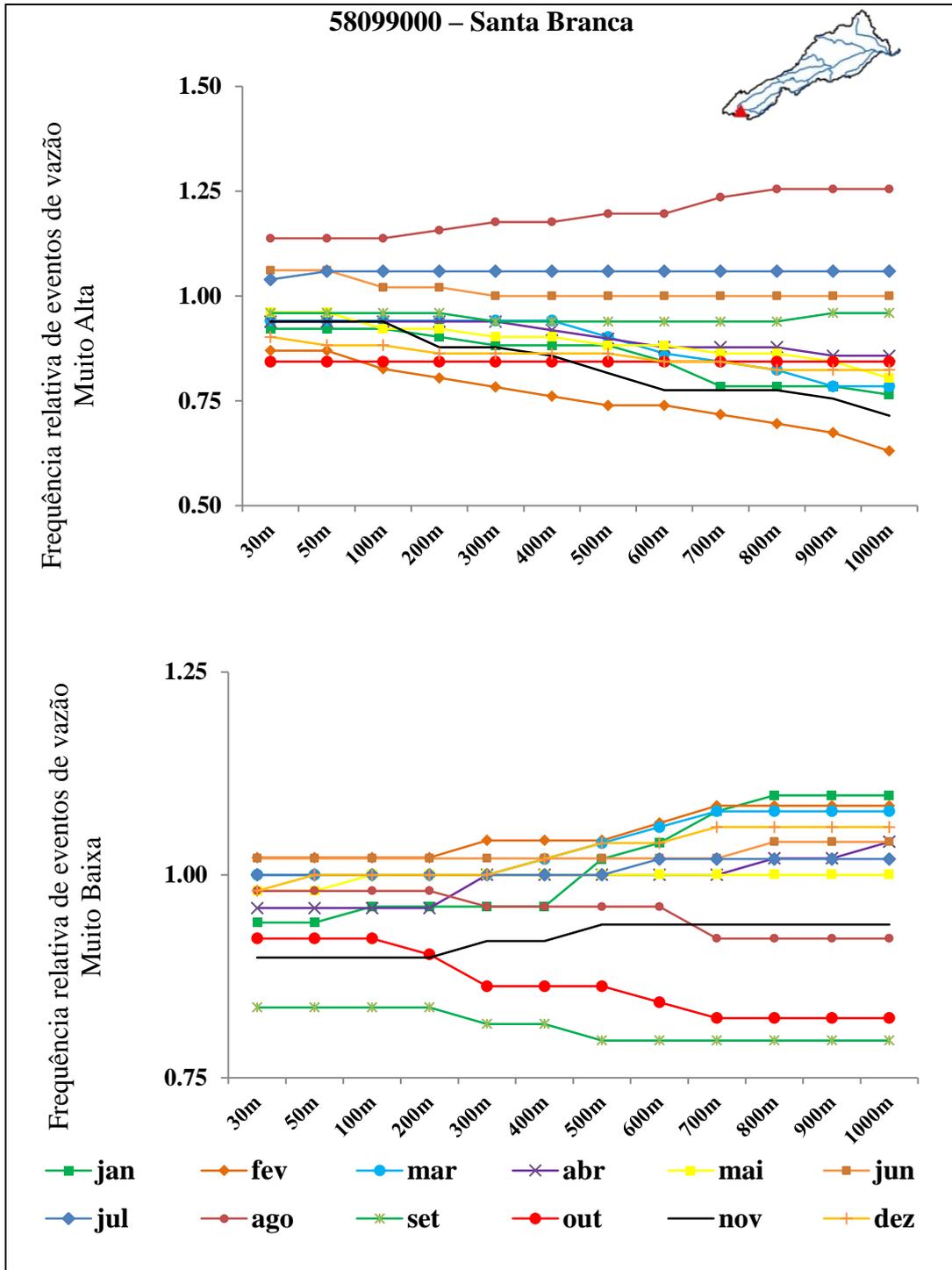
4.3.4. Frequência de Extremos de Vazão

Nesta seção são apresentados os resultados da comparação entre a frequência de eventos de vazão muito alta e muito baixa, considerando que eventos de vazão muito alta, correspondem a vazões diárias com valores maiores do que o quantil 85%, e eventos de vazão muito baixa, referem-se as vazões diárias inferiores ao quantil 15%. Destaca-se que os limiares quantílicos foram determinados separadamente para cada mês do ano utilizando as vazões diárias da simulação de controle. A frequência de ocorrência mensal em cada um dos cenários foi comparada com a frequência de ocorrência no controle, baseada em todo o período (2005 a 2015).

Para o posto Santa Branca (Figura 59) a frequência de vazões muito altas diminui em função do aumento da faixa de APP nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro fevereiro e março. Para o mês de janeiro nota-se uma redução mais acentuada entre as faixas de 500 m e 700 m, quando o percentual de redução passa de 12% para 26%. A redução mais acentuada ocorre no mês de fevereiro que indica reduções de 14% (cenário de 30m) a 37% (cenário de 1000m). Os meses de abril, maio, junho também indicam redução em função do aumento da faixa de APP, porém com menor magnitude que os outros meses. No mês de agosto ocorre o inverso, indicando aumento da ocorrência de vazões muito altas em função do aumento da faixa de APP e nos demais meses (julho e setembro) não são notadas reduções ou aumentos expressivos na frequência de vazões muito altas.

A frequência de vazões muito baixas apresenta variações menos expressivas para todos os meses do ano. Em dezembro e janeiro os primeiros cenários indicam redução na frequência de vazões muito baixas (cenário 30m a cenário 400m) e os seguintes aumento na frequência de vazões muito baixas, fevereiro e março possuem comportamento semelhantes e indicam aumento da frequência de vazões muito baixas em função do aumento da faixa de APP. Os meses de abril, maio, junho e julho possuem variações pouco expressivas (até 4%). O mês de agosto apresenta redução de até 8% para as faixas de APP de 1000 m, o mês de setembro apresenta a redução mais acentuada de 16% (cenário 30m) a 20% (cenário 1000m), comportamento semelhante a outubro que indica reduções de 8% a 18% em função do aumento da largura da APP. O mês de novembro indica redução pequena (10%) para os primeiros cenários e o percentual de redução da frequência de vazões muito baixas diminui para os cenários de maior faixa de APP chegando a 4% (cenário 500 a cenário 1000m).

Figura 59: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Santa Branca.

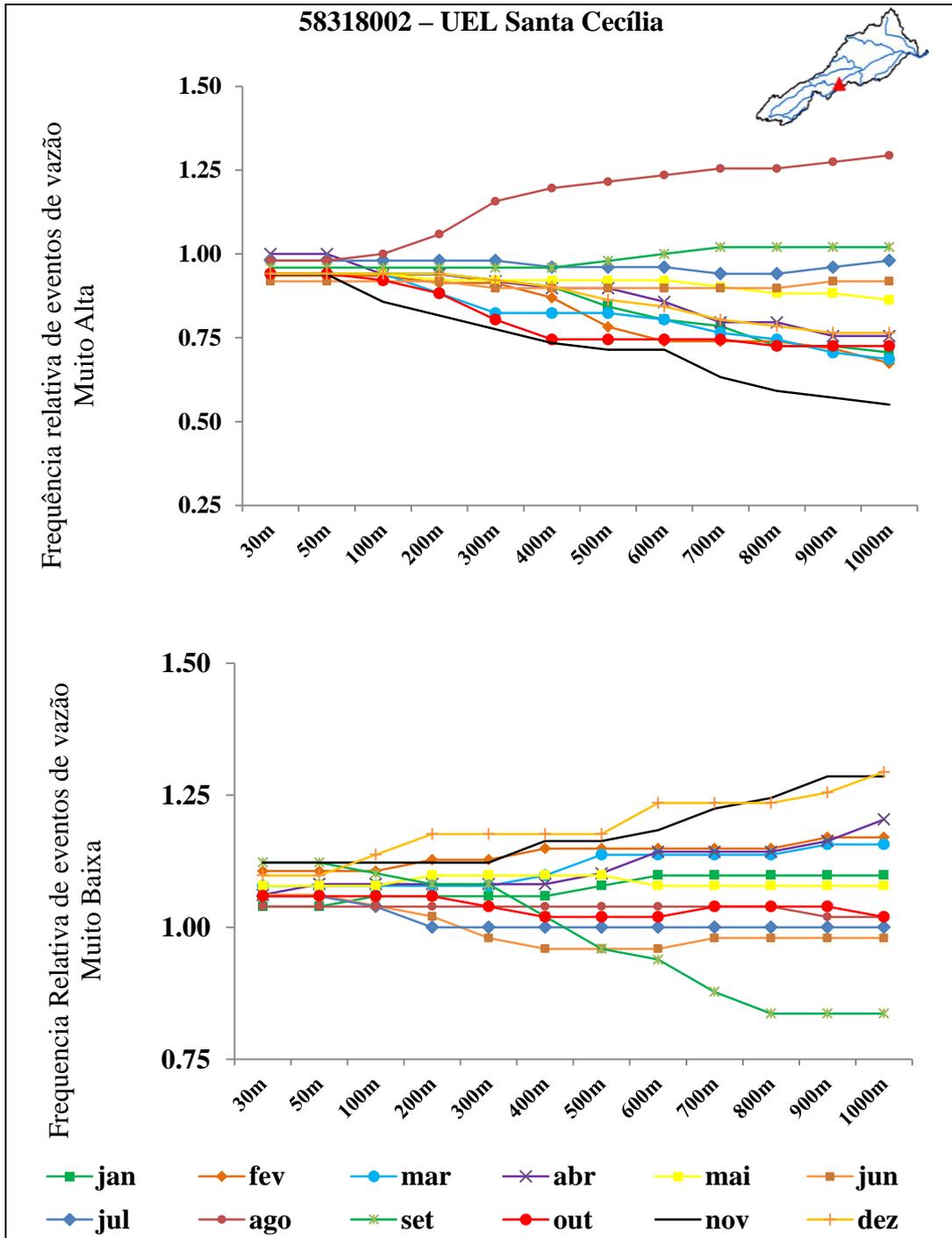


Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento das vazões muito altas do posto Santa Cecília (Figura 60) é semelhante ao anterior, indicando nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril redução da frequência de vazões muito altas em função do aumento da faixa de APP, em novembro a redução é acentuada (6% a 45%), os meses de maio e junho também apresentam redução, mas menores que os meses citados anteriormente, os meses de julho e setembro apresentam comportamento igual ao controle e o mês de agosto indica aumento da frequência de vazões muito altas com o aumento da faixa de APP.

Também no posto de Santa Cecília a influência da APP para frequência de vazões muito baixa é menos pronunciado do que o resultado das vazões muito altas. Os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril mostram aumento da frequência de vazões muito baixas em função do aumento da faixa de vegetação de margem, sendo este aumento mais pronunciado em novembro e dezembro, em maio há um aumento de 8% na frequência para todos os cenários, junho indica aumento (6%) na frequência nos primeiros cenários para redução de até 4%, em julho há aumento pouco expressivo nos cenários de 30 e 50 metros de faixa de APP (2%) e resultados iguais ao controle nos cenários seguintes. Agosto também apresenta resultado igual ao controle para os cenários, setembro passa de aumento de 12% para redução de 16% na frequência de vazões muito baixas e outubro apresenta aumento entre 6% e 2%.

Figura 60: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto UEL Santa Cecília.

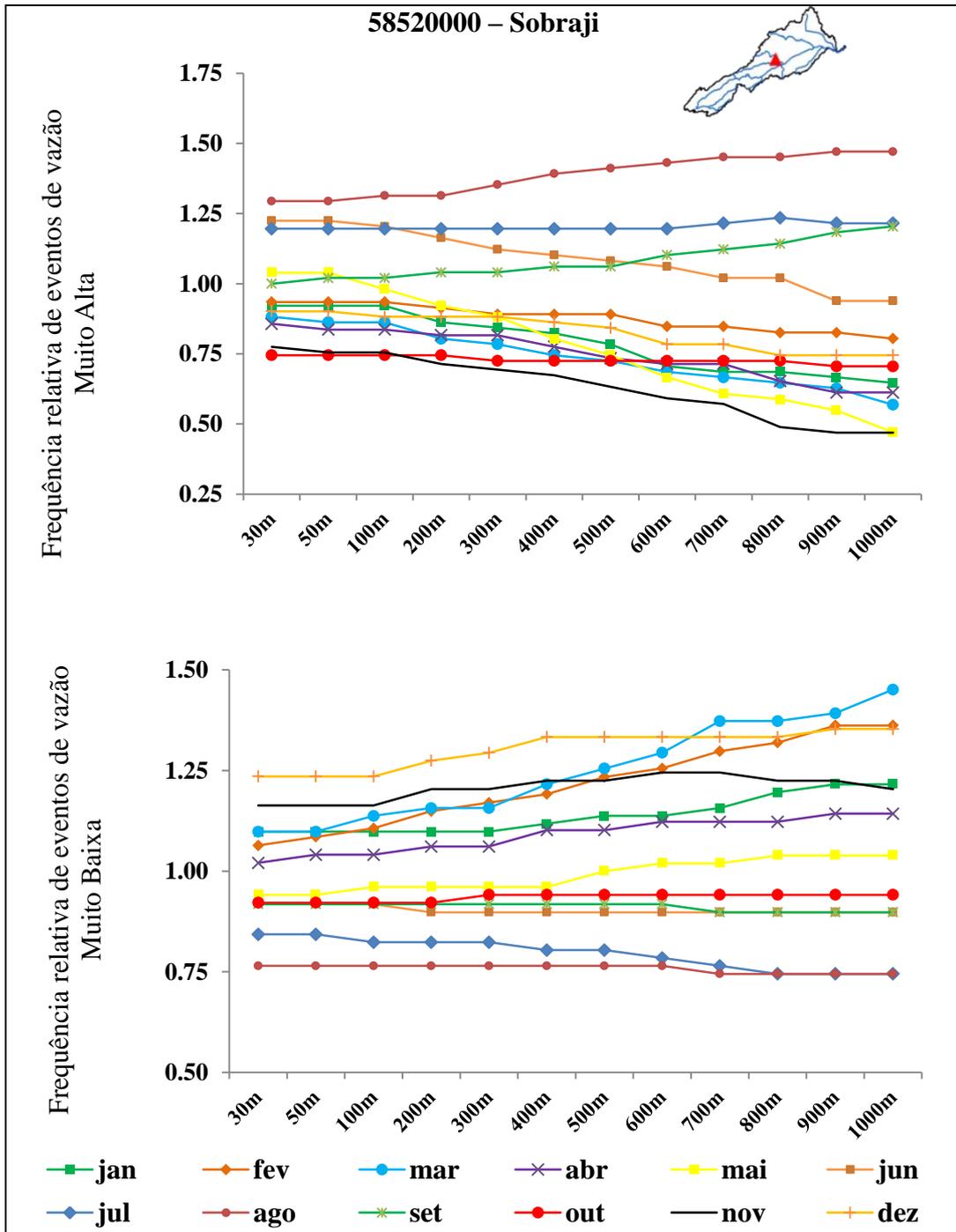


Fonte: Elaborada pelo autor.

O posto Sobraji (Figura 61) indica redução da frequência de vazões muito alta com o aumento da faixa de APP nos meses de outubro, novembro (mês com redução mais acentuada), dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio. Em junho os primeiros cenários mostram aumento na frequência de vazões muito alta e, à medida que as faixas de APP aumentam, o percentual diminui e termina indicando redução de 7% no cenário que considera a faixa de 1000 m. No mês de julho mostra aumento de 20% constante para todos os cenários e em agosto e setembro há aumento frequência de vazões muito altas em função do aumento da faixa de APP.

Para a frequência de vazões muito baixas o posto Sobraji apresenta aumento na frequência em função do aumento da faixa de vegetação marginal para os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril. Neste posto, de modo geral, o aumento é mais acentuado do que nos anteriores e, também diferente dos anteriores, o mês de outubro aparece indicando redução na frequência de vazões muito baixas. Os meses de junho, julho, agosto e setembro também indicam redução na frequência de extremos de vazão muito baixa em função do aumento da faixa de APP e o resultado do mês de maio fica próximo do controle, indicando variação que vai de redução de 6% para aumento de 4% na frequência extremos de vazão muito baixa.

Figura 61: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Sobraji.

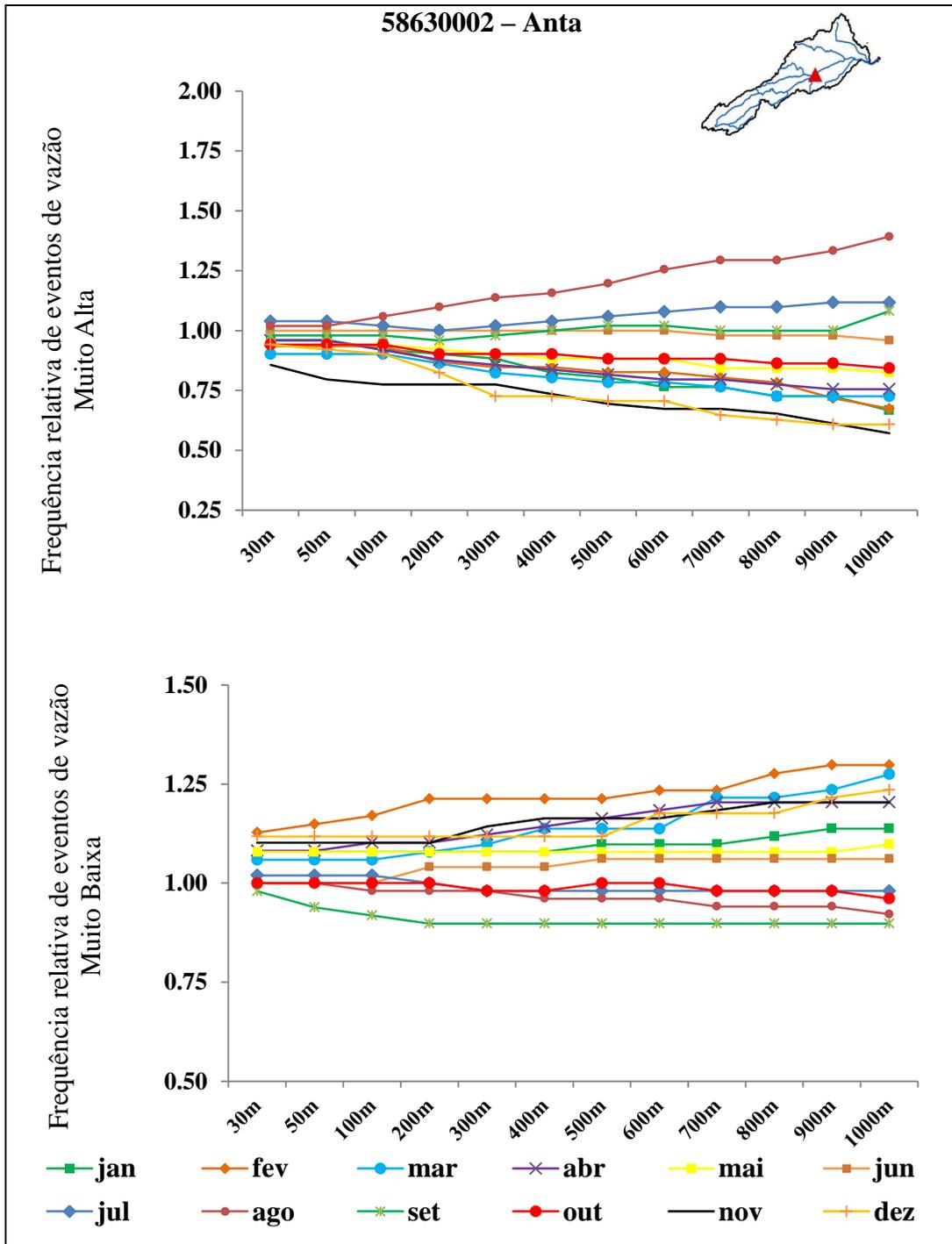


Fonte: Elaborada pelo autor.

A frequência de vazões muito alta reduz no posto Anta (Figura 62) em função do aumento da faixa de APP nos meses de outubro, novembro (maior redução), janeiro, fevereiro, março, abril e maio. Os meses de junho e setembro permanecem com frequências iguais ao controle e os meses de julho e agosto apresentam aumento na frequência de vazões muito altas.

Para a frequência de vazões muito baixa, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril apresentam aumento da frequência em função da ampliação da faixa de APP. Maio e junho registram aumento, porém em percentual menores o que os outros meses. Julho e outubro com redução próxima de 2% têm frequências de eventos de vazão muito baixa semelhante ao controle. No mês de agosto a redução na frequência de vazões baixas chega a 8% para o cenário de 1000 m. Setembro apresenta redução de 10% para faixas de APP a partir de 200 m.

Figura 62: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Anta.

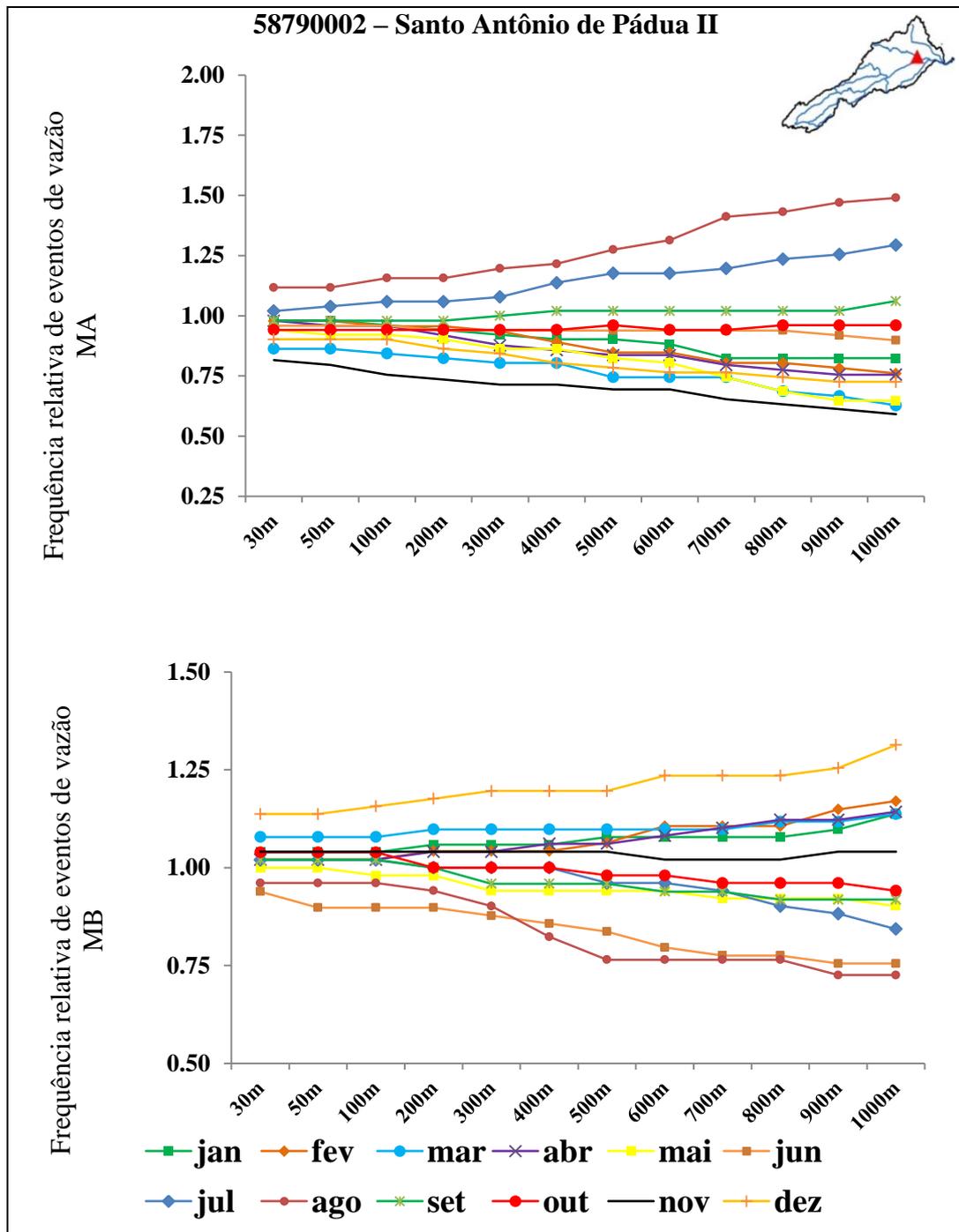


Fonte: Elaborada pelo autor.

No posto Santo Antônio de Pádua II (Figura 63), os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril maio e junho apresentam redução na frequência de vazão muito alta e, também neste posto, novembro é o mês com a redução mais acentuada. Em julho e agosto frequência de eventos de vazão muito alta aumenta, sendo em agosto o maior aumento e o mês de setembro tem frequência igual ao controle.

A frequência de vazões muito baixas para este posto apresenta aumento em função da ampliação da faixa de APP para os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril, e redução em função da ampliação da faixa de APP para os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro. O mês de novembro apresenta aumento variando entre 3% e 4% , ou seja, com frequência de ocorrência ainda muito próximas à frequência do controle.

Figura 63: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Santo Antônio de Pádua II.

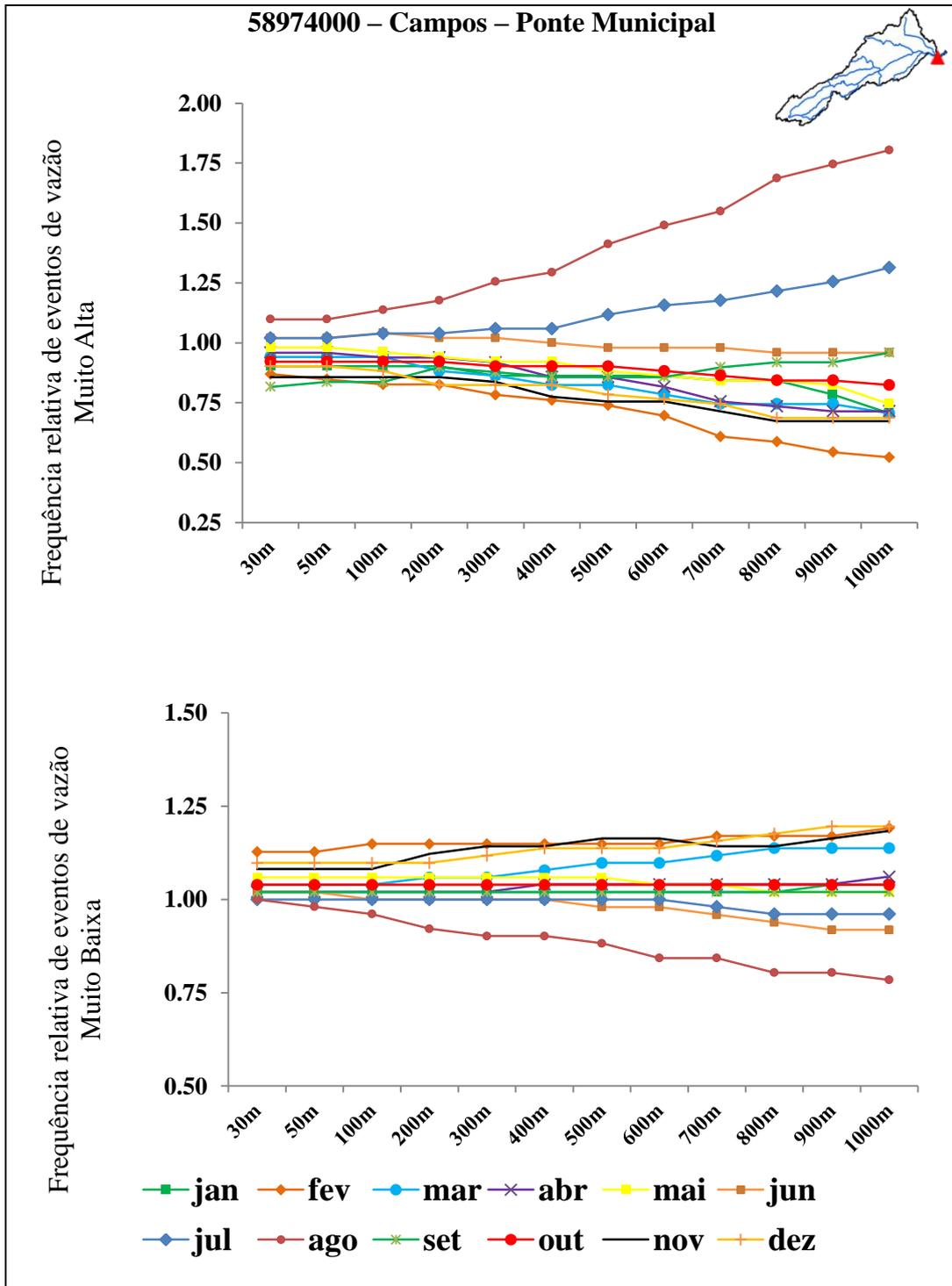


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o último posto de monitoramento da bacia, Campos – Ponte Municipal (Figura 64), o comportamento da frequência de vazões muito altas é semelhante aos anteriores indicando redução da frequência de eventos em função do aumento da faixa de APP para os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio. O mês de junho tem comportamento próximo ao controle, julho e agosto apresentam aumento na frequência de vazões muito altas com aumento notadamente mais acentuado em agosto.

As variações da frequência de vazões muito baixas tem menores amplitudes do que a vazão muito alta. Os meses de setembro, outubro, janeiro, abril, maio, setembro e outubro oscilam com variações (aumento ou redução) de no máximo 4%, ou seja, a frequência de eventos de vazão muito baixa nestes meses, em todos os cenários, ainda é muito próxima à frequência do controle. Apresentam aumento na frequência de vazões muito baixas os meses de fevereiro, março, novembro e dezembro enquanto que os meses de junho e agosto apresentam redução da frequência de vazões muito baixa em função do aumento da faixa de APP.

Figura 64: Razão entre frequência de extremos de vazão muito alta (MA) e muito baixa (MB) nos cenários em relação ao cenário de controle para o posto Anta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado da análise de frequência de extremos de vazão mensal é bastante diverso para cada um dos postos analisados, contudo alguns resultados gerais podem ser sumarizados. Entre outubro e março a frequência de vazões muito alta diminui em função do aumento da faixa de APP. Este resultado ocorre em todos os postos analisados, com exceção dos postos Santa Branca e Campos – Ponte Municipal, nas quais o mês de novembro apresentou redução mais acentuada em relação aos demais meses do período.

Este comportamento pode estar associado ao aumento da capacidade de armazenamento do reservatório superficial do modelo via interceptação, promovido pelo aumento da área florestal (que possui maior índice de área foliar). O maior volume interceptado favorece a evaporação e diminui o volume precipitado que é transformado em vazão. A cobertura do tipo florestal também apresenta maior capacidade de armazenamento de água no solo, que pode contribuir para redução do escoamento superficial.

A maior atenuação observada no mês de novembro pode ser explicada por dois mecanismos do modelo. O mês de novembro está no início da estação chuvosa para a bacia, quando os reservatórios superficiais estão com maior capacidade de armazenamento. Além disso, as vazões de novembro, apesar de maiores do que o período de estiagem, são ainda na maior parte do tempo ordinárias para o regime anual da bacia (Tabela 13), sendo que a capacidade de atenuação dos picos promovida pela vegetação, de acordo com Tucci e Clarke (1997), são preponderantes para eventos de cheia de menor período de retorno.

Tabela 13: Limiares de vazão muito alta (percentil 85%) mensal determinados com base na simulação de controle

Código	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
58099000	188,38	140,37	146,94	130,71	81,89	66,14	59,00	49,32	48,88	59,14	70,95	123,39
58318002	671,58	557,44	504,66	442,45	280,44	233,70	208,65	175,53	174,93	227,26	284,92	473,15
58520000	200,74	138,24	117,51	89,84	66,78	55,26	48,90	43,36	43,03	49,12	74,43	146,68
58630002	1294,72	1029,03	864,46	728,95	501,54	414,57	370,86	318,41	318,21	394,17	534,14	922,56
58790002	402,06	249,21	210,29	179,47	131,10	107,60	90,18	81,35	80,11	89,48	136,14	266,23
58974000	2590,21	1816,78	1493,76	1226,13	865,88	717,13	623,02	544,76	544,90	634,46	917,96	1705,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro resultado comum para todos os postos analisados é o aumento da frequência de vazões muito altas em função do aumento da faixa de APP para o mês de agosto. A análise de vazões encontradas na literatura são feitas com base na mínima anual média de longo termo, onde os resultados apontam para a redução das vazões mínimas em função do reflorestamento

ou aumento das vazões mínimas na substituição da cobertura florestal por agrícola (VIOLA *et al.*, 2014; BAYER, 2014; PEREIRA, 2013).

Para a análise de frequência das vazões muito baixas é possível destacar que os postos analisados indicaram aumento da frequência de vazões muito baixas em função do aumento da faixa de APP para os meses do período chuvoso da bacia. Neste trabalho foi considerado que o valor da resistência superficial da URH floresta é igual ao da agrícola. A manutenção da mesma resistência superficial associada com o maior índice de área foliar da florestas pode ter contribuído para aumento das vazões muito baixas durante o período chuvoso promovendo o aumento da evapotranspiração da URH Floresta em relação à agrícola. Destaca-se que, embora haja um aumento da frequência de vazões muito baixas no período chuvoso, os limiares de vazão desta categoria durante o período chuvoso são maiores do que nos demais meses do ano (Tabela 14) .

Nos meses mais secos da bacia, a frequência de vazões muito baixas diminui em função do aumento da faixa de APP. Esta redução é mais pronunciada nos postos localizados na parte baixa da bacia (Santo Antônio de Pádua II e Campos – Ponte Municipal). Estes postos estão em locais onde o acumulado de chuva anual é o menor de toda a bacia, sendo a maior contribuição para a vazão das chuvas que ocorrem na parte mais alta da bacia.

Os resultados de diminuição da frequência de vazões muito baixas e aumento da frequência de vazões muito altas durante os meses de estiagem indicam que a manutenção de cobertura florestal, apesar de reduzir as vazões em termos de médias anuais, podem reduzir o impacto das estiagens na disponibilidade hídrica.

Tabela 14 – Limiares de vazão muito baixa (percentil 15%) mensal determinados com base na simulação de controle

Código	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
58099000	43,63	56,79	53,30	47,30	42,75	37,14	34,18	27,40	29,74	27,78	32,59	40,13
58318002	179,11	228,61	208,66	185,05	158,09	136,29	127,55	108,98	110,67	110,73	142,83	174,81
58520000	48,39	54,07	56,29	47,85	38,66	36,01	33,77	31,05	30,07	29,17	36,79	42,49
58630002	346,60	453,40	398,41	352,40	277,27	247,97	226,80	199,85	206,82	203,28	278,45	339,71
58790002	88,09	86,75	87,24	92,18	64,08	57,37	55,40	49,67	47,66	43,78	61,10	91,62
58974000	588,14	739,57	721,56	636,20	448,64	395,42	371,26	330,55	358,51	343,46	462,02	598,62

Fonte: Elaborada pelo autor.

5. Conclusões e recomendações

O modelo MGB foi calibrado e verificado para a bacia do rio Paraíba do Sul, utilizando como função objetivo para calibração do modelo os parâmetros R_2 , R_{log} e ΔV . A avaliação da calibração foi complementada pelos parâmetros r , V , $REQM$, EA , ER e a acurácia mensal do modelo para diferentes limiares de vazão e também com a avaliação visual dos hidrogramas simulados e observados.

Os resultados encontrados indicam que o modelo pode representar adequadamente o processo de transformação de chuva em vazão da bacia. Verificou-se que a representação pelo modelo é melhor para os postos de monitoramento da parte média (superior e inferior) e para a parte baixa da bacia.

Foram simulados cenários de recomposição da APP de margem ao longo dos cursos d'água da bacia, considerando as faixas que deveriam ser recompostas de acordo com o Código Florestal (30 m, 50 m, 100 m e 200 m) e incluindo faixas maiores de 300 m a 1000 m, em intervalos de 100 m. Os cenários foram comparados com a simulação da condição atual da bacia (controle) em termos de vazão média anual, vazão máxima anual, Q_{05} e pela frequência de extremos de vazão muito alta e muito baixa cujos limiares foram definidos com base no quantil 85% e 15%, respectivamente.

O resultado dos cenários indicam redução da vazão média anual em função do aumento da vegetação ripária ao longo dos cursos d'água e que a redução é mais acentuada nos anos em que a vazão média é maior. Tal comportamento dependem do padrão de chuvas, ou seja, está relacionado com o total pluviométrico precipitado na bacia. No período em que a bacia passou por uma condição de estiagem severa (2014 a 2015) essa redução é muito pequena.

A vazão máxima anual é menor quanto maior a largura da APP, sendo a magnitude da redução variável anualmente, com reduções mais (menos) acentuadas nos anos em que a vazão máxima anual é menor (maior).

O resultado da Q_{95} , tanto anual quanto para o período todo não apresentam um resultado generalizado para todos os postos. Apesar dos indícios da maior parte dos postos apontam para o aumento da vazão de base em função do aumento da faixa de recomposição, que ficou muito claro para alguns postos em todas as análises. Salienta-se que o modelo utilizado representa de maneira relativamente simplificada o comportamento do escoamento subterrâneo. Especificamente fatores relacionados com a influência do contexto

hidrogeológico da bacia, não são representados ou são simplificados pelo modelo na determinação da vazão crítica.

Para a análise de frequência de extremos, apesar do comportamento variado para cada um dos postos, foi possível identificar que a frequência de vazões muito alta dos meses que compreendem o período chuvoso da bacia diminui em função do aumento da faixa de APP, sendo que o mês de novembro apresenta redução acentuada em relação aos demais meses do período.

A fundamentação para este resultado pode estar associada com o aumento da capacidade de armazenamento do reservatório superficial do modelo, promovido pelo aumento da área florestal (que possui maior índice de área foliar) e que favorece maior evaporação, diminuindo assim o volume precipitado que se transforma em escoamento. O resultado obtido para o mês de novembro pode ser explicado pelas vazões de novembro, apesar de maiores do que o período de estiagem, são ainda, na maior parte do tempo, ordinárias para o regime anual da bacia, sendo que a capacidade de atenuação dos picos promovida pela vegetação é preponderante para cheias de menor tempo de recorrência.

Ainda para a frequência de vazões muito altas, constata-se que a frequência de eventos aumenta em função do aumento da faixa de APP para o mês de agosto. Considerando que o mês de agosto corresponde a um mês de recessão na bacia.

O aumento da faixa de APP promove o aumento da frequência de vazões muito baixas para os meses do período chuvoso da bacia. Este resultado pode decorrer da manutenção da mesma resistência superficial para URH floresta e agrícola, que, associada com o maior índice de área foliar da floresta, pode ter promovido maior evapotranspiração e consequente redução das vazões do período.

Nos meses mais secos da bacia, a frequência de vazões muito baixas diminui em função do aumento da faixa de APP. Esta redução é mais pronunciada nos postos localizados na parte baixa da bacia (Santo Antônio de Pádua II e Campos – Ponte Municipal). Estes postos estão em locais onde o acumulado de chuva anual é o menor de toda a bacia, sendo a vazão nesta faixa mais dependente da contribuição das condições hidrológicas que correm na parte mais alta da bacia, em curto prazo. Em longo prazo, a manutenção do escoamento de base, contribui para a redução de vazões muito baixas, o que pode ser favorecido pelo aumento da cobertura florestal, devido ao aumento da infiltração, da recarga e da umidade do solo, cujo efeito pode ser mais evitente em anos de estiagem prolongada.

As conclusões deste trabalho devem levar em consideração as limitações inerentes à aplicação de modelos hidrológicos para simulação de grandes bacias, bem como limitações encontradas especificamente para a bacia em que o modelo foi aplicado. A calibração de modelos hidrológicos de grandes bacias é feita considerando uma série de parâmetros fixos e calibráveis para diferentes URHs. A determinação destes valores, como a resistência superficial, possui ainda incertezas, uma vez que a resistência superficial é variável em função das condições locais (clima, tipo de vegetação, tipo de solo, umidade do solo).

Especificamente para aplicação deste estudo, deve-se levar em conta que a calibração do modelo utilizou vazões naturalizadas que, apesar de calculadas utilizando informações precisas de volumes vertidos e regularizados da bacia e com fundamentação teórica no seu cálculo, ainda assim são uma estimativa do que seria o comportamento natural da bacia. Os postos de vazão observada da bacia também possuem limitações, uma vez que a vazão observada é calculada com base na relação cota/descarga do postos fluviométrico, sendo que a estimativa de vazões para este tipo de dado possuem maiores incertezas nos extremos de máximas e mínimas, dada a dificuldade em mensurar a vazão nestas condições.

Durante a simulação dos cenários, foram utilizadas as mesmas séries de variáveis meteorológicas observadas (incluindo a precipitação, que neste trabalho foi tratado como uma variável hidrológica) para o período (01/01/2005 a 31/12/2015). Todavia o comportamento dessas variáveis pode se alterar à medida que cobertura da bacia também se altera. Apesar da integração entre os conhecimentos de hidrologia e meteorologia terem evoluído e o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos para grandes bacias ser resultado do esforço para esta integração, avanços ainda são necessários tanto no monitoramento de variáveis meteorológicas quanto no acoplamento de modelos hidrológicos e meteorológicos.

Embora tenha sido utilizado neste trabalho a recomposição da vegetação de margem como referência para a elaboração dos cenários, as análises desenvolvidas ao longo da dissertação não asseguram que os impactos notados estejam relacionados especificamente com o posicionamento da vegetação ou se foram causados exclusivamente pelo aumento da cobertura florestal e então cenários com o mesmo percentual de cobertura florestal dos cenários de APP apontariam para resultados muito próximos aos encontrados nesta pesquisa.

Apesar destas limitações, os resultados sugerem que a resposta da vazão na bacia do rio Paraíba do Sul é sensível a alterações de cobertura da superfície. Essa sensibilidade é notadamente maior para as análises mensais, sendo que os trabalhos que utilizam modelagem

hidrológica distribuída em bacias semelhantes à bacia, não analisam o comportamento intraanual.

Os resultados deste trabalho sugerem que, do ponto de vista hidrológico, a manutenção de APP em margens são um importante mecanismo de manutenção e/ou melhora dos serviços ambientais que diminuem os picos de cheia e que são importantes para a manutenção das vazões de base, fundamental para garantia de disponibilidade hídrica nos períodos mais secos da bacia.

A melhora desses serviços ambientais é tão boa quanto maior a área de APP mantida na margem do rio, deste modo, as áreas de APP mantidas de acordo com o preconizado pelo código florestal são importantes para manutenção/melhora dos serviços ambientais, porém, a manutenção de APP maiores implicariam em ganhos consideravelmente maiores do ponto de vista manutenção de vazões em estiagens e de redução dos picos de cheia.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de metodologias para aumentar a confiabilidade da parametrização realizada. Uma vez que a séries de vazão da bacia são suficientemente longas (algumas das estações analisadas neste trabalho possuem série de vazão desde meados da década de 60) e que as características de uso e cobertura da bacia foram se alterando ao longo do tempo, a parametrização realizada poderia ser testada através de uma simulação de longo prazo, utilizando mapas de URH dinâmicos no tempo, considerando as alterações de superfície.

Outra possibilidade para avaliar ou aperfeiçoar o desempenho do modelo é comparar o resultado da saída de evapotranspiração do modelo com o obtido utilizando outras técnicas como medições experimentais na bacia ou em condições semelhantes, estimativas utilizando sensoriamento remoto e resultados de outros modelos, não só hidrológicos, que podem ser utilizados para estimativa de evapotranspiração da bacia.

Para avaliar se o modelo pode diferenciar a variação espacial da recomposição, cenários com o mesmo percentual de cobertura florestal mas com diferente distribuição espacial poderiam ser utilizados como uma primeira avaliação desta questão. Por exemplo, testando se o resultado do cenário de recomposição de margem de 1000 m tem o mesmo comportamento de um cenário com a mesma proporção de cada uma das URH, porém com a cobertura florestal distribuída aleatoriamente ao longo da bacia.

As sugestões anteriores foram feitas no sentido de aumentarem a confiabilidade ou reduzir a incerteza dos resultados apresentados pelo modelo. Ainda assim, essas incertezas precisam ser consideradas na apresentação das saídas do modelo e então será possível avaliar se as alterações indicadas na resposta hidrológica são maiores ou estão dentro da faixa de incerteza da saída do modelo.

Referências bibliográficas

AMORA, D. Acordo entre Estados autoriza São Paulo a iniciar a transposição do Jaguari.

Folha de São Paulo, São Paulo, 27 nov. 2014. Cotidiano.

ADAM, K. N., COLLISCHONN, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.

BAYER, D.M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BRASIL, **Lei Federal n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm>. Acesso em: 23 jul. 2017.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 23 jul. 2017.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 02 abr. 2017.

BENNETT, K. E.; WERNER, A. T.; SCHNORBUS, M. Uncertainties in hydrologic and climate change impact analyses in headwater basins of British Columbia. **Journal of Climate**, v. 25, n. 17, p. 5711-5730, 2012.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling? **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2001.

CAMPOS, J.D. **Cobrança pelo uso da água nas transposições da bacia do rio Paraíba do Sul envolvendo o Setor Elétrico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CARAM, R.O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2010.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Previsão Sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: Ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, p.43 – 59, 2005.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling**. *Hydrological Sciences Journal*, v.52, p.878 – 895, 2007.

COSTA, M. H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion *In*: Bonell, M.; Bruijnzeel, L.A (Org). **Forest–Water–People in the Humid Tropics**, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1, p. 206-217, 2003.

DAVIS E.G.; NAGHETTINI M.C. **Estudo de Chuvas Intensas no Estado Rio de Janeiro**. 2ª ed. revista e ampliada. 1 CD-ROM. Brasília: CPRM, 2000.

DEMARIA, E. M. C. *et al.* Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? **Journal of Hydrology**, v. 502, p. 128-138, 2013.

FAN, F. M. *et al.* Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2906-2919, 2014.

FAN F. M., BUARQUE D. C., PONTES, P.R.M., COLLISCHONN W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. PAP019919. 2015

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/>> Acesso em: 03 mar 2017.

LIANG, Xu *et al.* A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.

LINSLEY, R.K. Jr.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for Engineers**. Ed. McGrawHill, Series in Water Resources and Environmental Engineering, SI Metric Edition, 1988.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, J.GL. SMAP, a simplified hidrologic model. In: **Symposium on Rainfall Runoff Modeling**. Mississippi. 1981.

MARENGO, J.A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARENGO, J. A. *et al.* A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015.

NETO, A. R. **Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. 178p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

NEVES, W. V. **Avaliação da vazão em bacias hidrográficas com veredas, em diferentes estádios de conservação na APA do Rio Pandeiros, MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

NIJSSEN, B. *et al.* Streamflow simulation for continental-scale river basins. **Water Resources Research**, v. 33, n. 4, p. 711-724, 1997.

NUNES, L.H.; VICENTE, A.K.; CANDIDO, D.H. Clima da Região Sudeste do Brasil *In*: Iracema F.A. Cavalcanti, Nelson J. Ferreira, Maria A.F. Silva Dias (Organizadores). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, Oficina de Textos, 2009

PAIVA, R. C. D. *et al.* Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.

PANAGOPOULOS, Y. *et al.* SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 19, p. 3500-3512, 2011.

PEREIRA, D.R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14-37, 2016.

RODRIGUEZ, D.A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 10, p. 1831-1846, 2016.

ROSMAN, P. C. C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. *et al.* **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

SANTOS, H.G. dos *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil—legenda atualizada**. Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa Solos, 2011.

SAUER, S. N.; DE FRANÇA, F. C. Código Florestal, função socioambiental da terra e soberania alimentar. **Caderno crh**, v. 25, n. 65, 2012.

SILVA, P.M.O. MELLO C.R.; SILVA A.M. COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, J.M. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre. Editora da Universidade: ABHR, 669 p. 1998.

TUCCI, C. E.M.; CLARKE, Robin T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUNDISI, J.G. **Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 92p, 2014.

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente (LabHid) da COPPE/UFRJ. **Plano de Recursos Hídricos para a Fase Inicial da Cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul: Balanço entre disponibilidade e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com indicação de conflitos potenciais**. Vol. 3, Cap. 4. Rio de Janeiro, 2001.

VASCONCELOS, V. V. What maintains the waters flowing in our rivers? **Applied Water Science**, v. 7, n. 4, p. 1579-1593, 2017.

VIOLA, M. R.; DE MELLO, C. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2012.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A.F.S. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n. 2, p. 63-78, 1999.

YANG, C. *et al.* Analysis and simulation of human activity impact on streamflow in the Huaihe River basin with a large-scale hydrologic model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 3, p. 810-821, 2010.

YANG, C. *et al.* Effects of Vegetation Cover on Hydrological Processes in a Large Region: Huaihe River Basin, China. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 11, p. 1477-1483, 2011.

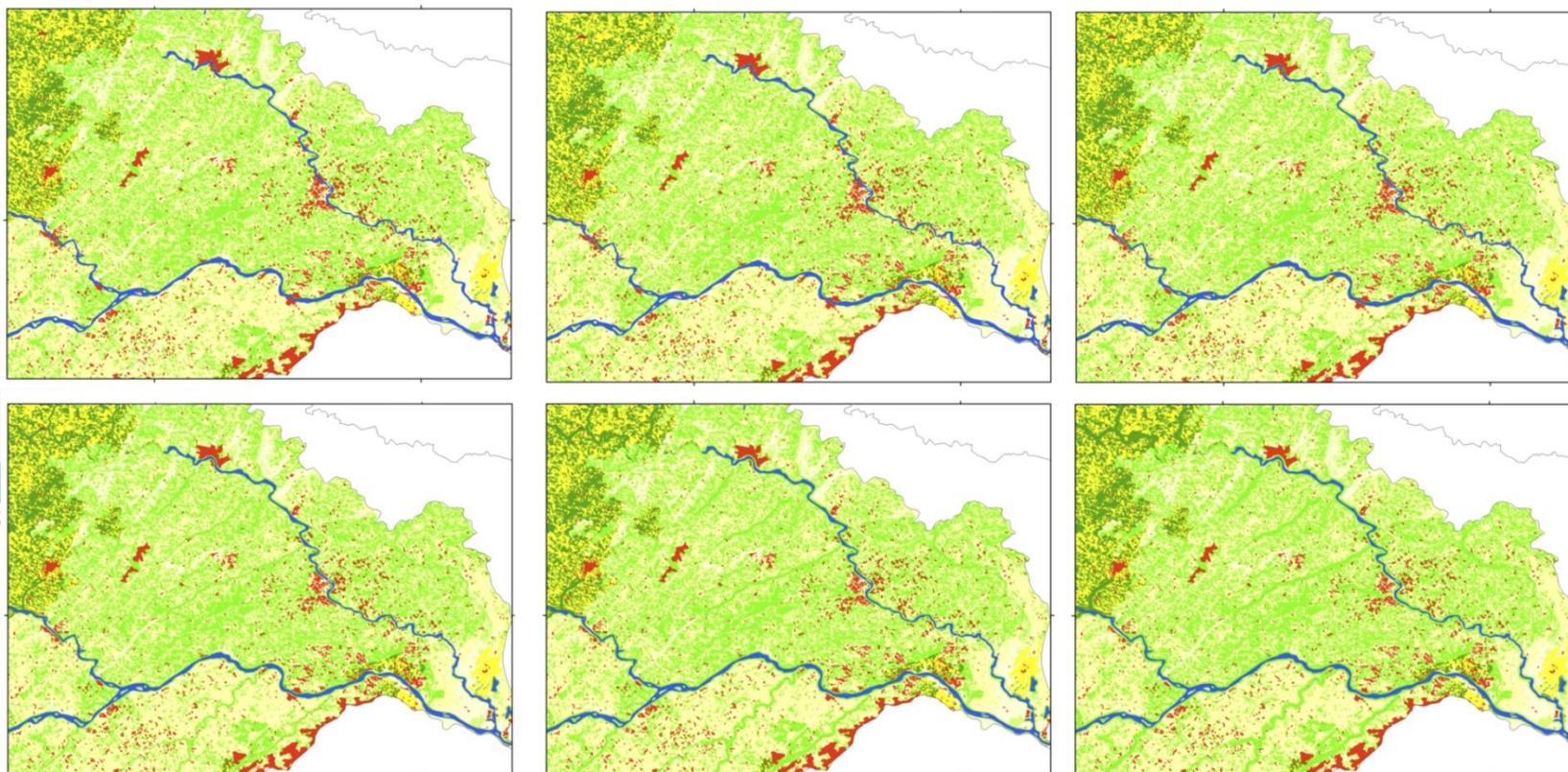
ZHANG, M. *et al.* A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. **Journal of hydrology**, v. 546, p. 44-59, 2017.

ZAKIA, M.J.B. Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de matas nativas. Tese (Doutorado), Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

Anexo A

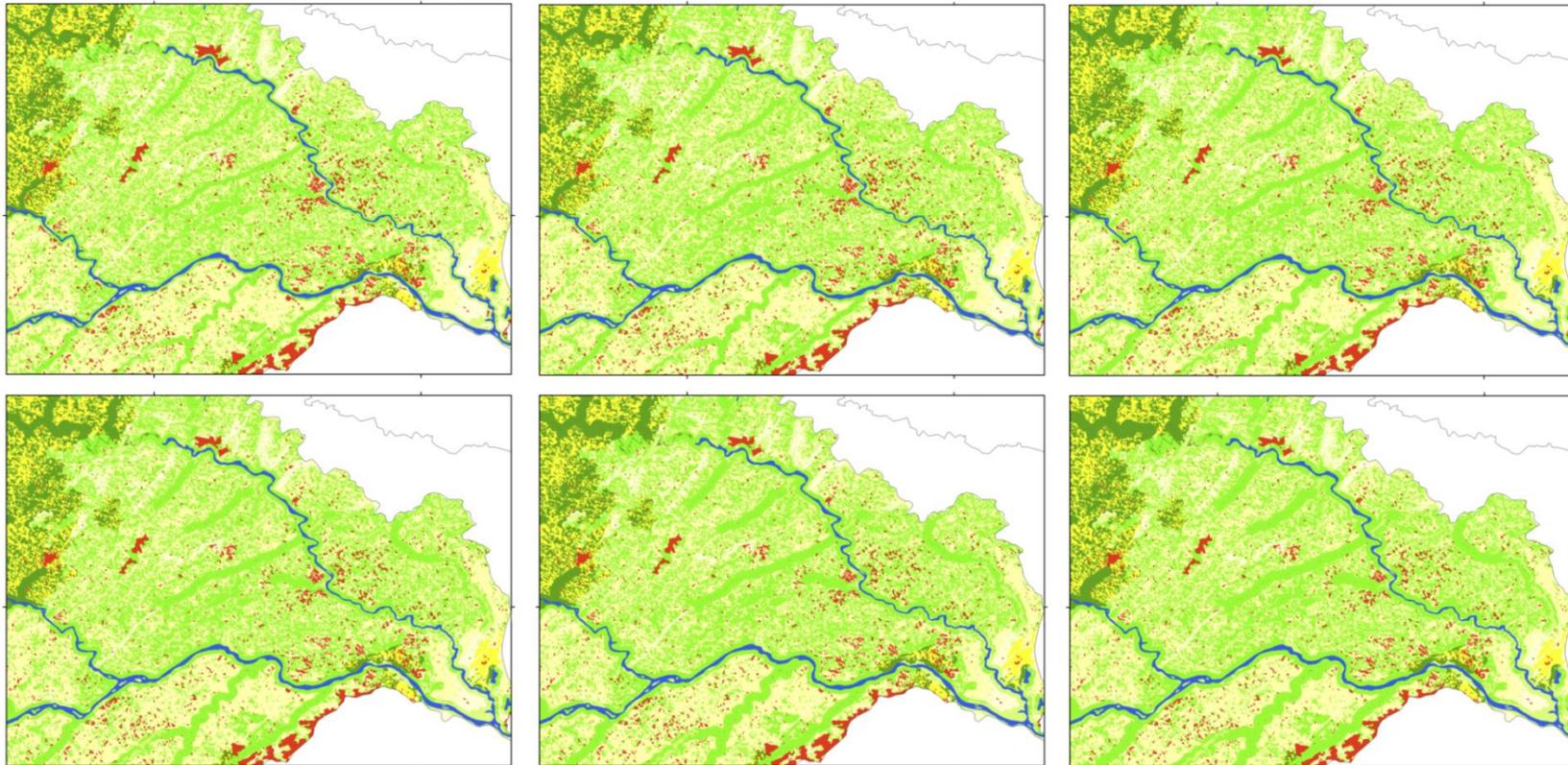
Detalhes dos mapas de URH dos cenários

Figura A1: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) de parte da bacia, próxima a foz do rio Paraíba do Sul, para os cenários considerando largura de vegetação marginal de 30m (a), 50m (b), 100m (c), 200m (d), 300m (e) e 400m (f).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A2: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) de parte da bacia, próxima a foz do rio Paraíba do Sul, para os cenários considerando largura de vegetação marginal de 500m (a), 600m (b), 700m (c), 800m (d), 900m (e) e 1000m (f).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo B

Descrição das URHs

- 1 // Agricola em solo pouco profundo
- 2 // Agricola em solo profundo
- 3 // Agricola em solo muito profundo
- 4 // Floresta em solo pouco profundo
- 5 // Floresta em solo profundo
- 6 // Floresta em solo muito profundo
- 7 // ASI
- 8 // Agua

Parâmetros fixos utilizados nas simulações

albedo

use	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
2	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
3	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
4	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
5	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
6	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
8	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

LAI !leaf area index

use	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	ouc	nov	dec
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Z !trees heigth

use	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

SR !superficial resistance

use	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
2	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
3	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
5	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
6	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
7	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

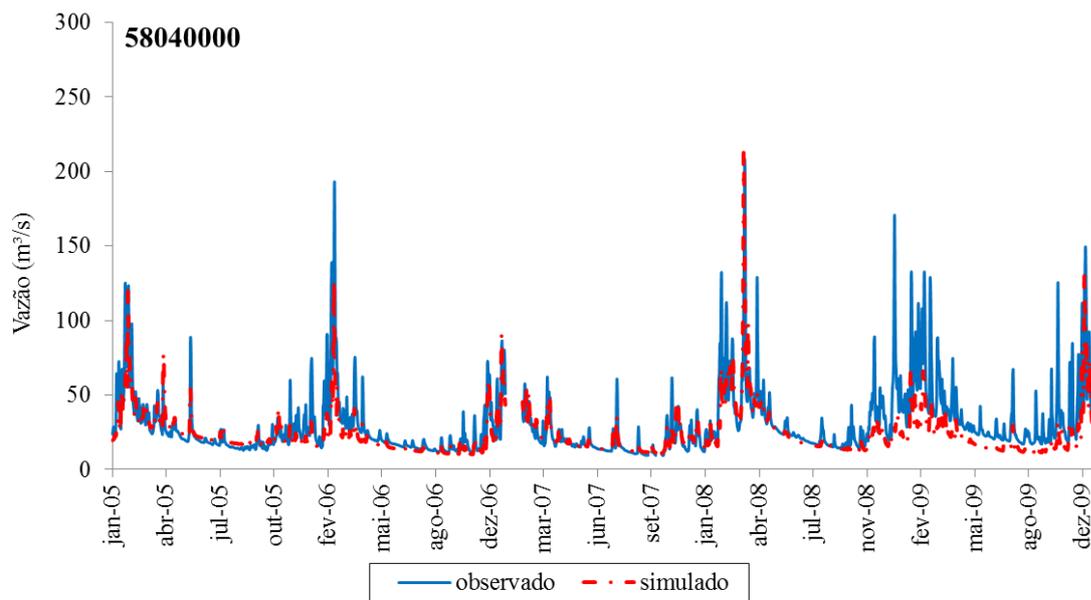
Parâmetros de calibração utilizados nas simulações

Watershed	1						
use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
1	200	0.1	0.92	4.3	0.6	0	0.1
2	350	0.09	0.74	4.03	0.6	0	0.1
3	1024.2	0.05	1.68	5.21	0.6	0	0.1
4	350	0.05	1.62	1.61	0.6	0	0.1
5	600.5	0.05	3.81	2.97	0.6	0	0.1
6	3000	0.04	4.03	1.56	0.6	0	0.1
7	16.5	0.35	0.86	1.29	0.6	0	0.1
8	0	0	0	0	0	0	0
CS	19.18						
CI	188.11						
CB	5521.37						
QB_M3/SKM2	0.01						

Anexo C

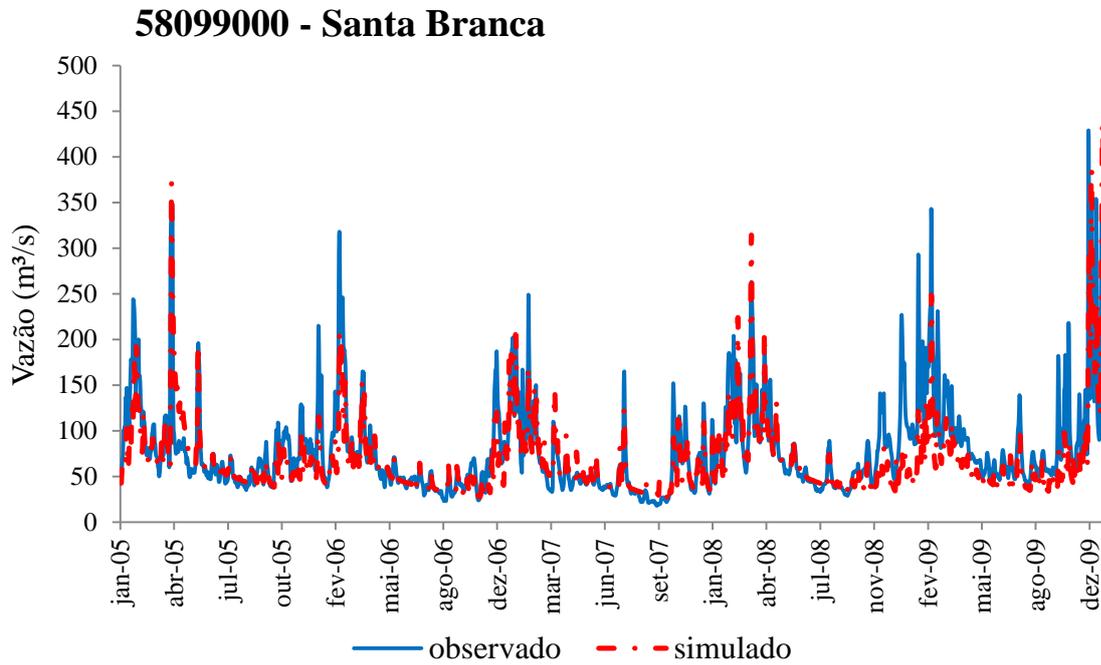
Hidrogramas simulados e observados para o período de calibração

Figura C1: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58040000 – São Luis do Paraitinga



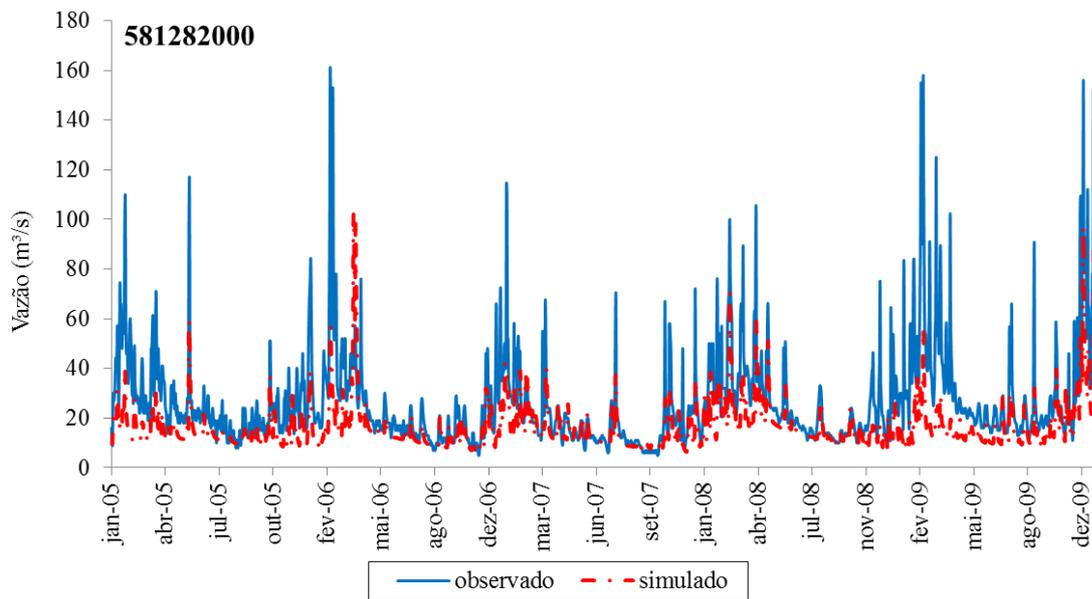
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C2: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto
580990000 – Santa Branca



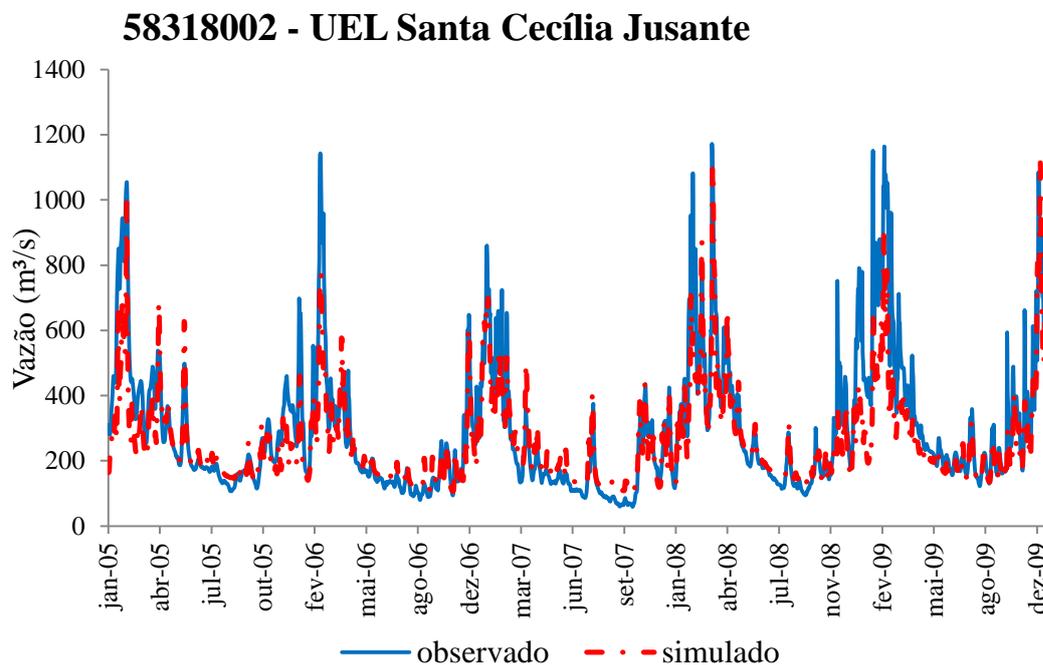
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C3: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto
581282000 – UHE Jaguari Jusante



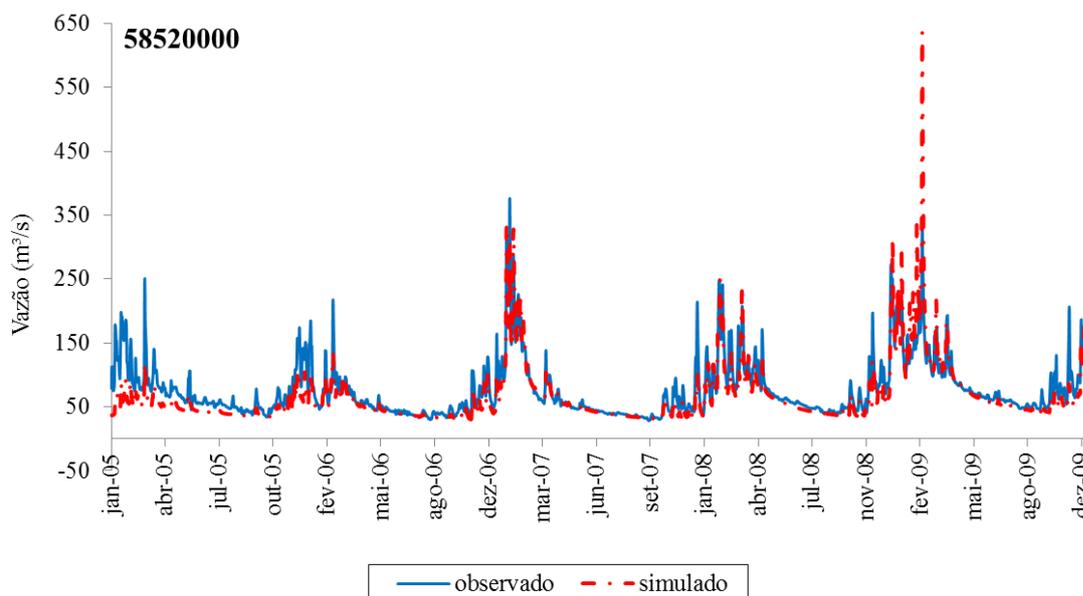
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C4: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto
58318002 – UEL Santa Cecília Jusante



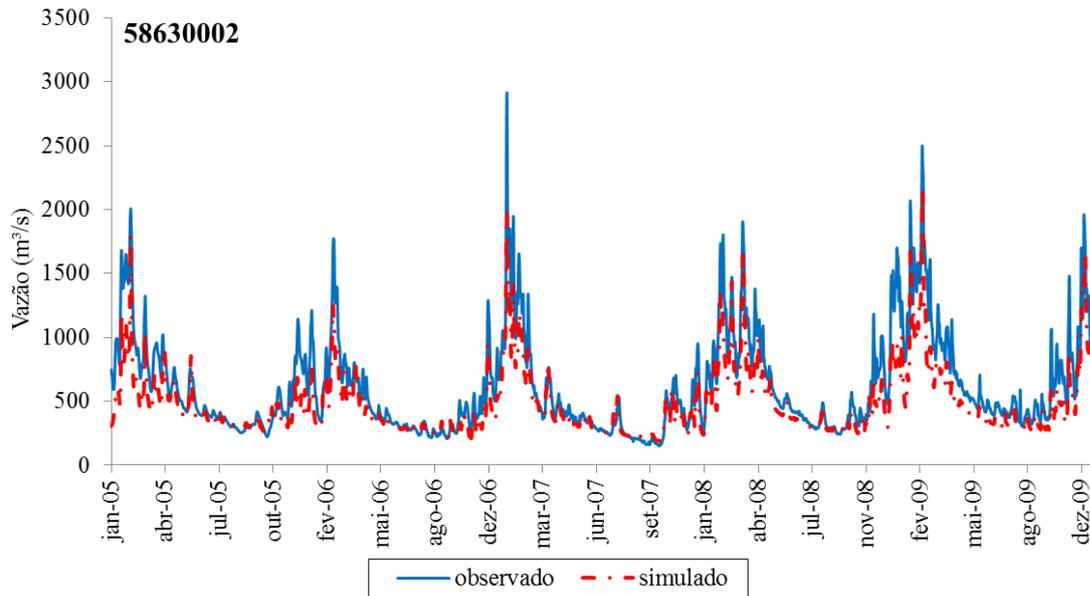
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C5: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto
58520000 – Sobraji



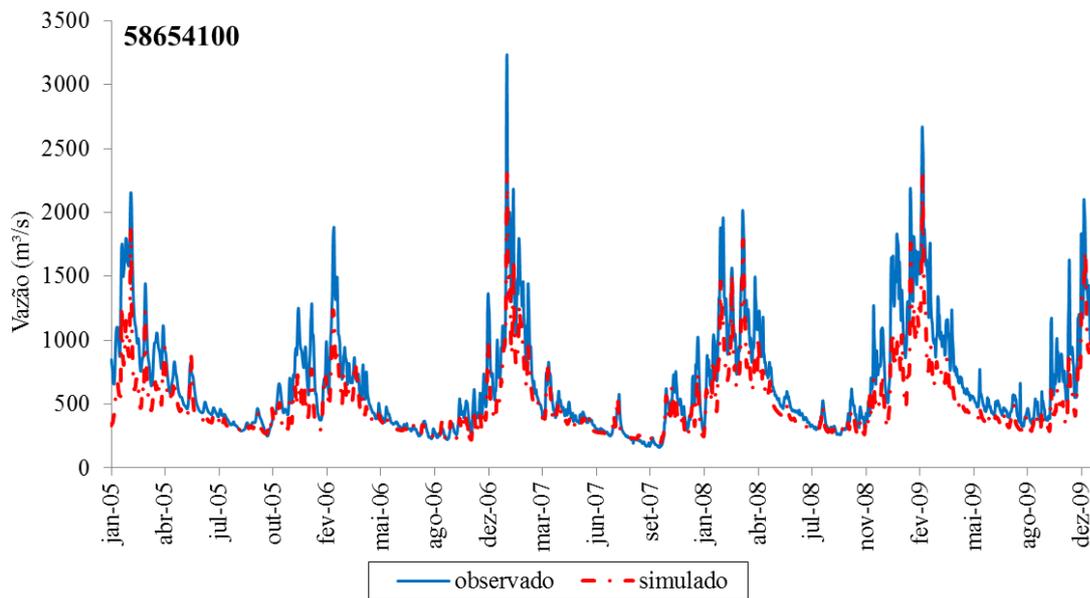
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C6: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58630002 – Anta



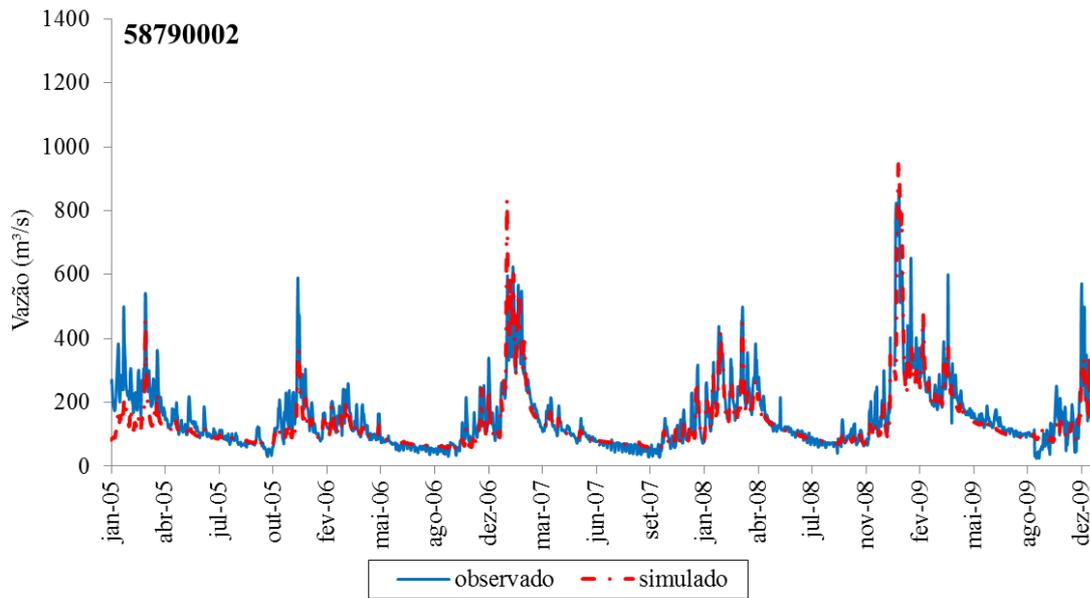
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C7: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58654100 – Porto Velho do Cunha.



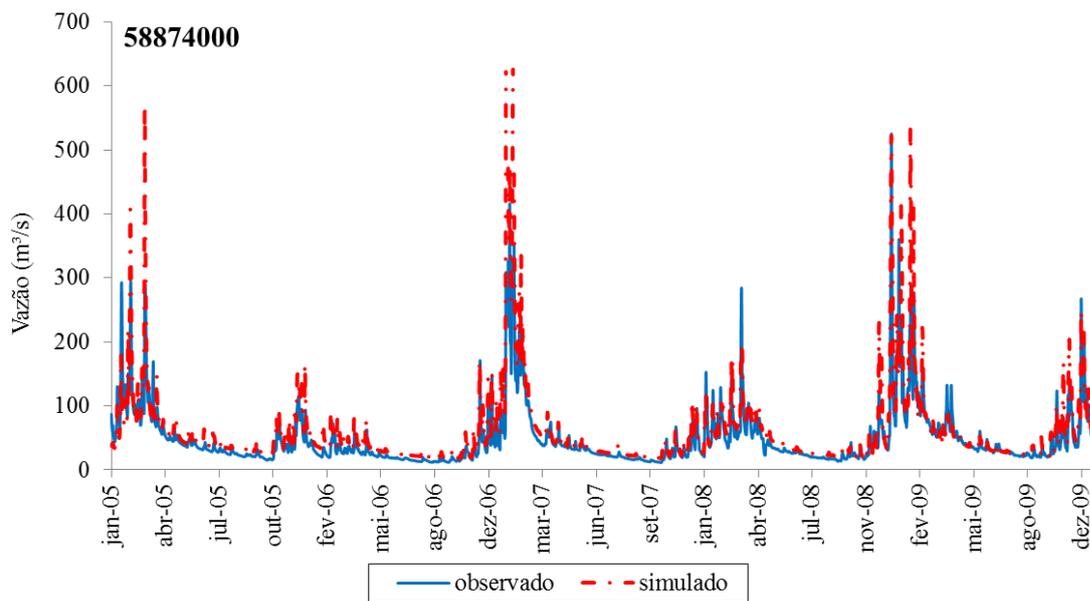
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C8: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II



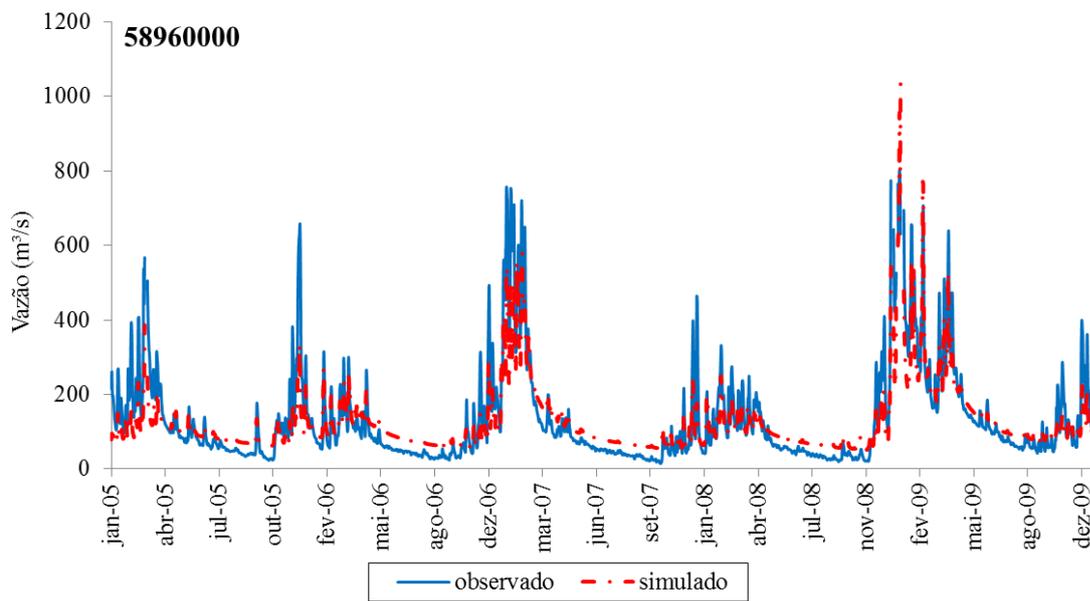
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C9: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58874000 – Dois Rios



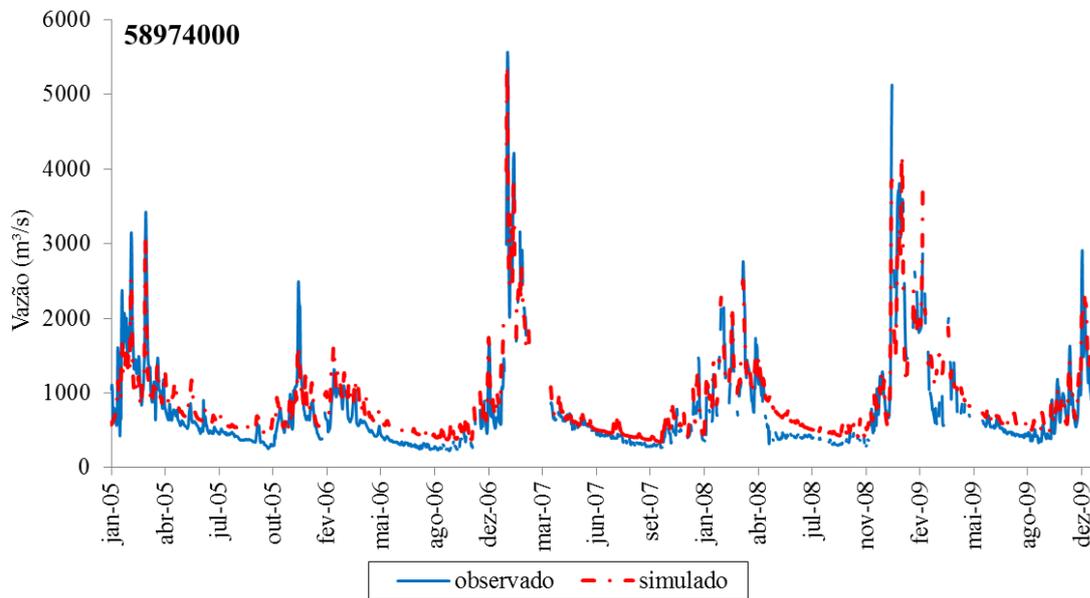
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C10: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58960000 – Cardoso Moreira



Fonte: Elaborado pelo autor.

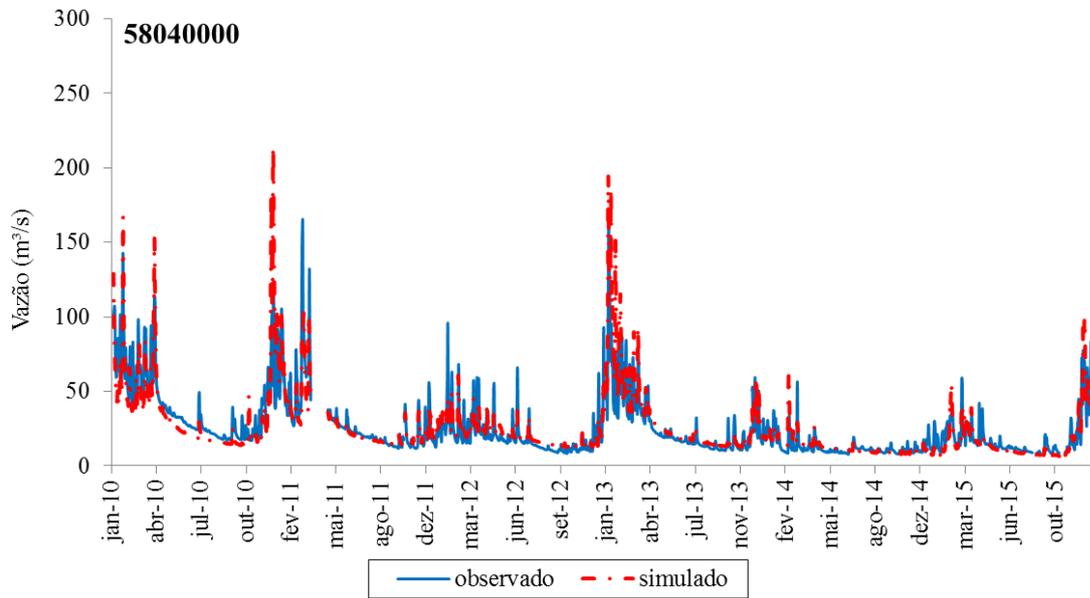
Figura C11: Hidrograma simulado e observado para o período de calibração no posto 58974000 – Campos: Ponte Municipal



Fonte: Elaborado pelo autor.

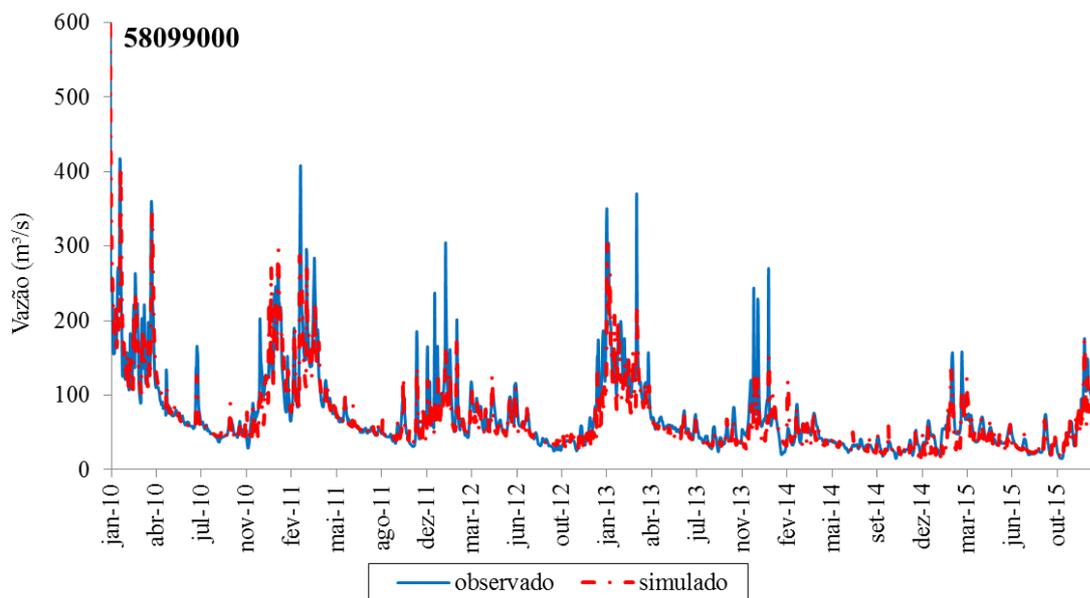
Hidrogramas simulados e observados para o período de verificação

Figura C12: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58040000 - São Luís do Paraitinga.



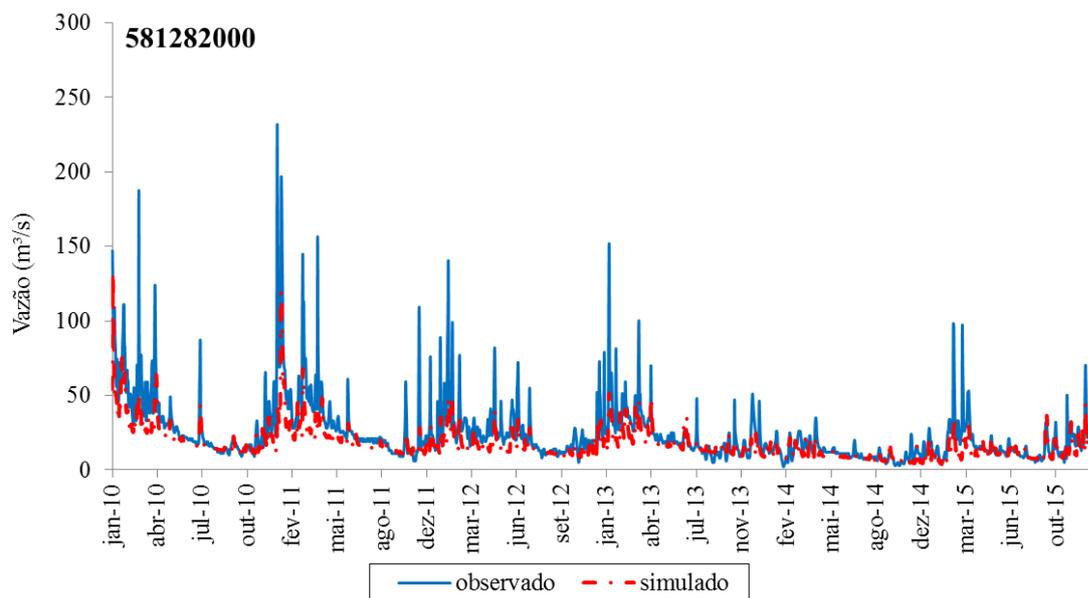
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C13: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58099000 – Santa Branca.



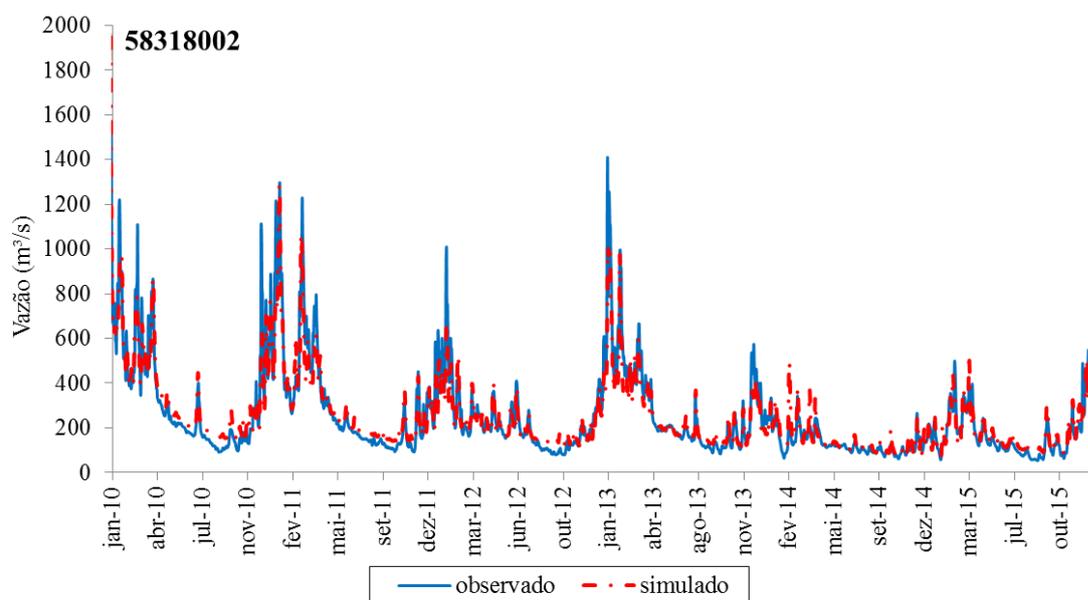
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C14: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58128200 – UHE Jaguari Jusante.



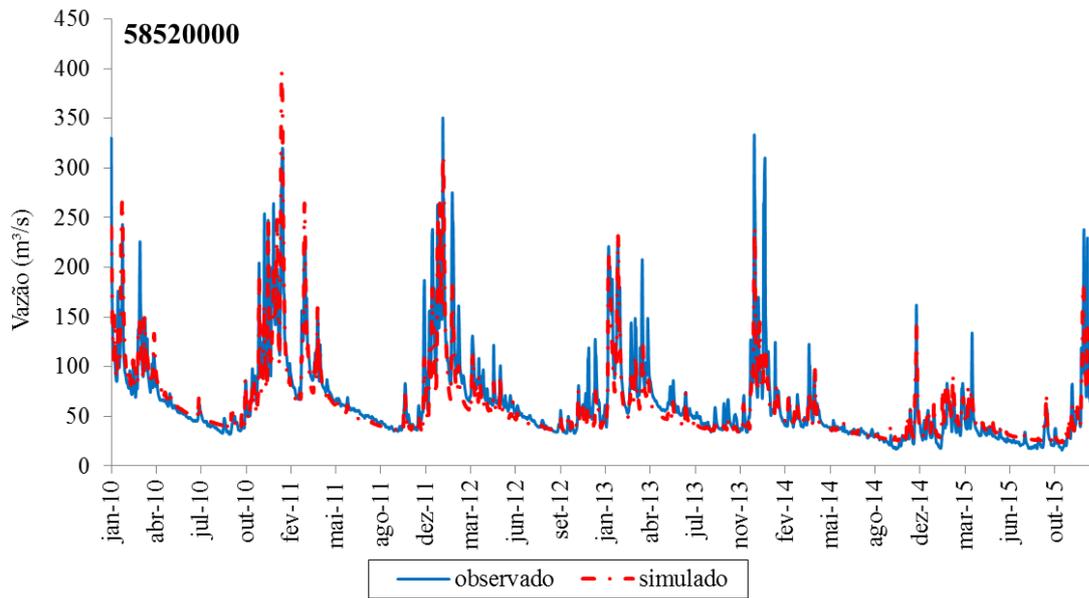
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C15: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante.



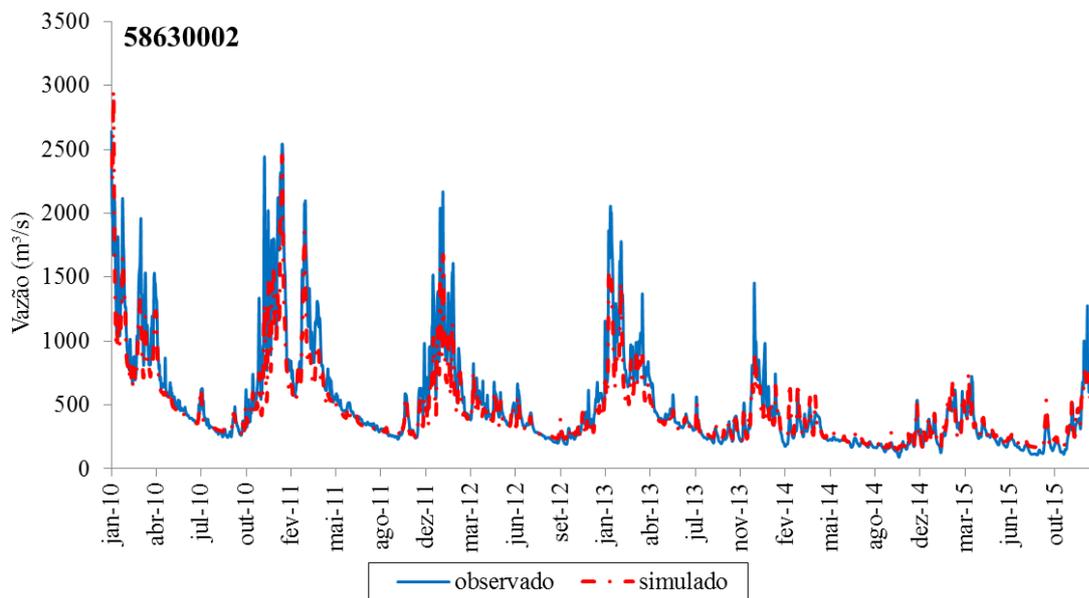
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C16: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58520000 - Sobraji.



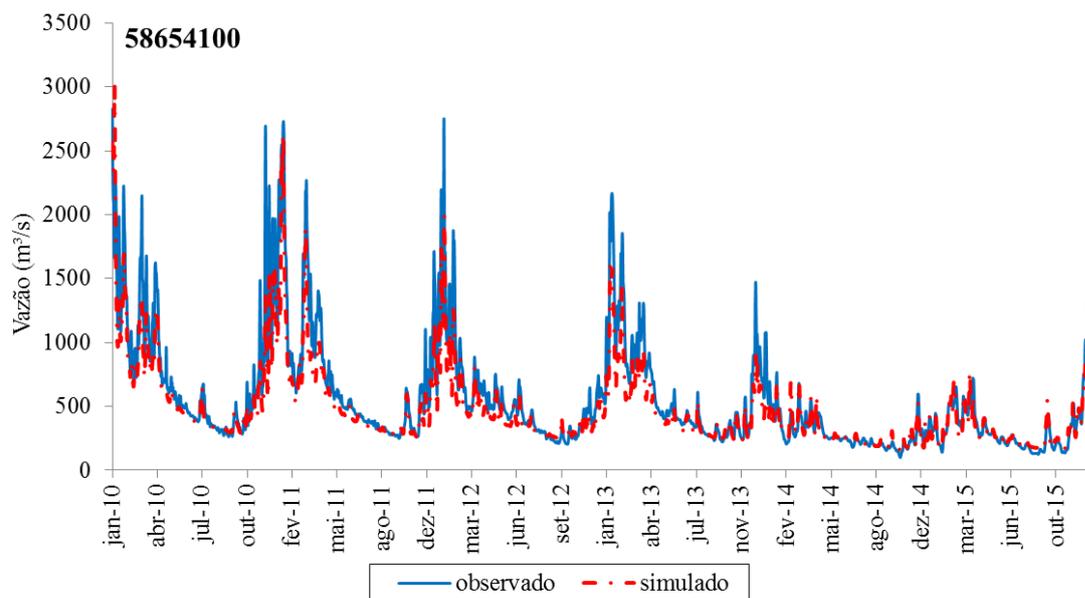
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C17: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58630002: Anta.



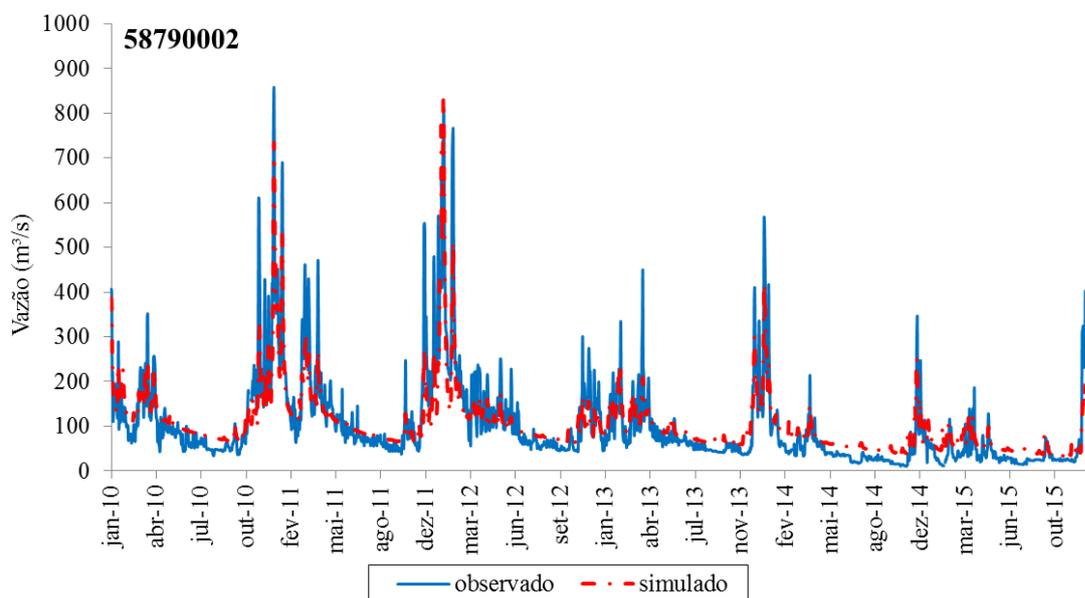
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C18: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58654100: Porto Velho do Cunha.



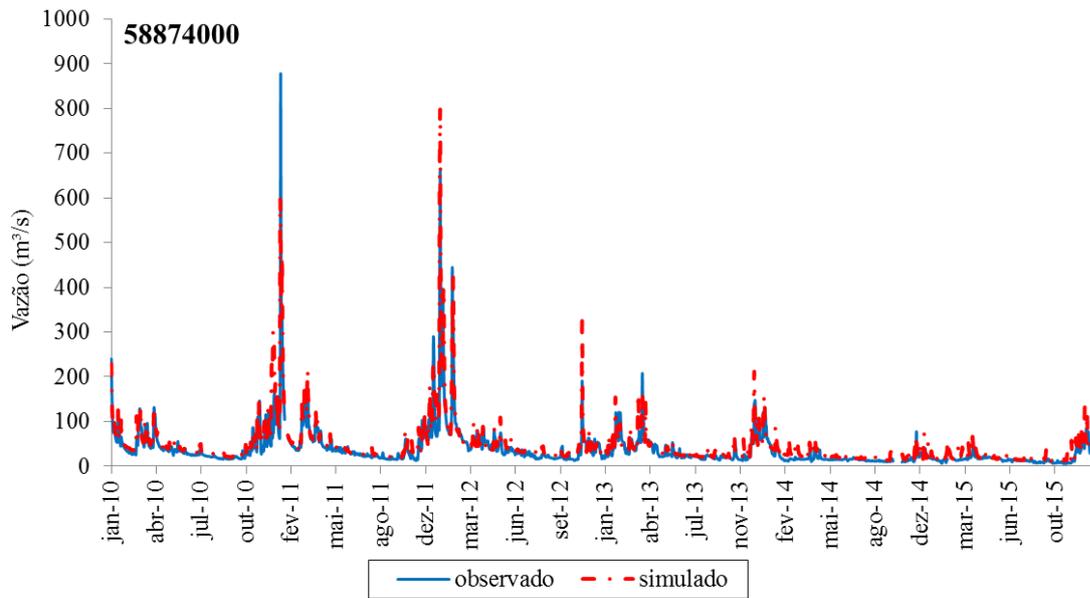
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C19: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58790002: Santo Antônio de Pádua II.



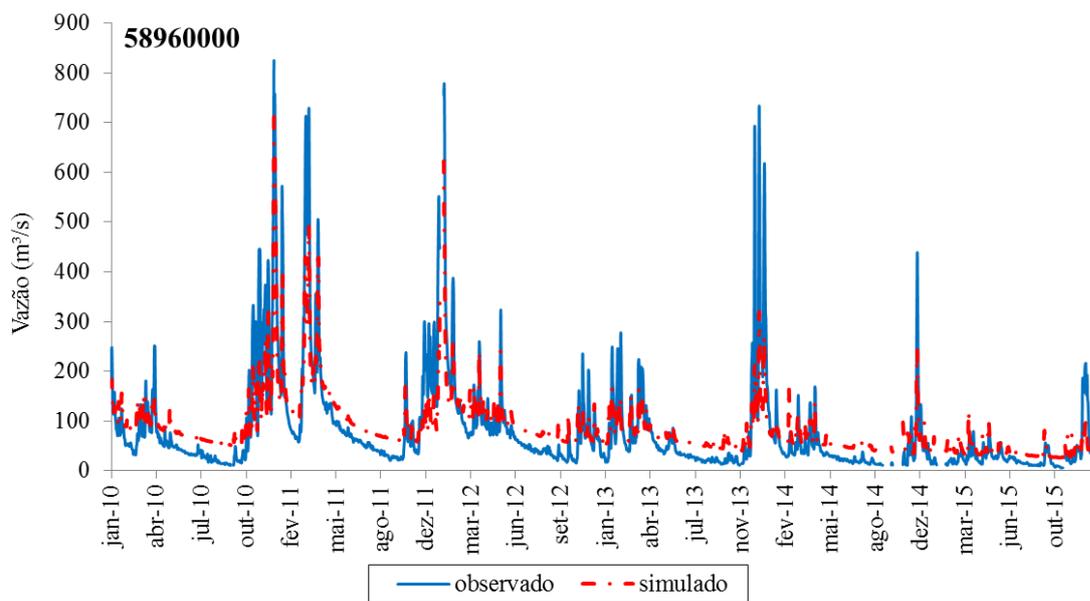
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C20: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58874000: Dois Rios.



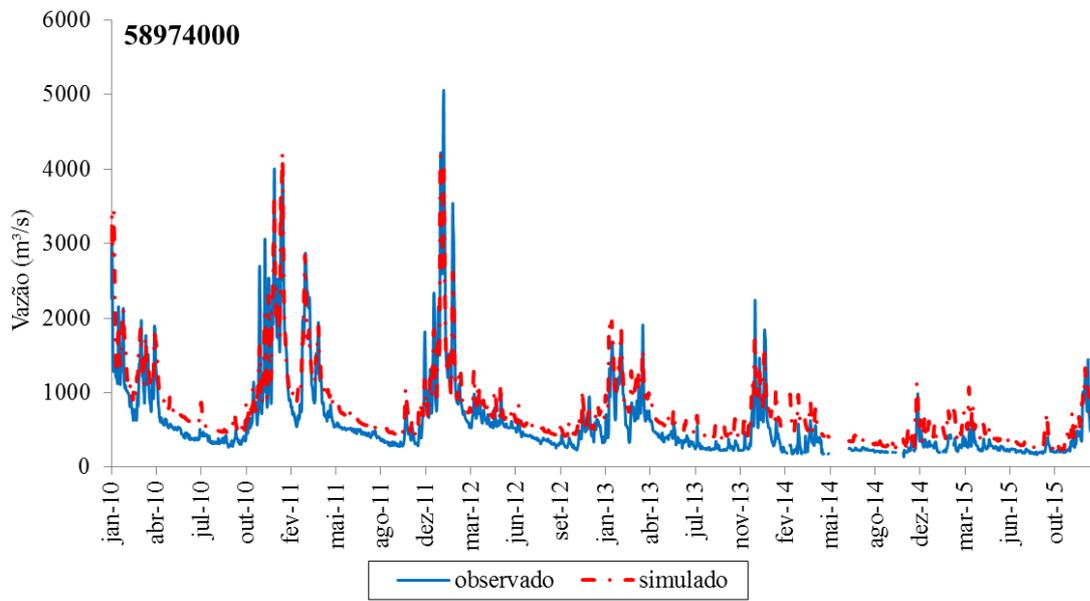
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C21: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58960000: Cardoso Moreira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C22: Hidrograma simulado e observado para o período de verificação no posto 58974000: Campos – Ponte Municipal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo D

Acurácia mensal para o período de calibração

Figura D1: Acurácia mensal para o ponto 58040000 – São Luís do Paraitinga para o período de calibração

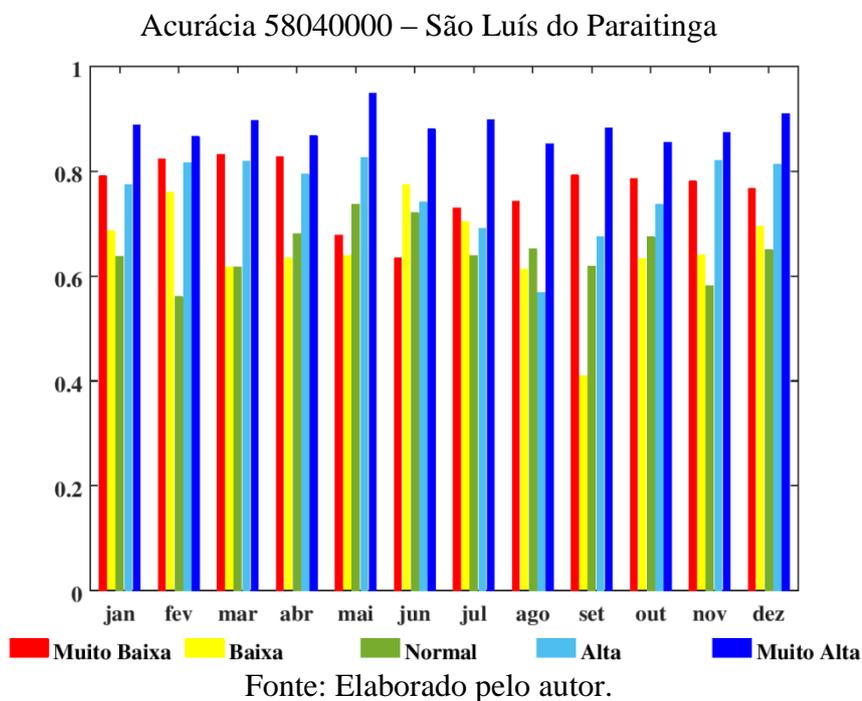


Figura D2: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de calibração.

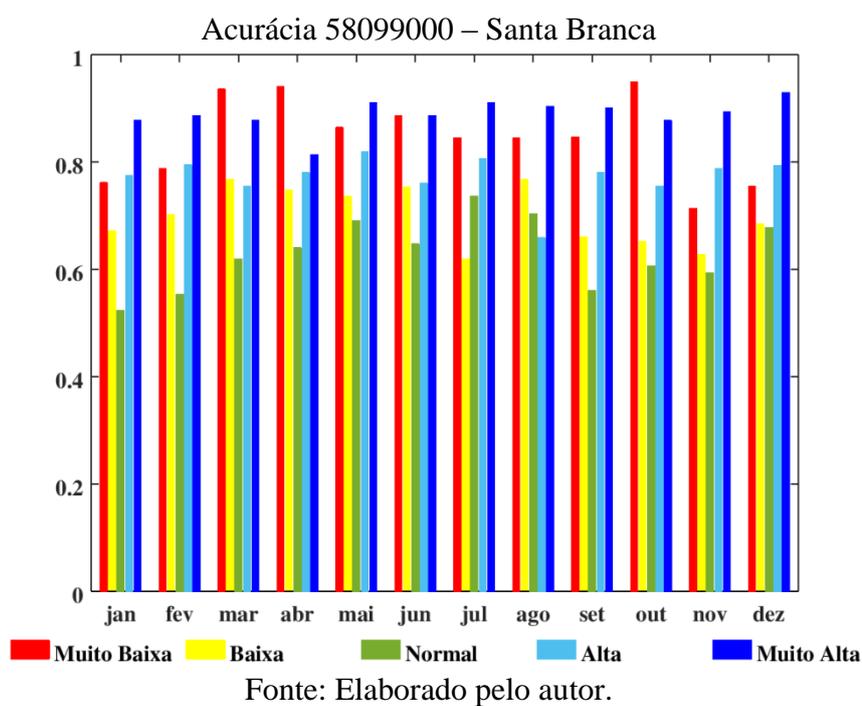


Figura D3: Acurácia mensal para o ponto 581282000 – UHE Jaguari Jusante para o período de calibração.

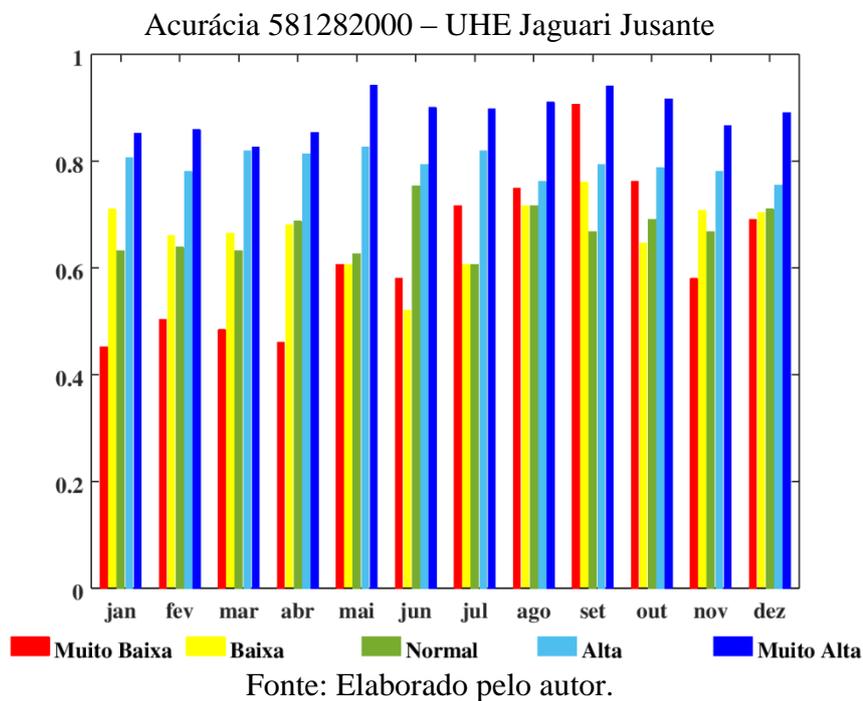


Figura D4: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de calibração.

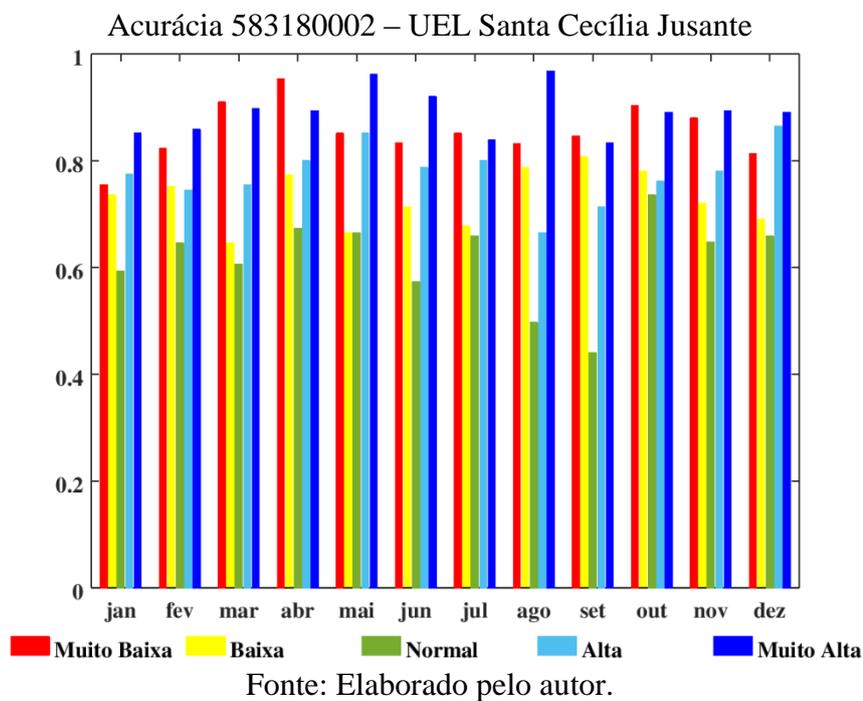


Figura D5: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de calibração.

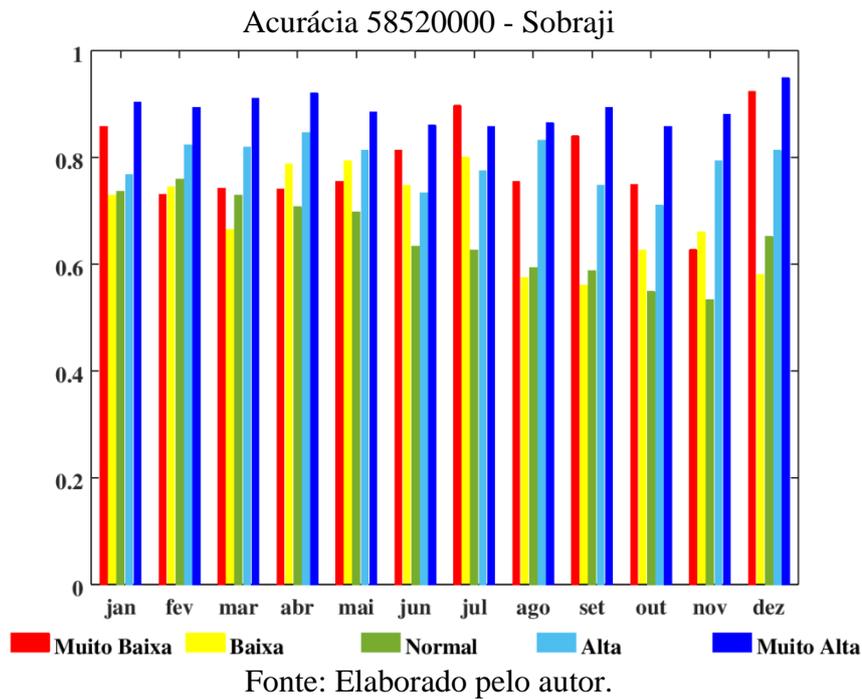


Figura D6: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de calibração.

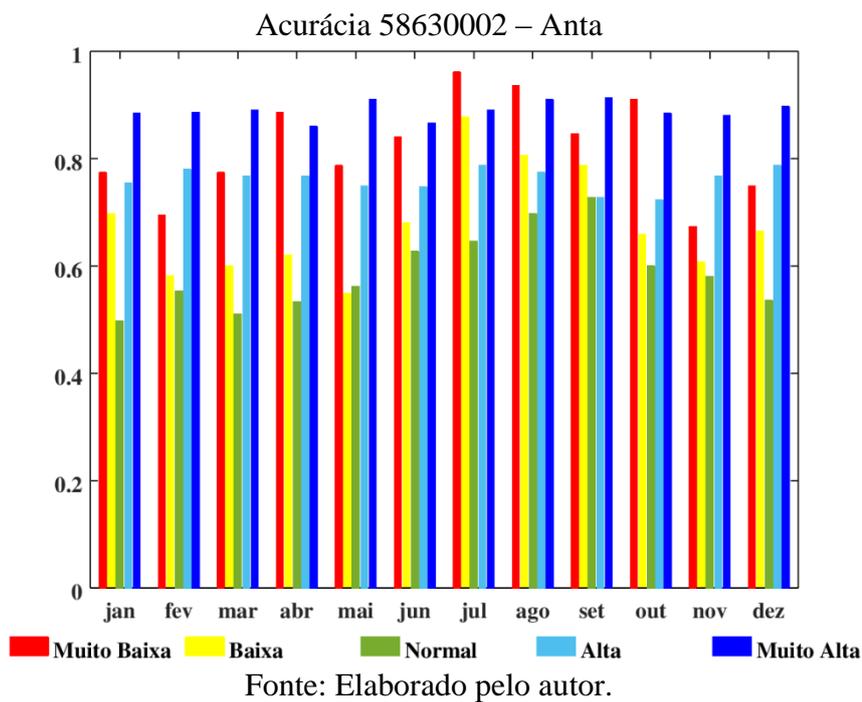


Figura D7: Acurácia mensal para o ponto 58654100 – Porto Velho do Cunha para o período de calibração.

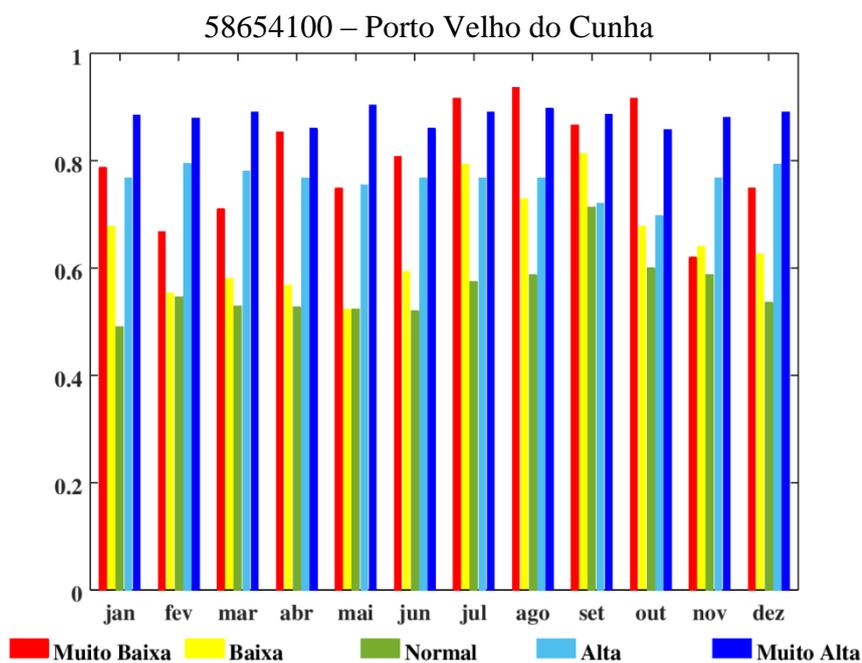


Figura D8: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de calibração.

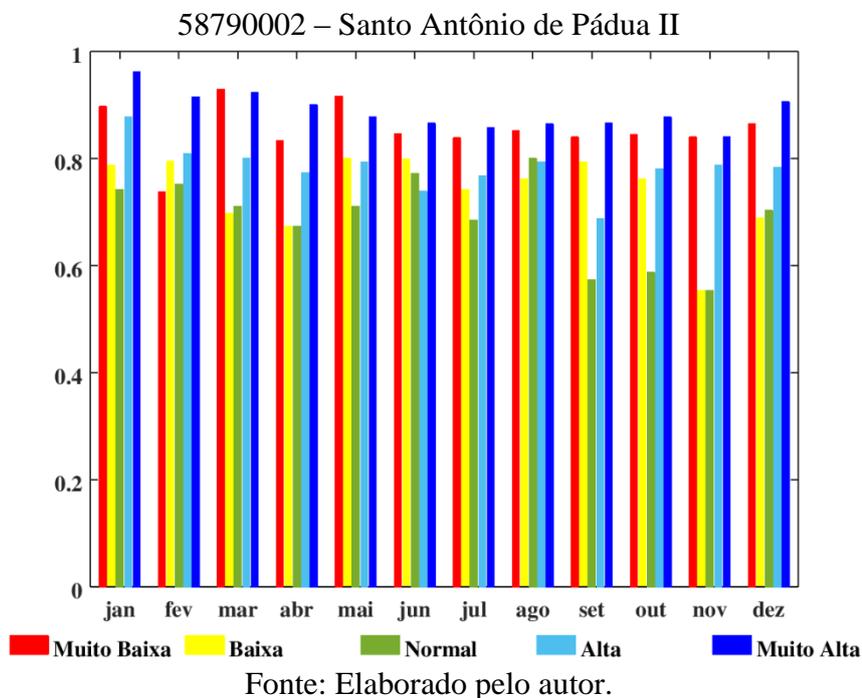


Figura D9: Acurácia mensal para o ponto 58874000 – Dois Rios para o período de calibração.

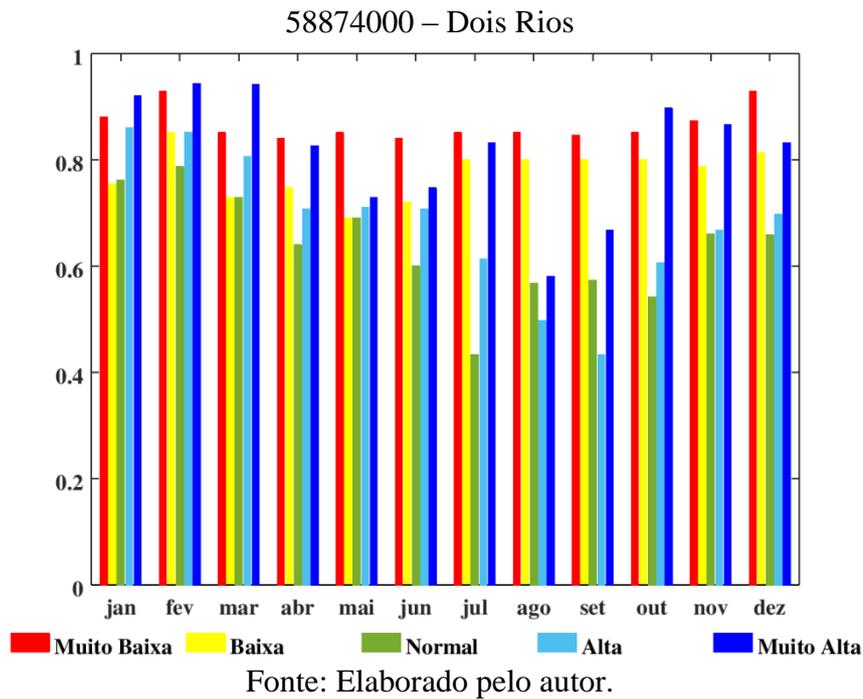


Figura D10: Acurácia mensal para o ponto 58960000 – Cardoso Moreira para o período de calibração.

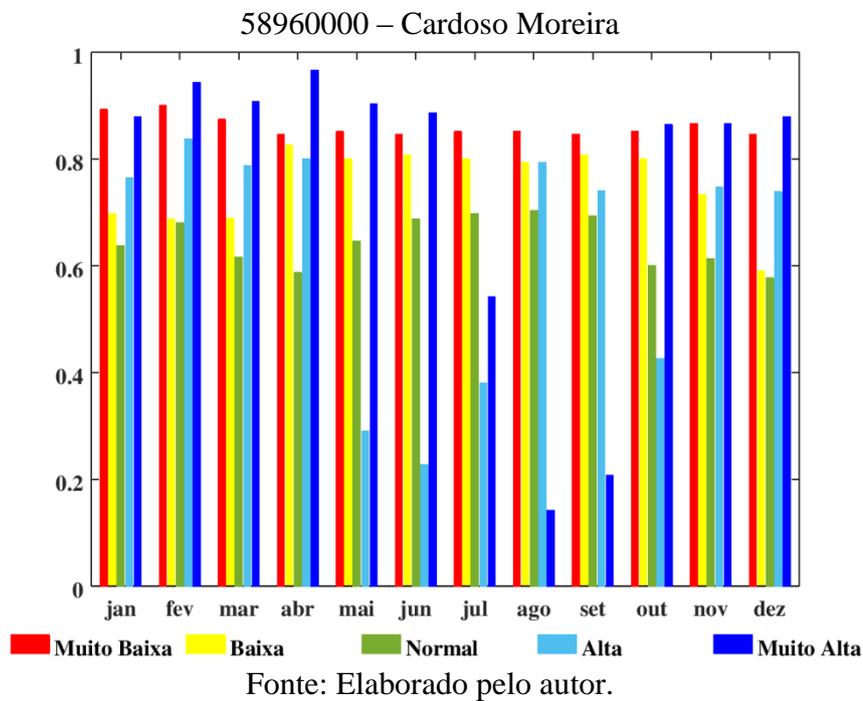
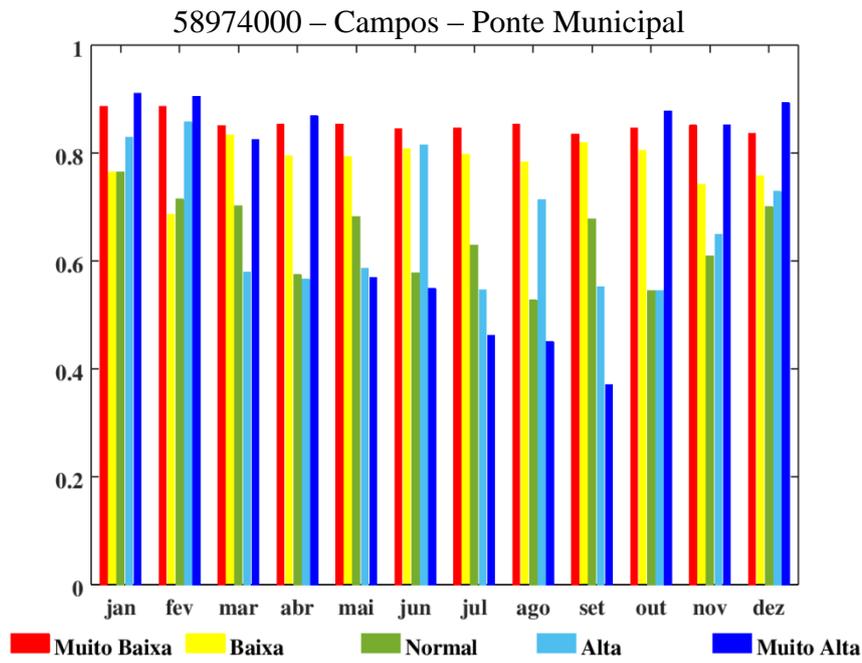


Figura D11: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de calibração.



Acurácia mensal para o período de verificação

Figura D12: Acurácia mensal para o ponto 58040000 – São Luís do Paraitinga para o período de verificação

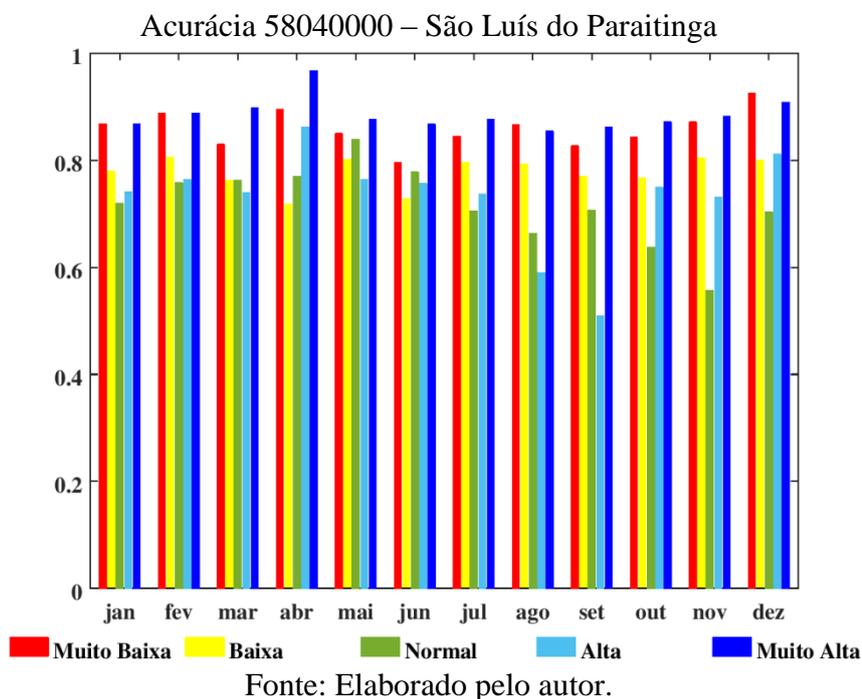


Figura D13: Acurácia mensal para o ponto 58099000 – Santa Branca para o período de verificação.

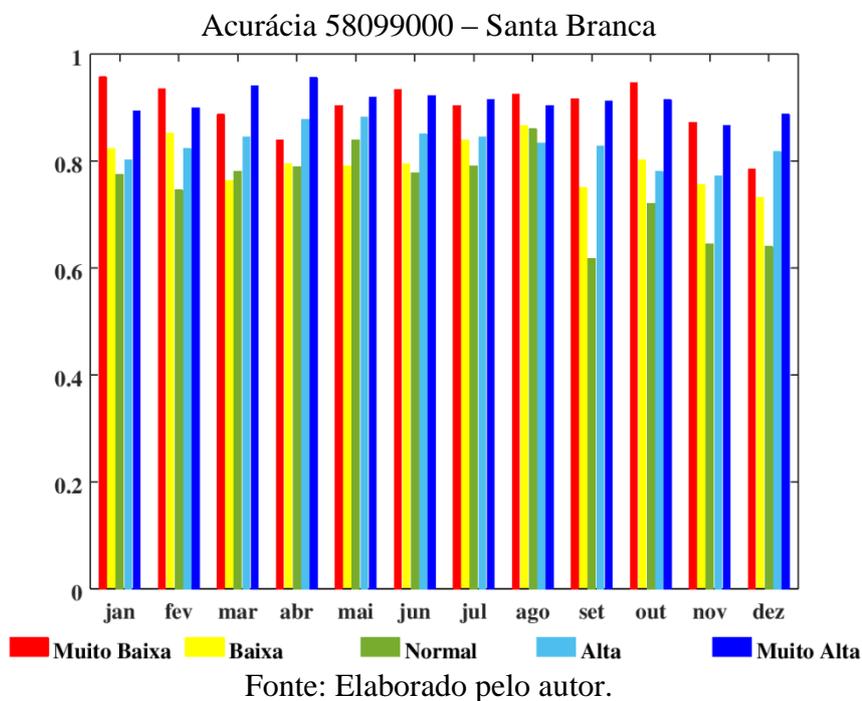


Figura D14: Acurácia mensal para o ponto 581282000 – UHE Jaguari Jusante para o período de verificação

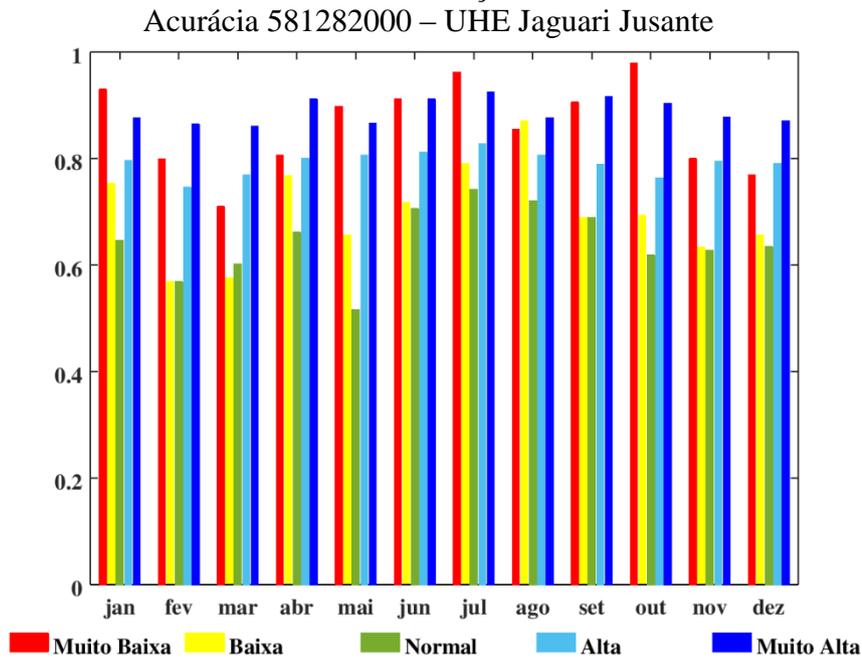


Figura D15: Acurácia mensal para o ponto 58318002 – UEL Santa Cecília Jusante para o período de verificação.

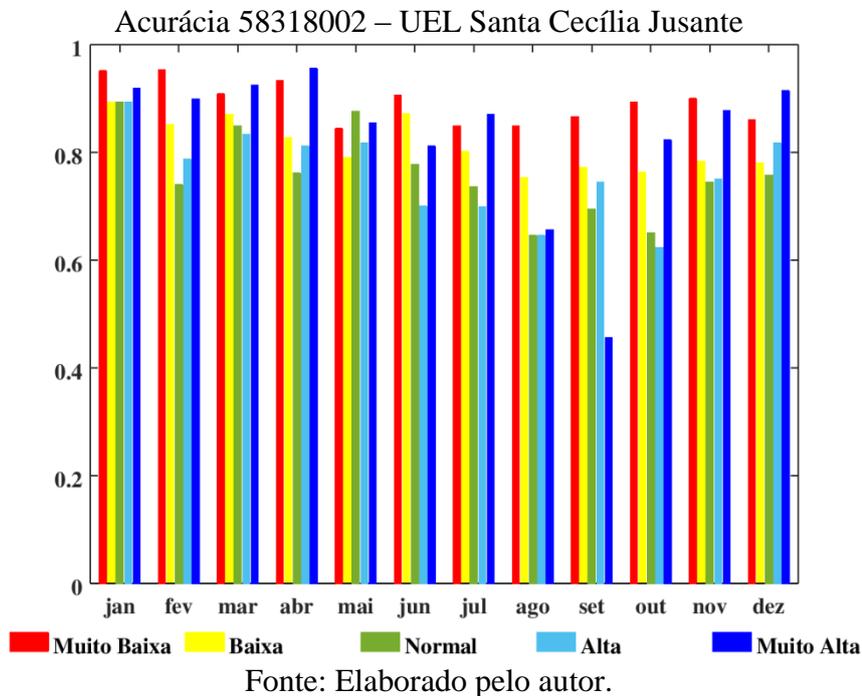


Figura D16: Acurácia mensal para o ponto 58520000 – Sobraji para o período de verificação.

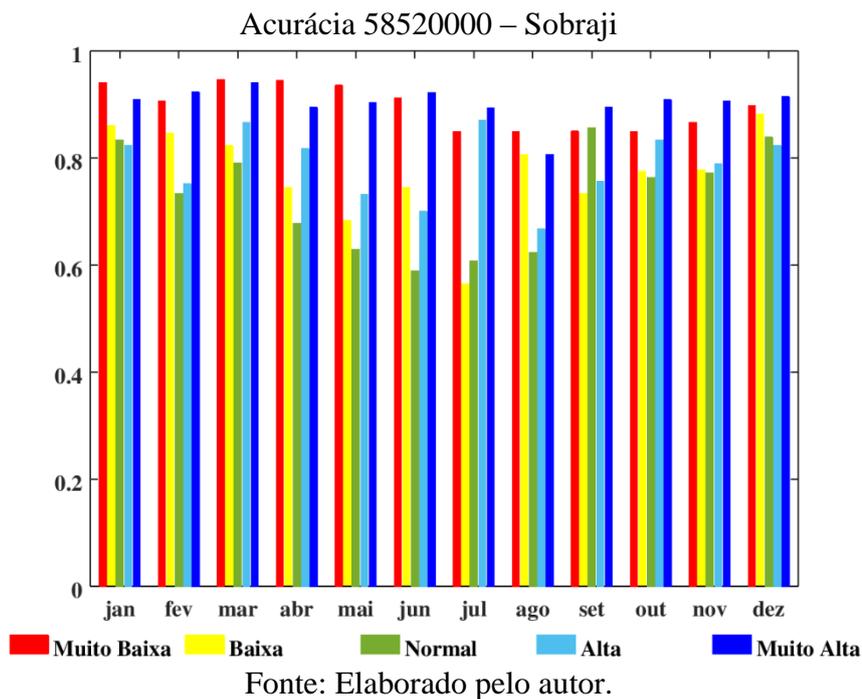


Figura D17: Acurácia mensal para o ponto 58630002 – Anta para o período de verificação.

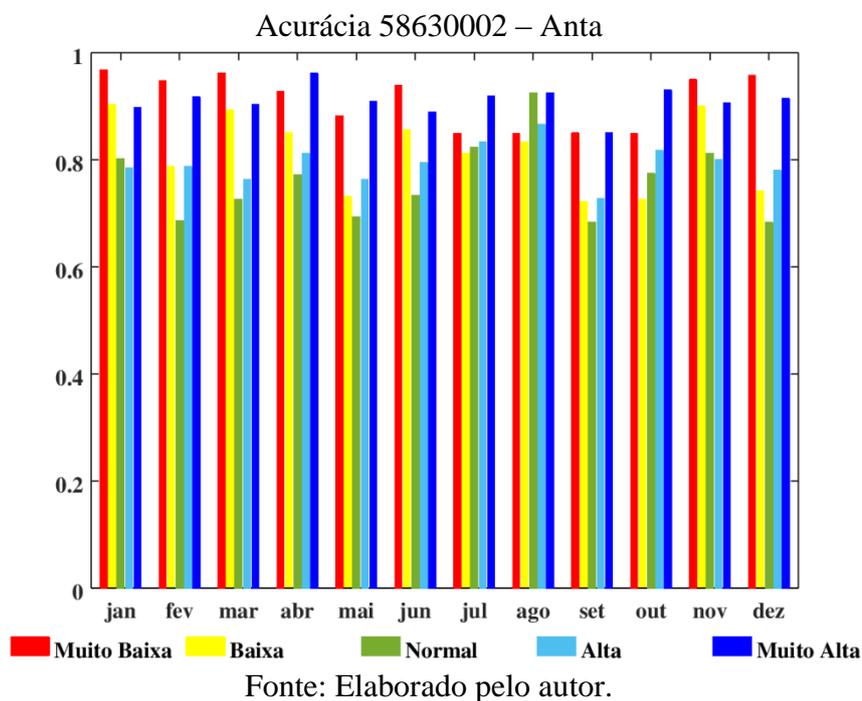


Figura D18: Acurácia mensal para o ponto 58654100 – Porto Velho do Cunha para o período de verificação.

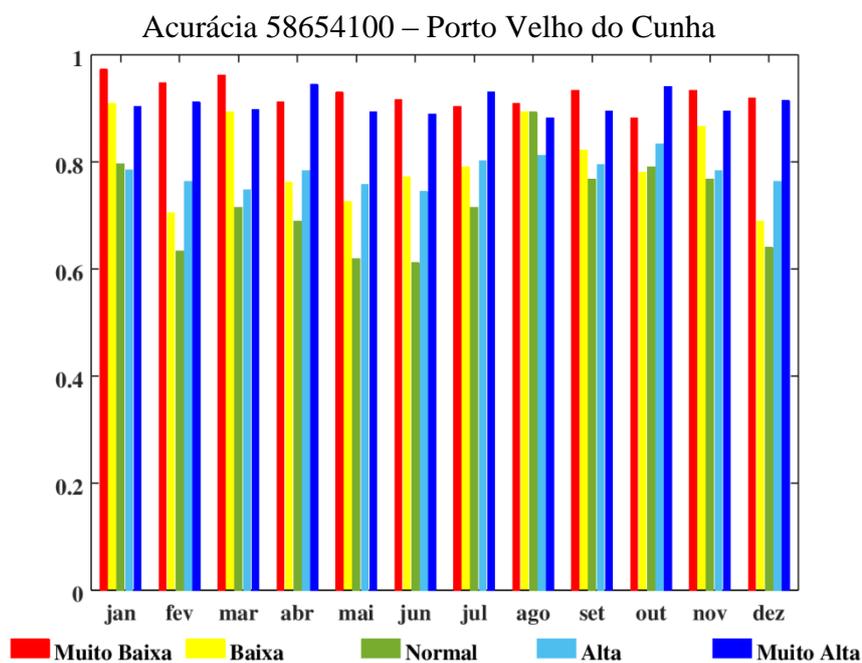


Figura D19: Acurácia mensal para o ponto 58790002 – Santo Antônio de Pádua II para o período de verificação.

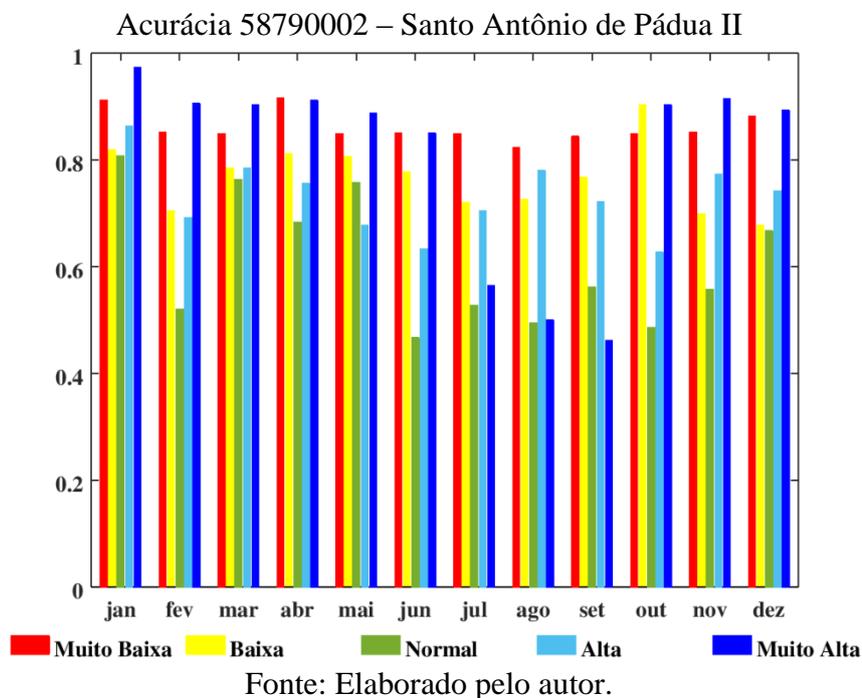


Figura D20: Acurácia mensal para o ponto 58874000 – Dois Rios para o período de verificação.

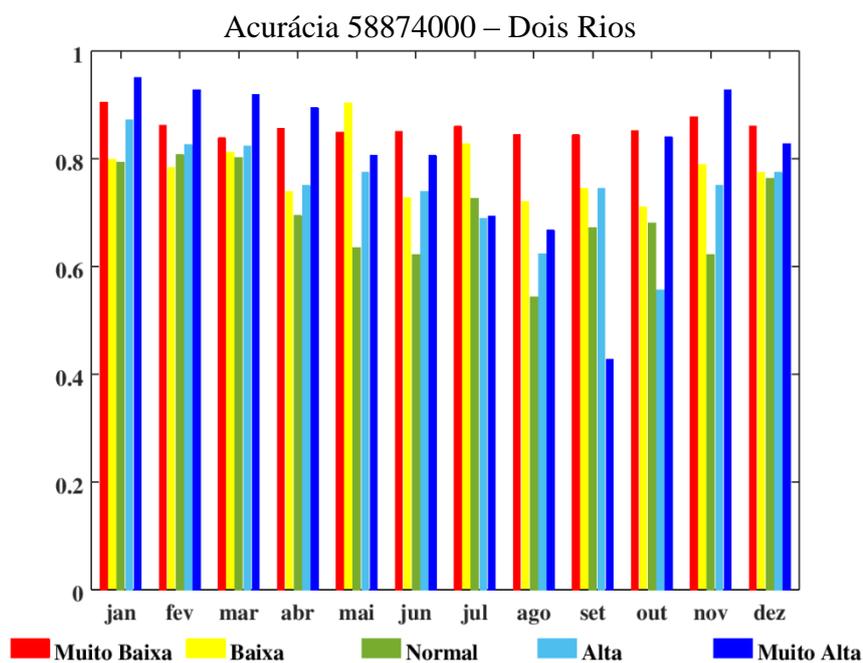


Figura D21: Acurácia mensal para o ponto 58960000 – Cardoso Moreira para o período de verificação.

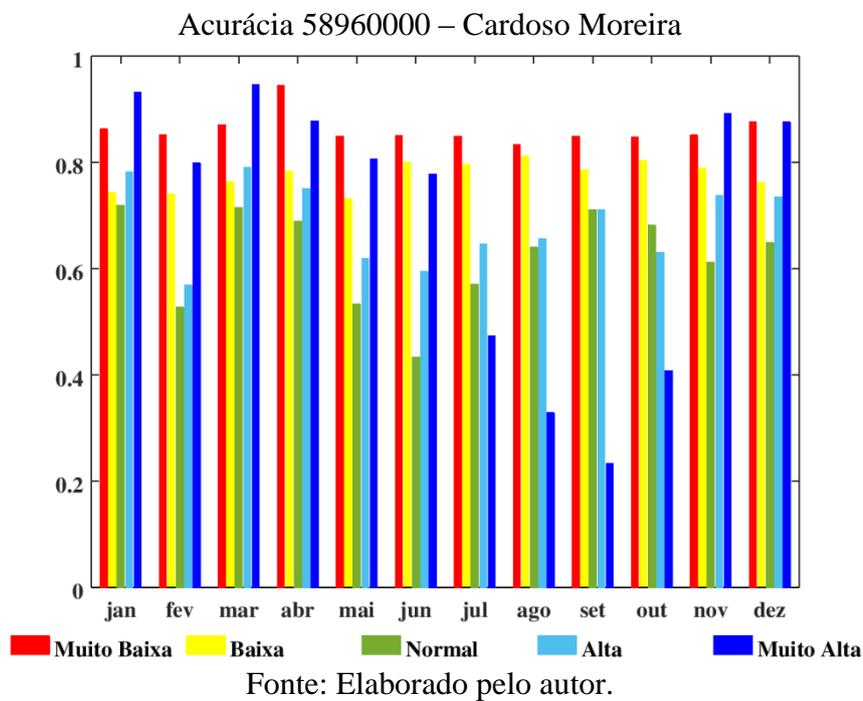
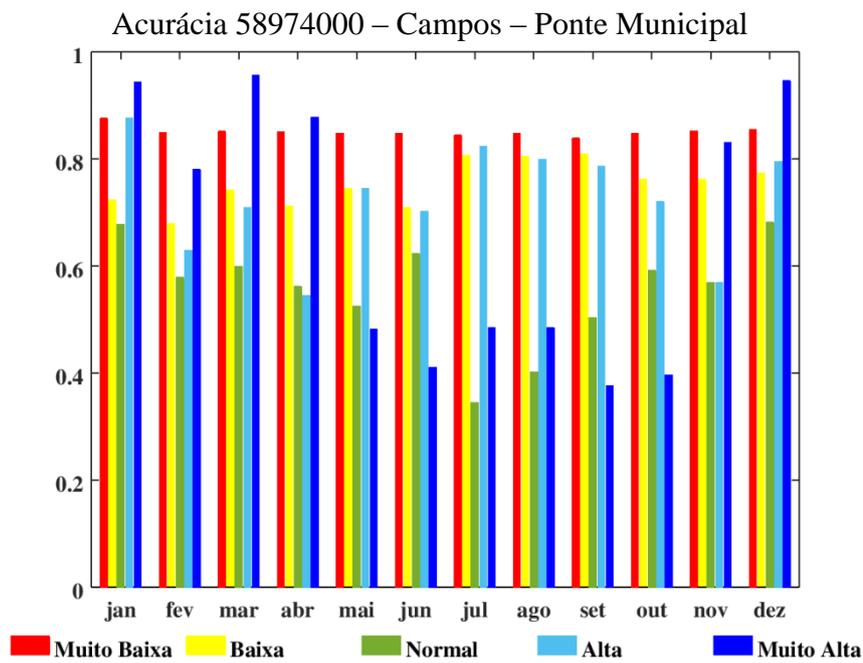


Figura D22: Acurácia mensal para o ponto 58974000 – Campos – Ponte Municipal para o período de verificação.



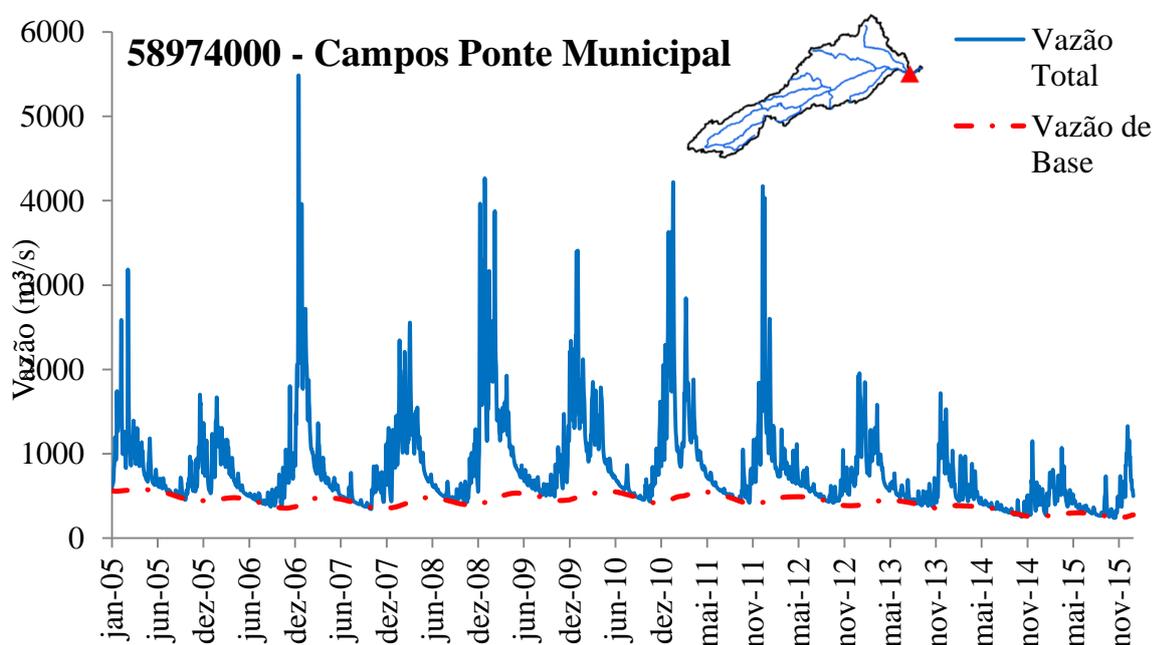
Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo E

Avaliação das saídas de escoamento de base e evapotranspiração da bacia

Este anexo apresenta os resultados das saídas do modelo para o escoamento de base para a evaporação da bacia. A Figura E1 mostra o hidrograma da simulação da condição atual da bacia, para o posto mais próximo do exutório da bacia (Campos – Ponte Municipal) indicando o escoamento de base. O modelo consegue representar adequadamente o comportamento do escoamento de base, com picos posteriores ao pico de vazão, representando corretamente inclusive o período de estiagem entre 2014 e 2015.

Figura E1: Hidrograma simulado para bacia (2005 a 2015) na condição atual indicando a vazão de base.

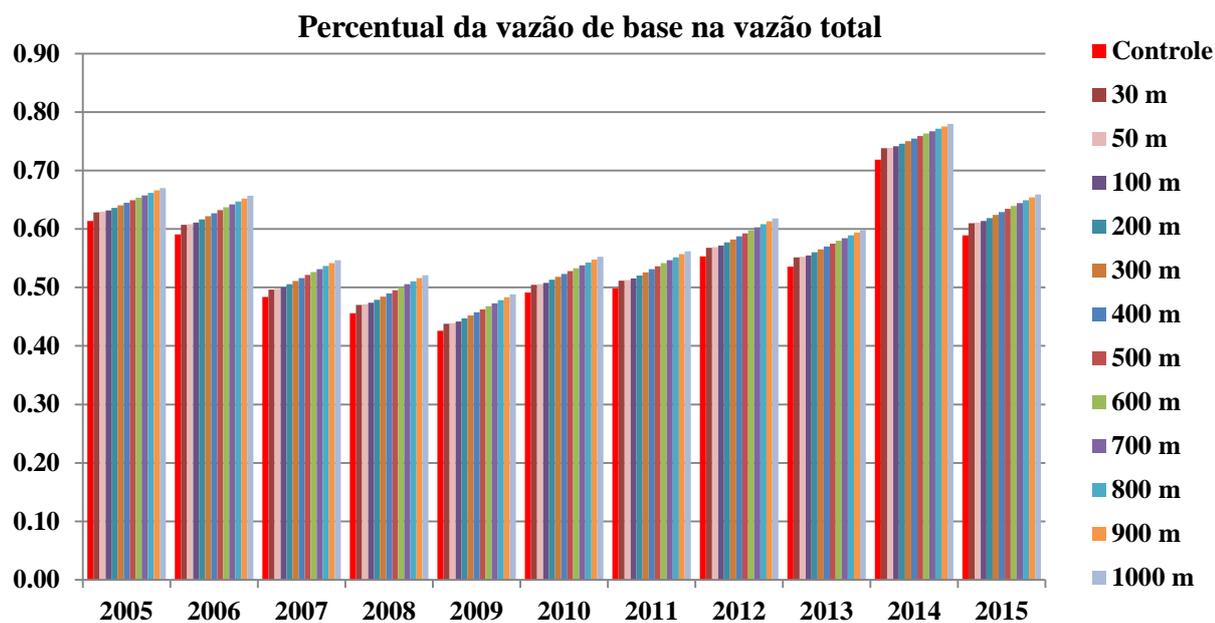


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura E2 mostra a relação entre a vazão média anual e a vazão média anual de base para a bacia do rio Paraíba do Sul. A vazão de base representa entre 40% e 70% do escoamento da bacia, sendo que o escoamento de base corresponde a frações maiores do escoamento total em anos de estiagem, em anos em que a vazão média é maior, a parcela de escoamento de base é menos representativa da vazão total.

Quanto à variação do escoamento de base em função do aumento da faixa de APP, a parcela de representação do escoamento de base é maior quanto maior a faixa de APP. Ainda assim, as variações são pequenas (de 5 a 7% para o cenário de 1000 m) e independentes do percentual de vazão que é representado pelo escoamento de base.

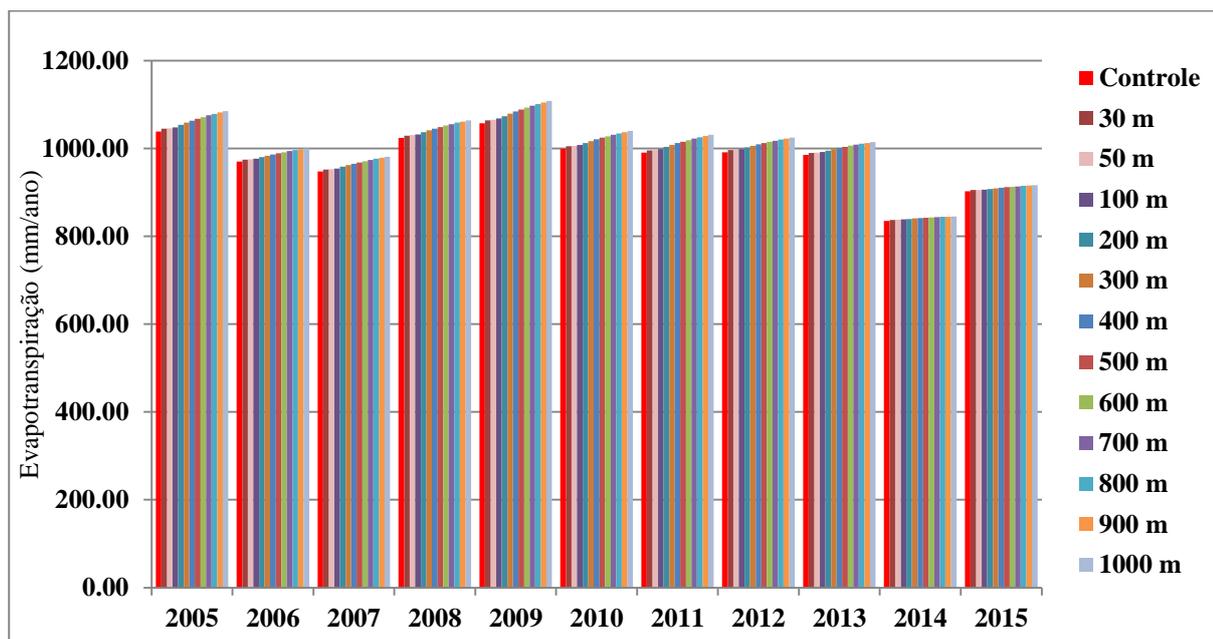
Figura E112: Relação entre a vazão média anual da bacia e a vazão média anual de base total pertencente ao escoamento de base da bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura E3 apresenta a evapotranspiração anual da bacia para os anos de simulação em cada um dos cenários. A evapotranspiração é maior quanto maior a área de vegetação florestal de margem, sendo que a maioria dos anos tem comportamento semelhante no acréscimo que a vegetação florestal promove para a evapotranspiração, exceto os anos de 2014 e 2015, onde o aumento da evapotranspiração promovido pelas áreas de vegetação de margem é mais discreto que nos anos anteriores. Os anos de 2014 e 2015 foram anos de totais pluviométricos excepcionalmente abaixo da média para toda a bacia do rio Paraíba do Sul, e, como o incremento de evapotranspiração promovido pela vegetação florestal está associado com a maior capacidade do reservatório superficial do modelo, a hipótese é que, apesar de haver maior capacidade para evapotranspiração, a precipitação reduzida durante este período não foi suficiente para que o incremento de capacidade destes reservatórios fossem utilizados e promovessem maior evapotranspiração.

Figura E3: Evapotranspiração anual da bacia para os anos de simulação, para o controle e cenários de recomposição da faixa de vegetação de margem dos cursos d'água da bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo F

Análise de sensibilidade do modelo para os parâmetros fixos

Para avaliação da sensibilidade do modelo aos parâmetros de uso da terra, uma análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros fixos (albedo, índice de área foliar, altura média da vegetação e resistência superficial). Este teste é semelhante ao apresentado por Bayer (2014), com a diferença que nesta aplicação o modelo foi previamente calibrado, utilizando os mesmos valores de parâmetros fixos utilizados pela autora para simulações.

A análise de sensibilidade utiliza uma faixa de valores ampla o suficiente para compreender os valores de parâmetros fixos utilizados para o uso Floresta e Agrícola, utilizados na elaboração das URHs utilizadas para a área de estudo. O intervalo utilizado para análise de sensibilidade é mostrado na tabela F1 e foi utilizado com base em valores adotados em outras aplicações do MGB.

Tabela F1: Intervalo de variação e valores adotados para as coberturas agrícola e floresta na análise de sensibilidade do modelo. IAF é o índice de área foliar, rs a resistência superficial e h a altura média da vegetação.

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor utilizado para área agrícola	Valor utilizado para floresta	Valor máximo
Albedo []	0,10	0,24	0,12	0,30
IAF []	0,10	1,00	6,00	10,00
rs [s/m]	25,00	60,00	60,00	250,00
H [m]	0,50	0,50	10,00	30,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

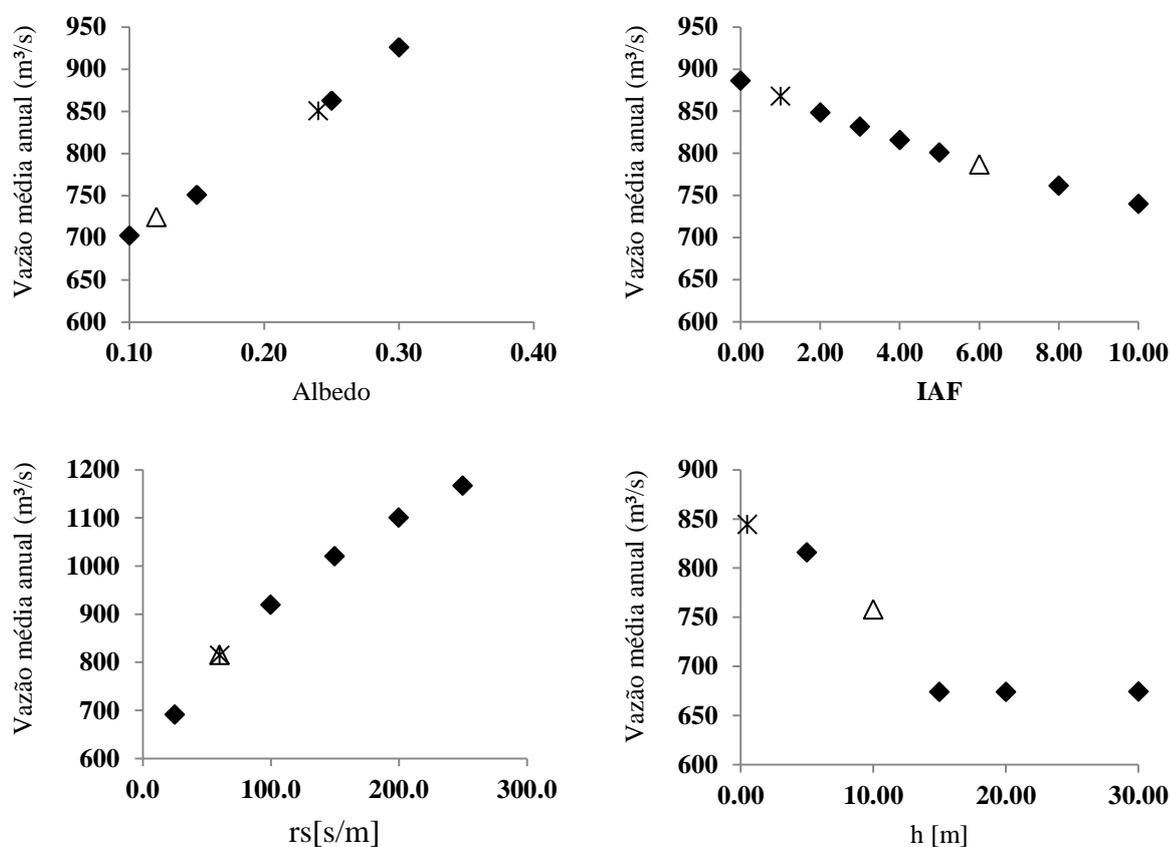
Para realizar a análise de sensibilidade, considera-se que todas as URH (exceto ao URH água) do modelo possuem parâmetros fixos iguais aos indicados na tabela F1, enquanto que os parâmetros calibráveis foram mantidos iguais aos encontrados na calibração do modelo.

Então, cada parâmetro fixo foi variado individualmente, mantendo constantes e iguais aos adotados nas simulações os parâmetros que não estavam em análise, por fim, o modelo é rodado para o período de estudo (2005 a 2015) e a vazão média do período é calculada para o último ponto da bacia.

A figura F1 mostra os resultados em termos de vazão média do período para cada um dos parâmetros utilizados, os parâmetros albedo e resistência superficial, quando aumentados individualmente, resultam em aumento da vazão média enquanto que os parâmetros IAF e h se comportam de maneira inversa.

A respeito da taxa de variação promovida pelas alterações de cada um dos parâmetros, a resistência superficial aparece como o que o modelo possui a maior sensibilidade. Os resultados desta análise concordam com os encontrados por Bayer (2014), que avaliou a sensibilidade do MGB na bacia do rio das Almas.

Figura F1: Análise de sensibilidade dos parâmetros fixos do modelo, (a) albedo, (b) índice de área foliar (IAF), resistência superficial (rs) e altura média da vegetação (h). Os pontos indicados com Δ são os valores adotados para cobertura floresta e * são os valores adotados para a cobertura do tipo agrícola.



Fonte: Elaborado pelo autor.