

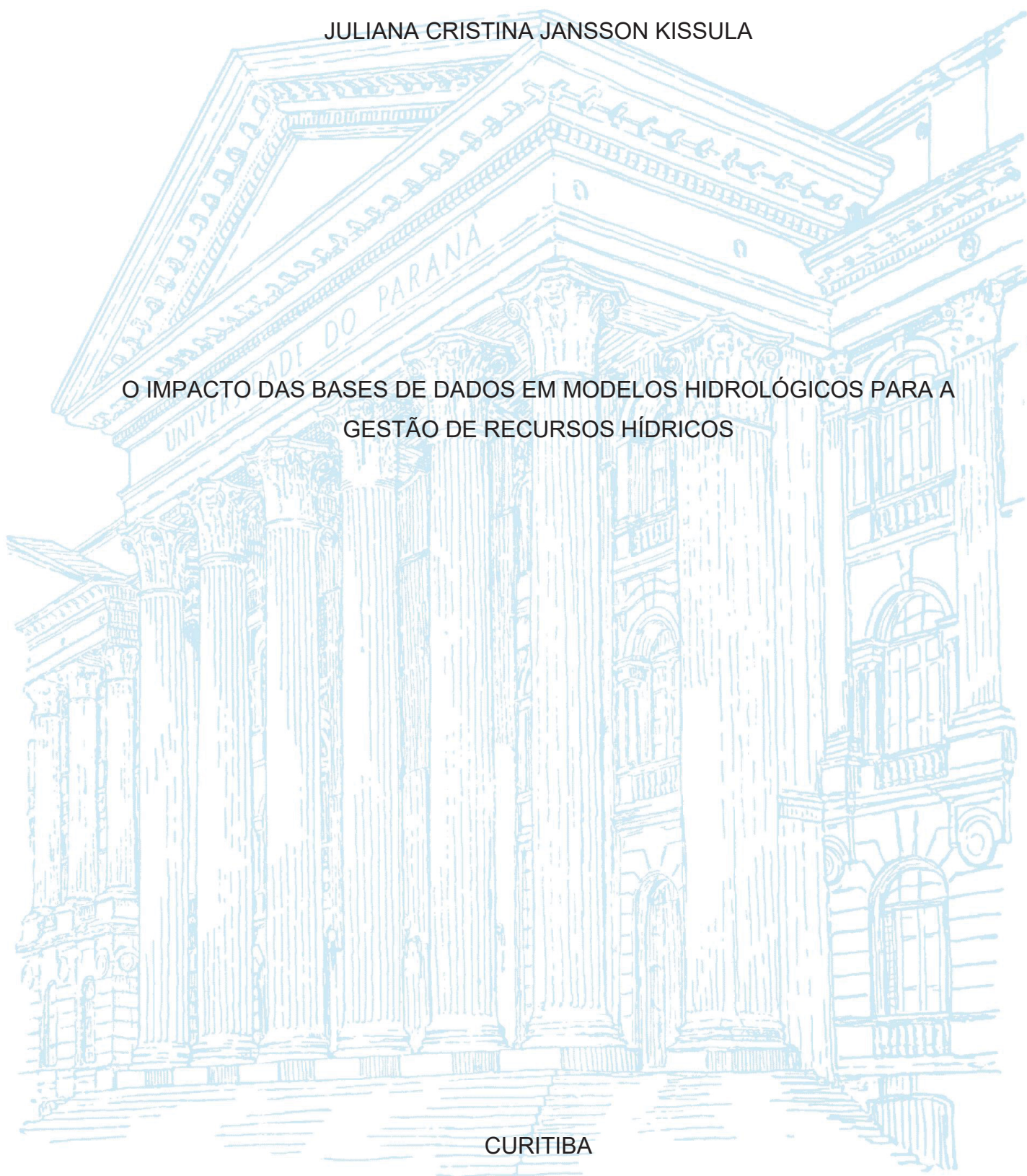
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA CRISTINA JANSSEN KISSULA

O IMPACTO DAS BASES DE DADOS EM MODELOS HIDROLÓGICOS PARA A
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

CURITIBA

2023



JULIANA CRISTINA JANSSON KISSULA

O IMPACTO DAS BASES DE DADOS EM MODELOS HIDROLÓGICOS PARA A
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Dissertação de Mestrado, apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Kissula, Juliana Cristina Jansson

O impacto das bases de dados em modelos hidrológicos para a gestão de recursos hídricos / Juliana Cristina Jansson Kissula. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes

Coorientador: Daniel Henrique Marco Detzel

1. Desenvolvimento de recursos hídricos. 2. Solo – Uso. 3. Hidrologia - Modelos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo. IV. Detzel, Daniel Henrique Marco. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JULIANA CRISTINA JANSSON KISSULA** intitulada: **O impacto das bases de dados em Modelos Hidrológicos para a Gestão de Recursos Hídricos**, sob orientação do Prof. Dr. CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Dezembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

15/12/2023 11:40:22.0

CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

20/12/2023 14:17:33.0

JÚLIO GOMES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/12/2023 16:30:27.0

FERNANDO MAINARDI FAN

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

15/12/2023 19:34:43.0

ELOY KAVISKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter permitido concluir o sonho de fazer um mestrado em algo que realmente queria estudar. Em todos os momentos, pude sentir e perceber Seu cuidado e orientação em todo o processo, o que fez tudo ainda mais especial.

Agradeço aos meus pais, Gerson e Eliane, por todo o exemplo de ética e dedicação em tudo o que fazem, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando, aconselhando e corrigindo quando necessário. Vocês foram fundamentais em minha formação – seja como pessoa, estudante e profissional.

Ao professor Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes pela orientação, suporte e aprendizado nesse tempo, que com seu jeito “macarrônico” de ser, nos leva a ver as coisas sob outra perspectiva e nos ensina de um modo bem singular. Foi uma honra ser sua orientanda. Ao professor Daniel Henrique Marco Detzel, pela coorientação, *insights* de conversas e reuniões em que percebia o privilégio que tive em poder usufruir um pouco do conhecimento dessa dupla.

Agradeço à banca examinadora deste trabalho: professores Júlio Gomes e Eloy Kaviski, da Universidade Federal do Paraná, e professor Fernando Mainardi Fan, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por suas excelentes contribuições.

À Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos – COBRAPE, não somente por ter permitido que não estivesse em tempo integral no escritório para desenvolver esse trabalho, mas também por ser onde cresci profissionalmente e pude conhecer a área de trabalho em que mais me identifico.

Além disso, nela que conheci profissionais que me inspiraram e a quem também agradeço: ao Christian Taschelmayer, que me coordenou desde que entrei na empresa e me ensinou muito, influenciando inclusive no “gosto” pelo geoprocessamento; e à Camila de Carvalho Almeida, que começou como uma colega de profissão e se tornou uma irmã, me aconselhando e compartilhando dessa jornada acadêmica e também na vida.

Por fim, mas não menos importante, à minha família e amigos, que foram compreensivos quando precisei me ausentar, me apoiaram em todos os momentos e compartilharam comigo mais essa realização.

RESUMO

A água é um recurso essencial à vida e, por meio do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global, é um composto vital para a regulação do clima terrestre. Porém, as mudanças climáticas, juntamente com as pressões socioeconômicas atuais, impulsionam a escassez de água e aumentam o desafio da gestão dos recursos hídricos e seu planejamento. No Brasil, tal gestão é regida pela Lei nº 9.433/97, que prevê instrumentos de gestão de recursos hídricos com a estimativa da disponibilidade hídrica para o gerenciamento adequado das águas. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo estimar adequadamente a disponibilidade hídrica, focando em diferentes bases de dados e calibrações de um modelo hidrológico. A hipótese é que a variação das estimativas de disponibilidade hídrica está relacionada ao uso da terra. Para testá-la, considera-se a bacia do rio Iguaçu como estudo de caso e abordam-se três configurações de calibrações do modelo hidrológico, aplicadas em duas diferentes bases de dados de uso da terra. Os resultados apresentaram impacto nas estimativas da disponibilidade hídrica, especialmente nas vazões com maior permanência, enquanto nas vazões de menores permanências a variação ocorre com menor significância. Uma vez que as vazões de estiagem são a principal referência para determinação da disponibilidade hídrica a ser utilizada em planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, e sabendo-se da complexidade de se reproduzir processos naturais e estimar suas repercussões com precisão, entende-se que, em vez de um valor absoluto, adotar faixas de disponibilidade hídrica, considerando incertezas e variações, podem ser mais apropriadas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, ao invés da utilização de um número fixo. Dessa forma, estariam sendo incluídos indiretamente fatores que, porventura, não tenham sido identificados no processo pelos mais diversos motivos. Além disso, ao se obter tais faixas de incerteza com a utilização de um modelo hidrológico, os resultados refletem o efeito das entradas e saídas de processos hidrológicos com suas características de aleatoriedade.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos; uso e ocupação do solo; modelos hidrológicos; curva de permanência.

ABSTRACT

Water is an essential resource for life, and through the hydrological cycle and global atmospheric circulation, it plays a vital role in regulating the Earth's climate. However, climate change, coupled with current socio-economic pressures driving water scarcity, is increasing the challenge of water resource management and planning. In Brazil, such management is governed by Law No. 9,433/97, which establishes water resource management instruments, including the estimation of water availability for proper water management. Therefore, this research aimed to accurately estimate water availability, focusing on different databases and calibrations of a hydrological model. The hypothesis is that variations in water availability estimates are related to land use. To evaluate this hypothesis, the study considers the Iguaçu River basin as a case study and examines three model calibration configurations applied to two different land use databases. The results showed an impact on water availability estimates, especially for higher persistence flow rates, while variations in lower persistence flow rates were less significant. Since low-flow rates are the primary reference for determining water availability for water resource planning and management, and given the complexity of accurately reproducing natural processes and estimating their consequences, it is argued that, rather than relying on a single fixed value, adopting water availability ranges that account for uncertainties and variations may be more appropriate for water resource planning and management. This approach indirectly includes factors that may not have been identified during the modeling process for several reasons. Furthermore, by obtaining these uncertainty ranges using a hydrological model, the results reflect the effects of random characteristics of hydrological processes.

Keywords: water resource management; land use and land cover; hydrological models; flow duration curve.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DO PLANO EXPERIMENTAL DO PRESENTE TRABALHO	17
FIGURA 2.1 - ESQUEMA LÚDICO DOS DIFERENTES MODELOS HIDROLÓGICOS	20
FIGURA 3.1 – BACIA DO RIO IGUAÇU: A ÁREA DE ESTUDO, COM DESTAQUE PARA A REGIÃO METROPOLITANA (RM) DE CURITIBA E MUNICÍPIOS COM MAIS DE 30.000 HABITANTES	30
FIGURA 3.2 – PRINCIPAIS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NA BACIA DO RIO IGUAÇU	32
FIGURA 3.3 – SUB-BACIAS DO PROJETO IGUAÇU	32
FIGURA 3.4 – ESQUEMA METODOLÓGICO DO MGB	34
FIGURA 3.5 - ESQUEMA DO BALANÇO HÍDRICO NO SOLO REALIZADO NO MGB	35
FIGURA 3.6 – ESQUEMA DOS RESERVATORIOS LINEARES DENTRO DE UMA MINIBACIA.....	38
FIGURA 3.7 - DELIMITAÇÃO DA BACIA, REDE DE DRENAGEM E MINIBACIAS RESULTANTES DO PRÉ-PROCESSAMENTO	42
FIGURA 3.8 – URHS OBTIDAS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU CONFORME FAN <i>ET AL.</i> (2015)	43
FIGURA 3.9 – URHS OBTIDAS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU CONFORME MAPBIOMAS (2022).....	43
FIGURA 3.10 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE URHS EM CADA SUB-BACIAS CONFORME FAN <i>ET AL.</i> (2015)	44
FIGURA 3.11 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE URHS EM CADA SUB-BACIAS CONFORME MAPBIOMAS (2021).....	45
FIGURA 3.12 – FLUVIOGRAMAS DIÁRIOS DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO	49
FIGURA 3.13 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO	50
FIGURA 3.14 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA.....	55
FIGURA 3.15 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8.....	60
FIGURA 3.16 - SUB-BACIAS UTILIZADAS NO ESTUDO DE PARANHOS (2023).....	64
FIGURA 3.17 - POSTOS FLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS NO ESTUDO DE PARANHOS (2023).....	65
FIGURA 3.18 – EQUIVALÊNCIA DAS SUB-BACIAS VERIFICADAS.....	69
FIGURA 3.19 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023).....	72
FIGURA 3.20 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA	76
FIGURA 3.21 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA	79

FIGURA 3.22 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8.....	82
FIGURA 3.23 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8.....	85
FIGURA 3.24 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023)	88
FIGURA 3.25 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023)	91
FIGURA 4.1 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES COM AS URHS DE FAN <i>ET AL.</i> (2015) E MAPBIOMAS (2021), PARA TODAS AS CALIBRAÇÕES.....	97
FIGURA 4.2 – BOX-PLOT DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	102
FIGURA A.1 – FLUXOGRAMA DA ESTRATÉGIA DO ALGORITMO MOCOM-UA.....	122
FIGURA A.2 – ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO COMPLEXA	123

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - APLICAÇÕES DOS DIFERENTES TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS NO GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS	21
QUADRO 2.2 – RESUMO DE CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS MODELOS HIDROLÓGICOS	23
QUADRO 2.3 – PESQUISA DE ESTUDOS RECENTES ENVOLVENDO MODELAGEM HIDROLÓGICA E GESTÃO E PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS	27
QUADRO 2.4 - PESQUISA DE ESTUDOS RECENTES ENVOLVENDO O MGB E GESTÃO E PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS	28
QUADRO 3.1 - ADAPTAÇÃO DAS CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA PARA A GERAÇÃO DAS URHs	41
QUADRO 3.2 – ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO	47
QUADRO 3.3 – PROPRIEDADES DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO	48
QUADRO 3.4 – ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO, VARIANTES POR URHS	52
TABELA 3.2 – PARÂMETROS DE SOLO INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, VARIANTES POR URHS	53
TABELA 3.3 – PARÂMETROS INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, CONSTANTES POR URHS	53
TABELA 3.4 – PARÂMETROS DE SOLO VARIANTES POR URHS, RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA.....	54
TABELA 3.5 – PARÂMETROS CONSTANTES POR URHS RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA.....	54
TABELA 3.6 – PARÂMETROS DE SOLO VARIANTES POR URHS, RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA.....	58
TABELA 3.7 – PARÂMETROS CONSTANTES POR URHS RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA.....	59
TABELA 3.8 – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO, VARIANTES POR URHS.....	65
TABELA 3.9 – PARÂMETROS DE SOLO INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, VARIANTES POR URHS	66
TABELA 3.10 – PARÂMETROS INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, CONSTANTES POR URHS	66
TABELA 3.11 – PARÂMETROS DE SOLO CALIBRADOS POR PARANHOS (2023), VARIANTES POR URHS	67
TABELA 3.12 – PARÂMETROS CALIBRADOS POR PARANHOS (2023), CONSTANTES POR URHS ...	68
TABELA 3.13 – PARÂMETROS DE SOLO ADAPTADOS DE PARANHOS (2023), VARIANTES POR URHS	69
TABELA 3.14 – PARÂMETROS ADAPTADOS DE PARANHOS (2023), CONSTANTES POR URHS	71
TABELA 4.1 - COEFICIENTES DE EFICIÊNCIA DAS CALIBRAÇÕES E VALIDAÇÕES DO MGB PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU.....	96
TABELA 4.2 – DIFERENÇA ENTRE AS MAIORES E MENORES VAZÕES SIMULADAS PARA CADA PERMANÊNCIA	102
TABELA 4.3 - VAZÕES DE DIFERENTES PERMANÊNCIAS PARA TODAS AS SIMULAÇÕES.....	105
TABELA 4.4 – DIFERENÇA EM TERMOS PERCENTUAIS ENTRE AS MAIORES E MENORES VAZÕES SIMULADAS PARA CADA PERMANÊNCIA	107

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas e Saneamento
CAMELS-BR-	<i>Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies – Brazil</i>
ESA	- <i>European Space Agency</i>
GRH	- Gestão de Recursos Hídricos
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
IPH	- Instituto de Pesquisas Hidráulicas
logNSE	- logaritmo de eficiência de Nash-Sutcliffe
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MGB	- Modelo de Grandes Bacias
MOCOM-UA	- <i>Multi-Objective Complex Evolution</i>
NSE	- eficiência de Nash-Sutcliffe
ONU	- Organização das Nações Unidas
PRH	- Plano de Recursos Hídricos
QGIS	- Quantum GIS
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SIN	- Sistema Interligado Nacional
SNIRH	- Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	- Usina Hidrelétrica
URH	- Unidade de Resposta Hidrológica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	14
1.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS DA PESQUISA	14
1.3 SÍNTESE DO MÉTODO.....	15
1.4 PLANO EXPERIMENTAL.....	15
1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	18
2 MODELOS HIDROLÓGICOS E DISPONIBILIDADE HÍDRICA	19
2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS	19
2.1.1 Modelos hidrológicos e aplicações.....	22
2.2 SÍNTESE CONCEITUAL DO CAPÍTULO	29
3 MODELO HIDROLÓGICO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU 30	
3.1 BACIA DO RIO IGUAÇU.....	30
3.2 MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB).....	32
3.2.1 Módulo de balanço de água e energia no solo.....	34
3.2.2 Módulo de escoamento interno na minibacia	37
3.2.3 Módulo de escoamento na rede de drenagem	38
3.3 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL.....	40
3.4 BASE DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	45
3.5 CALIBRAÇÃO DO MGB PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU	51
3.5.1 Calibração completa.....	52
3.5.2 Calibração apenas com a sub-bacia 8	58
3.5.3 Calibração de Paranhos (2023).....	63
3.6 VALIDAÇÃO DO MODELO	75
3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO	94
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
REFERÊNCIAS.....	111
ANEXOS	119
A. CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	120
ALGORITMO MOCOM-UA.....	121
REFERÊNCIAS.....	123
B. ARTIGO XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS	125

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida humana, à vida em diferentes ecossistemas e, por meio do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global, é um composto vital para a regulação do clima terrestre. Porém, as mudanças no regime de precipitação, aumento das temperaturas global e do nível do mar, juntamente com as pressões socioeconômicas atuais são considerados os principais impulsionadores da escassez de água, o que aumenta o desafio de gerir seus múltiplos usos (Phan *et al.*, 2019). Dessa forma, é necessário planejamento para que se possa garantir que agora e no futuro haja água em quantidade e qualidade necessárias para os diversos usos, e inseridas nos conceitos de sustentabilidade da ONU (1987).

No Brasil, a Lei nº 9.433/97 (Brasil, 1997), também conhecida como “Lei das Águas”, é a referência de planejamento e gestão e prevê, dentre outras normativas, instrumentos de gestão de recursos hídricos. A gestão de recursos hídricos, por sua vez, é o processo coordenado e orientado por metas, de planejar, planejar, desenvolver e gerenciar os recursos hídricos, envolvendo tanto os aspectos quantitativos como os qualitativos da água, seus múltiplos usos e a sinergia destes e com o meio ambiente, e inclui as instituições, infraestrutura, incentivos e sistemas de informação que apoiam e orientam a gestão da água (World Bank, 2022; Cardwell *et al.*, 2006).

O primeiro passo para a implementação desses instrumentos se dá a partir da elaboração dos chamados Planos de Recursos Hídricos, que preveem a estimativa da disponibilidade hídrica para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos dentre seus conteúdos mínimos, conforme descrito no Art. 7º da referida lei.

Por sua vez, a disponibilidade hídrica consiste na parcela da água que se tem disponível para utilização pela sociedade em seu desenvolvimento, considerando ainda que parte dela é necessária para a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos e aspectos ambientais. Uma das metodologias utilizadas para sua obtenção é a chamada curva de permanência, a qual relaciona a vazão com a porcentagem do tempo em que ela é igualada ou superada em relação ao seu período histórico, representando assim a probabilidade de excedência das vazões (Cruz e Tucci, 2008; Vogel e Fennessey, 1994). Diversos trabalhos, como de Cruz (2001), Mendes (2007) e Ruthes (2017), relacionam a curva de permanência aos instrumentos

de gestão de recursos hídricos, principalmente à outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

Contudo, a curva de permanência pode variar conforme o método utilizado para obtenção dos dados que a compõe, seja quanto às características do modelo, ou ainda o período, a qualidade e a quantidade dos dados empregados. A essas variações intrínsecas da representação de fenômenos e processos naturais, somam-se as variabilidades espaciais e temporais. Tudo isso contribui para o aumento da complexibilidade de se obter um valor exato do quanto de água se tem disponível para o uso, não apenas pela sociedade, mas por todos os meios e sistemas dependentes desse recurso.

Para simular os processos físicos do ciclo hidrológico de maneira mais aproximada da realidade das bacias hidrográficas é que foram desenvolvidos os modelos hidrológicos (Tucci, 2005). Contudo, como indicado por Machado (2002), o principal desafio da utilização de modelos hidrológicos consiste na dificuldade de se representar a heterogeneidade dos sistemas naturais, mesmo utilizando parâmetros distribuídos e um grande número de dados.

Nesse sentido, integrar os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) acoplados aos modelos hidrológicos é fundamental no contexto da gestão de recursos hídricos, porque permitem a geração de um banco de dados que funciona como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos. Dessa forma, além das variáveis hidrológicas propriamente ditas, possibilita previsões hidrológicas considerando, dentre outros, resultados decorrentes de mudanças no uso e ocupação do solo e no clima, aumentando a produtividade e servindo como uma das principais ferramentas de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (MACHADO, 2002; Santos *et al.*, 2006).

A junção de modelos hidrológicos aos SIGs tem se mostrado como uma das principais ferramentas para a estimativa da disponibilidade hídrica, uma vez que há um consenso de que se trata de um recurso muito produtivo por permitirem acelerar os processos de desenvolvimento e implementação desses modelos, além de facilitar e, conseqüentemente, melhorar a interpretação de seus resultados (Fan e Collischonn, 2014; Morad e Pérez, 2001).

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O conceito de disponibilidade hídrica é a base para os instrumentos da gestão de recursos hídricos, previstos na Lei nº 9.433/97 (Brasil, 1997) é um dos conteúdos mínimos dos Planos de Recursos Hídricos. Pode ser considerado como o conceito básico para a avaliação da concessão da outorga de direito de uso e, juntamente com a demanda e finalidade, um importante indicador para implementação da cobrança. Esta estratégia visa destacar o racional da água e seu reconhecimento como bem econômico e recurso finito, e permitir a definição da classe de enquadramento dos corpos de água, segundo os usos preponderantes.

Portanto, faz-se necessária a estimativa adequada da disponibilidade hídrica para a utilização na gestão dos recursos hídricos, de modo que se cumpram os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, como destacado a seguir:

Art. 1º A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997).

Diante do exposto, o presente estudo se estrutura no sentido de permitir estimar adequadamente a disponibilidade hídrica com vistas ao planejamento do uso da água, uma vez que se dispõe de inúmeras metodologias e ferramentas para seu cálculo.

1.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS DA PESQUISA

A hipótese da pesquisa está associada ao impacto hidrológico de diferentes bases de dados espaciais de uso e ocupação da terra na valoração da disponibilidade hídrica, utilizando de um modelo hidrológico acoplado a um SIG. A ideia é a de consolidar uma grande calculadora de informações espacializadas, podendo ser uma ferramenta útil para a estimativa dessa variação espacial e temporal da disponibilidade hídrica com fins de utilização na gestão de recursos hídricos.

Assim, o objetivo geral da pesquisa consiste em avaliar quais as possíveis implicações que o uso de diferentes bases de dados de uso da terra teria na estimativa da disponibilidade hídrica para utilização na gestão de recursos hídricos, adotando-se, para os cálculos, um modelo hidrológico georreferenciado. Para tanto, tomou-se a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, desde a Região Metropolitana de Curitiba/PR até sua foz, como estudo de caso.

Já os objetivos específicos da pesquisa podem ser destacados em (i) utilizar diferentes calibrações do modelo para avaliar a disponibilidade hídrica; (ii) estimar, em diferentes pontos de controle ao longo do curso do Rio Iguaçu, a disponibilidade hídrica; e (iii) associar essas disponibilidades calculadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/97 (Brasil, 1997).

1.3 SÍNTESE DO MÉTODO

A base metodológica utilizada se fundamenta na aplicação de um modelo hidrológico georreferenciado para a estimativa da disponibilidade hídrica em pontos de controle da bacia, utilizando para isso, dados de uso e ocupação da terra de diferentes fontes e níveis de detalhamento.

Além disso, foi utilizado um algoritmo para a calibração do modelo hidrológico MGB (Collischonn *et al.*, 2020) com diferentes divisões da bacia hidrográfica analisada, bem como com diferentes configurações e coeficientes do algoritmo. Contudo, deve ser ressaltado que, embora realizadas diferentes calibrações, o objetivo desta pesquisa não foi obter o melhor de conjunto de parâmetros calibrados, tampouco definir qual a melhor estratégia de calibração, mas sim obter diferentes conjuntos de parâmetros suficientemente calibrados para prosseguir com a modelagem.

Por fim, para avaliação das calibrações, validações e simulações, foram utilizados os coeficientes de eficiência gerados automaticamente pelo modelo, e também avaliados visualmente os hidrogramas e curvas de permanência geradas.

1.4 PLANO EXPERIMENTAL

A Figura 1.1 apresenta um esquema do plano experimental do estudo: o ponto de partida foi o artigo apresentado no anexo B deste documento, que estabelece uma

discussão sobre a disponibilidade hídrica caso se utilizasse informações diferentes de uso e ocupação da terra para sua estimativa.

Assim, para se testar tal hipótese, utilizou-se duas bases diferentes de informações de uso e ocupação da terra:

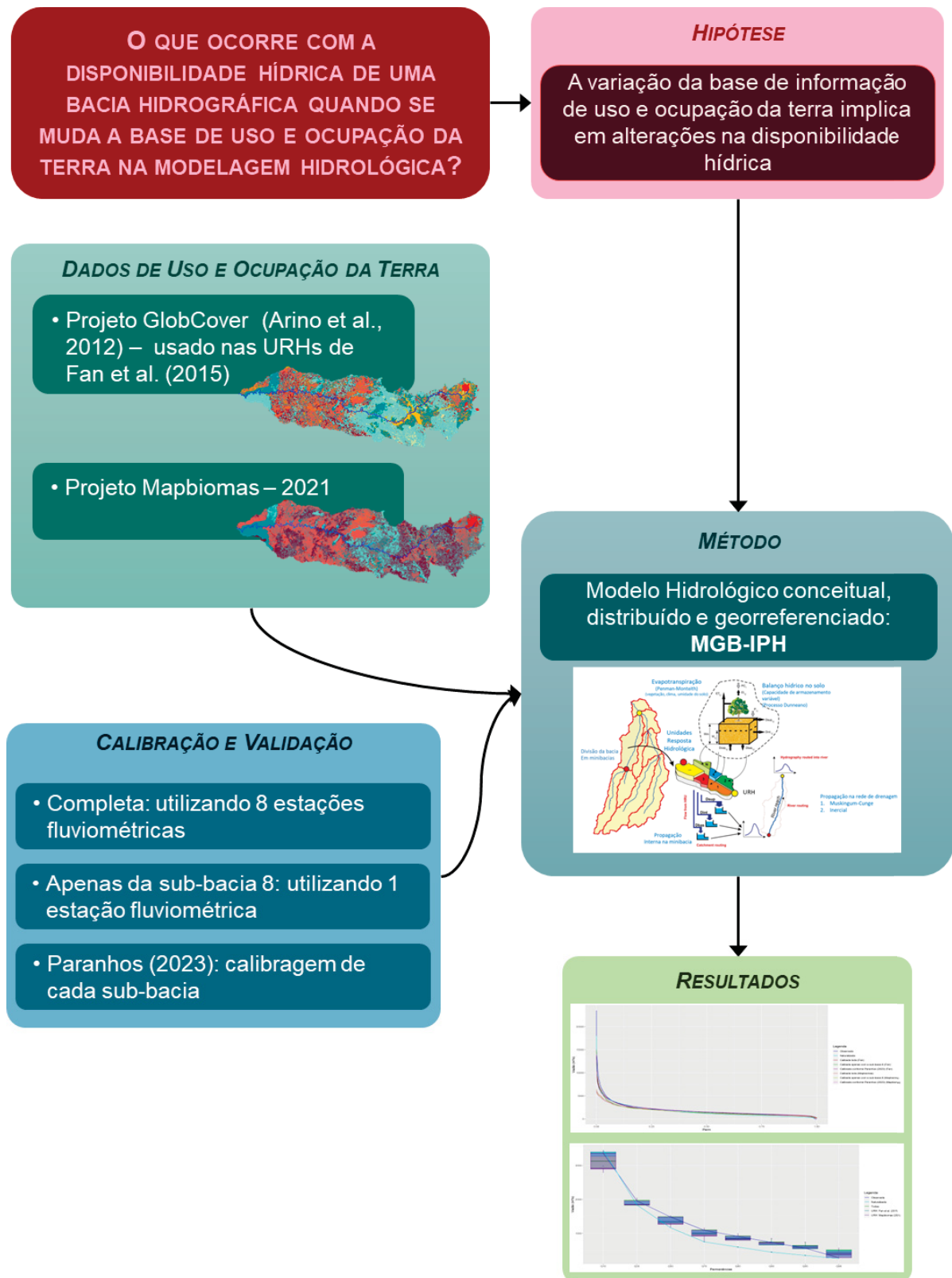
- Projeto GlobCover da *European Space Agency* (ESA), que, em parceria com a *Université Catholique de Louvain* (Arino *et al.*, 2012), desenvolveu uma base de uso e ocupação do solo com resolução de 400 m e abrangência global, tendo como referência o ano de 2009;
- Projeto Mapbiomas (Mapbiomas, 2022), desenvolvido por uma rede colaborativa de especialistas em sensoriamento remoto e mapeamento de vegetação de ONGs, universidades e startups de tecnologia, com resolução de 90 m e abrangendo o território brasileiro. A base divulgada é atualizada anualmente, com informações a partir de 1985, tendo sido selecionado o ano de 2021 para a modelagem do presente trabalho.

Para a modelagem propriamente dita, escolheu-se o Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por incluir as variações espaciais em sua metodologia e ser um modelo amplamente utilizado e com aplicação já consolidada no meio (Paranhos, 2023; Pontes *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2019, Lopes *et al.*, 2018; Munar *et al.*, 2018; Fleischmann *et al.*, 2021).

Como um dos objetivos específicos foi a avaliação quanto a diferentes tipos de calibração, foram incorporadas três tipos de calibração realizadas pelo algoritmo *Multi-Objective Complex Evolution* (MOCOM-UA) (Yapo *et al.*, 1998): (i) calibração completa da bacia, ou seja, utilizando-se todas as estações fluviométricas no processo de calibração; (ii) calibração apenas com a sub-bacia 8, que é onde está localizado o exutório do rio Iguaçu; e (iii) utilizando a calibração realizada por Paranhos (2023) para a mesma área de estudo.

As duas primeiras calibrações citadas foram realizadas utilizando a base de uso e ocupação da terra do Projeto GlobCover (Arino *et al.*, 2012), e a terceira foi adaptada também a partir dessa base, tendo sido feito o mesmo quanto a validação das calibrações. Posteriormente, os parâmetros calibrados e validados foram aplicados em simulações, para o mesmo período de tempo, agora com a base do Projeto Mapbiomas (Mapbiomas, 2022).

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DO PLANO EXPERIMENTAL DO PRESENTE TRABALHO



FONTE: DA AUTORA (2023).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento segue a seguinte organização: no presente capítulo 1 são apresentados os aspectos introdutórios do estudo, suas motivações, objetos de investigação e explicações de como se deu a pesquisa.

O capítulo 2, por sua vez, apresenta os aspectos metodológicos que envolvem a modelagem hidrológica, bem como uma breve análise da aplicação desses modelos na gestão de recursos hídricos.

Já o capítulo 3 contempla o estudo de caso da aplicação do modelo hidrológico georreferenciado MGB à bacia hidrográfica do rio Iguaçu. Ele contém uma breve introdução à área de estudo e ao modelo utilizado, a base de dados necessária para a modelagem, e os aspectos referentes à execução propriamente dita: calibração e validação da modelagem.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos com a modelagem de diferentes bases de dados e também das diferentes calibrações utilizadas.

Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais deste estudo, as reflexões sobre aplicações e contribuições à gestão de recursos hídricos, e possibilidades de novos estudos relacionados e que complementariam a temática abordada.

O anexo A traz uma síntese sobre os processos de calibração automática de modelos hidrológicos, aprofundando mais no algoritmo MOCOM-UA, que é utilizado no MGB. No anexo B, por sua vez, é apresentado um artigo onde diferentes bases de uso e ocupação da terra da área de estudo foram o alvo das análises, e serviram como ponto de partida para o desdobramento do presente estudo.

2 MODELOS HIDROLÓGICOS E DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O presente capítulo apresenta uma descrição conceitual dos modelos hidrológicos, suas características e critérios, bem como seus propósitos e aplicações.

2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Tucci (2005), os processos envolvidos no ciclo hidrológico dependem de um grande número de fatores, o que complexifica a análise de seus processos. Na busca de entender melhor o comportamento desses processos em um sistema como uma bacia hidrográfica, foram desenvolvidos os modelos hidrológicos, nos quais simulam-se tais processos naturais, representando o comportamento da bacia de modo a propiciar a previsão de condições diferentes das observadas. Assim, os modelos hidrológicos são ferramentas para representação das bacias hidrográficas.

Contudo, Tucci (2005) ressalta que há uma idealização sobre o uso de tais modelos, quanto a sua real potencialidade e necessidade, uma vez que estes possuem limitações inerentes tanto quanto à qualidade e quantidade de dados hidrológicos necessários ao processo de modelagem, como da dificuldade de formular matematicamente os processos naturais, que envolve ainda a simplificação de informações e fenômenos com variação espacial.

Tais limitações propiciaram o desenvolvimento de diversos tipos de modelos, com diferentes abordagens, exigindo do usuário/hidrólogo um julgamento prévio de qual se adequa melhor ao propósito proposto. Dentre os diferentes tipos de modelo, pode-se destacar os seguintes (Tucci, 2005):

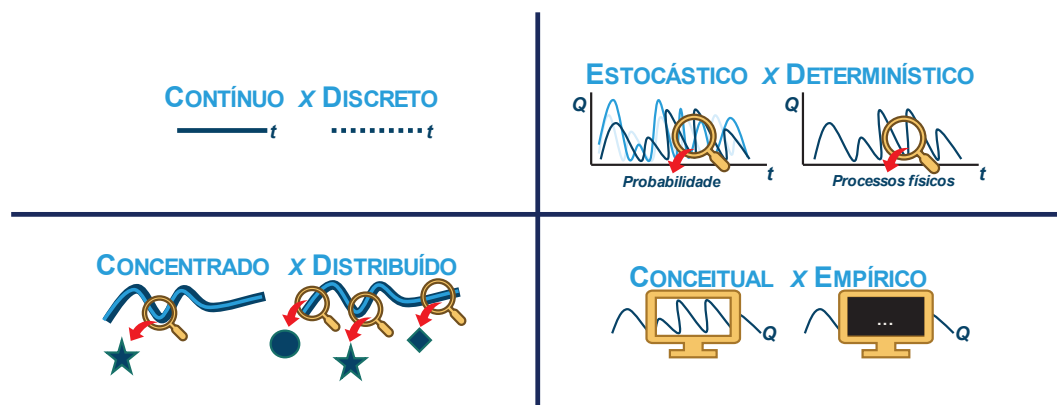
- Contínuo x Discreto: nesse caso, a nomenclatura refere-se ao tipo do sistema representado – o sistema contínuo é aquele que ocorre ininterruptamente, enquanto o sistema discreto ocorre em um espaço de tempo. Na hidrologia, a maioria dos sistemas são contínuos, mas representados por modelos discretos, como por exemplo a vazão de um rio, que ocorre sem interrupção, porém seus registros se dão em intervalos fixos de tempo;
- Concentrado x Distribuído: o modelo concentrado não considera as possíveis variações espaciais de características dentro da área de análise, de modo que o resultado gerado representa toda a abrangência dessa região. Já o Modelo Distribuído considera as

diferentes características que ocorrem dentro da área de análise, necessitando de informações especializadas para a realização das análises, e gerando resultados que variam conforme a variabilidade dessas características;

- Estocástico x Determinístico: o estocástico considera as leis probabilísticas e conceitos estatísticos, enquanto o determinístico não. Ademais, o modelo Estocástico envolve aleatoriedade no processo e pode gerar mais de um *output* para um mesmo *input*, ao contrário do Determinístico, que gera apenas um único *output* para cada *input*;
- Empírico x Conceitual: os modelos empíricos são aqueles que tem como base a observação para desenvolver suas respostas, de modo que prevê apenas conforme o que já aconteceu e é, portanto, incapaz de simular respostas a mudanças imprevistas. Já os Conceituais, apesar de poderem envolver dados observados, agregam processos físicos para representações do fenômeno/comportamento analisado.

A Figura 2.1 apresenta esquematicamente uma síntese das diferenças entre os modelos enquanto as diferentes aplicações desses modelos hidrológicos são apresentadas no Quadro 2.1.

FIGURA 2.1 - ESQUEMA LÚDICO DOS DIFERENTES MODELOS HIDROLÓGICOS



FONTE: DA AUTORA, BASEADA EM TUCCI (2005).

QUADRO 2.1 - APLICAÇÕES DOS DIFERENTES TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS NO GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Exemplos de Usos
Precipitação-Vazão	determinístico empírico conceitual	Comportamento	calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	extensão de séries de vazão, dimensionamento, previsão em tempo atual, avaliação de uso da terra
Vazão-Vazão	determinístico empírico conceitual		calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	extensão de séries de vazões, dimensionamento, previsão de cheias
Geração estocástica de vazão	estocástico		calcula a vazão com base nas características da série histórica	dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo saturado	determinístico		determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento etc.	capacidade de bombeamento, nível do lençol freático, iteração rio-aquífero etc.
Hidrodinâmico	determinístico		synetiza vazões em rios e rede de canais	simulação de alterações do sistema, efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de água de rios e reservatórios	determinístico		simula a concentração de parâmetros de qualidade de água	impacto de efluentes, eutrofização de reservatórios, condições ambientais
Rede de canais e condutos	determinístico	Comportamento e otimização	otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	rede de abastecimento de água, rede de irrigação
Operação de reservatórios	determinístico estocástico		determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	usos múltiplos
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	determinístico estocástico	Comportamento, otimização e planejamento	simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial etc.

FONTE: ADAPTADO DE TUCCI (2005).

Dentre os aprimoramentos que vêm sendo realizados nesses modelos, especificamente quanto a inclusão da variação espacial na modelagem hidrológica, destacam-se os modelos hidrológicos georreferenciados, os quais permitem incluir nas análises não somente as variáveis hidrológicas propriamente ditas, mas também a heterogeneidade dos sistemas naturais (Machado, 2002), além da realização de previsões considerando, dentre outros, resultados decorrentes de mudanças no uso

e ocupação do solo e no clima, servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (Santos *et al.*, 2006).

A integração de modelos hidrológicos a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem se mostrado como uma das principais ferramentas para uma melhor representação de processos hidrológicos (Fan e Collischonn, 2014) e permite aplicações com menos incertezas nas estimativas e na interpretação de seus resultados (Morad e Pérez, 2001).

Neste contexto, destaca-se o Modelo de Grandes Bacias (MGB), que se trata de um modelo hidrológico conceitual e distribuído, com operação acoplada ao *software* de SIG Quantum GIS (QGis) (Collischonn *et al.*, 2020), conforme mais bem apresentado no item 3.2.

2.1.1 Modelos hidrológicos e aplicações

Para a seleção do modelo hidrológico adequado a ser utilizado para um determinado propósito, é necessário que sejam verificadas uma série de critérios e características desses modelos, de modo a embasar a tomada de decisão (Salvadore *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2018). O Quadro 2.2 a seguir, adaptado de Muhlenhoff (2023), apresenta uma lista desses diversos critérios e características que auxiliam a ilustrar a aplicabilidade desses modelos.

QUADRO 2.2 – RESUMO DE CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS MODELOS HIDROLÓGICOS

INFORMAÇÕES GERAIS BÁSICAS	Nome do software (*) Domínio Público		SWM	SWAT	HSFP	AGNPS	AnnAGNPS	CE-QUAL-W2	MIKE SHE	HEC-HMS	STORM	WEPP	MGB
	Desenvolvedor		USEPA	Texas A&M University	USEPA	USDA-ARS	USDA-ARS/NRCS	USACE	DHI	USACE	USACE	USDA-ARS	IPH-UFRGS
Tipo de modelo	Coeficientes de exportação	Fisicamente baseado	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Urbano	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Discretização espacial de uso e ocupação do solo		Rural	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Agricultura	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Floresta	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Rios	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Lagos	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Discretização temporal	Reservatórios/Barramentos		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Orientado por eventos	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Contínuo	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Discretização temporal de simulação	Sub-diário		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Diário	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Mensal	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

BASE DO EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO											
Nome do software (*) Domínio Público		SWM * SWAT * HSPF * AGNPS * AnnAGNPS * CE-QUAL-W2 *	MIKE SHE	HEC-HMS *	STORM *	WEPP *	MGB *				
Representação espacial da bacia (unidades de cálculo)	Concentrado	●	-	-	●	●	-				
	Grade regular com características hidrológicas uniformes	-	-	-	-	-	-				
	Áreas permeáveis e impermeáveis, canais e reservatórios	-	-	-	-	-	●				
	Unidades de Resposta Hidrológica (URH)	-	●	●	-	-	●				
Modelo de transformação chuva- vazão	Armazenamento não linear (e equação de Manning)	●	-	-	-	-	-				
	SCS	●	-	●	●	-	-				
	Maximum Surface Retention	-	-	-	-	-	-				
	Hidrograma Unitário	●	-	●	●	-	-				
Modelo de Evapotranspiração	Hidrograma	●	-	-	-	-	●				
	Outros	-	-	-	-	-	●				
	Hargreave	●	●	-	-	-	-				
	Penman	-	●	-	-	-	●				
Modelo de Infiltração	Série temporal	●	-	-	-	-	-				
	Relação Empírica	-	-	●	-	-	-				
	Equação de Horton	●	-	-	-	-	-				
	Equação de Horton modificada	●	-	-	-	-	-				
Modelo de Infiltração	Green Ampt	-	●	-	-	●	-				
	SCS (CN modificado)	●	-	-	●	-	-				
	Equação de Philip	-	-	●	-	-	-				
	Outro	-	-	-	-	-	●				
Modelo de propagação	Equações completas de Saint-Venant	-	-	-	-	-	●				
	Difusão	●	-	-	-	-	-				
	Onda cinemática	●	-	-	●	-	-				
	Gravitacional	-	-	-	●	-	-				
	Muskingum - Cunge	-	-	-	●	-	●				
	Muskingum	-	●	-	●	-	-				

BASE DO EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

Nome do software (*) Domínio Público		SWM	SWAT	HSPF	AGNPS	AnnAGNPS	CE-QUAL-W2	MIKE SHE	HEC-HMS	STORM	WEPP	MGB
APLICABILIDADE	Simulação de diferentes cenários de uso e ocupação do solo	●	●	●	●	●	-	-	●	-	●	●
	Compatibilidade com SIG para entrada de dados	●	●	●	●	●	-	-	-	-	●	●
	Compatibilidade com SIG para calibração do modelo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
	Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●

FONTE: ADAPTADO DE MUHLENHOFF (2023)

Dentre as diversas características e aplicações desses modelos, destaca-se o fato de que nenhum deles possui finalidade voltada especificamente à gestão de recursos hídricos.

Todini (2007) e Singh (2018) apresentaram um histórico da modelagem hidrológica, remontando à 1850, quando se refere ao nascimento desta. Contudo, ao observar ambos os levantamentos, embora as aplicações e estudos investigados estejam relacionados à gestão de recursos hídricos, tal temática não é abordada diretamente.

Tucci (2005) já mencionava que a principal busca de desenvolvimento dos modelos hidrológicos foi moldada pelo dimensionamento de reservatórios, previsão de vazões em tempo real e extensão de séries para a análise de enchentes ou estiagens, sendo apenas posteriormente incluídas as questões ambientais e os aproveitamentos dos recursos hídricos em decorrência da deterioração dos recursos naturais.

Uma pesquisa sobre estudos que estão sendo desenvolvidos nos últimos anos, apresentada no Quadro 2.3, demonstra que a tendência observada no histórico dos autores citados ainda é perpetuada, com a gestão de recursos hídricos (GRH) continuando não sendo o foco da modelagem hidrológica.

Por fim, como mostrado no Quadro 2.2, o Modelo de Grandes Bacias - MGB, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), tem a aplicabilidade para a estimativa da disponibilidade hídrica. Por esse motivo, também foi realizada uma pesquisa de trabalhos recentes focando nos que utilizaram o MGB e que tinham algum relação com a GRH, os quais são mostrados no Quadro 2.4. Pode-se perceber que o MGB tem sido utilizado na elaboração de Planos de Recursos Hídricos (PRH), mas que os estudos desenvolvidos, por mais que cite e estejam relacionados à GRH, não se aprofundam em suas contribuições para esta.

QUADRO 2.3 – PESQUISA DE ESTUDOS RECENTES ENVOLVENDO MODELAGEM HIDROLÓGICA E GESTÃO E PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Referência	Palavras-chave	Área da bacia	Objetivo	Relaciona c/ GRH?
Lopes <i>et al.</i> , 2018	Modelagem hidrológico-hidrocinâmica; Modelagem em grande escala; Modelagem integrada; Sistemas rio-lagoa	180.000 km ²	Simular bacias e lagoas de maneira unificada	Não apresenta relação
Wongchuig <i>et al.</i> , 2019	Reanálise hidrológica, modelagem hidrológica-hidrocinâmica, Assimilação de dados; EnKF local; Conjunto de dados de longo prazo; Bacia Amazônica	6e10^9 km ²	Desenvolver Reanálise Hidrológica	Não apresenta relação
Munar <i>et al.</i> , 2018	Processos hidrológicos, Processos hidrocinâmicos, Altimetria por satélite, Lago Mirim, MBG-IPH, IPH-ECO	58.400 km ²	Entender o funcionamento de um modelo hidrológico acoplado a um modelo hidrocinâmico para simulação do comportamento bacia-lago	Não apresenta relação
Pontes <i>et al.</i> , 2017	Modelagem hidrológico-hidrocinâmica; modelo MGB; acoplamento SIG; Rotina de fluxo inercial; Bacia do Araguaia	390.000 km ³	Apresentar melhorias no MGB, comparando com versão original	Não apresenta relação
Swain, <i>et al.</i> , 2020	Brahmani, Baitarani, Água azul, Água verde, SWAT, Escassez de água	36.790 km ² e 12.094 km ²	Avaliar escassez e correlação com mudanças climáticas e uso e ocupação do solo	Não apresenta relação
Schuster <i>et al.</i> , 2020	Mudanças climáticas, Bacia da Laguna dos Patos, Disponibilidade hídrica	182.000 km ²	Avaliar disponibilidade hídrica frente a mudanças climáticas	Não apresenta relação
Oliveira <i>et al.</i> , 2019	Gestão de recursos hídricos; Simulação hidrológica; Sustentabilidade; Fronteira agrícola	37.444 km ²	Avaliar a disponibilidade hídrica e variações sazonais na vazão	Menciona, mas não aprofunda
Vema e Sudheer, 2020	Modelos hidrológicos distribuídos; Calibração de modelos; Transferência de parâmetros; Eficiência computacional; SWAT	2.800 km ² e 2.245k km ²	Avaliar os impactos da resolução dos dados de entrada do modelo na calibração e validação do mesmo	Menciona, mas não aprofunda
Fleischmann <i>et al.</i> , 2021	Modelagem hidrológica, Modelagem em grande escala, Hidrelétrica, Dinâmica de inundação, Bacia do Rio Paraná, MGB	950.000 km ²	Representar as interações rio-planície de inundação-reservatório por meio de um modelo hidrológico-hidrocinâmico e analisar as variáveis hidráulicas considerando os efeitos de operação de reservatórios	Menciona, mas não aprofunda

FONTE: DA AUTORA (2023).

QUADRO 2.4 - PESQUISA DE ESTUDOS RECENTES ENVOLVENDO O MGB E GESTÃO E PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Referência	Palavras-chave	Área da Bacia	Objetivo	Relaciona com GRH?
INEA, 2018	-	1.800 km ²	Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande	Sim, é um PRH
Silva e Medeiros, 2018	Semiárido; Modelo distribuído	43.683 km ²	Aplicar o MGB na modelagem do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu	Menciona, mas não aprofunda
Agência Peixe Vivo, 2020	-	14.155 km	Elaboração do Plano de Recursos Hídricos e Enquadramento dos corpos d'águas da bacia hidrográfica do Alto São Francisco	Sim, é um PRH
Agência Peixe Vivo, 2021	-	170.100 km ²	Elaboração de estudo de avaliação do conhecimento existente sobre a utilização das águas nas bacias do rio Carinhanha, Corrente e Grande, com foco na disponibilidade hídrica e nos diversos usos	Sim, é um PRH
Dias, 2021	Modelagem Hidrológica e Hidráulica; Bacia Hidrográfica do Rio Pomba; Softwares de Simulação Hidrológica; Modelo de Grandes Bacias (MGB); Inundações	8.616 km ²	Analisar o comportamento hidrológico e hidráulico de uma bacia hidrográfica e sua rede de drenagem com base na utilização do plugin MGB	Menciona, mas não aprofunda
Neto <i>et al.</i> , 2021	Modelo hidrológico; Vazão; MapBiomas	32.649 km ²	Calibrar e validar o modelo MGB-IPH para simular o comportamento da vazão na bacia hidrográfica do rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo	Não apresenta relação
Matias, 2022	Rio São Francisco; Modelagem Hidrológica; Disponibilidade Hídrica; Mudanças Climáticas; Cenários	639.219 km ²	Produzir projeções de vazão de acordo com os cenários de mudanças climáticas SSP (<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>), através de simulações no modelo hidrológico MGB	Menciona, mas não aprofunda
Santos, 2022	Recursos Hídricos, Estresse Hídrico, Modelo MGB, WARM-GIS Tools	Não apresenta	Aplicar as ferramentas de modelagem matemática do MGB e do WARM-GIS Tools para analisar quantitativamente os recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Jaguarão	Sim
Siqueira <i>et al.</i> , 2022	Simulação hidrológica; legislação ambiental; regime hidrológico	9.271 km ²	Compreender como o uso e a cobertura do solo podem alterar o regime hidrológico, utilizando-se de cenários hipotéticos e simulações de um modelo conceitual distribuído	Menciona, mas não aprofunda

FONTE: DA AUTORA (2023).

2.2 SÍNTESE CONCEITUAL DO CAPÍTULO

Como apresentado, o desenvolvimento e aprimoramento dos modelos hidrológicos não foram impulsionados pela necessidade de aperfeiçoar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos. Este fato, inclusive, ainda pode ser identificado quando avaliados os estudos e publicações recentes que, embora mencionem em alguns casos a gestão de recursos hídricos, não aprofundam tal relação e nem aplicam diretamente a essa temática.

Conforme apontado por Haydar *et al.* (2016), Schlaepfer *et al.* (2017), Javadinejad *et al.* (2019) e Phan *et al.* (2019), o desafio da gestão múltipla dos usos da água tende a aumentar frente ao agravamento dos eventos extremos, simultaneamente com o aumento de pressões socioeconômicas, ambos fatores que impulsionam a escassez de água e, conseqüentemente, fomentam os conflitos pelo seu uso. Portanto, planejar com cautela se faz cada vez mais necessário, sendo os modelos hidrológicos importantes ferramentas para este propósito, tanto para a avaliação da disponibilidade hídrica atual, como para a simulação das repercussões de diferentes cenários ambientais e socioeconômicos sobre os recursos hídricos.

Nesse sentido, o presente trabalho procura contribuir para preencher tal lacuna, uma vez que questiona sobre quais seriam as inferências com relação à disponibilidade hídrica quando modificada informação de uso e ocupação da terra em sua estimativa, usando, para tanto, um modelo hidrológico georreferenciado.

3 MODELO HIDROLÓGICO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU

No presente capítulo serão apresentados os procedimentos realizados para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Iguaçu com o MGB (Collischonn *et al.*, 2020), bem como as especificidades do modelo e as diferentes bases de dados utilizadas na modelagem, com o objetivo de verificar a implicância destas nos valores de disponibilidade hídrica. O modelo hidrológico utilizado é fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 BACIA DO RIO IGUAÇU

A maior bacia hidrográfica localizada no estado do Paraná é a bacia do rio Iguaçu (Figura 3.1), abrangendo cerca de 70 mil km², dos quais 80% encontram-se em território paranaense, 17% no estado de Santa Catarina, e 3% em domínio argentino. As nascentes do Rio Iguaçu originam-se no Planalto de Curitiba, próximas à Serra do Mar, seguindo um curso de 1.320 km através dos três planaltos paranaenses, até seu desague no Rio Paraná (Paraná, 2021).

Sua população é de 4,5 milhões de pessoas, o que representa quase metade da população total do estado do Paraná. Consequentemente, o setor de abastecimento público caracteriza o maior consumidor das águas da bacia, uma vez que consome pouco mais de 80% da demanda de recursos hídricos na região, seguido do setor industrial, com 10% (Paraná, 2021).

FIGURA 3.1 – BACIA DO RIO IGUAÇU: A ÁREA DE ESTUDO, COM DESTAQUE PARA A REGIÃO METROPOLITANA (RM) DE CURITIBA E MUNICÍPIOS COM MAIS DE 30.000 HABITANTES



FONTE: DA AUTORA, COM DADOS DE FERNANDES *ET AL.* (S.D.) E GOOGLE EARTH (2023).

A região do Alto Iguaçu é uma das bacias mais relevantes do Paraná, considerando sua importância política e econômica, e a localização da capital do estado e por ser o principal manancial de abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba. Destaca-se uma grande concentração de população, com significativa atividade industrial, comercial e de serviços, enquanto na região do Médio e do Baixo Iguaçu predomina a atividade agropecuária, com a soja e o trigo como principais culturas, além de pastagens (Paraná, 2021).

Segundo ANA (2021a), uma parte da Bacia Hidrográfica do Paraná, a qual inclui a Bacia do Rio Iguaçu, registrou períodos úmidos entre os anos de 2016 e 2017, cenário este diferente do identificado a partir de 2018, em que houve registro de seca na região. Tal situação gerou os estudos apresentados na Nota Técnica Conjunta nº 3/2021/SRE/SOE/SFI/SPR/SGH (ANA, 2021b), a qual recomendou a emissão pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) da Declaração de situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná, que foi instituída posteriormente por meio da Resolução nº 77/2021 (ANA, 2021c).

Segundo a referida Nota Técnica, os usos mais afetados seriam os não consuntivos, como lazer e turismo, navegação e geração hidrelétrica, sendo que, para este último, foi previsto o impacto para o atendimento do Sistema Interligado Nacional (SIN), o que foi concretizado na recente crise energética do Brasil que culminou da situação de escassez hídrica verificada também em outras bacias do país.

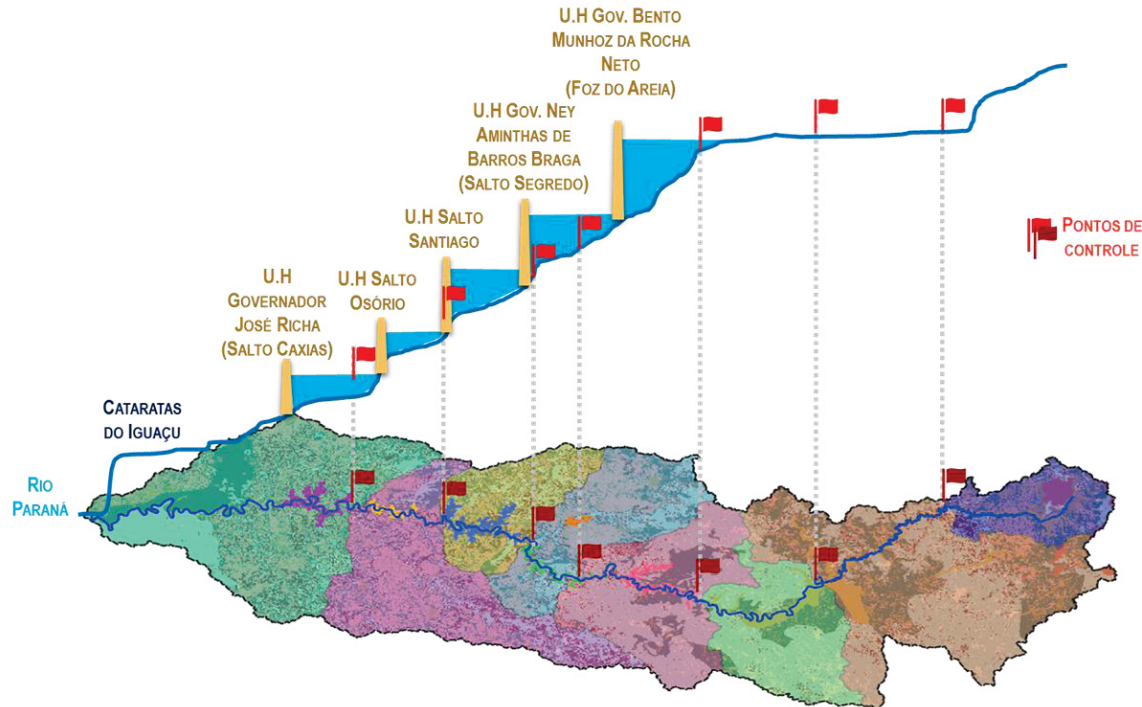
Aliás, o aproveitamento hidrelétrico é uma vocação natural da bacia do Iguaçu, uma vez que seus principais rios nascem próximo ao litoral do estado e se desenvolvem ao seu interior, percorrendo um curso de mais de 1.000 km com desnível de cerca de 800 m que, somados às vazões significativas observadas ao exutório do rio Iguaçu, propiciam a instalação de aproveitamentos hidrelétricos (Machado e Krüger, 2011).

Nesse sentido, podem ser destacadas as Usinas Hidrelétricas (UHE) Gov. Bento Munhoz da Rocha Neto (Foz do Areia - 1.676 MW), Gov. Ney de Barros Braga (Salto Segredo - 1.260 MW), Salto Santiago (1.420 MW), Salto Osório (1.078 MW) e a Governador José Richa (Salto Caxias - 1.240 MW). A localização dessas UHEs na referida bacia pode ser observada na Figura 3.2.

Por fim, as análises realizadas no âmbito do presente trabalho consideraram a bacia como um todo e as sub-bacias do Projeto Iguaçu (Fernandes *et al.*, s.d.), que

podem ser visualizadas na Figura 3.3 junto com os respectivos pontos de controle, para um melhor detalhamento das informações.

FIGURA 3.2 – PRINCIPAIS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NA BACIA DO RIO IGUAÇU



FONTE: DA AUTORA, COM INFORMAÇÕES DE FERNANDES *ET AL.* (S.D.).

FIGURA 3.3 – SUB-BACIAS DO PROJETO IGUAÇU



FONTE: DA AUTORA, COM INFORMAÇÕES DE FERNANDES *ET AL.* (S.D.).

3.2 MODELO DE GRANDES BACIAS (MGB)

O Modelo de Grandes Bacias – MGB (Collischonn *et al.*, 2020) é um modelo hidrológico baseado em equações conceituais para simular o ciclo hidrológico terrestre, tendo sido utilizado para diversas aplicações como estudos de previsão de

vazões para cheias e operação de reservatórios, reanálises hidrológicas para estudo de extremos históricos, avaliação de impactos decorrentes de mudanças no uso do solo e mudanças climáticas, estimativa de vazões para sistemas de suporte à decisão e planejamento de recursos hídricos (Collischonn *et al.*, 2020).

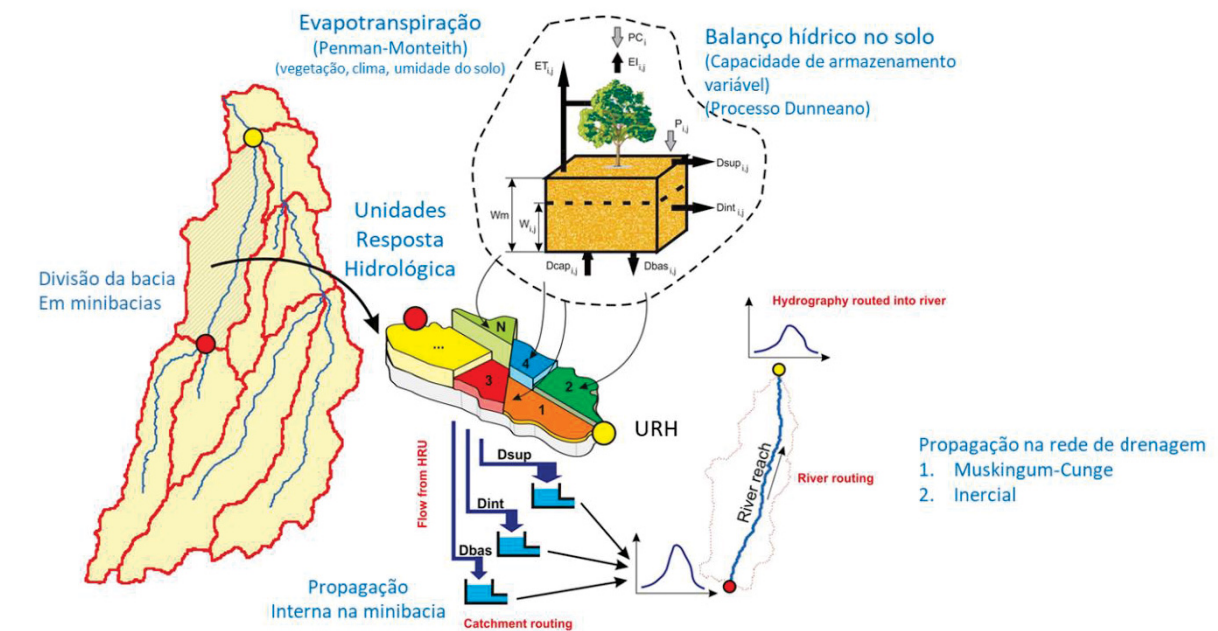
Desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sua primeira versão foi apresentada por Collischonn (2001) e Collischonn *et al.* (2007), com várias melhorias conceituais realizadas ao longo dos últimos 10 anos e implementadas por Buarque *et al.* (2008), Paiva *et al.* (2011), Pontes *et al.* (2017) e Fleischmann *et al.* (2018).

Conforme seu manual teórico (Collischonn *et al.*, 2020), trata-se de um modelo hidrológico distribuído que divide a bacia hidrográfica em unidades espaciais menores, procedimento este denominado discretização, o qual é realizado de uma forma não estruturada, considerando pequenas bacias hidrográficas incrementais, denominadas minibacias na versão atual do modelo.

O MGB faz a representação dos processos hidrológicos, com passo de tempo diário ou horário, e com uma estratégia de integração de águas superficiais e subterrâneas. A Figura 3.4 apresenta um resumo esquemático das metodologias empregadas no MGB para a simulação do ciclo hidrológico.

Como em uma minibacia podem existir diversas características físicas, esta precisa ser dotada de uma variabilidade interna que seja capaz de representar adequadamente seus processos hidrológicos. No MGB, tal variabilidade é implementada a partir do conceito das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), que consistem em subdivisões das minibacias em unidades menores correspondentes às combinações de informações de tipo de solo, tipo de vegetação, tipo de uso da terra e topografia. Dessa forma, os parâmetros do modelo podem ser associados a tais classes de URHs, simplificando e otimizando o processo de calibragem (Collischonn *et al.*, 2020).

FIGURA 3.4 – ESQUEMA METODOLÓGICO DO MGB



FONTE: COLLISCHONN ET AL. (2020).

Conforme o manual teórico elaborado por Collischonn *et al.* (2020) a estruturação do MGB é feita seguindo três módulos principais, descritos a seguir.

3.2.1 Módulo de balanço de água e energia no solo

Neste módulo são realizados os cálculos relativos aos processos hidrológicos verticais, ou seja, envolvem o balanço de energia solar na superfície, a interceptação de água da chuva, o balanço de água no solo, a percolação da água para o aquífero e o fluxo ascendente, e a geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

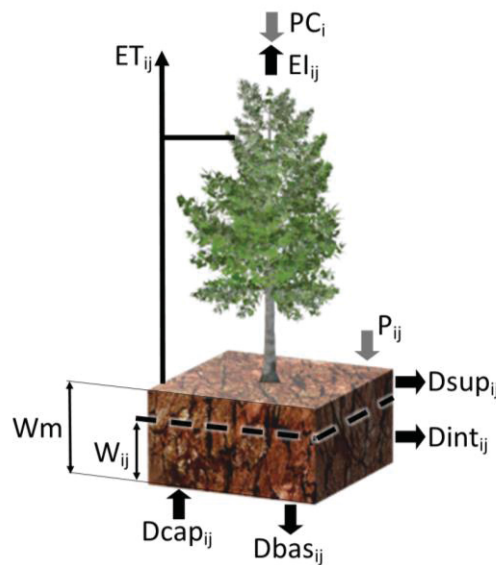
O balanço de energia solar na superfície envolve a estimativa de radiação líquida, que consiste no resultado do balanço entre a radiação solar incidente de ondas curtas, a radiação de ondas curtas refletida e a radiação líquida de ondas longas. Já a interceptação de água da chuva é a primeira etapa do balanço hídrico no solo e no MGB é considerada como dependente da cobertura do solo, expressa pelo parâmetro de índice de área foliar (IAF) e consiste na parcela de água da chuva retida pela vegetação.

O balanço hídrico na camada do solo, por sua vez, é realizado para as URHs dentro de cada minibacia, podendo ser expresso pela equação:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - E_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}} + D_{cap_{i,j}}) * \Delta t$$

O subíndice i refere-se à minibacia, enquanto o subíndice j refere-se à URH; $W_{i,j}^k$ e $P_{i,j}$ são conhecidos em cada intervalo de tempo e os demais valores são estimados a partir do estado de armazenamento do início do intervalo de tempo e de parâmetros do modelo; Δt (dias) é o tamanho do intervalo de tempo; $W_{i,j}^k$ (mm) é a lâmina de água armazenada no solo ao final do intervalo de tempo; $W_{i,j}^{k-1}$ (mm) é a lâmina de água armazenada no início do intervalo de tempo; $P_{i,j}$ (mm/dia) é a precipitação menos a interceptação ao longo do intervalo de tempo; $E_{i,j}$ (mm/dia) é a evapotranspiração da água do solo ao longo do intervalo de tempo; $D_{sup_{i,j}}$ (mm/dia) é a drenagem rápida, que consiste no fluxo de escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo; $D_{int_{i,j}}$ (mm/dia) é a drenagem lenta, ou seja, o fluxo de escoamento subsuperficial ao longo do intervalo de tempo; $D_{bas_{i,j}}$ (mm/dia) é a drenagem muito lenta, decorrente da percolação do solo para o aquífero ao longo do intervalo de tempo; e $D_{cap_{i,j}}$ (mm/dia) é o fluxo de água ascendente do aquífero para o solo. A Figura 3.5 apresenta visualmente o esquema do balanço para uma URH.

FIGURA 3.5 - ESQUEMA DO BALANÇO HÍDRICO NO SOLO REALIZADO NO MGB



FONTE: ADAPTADO DE COLLISCHONN ET AL. (2020).

Para estimativa da evapotranspiração, o MGB utiliza a equação de Penman-Monteith, conforme Shuttleworth (1993):

$$E = \left(\frac{\Delta * (R_L - G) + \rho_A * c_p * \frac{e_s - e_d}{r_a}}{\Delta + \gamma * (1 + \frac{r_s}{r_a})} \right) * \frac{1}{\lambda * \rho_w}$$

onde E é a taxa de evapotranspiração, em m.s^{-1} ; λ , em MJ.kg^{-1} é o calor latente de vaporização; Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor, em $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$; R_L é a radiação líquida na superfície, em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; G é o fluxo de energia para o solo, em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; ρ_A , em kg.m^{-3} , é a massa específica do ar; ρ_w é a massa específica da água, em kg.m^{-3} ; c_p , em $\text{MJ.kg}^{-1}.\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}$, é o calor específico do ar úmido; e_s , em kPa , é a pressão de saturação do vapor; e_d , em kPa , é a pressão do vapor; γ é a constante psicrométrica ($\gamma = 0,66 \text{ kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); r_s [s.m^{-1}] é a resistência superficial da vegetação, em s.m^{-1} ; e r_a é a resistência aerodinâmica, também em s.m^{-1} . A evapotranspiração no modelo é calculada em duas etapas, primeiro aplicada à água interceptada, depois à água presente no solo.

Quanto ao cálculo do escoamento superficial no solo, no MGB é considerado o processo Dunneano (Dunne e Black, 1970), em que a geração de escoamento superficial ocorre somente em áreas de solo saturado, o que varia de acordo com o estado de armazenamento de umidade médio do solo. Já para o escoamento subsuperficial, referente ao fluxo de água que ocorre nas camadas superficiais do solo, o modelo utiliza uma relação semelhante à de Brooks e Corey (Rawls *et al.*, 1993), que relaciona a condutividade hidráulica do solo à sua textura, de modo que a taxa dessa drenagem é muito maior quando o solo está próximo a saturação do que quando está seco:

$$Dint_{i,j} = Kint_{i,j} * \left(\frac{W_{i,j}^{k-1} - W_{z_j}}{W_{m_j} - W_{z_j}} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda_j}} \quad \text{se } W_{i,j}^{k-1} > W_{z_j}$$

$$Dint_{i,j} = 0 \quad \text{se } W_{i,j}^{k-1} \leq W_{z_j}$$

onde Wz_j (mm) é o limite inferior de armazenamento no solo para que haja escoamento subsuperficial, sendo normalmente adotado como 10% do Wm ; $Kint_{i,j}$ (mm/dia) é a condutividade hidráulica do solo saturado; λ representa o índice de porosidade do solo, adotando-se normalmente o valor de 0,67; e $Dint_{i,j}$ (mm/dia) é a lâmina de escoamento subsuperficial do bloco j da minibacia i ao longo de um intervalo de tempo.

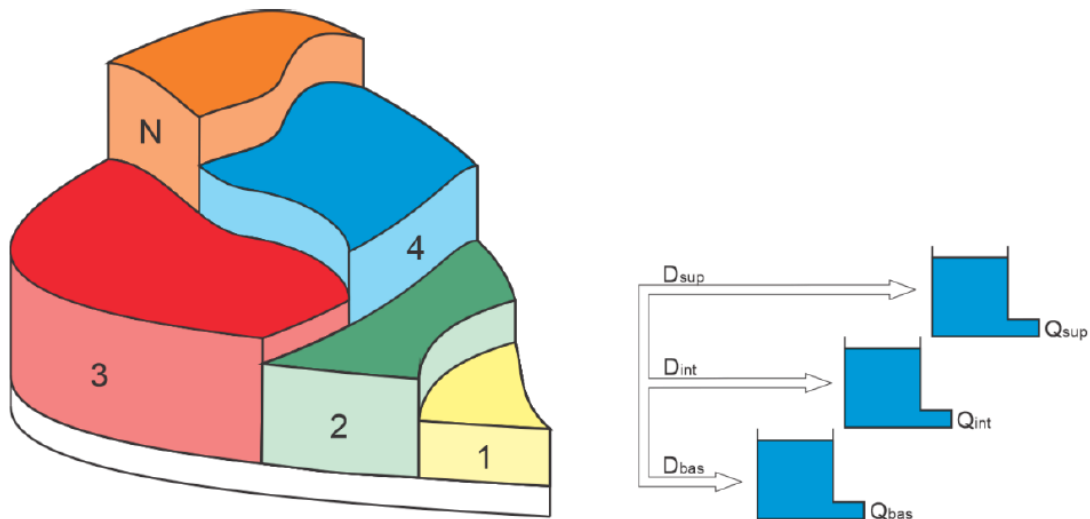
Por fim, no módulo de balanço de água e energia no solo são calculados os fluxos de água decorrentes da percolação, as transferências ascendentes que ocorrem em situação de estresse hídrico, bem como a parcela de água infiltrada em áreas inundadas da planície na camada de solo não-saturado. Este último, quando calculado (método inercial, a ser detalhado a diante), passa a ser incluído na equação do balanço hídrico, que passa a ser a seguinte expressão:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - E_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j} + Dcap_{i,j} + Dinf_{i,j}) * \Delta t$$

3.2.2 Módulo de escoamento interno na minibacia

O segundo módulo representa os processos hidrológicos horizontais que ocorrem dentro de uma minibacia, desde a origem do escoamento, que se dá no módulo de balanço de água, até atingir a rede de drenagem principal da bacia. Nele são calculados o retardo e o amortecimento dos hidrogramas dos escoamentos, o que são representados matematicamente através da passagem deles por três reservatórios lineares, um para cada tipo de escoamento gerado: o escoamento superficial segue do solo para o (i) reservatório linear superficial; o escoamento subsuperficial segue do solo para o (ii) reservatório subsuperficial; e o escoamento subterrâneo segue do solo para o (iii) reservatório subterrâneo, que representa o aquífero da minibacia. Assim, cada minibacia tem sempre esses três reservatórios, conforme a Figura 3.6, independentemente da quantidade de URHs que possua e desta possuir ou não barragens, açudes ou reservatórios.

FIGURA 3.6 – ESQUEMA DOS RESERVATÓRIOS LINEARES DENTRO DE UMA MINIBACIA



FONTE: COLLISCHONN *ET AL.* (2020).

As equações utilizadas estão devidamente documentadas por Collischonn *et al.* (2020).

3.2.3 Módulo de escoamento na rede de drenagem

Por fim, este módulo representa os processos horizontais que ocorrem ao longo dos principais rios da bacia, os quais são definidos durante o procedimento de discretização da bacia, já abordado. Para tais cálculos, o MGB utiliza duas opções de metodologias: o modelo Muskingum-Cunge e o modelo inercial.

O modelo Muskingum-Cunge exige menos esforços computacionais e, consequentemente, menos tempo de processamento, mas que não é adequado a regiões de planícies por não considerar os fluxos de água decorrentes da percolação. Neste método, a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer é relacionada às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual. O escoamento ocorre em regime permanente e uniforme e o MGB considera um passo de tempo horário, mesmo que a simulação do balanço hídrico e a geração de escoamento seja em passo diário.

Já o modelo inercial baseia-se em uma versão modificada das equações de Saint-Venant, que são equações diferenciais de escoamento em regime não permanente em rios, sendo a modificação apenas no termo de advecção, o qual é desprezado. A equação dinâmica simplificada utilizada é a seguinte:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g(B * h) * \frac{\partial y}{\partial x} + g(B * h) * \frac{|Q| * Q * n^2}{(B * h)^2 * R^{\frac{3}{4}}} = 0$$

onde Q é a vazão em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; R é o raio hidráulico em m; n o coeficiente de rugosidade de Manning; B é a largura do rio, em m; e h é a profundidade, também em m. É adotado que o rio tem uma seção transversal retangular, e considerado que o raio hidráulico é igual à profundidade, o que é razoável para canais naturais, geralmente muito mais largos do que profundos (Collischonn *et al.*, 2020).

Finalmente, o MGB divide os parâmetros em dois tipos: os parâmetros da vegetação, adotados como fixos, e parâmetros do solo, que são calibrados.

Os parâmetros de vegetação que devem ser definidos inicialmente no MGB são albedo, altura da vegetação, índice de área foliar e resistência superficial em boas condições de umidade do solo. Estes parâmetros não são calibráveis uma vez que o modelo se demonstra pouco sensível às suas variações, dentro do intervalo esperado. Eles são utilizados no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, já descrito anteriormente.

Já os parâmetros de solo podem ter seu valor variado conforme a URH e para cada sub-bacia, e consistem no Wm , que representa a capacidade de armazenamento de água no solo; b , que é a forma da relação empírica entre fração de área saturada e armazenamento médio de umidade no solo; $Kbas$, que consiste no parâmetro de escoamento subterrâneo e controle de volume na recessão e estiagem; $Kint$, parâmetro de escoamento subsuperficial; Wc , que é a fração de Wm abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial; CAP , que consiste no fluxo de retorno da camada subterrânea para o solo (capilaridade); CS , que é o parâmetro para calibração da propagação superficial, multiplicativo do tempo de concentração; CI , que é o parâmetro para calibração da propagação subsuperficial, multiplicativo do tempo de concentração; e por fim o CB , que é o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

A devida documentação e detalhamento do MGB, bem como seus manuais práticos e teóricos, podem ser encontrados na página oficial do Grupo de Pesquisa

de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (HGE-IPH/UFRGS)¹.

3.3 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

A estratégia de pré-processamento de dados visa gerar a discretização da bacia hidrográfica em unidades menores, chamadas de minibacias, e que são áreas de contribuição imediata de um segmento de rio. Essas minibacias, por sua vez, são divididas em elementos ainda menores, capazes de representar a heterogeneidade das características físicas que afetam os processos hidrológicos, sendo esses elementos denominados Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) (Collischonn *et al.*, 2020), conforme descrito no item 3.2.

Para tanto, o pré-processamento é realizado utilizando-se um pacote de ferramentas chamado IPH-Hydro Tools, também do IPH/UFRGS, do qual resulta um arquivo que reúne as principais informações necessárias para que possa ser realizada a simulação utilizando o MGB. Para o presente estudo, os procedimentos de discretização foram realizados como a descrição detalhada de Alves *et al.* (2020), sendo as seguintes informações as principais requeridas:

- Modelo Digital de Elevação (MDE), sendo obtido da imagem do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 4*, na resolução de 90 m, pela plataforma *Google Earth Engine* (Jarvis *et al.*, 2008);
- Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), elaborado para toda a América do Sul por Fan *et al.* (2015), que teve como base dados de tipos de solo em diferentes escalas, tanto globais como continentais, e complementadas com mapeamentos regionais de Minas Gerais, Paraná e Goiás; além de dados de cobertura do solo com resolução espacial 400 m, do projeto *GlobCover* da Agência Espacial Europeia (ESA), para o ano de 2009; e
- Dados das séries anuais do projeto Mapbiomas (Mapbiomas, 2021), com resolução de 90 m, tendo o ano de 2021 como base, para a geração de novas URHs combinadas com as informações de tipo de solo do arquivo *shapefile* de Pedologia do IBGE (2021).

¹ <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>

Ressalta-se que, para a utilização destas últimas informações e comparação com as classes de URHs de Fan *et al.* (2015), foi necessário adaptar tanto as classes de uso e ocupação do solo como dos tipos de solo. Com esse intuito, baseou-se nas classificações dos estudos de Sartori *et al.* (2005) e da Nota Técnica nº 46/2018/SPR (ANA, 2018) para a classificação dos solos, e a classificação apresentada no Quadro 3.1 para o uso e ocupação da terra.

QUADRO 3.1 - ADAPTAÇÃO DAS CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA PARA A GERAÇÃO DAS URHS

Mapbiomas		URH
Classe	Subclasse	Classe para URHs
Floresta	Formação Florestal	Floresta
	Formação Savânica	Floresta
	Mangue	Florestas inundáveis ou Várzeas
	Restinga Arborizada	-
Formação Natural não Florestal	Campo Alagado e Área Pantanosa	Florestas inundáveis ou Várzeas
	Formação Campestre	Floresta
	Apicum	Florestas inundáveis ou Várzeas
	Afloramento Rochoso	Áreas Semi-Impermeáveis
	Restinga Herbácea	-
	Outras Formações não Florestais	Floresta
Agropecuária	Pastagem	Agricultura
	Agricultura	Agricultura
	Lavoura Temporária	Agricultura
	Soja	Agricultura
	Cana	Agricultura
	Arroz	Agricultura
	Algodão (beta)	Agricultura
	Outras Lavouras Temporárias	Agricultura
	Lavoura Perene	Agricultura
	Café	Agricultura
	Citrus	Agricultura
	Outras Lavouras Perenes	Agricultura
	Silvicultura	Agricultura
	Mosaico de Usos	Agricultura
Área não Vegetada	Praia, Duna e Areal	-
	Área Urbanizada	Áreas Semi-Impermeáveis
	Mineração	Áreas Semi-Impermeáveis
	Outras Áreas não Vegetadas	Áreas Semi-Impermeáveis
Corpo D'água	Rio, Lago e Oceano	Água
	Aquicultura	Água

FONTE: DA AUTORA, COM ADAPTAÇÕES DE MAPBIOMAS (2021).

Ademais, foi assumido um limiar de área de contribuição para a criação de rede de drenagem no IPH-Hydro Tools de 20 km², bem como a secção da rede de

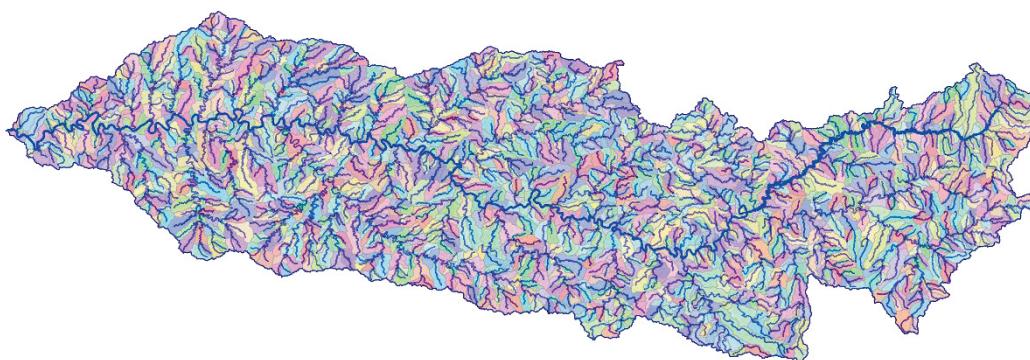
drenagem utilizando-se o processo “ArcHydro”, para que, posteriormente, os resultados pudessem ser comparados com as informações de disponibilidade hídrica por ottobacias disponibilizadas pela ANA em seu portal de metadados.

Como descrito por Alves *et al.* (2020), o principal resultado gerado pelo pré-processamento realizado com o IPH-Hydro Tools é o arquivo "MINI.gtp", o qual é fundamental para as etapas seguintes de preparação de dados e simulação pelo MGB. Nesse arquivo estão concentradas, por minibacias, as informações de área de drenagem a montante, coordenada do centroide, comprimento do trecho de rede, dentre outros, bem como um campo-chave que permite a associação dessas informações com o arquivo georreferenciado das minibacias.

Os primeiros resultados obtidos do pré-processamento realizado com o IPH-Hydro Tools são arquivos espacializados, referentes à discretização da bacia hidrográfica do rio Iguaçu. O MDE utilizado foi processado pela ferramenta para a criação da delimitação da bacia, de sua rede de drenagem, e suas minibacias, as quais podem ser visualizadas na Figura 3.7. Possuindo tais delimitações, foi possível obter as URHs para toda a bacia do rio Iguaçu, a qual é apresentada na Figura 3.8, ao processá-las com as unidades elaboradas por Fan *et al.* (2015) e, na Figura 3.9 as URHs elaboradas com os dados do Mapbiomas (2021) e IBGE (2021).

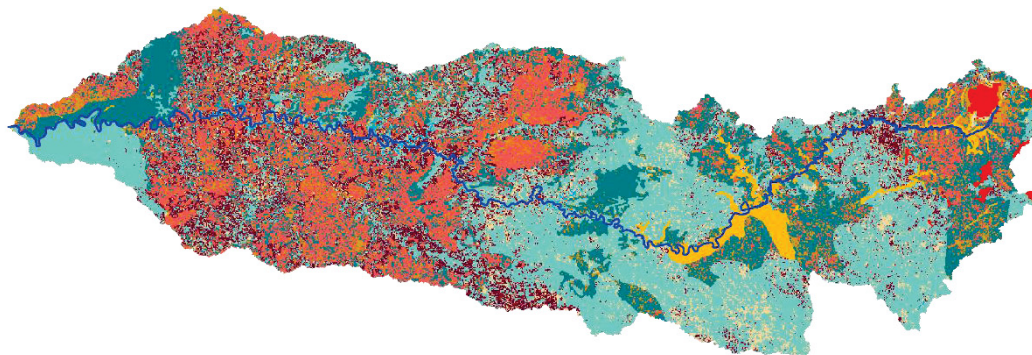
Ademais, o MGB permite a utilização de agrupamento regionais das minibacias em sub-bacias hidrográficas, adotadas para facilitar a posterior calibração dos parâmetros do modelo. Para tanto, foram utilizadas as sub-bacias adotadas no âmbito de Fernandes *et al.* (s.d.), já apresentadas na Figura 3.3, com os respectivos pontos de controle que embasaram a divisão, bem como os principais reservatórios dentro da área de interesse.

FIGURA 3.7 - DELIMITAÇÃO DA BACIA, REDE DE DRENAGEM E MINIBACIAS RESULTANTES DO PRÉ-PROCESSAMENTO



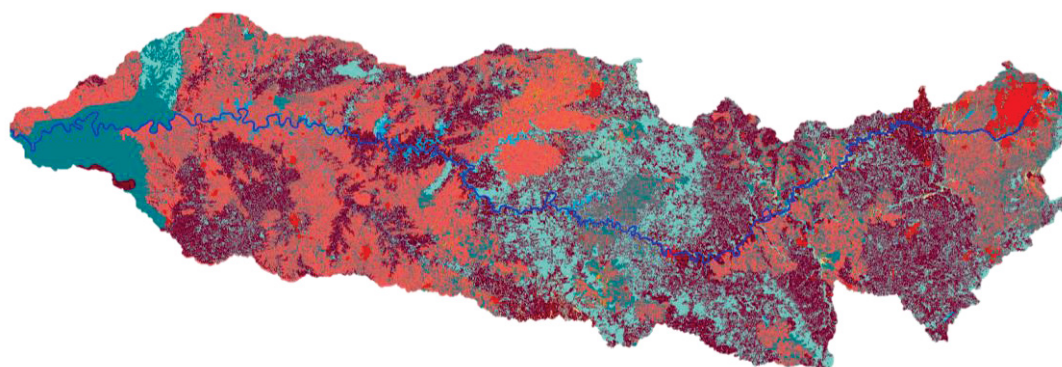
FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.8 – URHS OBTIDAS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU CONFORME FAN ET AL. (2015)



FONTE: DA AUTORA, COM INFORMAÇÕES DE FAN ET AL. (2015).

FIGURA 3.9 – URHS OBTIDAS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU CONFORME MAPBIOMAS (2022)

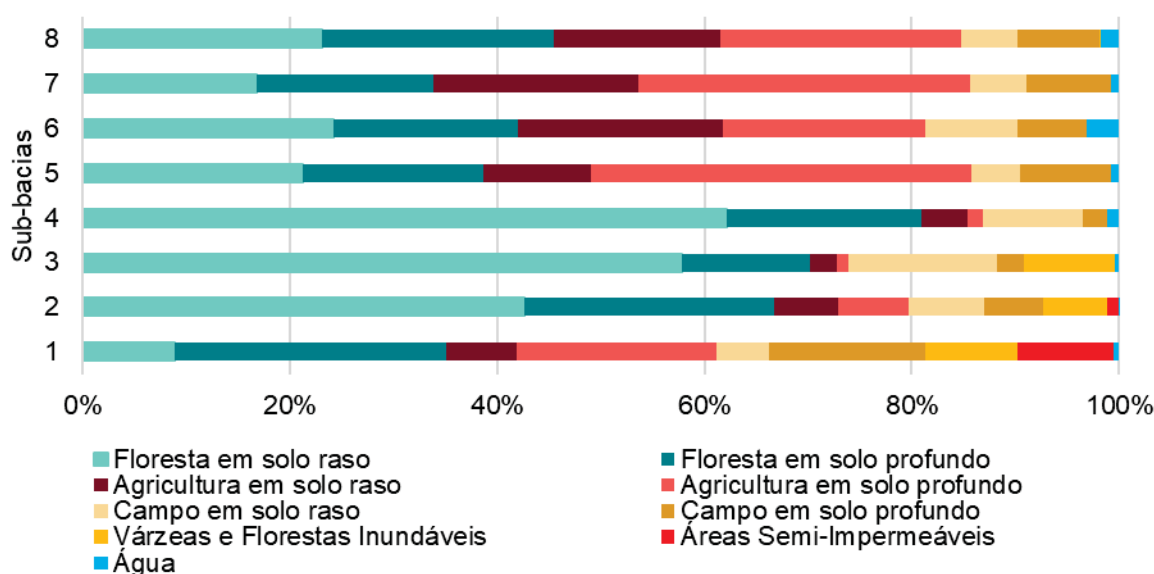


FONTE: DA AUTORA, COM INFORMAÇÕES DE MAPBIOMAS (2022).

Utilizando os dados de Fan *et al.* (2015), quantitativamente, foram obtidas 2.044 minibacias ao todo, das quais 99 estão na sub-bacia 1, a montante da estação de Porto Amazonas; 473 na sub-bacia 2, a montante de Fluvópolis, 191 na sub-bacia 3, até Barra do Espingarda; 259 na sub-bacia 4, a montante da estação Jusante Foz do Iratim; 201 na sub-bacia 5, até Águas Mornas; 140 na sub-bacia 6, a montante de Salto Santiago, 289 na sub-bacia 7, até Cruzeiro do Iguaçu, e 392 na sub-bacia 8 a montante de Puerto Aguirre. Quanto às classes de URHs verificadas na área da bacia analisada, as principais são floresta em solo raso, floresta em solo profundo e agricultura em solo profundo, ocupando 33%, 20% e 17%, respectivamente, de sua abrangência.

As classes de URHs para cada uma das sub-bacias podem ser verificadas na Figura 3.10, na qual nota-se presença significativa de áreas semi-impermeáveis, que incluem as áreas urbanas, apenas nas duas primeiras sub-bacias, mesmo havendo outras cidades de considerável território urbanizado, como Guarapuava, União da Vitória, Palmas, Pato Branco e Francisco Beltrão.

FIGURA 3.10 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE URHS EM CADA SUB-BACIAS CONFORME FAN ET AL. (2015)

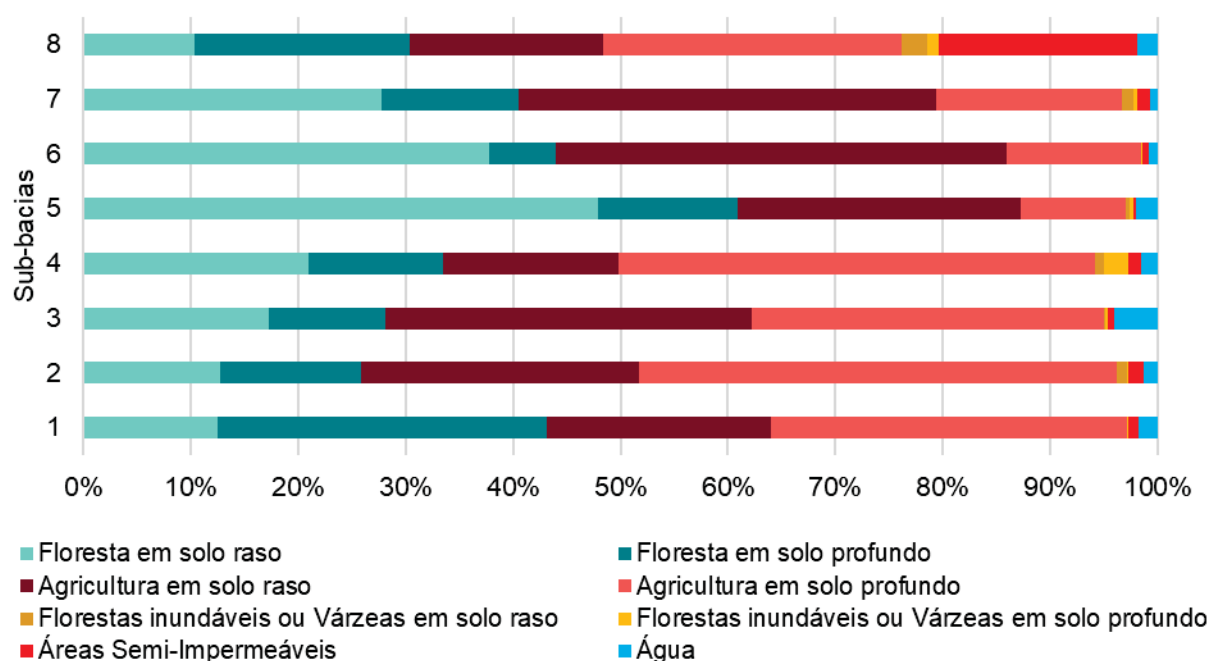


FONTE: DA AUTORA (2023).

Contudo, quando geradas as URHs com as informações de uso e ocupação da terra do Mapbiomas (2022) e tipo de solo do IBGE (2021), é possível observar diferenças quantitativas e qualitativas nos resultados: obtiveram-se 2.045 minibacias ao todo, das quais 388 estão na sub-bacia 1, a montante da estação de Porto Amazonas; 291 na sub-bacia 2, a montante de Fluvópolis, 140 na sub-bacia 3, até Barra do Espingarda; 201 na sub-bacia 4, a montante da estação Jusante Foz do Iratim; 262 na sub-bacia 5, até Águas Mornas; 189 na sub-bacia 6, a montante de Salto Santiago, 472 na sub-bacia 7, até Cruzeiro do Iguaçu, e 102 na sub-bacia 8 a montante de Puerto Aguirre. Quanto as classes de URHs verificadas na área da bacia analisada, as principais são agricultura em solo raso, agricultura em solo profundo e floresta em solo raso, ocupando 29%, 27% e 24%, respectivamente, de sua abrangência.

Da mesma forma, as classes de URHs para cada uma das sub-bacias podem ser verificadas na Figura 3.11, sendo possível observar uma mudança significativa na distribuição de todas as classes, destacando-se as áreas semi-impermeáveis, cujas áreas não eram identificáveis senão nas duas primeiras sub-bacias nas informações de Fan *et al.* (2015).

FIGURA 3.11 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE URHS EM CADA SUB-BACIAS CONFORME MAPBIOMAS (2021)



FONTE: DA AUTORA (2023).

Por fim, deve-se ressaltar que para a calibração e validação do modelo realizada no âmbito desse trabalho, tomou-se como base de dados as URHs de Fan *et al.* (2015), sendo os resultados dos parâmetros calibrados para essa base posteriormente aplicados às URHs geradas com o Mapbiomas (2021).

3.4 BASE DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Tanto para a caracterização da bacia do rio Iguaçu como para aferição e validação da modelagem realizada, foram utilizados dados hidrometeorológicos diários obtidos principalmente do banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), sendo as informações disponibilizadas por meio do Portal Hidroweb, que consiste na ferramenta virtual para acesso ao banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

(ANA) e que contém todas as informações da rede de monitoramento hidrometeorológica do país (ANA, 2022).

De modo a complementar estações que, por algum motivo, não estão mais disponíveis no Hidroweb, foram utilizados também as informações dos projetos *Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies – Brazil* (CAMELS-BR), que disponibiliza as séries históricas diárias de vazões para 3.679 estações fluviométricas e de dados meteorológicos, e 65 atributos para 897 bacias selecionadas no Brasil (Chagas *et al.*, 2021).

Para a seleção das estações fluviométricas a serem utilizadas principalmente na aferição da estimativa da disponibilidade hídrica para a Bacia do Rio Iguaçu, buscou-se quais estavam localizadas próximo ao exutório das sub-bacias de Fernandes *et al.* (s.d), e que tivessem um período significativo de dados observados de vazão em comum.

Assim, do Portal Hidroweb (ANA, 2022), foram selecionadas seis estações para as oito sub-bacias, de modo que as outras duas foram conseguidas do projeto CAMELS-BR (CHAGAS *et al.*, 2021), apresentadas no Quadro 3.2. Dessa forma, foi definido o período de 19 anos para as análises e modelagem, compreendido entre 1995 e 2014. As propriedades dessas estações são apresentadas no Quadro 3.3

Foram também gerados os fluviogramas e curvas de permanência de cada uma dessas estações, os quais são apresentados, respectivamente, na Quadro 3.3 – Propriedades das estações de controle selecionadas para cada sub-bacia do estudo

Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	7	8
Código	65035000	65220000	65310000	65774400	65803002	65883051	65894991	65993000
Nome	Porto Amazonas	Fluviópolis	União da Vitória	UHE Gov. Bento Munhoz Barramento	UHE Segredo Defluência	UHE Salto Santiago Barramento	UHE Salto Osório Barramento	Salto Cataratas
Fonte	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	CAMELS-BR	CAMELS-BR
Média	62,6	399,6	492,2	764,8	1.020,9	1.172,8	1.268,4	1.632,3
Mediana	45,8	287,1	343,3	688,0	920,0	973,0	1.077,0	1.235,4
Mínimo	3,4	34,5	54,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,9
Máximo	1.167,0	3.819,4	5.072,6	5.760,0	7.670,0	16.180,0	15.829,0	29.146,1
Amplitude	1.163,6	3.785,0	5.018,7	5.760,0	7.670,0	16.180,0	15.829,0	29.119,2
Variância	3.989,7	119.392,6	197.166,7	399.530,8	541.015,6	1.124.702,2	1.124.574,9	2.610.108,3

Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	7	8
Desvio padrão	63,2	345,5	444,0	632,1	735,5	1.060,5	1.060,5	1.615,6
Coeficiente de Variação	101,0	86,5	90,2	82,6	72,0	90,4	83,6	99,0
Coeficiente de Assimetria	3,5	2,5	2,5	2,1	2,4	4,3	3,6	4,1

FONTE: DA AUTORA COM DADOS DE ANA (2022) E CHAGAS ET AL. (2021).

Figura 3.12 e Figura 3.13, que serviram de referência para validação da modelagem realizada no estudo.

QUADRO 3.2 – ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO

Sub-Bacia	Código	Nome	Area (km²)	Período de dados	Fonte
1	65035000	Porto Amazonas	3.620	1935-2019	Hidroweb
2	65220000	Fluviópolis	18.600	1963-2017	Hidroweb
3	65310000	União da Vitória	24.200	1930-2017	Hidroweb
4	65774400	UHE Gov. Bento Munhoz Barramento	30.100	1985-1993	Hidroweb
5	65803002	UHE Segredo Defluência	34.400	1995-2015	Hidroweb
6	65883051	UHE Salto Santiago Barramento	43.900	1979-2019	Hidroweb
7	65894991	UHE Salto Osório Barramento	45.800	1995-2015	CAMELS-BR
8	65993000	Salto Cataratas	67.100	1942-2014	CAMELS-BR

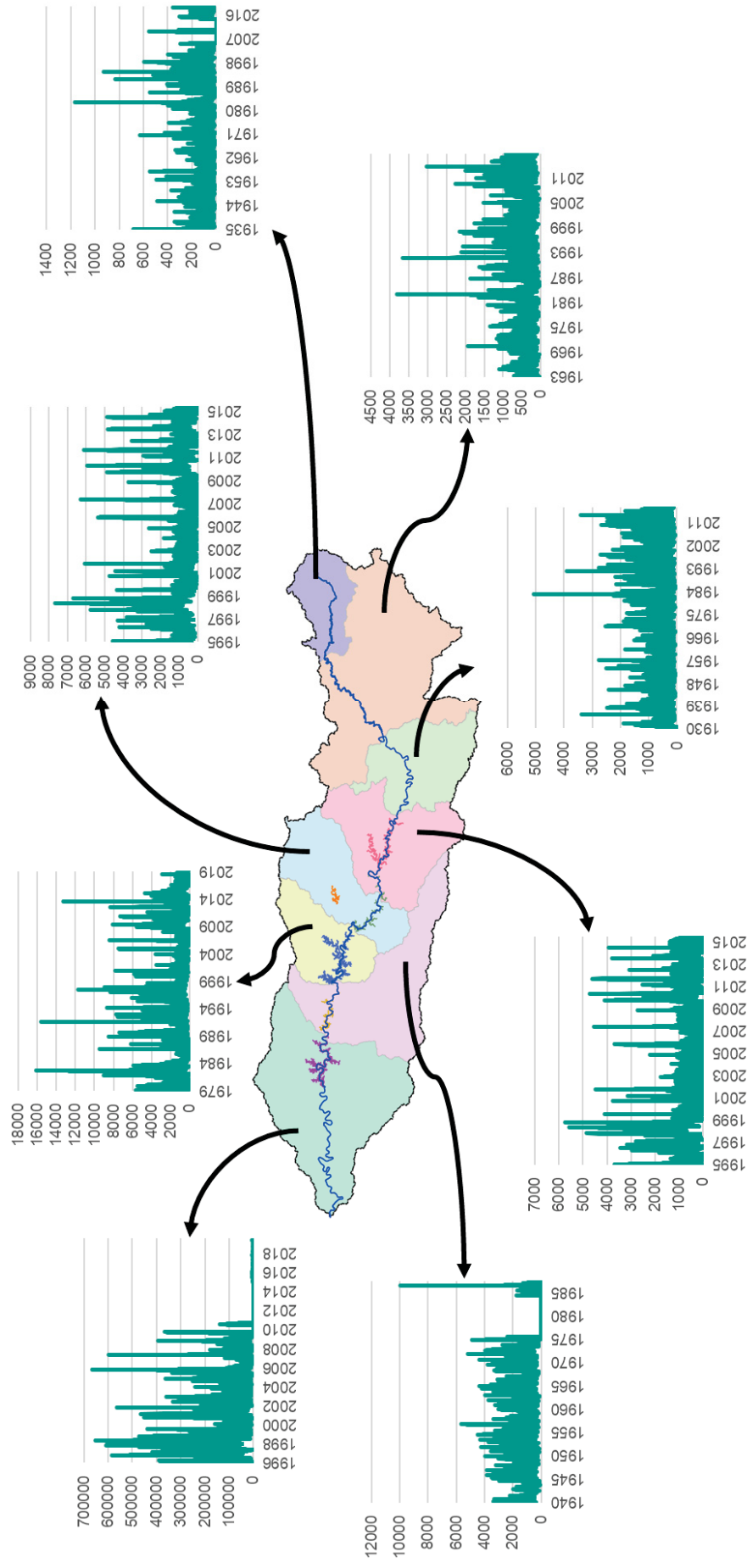
FONTE: DA AUTORA COM DADOS DE ANA (2022) E CHAGAS ET AL. (2021).

QUADRO 3.3 – PROPRIEDADES DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO

Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	7	8
Código	65035000	65220000	65310000	65774400	65803002	65883051	65894991	65993000
Nome	Porto Amazonas	Fluviópolis	União da Vitória	UHE Gov. Bento Munhoz Barramento	UHE Segredo Defluência	UHE Salto Santiago Barramento	UHE Salto Osório Barramento	Salto Cataratas
Fonte	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	Hidroweb	CAMELS-BR	CAMELS-BR
Média	62,6	399,6	492,2	764,8	1.020,9	1.172,8	1.268,4	1.632,3
Mediana	45,8	287,1	343,3	688,0	920,0	973,0	1.077,0	1.235,4
Mínimo	3,4	34,5	54,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,9
Máximo	1.167,0	3.819,4	5.072,6	5.760,0	7.670,0	16.180,0	15.829,0	29.146,1
Amplitude	1.163,6	3.785,0	5.018,7	5.760,0	7.670,0	16.180,0	15.829,0	29.119,2
Variância	3.989,7	119.392,6	197.166,7	399.530,8	541.015,6	1.124.702,2	1.124.574,9	2.610.108,3
Desvio padrão	63,2	345,5	444,0	632,1	735,5	1.060,5	1.060,5	1.615,6
Coefficiente de Variação	101,0	86,5	90,2	82,6	72,0	90,4	83,6	99,0
Coefficiente de Assimetria	3,5	2,5	2,5	2,1	2,4	4,3	3,6	4,1

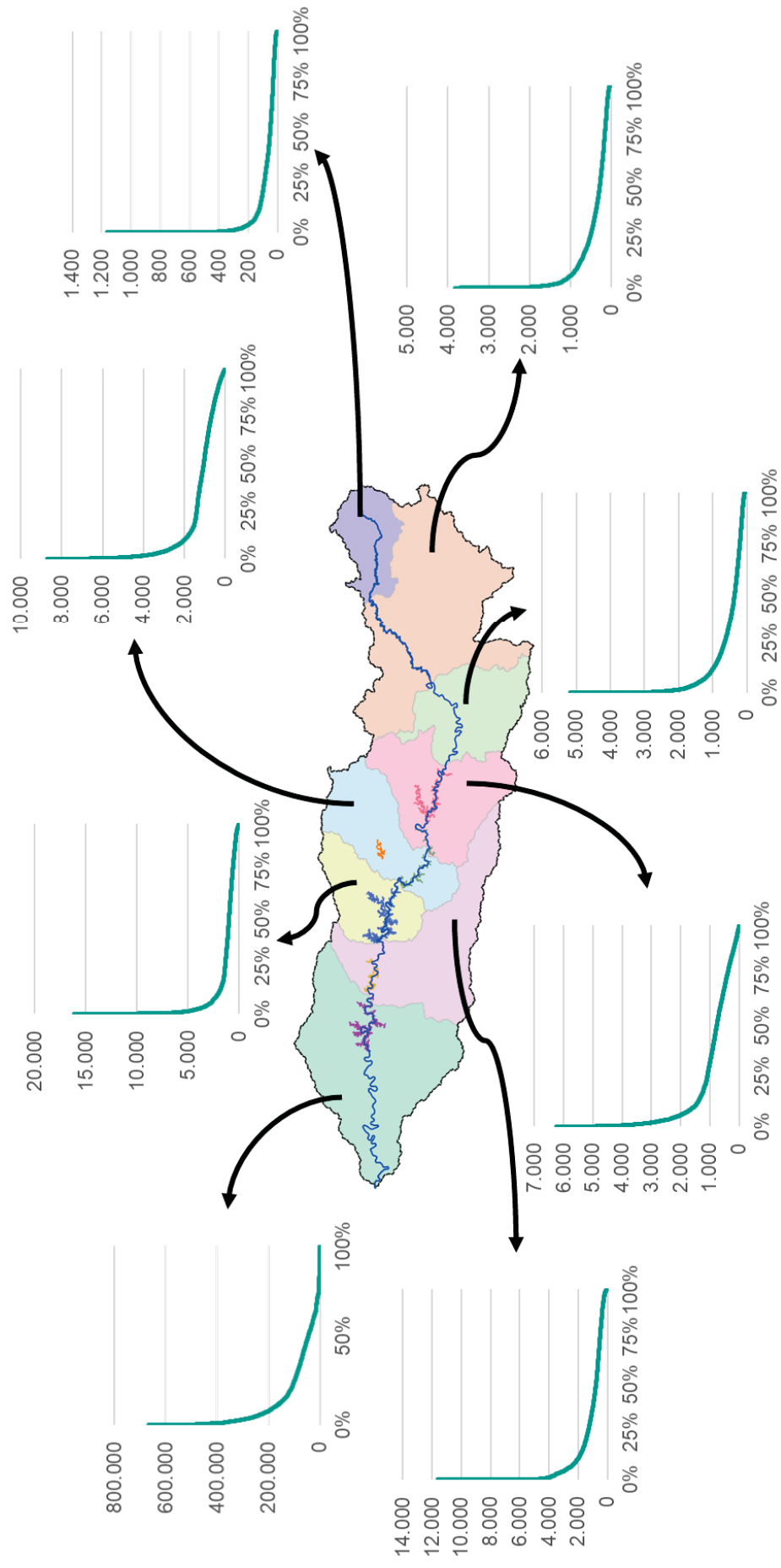
FONTE: DA AUTORA COM DADOS DE ANA (2022) E CHAGAS ET AL. (2021).

FIGURA 3.12 – FLUVIOGRAMAS DIÁRIOS DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO



FONTE: DA AUTORA COM DADOS DE ANA (2022) E CHAGAS ET AL. (2021).

FIGURA 3.13 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS ESTAÇÕES DE CONTROLE SELECIONADAS PARA CADA SUB-BACIA DO ESTUDO



FONTE: DA AUTORA COM DADOS DE ANA (2022) E CHAGAS ET AL. (2021).

Ademais, para a modelagem no MGB, foram obtidos os dados fluviométricos e pluviométricos para a bacia utilizando a ferramenta *ANA data acquisition* presente no MGB (ALVES *et al.* 2020), que permite o *download* automático das informações das estações da região de interesse também da base de dados do SNIRH (ANA, 2022). Neste caso, foram obtidos dados de 440 estações pluviométricas na região da bacia do rio Iguaçu, além das oito estações fluviométricas, uma para cada sub-bacia, já apresentadas.

Por fim, o modelo MGB também utiliza dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação (horas de sol por dia) para realizar os cálculos de evapotranspiração. Para a obtenção desses dados, foi utilizada outra ferramenta interna do modelo, *Climate variables* com a opção *Using INMET climatology databases*, que utiliza a base de dados interna de normais climatológicas de 1961-1990 calculadas pelo INMET para todo o Brasil (Inmet, 1992). Neste caso, foram utilizadas as estações apresentadas no Quadro 3.4.

QUADRO 3.4 – ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS

Estação	Nome	Latitude	Longitude
83025	São Mateus do Sul	-25,867	-50,383
83811	Ivaí	-25,000	-50,850
83826	Foz do Iguaçu	-25,550	-54,567
83834	Guarapuava	-25,400	-51,467
83836	Irati	-25,467	-50,633
83837	Ponta Grossa	-25,100	-50,167
83842	Curitiba	-25,433	-49,267
83844	Paranaguá	-25,533	-48,517
83858	Xanxerê	-26,850	-52,400
83860	Palmas	-26,483	-51,983
83864	Porto União	-26,233	-51,067
83865	Irineópolis	-26,250	-50,800
83867	Rio Negro	-26,100	-49,800
83872	Indaial	-26,900	-49,217
83874	São Francisco do Sul	-26,250	-48,650

FONTE: ADAPTADO DE INMET, 1992.

3.5 CALIBRAÇÃO DO MGB PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU

Para aferir a simulação da bacia pelo MGB, utilizou-se a ferramenta de calibração automática interna do modelo, a qual utiliza o algoritmo descrito no Anexo A.

A seguir são descritos os procedimentos e particularidades de cada uma das três calibrações utilizadas no presente trabalho.

3.5.1 Calibração completa

A primeira etapa foi realizada considerando o período entre os anos de 1995 e 2001, e todas as oito estações fluviométricas (65035000, 65220000, 65310000, 65774400, 65803002, 65883051, 65894991 e 65993000 – conforme descrito no item 3.4), uma para cada sub-bacia segundo a divisão de Fernandes *et al.* (s.d).

Para tanto, foram utilizadas as URHs geradas por Fan *et al.* (2015) e tomados como parâmetros iniciais os valores apresentados por Alves *et al.* (2020), que demonstrou o processo de calibração do modelo para a bacia do rio Iguaçu até UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, também conhecida como Foz do Areia, e que utilizou as mesmas URHs de Fan *et al.* (2015). Os parâmetros de vegetação (fixos) e de solo (calibráveis), que variaram em decorrência das classes de URH, podem ser conferidos na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente, enquanto os constantes são apresentados na Tabela 3.3.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO, VARIANTES POR URHS

Classe de URH	Albedo	Índice de área foliar	Altura das árvores (m)	Resistência superficial (s.m-1)
Floresta em solo raso	0,11	4,00	10,00	100,00
Floresta em solo profundo	0,16	9,00	30,00	150,00
Agricultura em solo raso	0,15	1,00	0,50	40,00
Agricultura em solo profundo	0,26	6,00	2,00	150,00
Campo em solo raso	0,10	1,00	5,00	40,00
Campo em solo profundo	0,19	4,00	10,00	80,00
Várzea	0,10	2,00	0,50	70,00
Áreas semi-impermeáveis	0,15	1,00	0,50	10,00
Água	0,08	1,00	0,10	0,00

FONTE: ALVES ET AL. (2020).

TABELA 3.2 – PARÂMETROS DE SOLO INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, VARIANTES POR URHS

URHs	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta em solo raso	900,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Floresta em solo profundo	1.000,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo raso	900,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo profundo	1.000,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Campo em solo raso	900,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Campo em solo profundo	1.000,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Várzea	500,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Áreas semi-impermeáveis	300,00	0,10	0,10	2,00	0,60	0,00	0,10
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

FONTE: ALVES ET AL. (2020).

TABELA 3.3 – PARÂMETROS INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, CONSTANTES POR URHS

Parâmetro	Valor
CS	20,00
CI	150,00
CB (h)	2.000,00
QB (m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²)	0,01

FONTE: ALVES ET AL. (2020).

Para a calibração propriamente dita, foram, então, adotados valores de indivíduos e gerações específicos do processo de calibração, bem como selecionadas as funções-objetivo de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o logaritmo de eficiência de Nash-Sutcliffe (logNSE) e o erro da vazão com 90% de permanência (Q₉₀). Ademais, não foram limitados nenhum dos parâmetros, e todas as sub-bacias do rio Iguaçu foram calibradas em um único processo. Dessa forma, a melhor calibração obtida foi com 100 indivíduos e 700 gerações quando considerados os resultados das funções-objetivo selecionadas.

Assim, a Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam os parâmetros resultantes do melhor processo de calibração, bem como a Figura 3.14 apresenta os hidrogramas e curvas de permanência resultantes dessa calibração, para cada uma das sub-bacias consideradas.

TABELA 3.4 – PARÂMETROS DE SOLO VARIANTES POR URHS, RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA

URHs	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta em solo raso	571,50	0,11	0,04	2,51	0,60	0,00	0,10
Floresta em solo profundo	874,00	0,10	0,08	3,40	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo raso	1.004,40	0,06	0,07	2,35	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo profundo	570,00	0,14	0,14	2,32	0,60	0,00	0,10
Campo em solo raso	340,20	0,16	0,10	2,29	0,60	0,00	0,10
Campo em solo profundo	736,00	0,06	0,10	2,53	0,60	0,00	0,10
Várzea	151,50	0,13	0,12	3,06	0,60	0,00	0,10
Áreas semi-impermeáveis	434,40	0,08	0,08	1,47	0,60	0,00	0,10
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

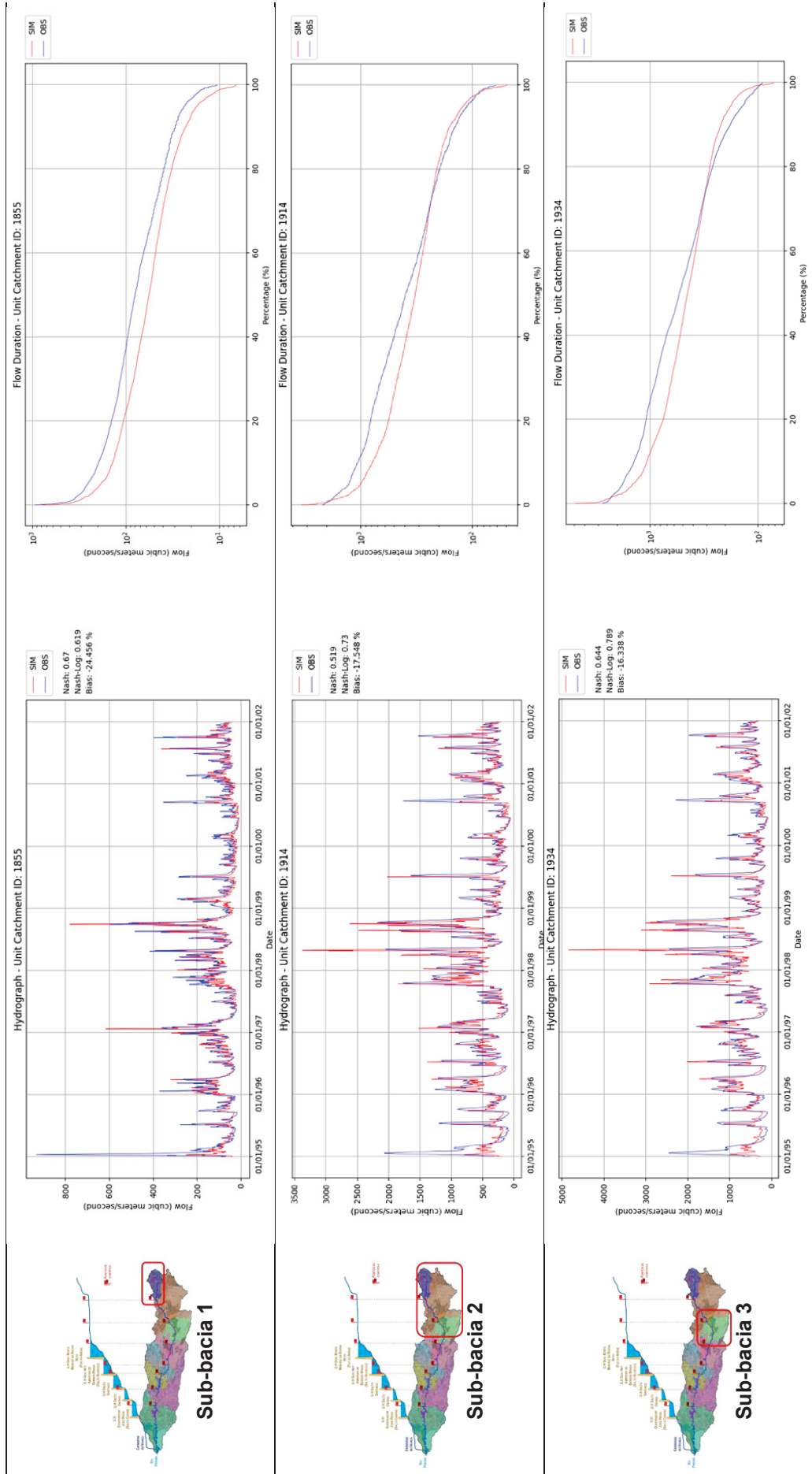
FONTE: DA AUTORA (2023).

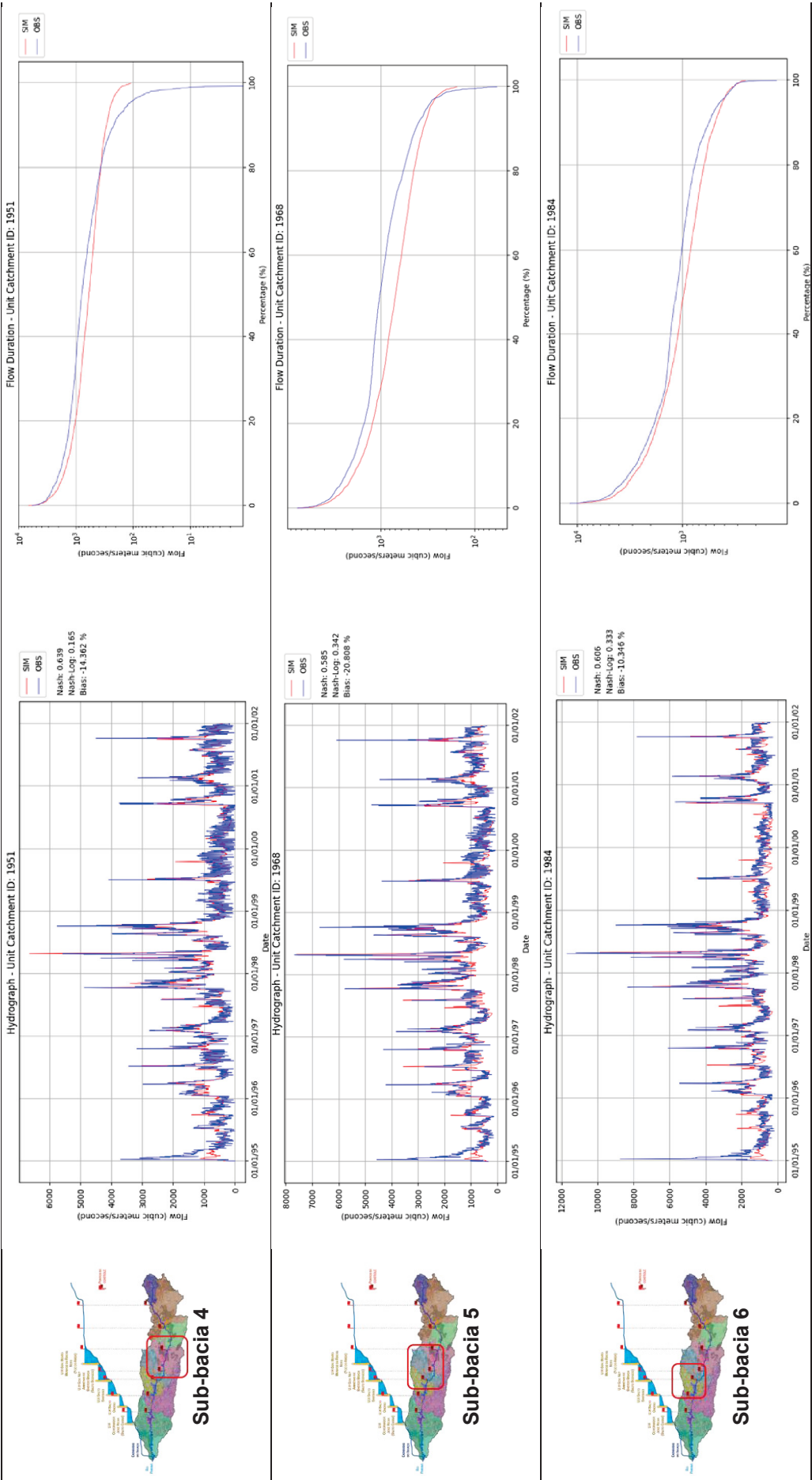
TABELA 3.5 – PARÂMETROS CONSTANTES POR URHS RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA

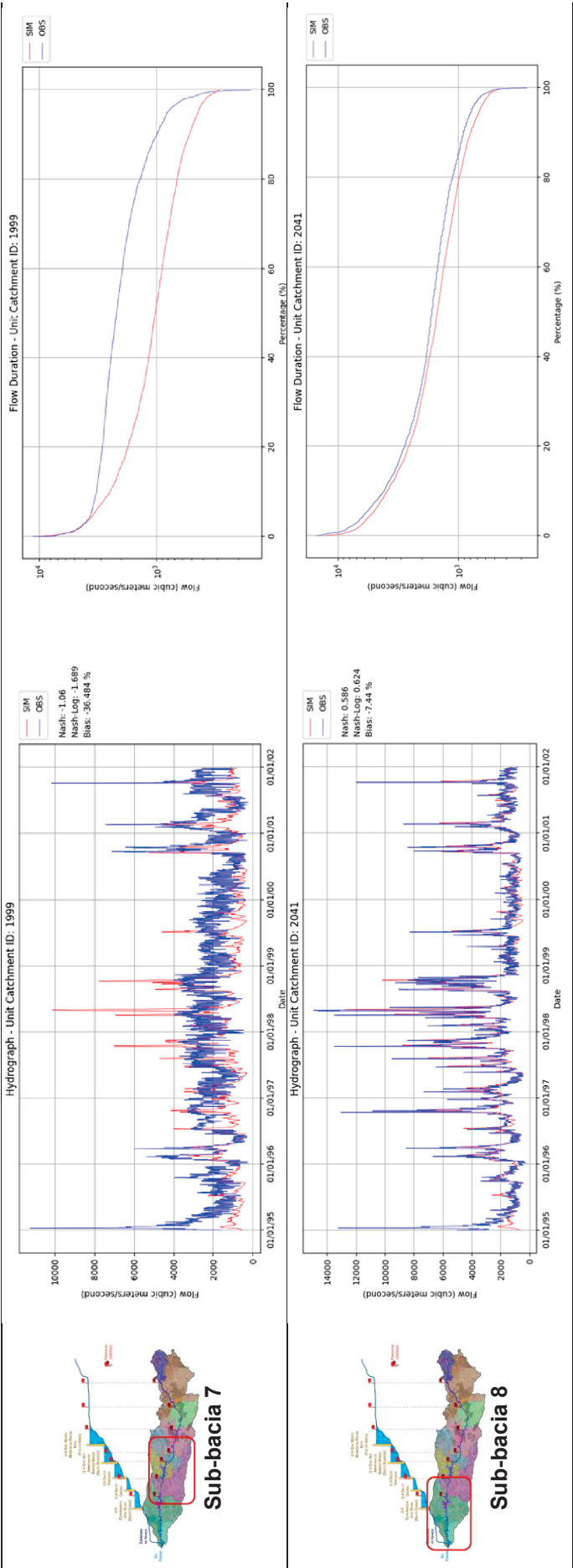
Parâmetro	Valor
CS	18,26
CI	78,90
CB (h)	9.622,00
QB (m ³ .s-1.km ⁻²)	0,01

FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.14 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA







FONTE: DA AUTORA (2023).

3.5.2 Calibração apenas com a sub-bacia 8

A segunda etapa foi idealizada em decorrência da primeira calibragem (item 3.5.1) ter demonstrado bons resultados no exutório da bacia, mesmo com os diversos reservatórios existentes à montante. Portanto, também se considerou o período entre os anos de 1995 e 2001, contudo, seu diferencial da primeira calibração consiste na utilização apenas da estação 65993000, correspondente à sub-bacia 8 de exutório do rio Iguaçu para o processo de calibração.

Da mesma forma, foram utilizadas as URHs geradas por Fan *et al.* (2015) e os valores apresentados por Alves *et al.* (2020) como parâmetros iniciais, sendo novamente adotados valores de indivíduos e gerações específicos do processo de calibração, selecionadas as funções-objetivo de NSE, o logNSE e o erro da Q_{90} e não foram limitados nenhum dos parâmetros. A melhor calibração também foi obtida quando adotados 100 indivíduos e 700 gerações, observando-se as funções-objetivo selecionadas.

A Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam os parâmetros resultantes do melhor processo de calibração considerando apenas a estação fluviométrica da sub-bacia 8, enquanto a Figura 3.15 apresenta os hidrogramas e as curvas de permanência resultantes dessa calibração, para cada uma das sub-bacias consideradas.

TABELA 3.6 – PARÂMETROS DE SOLO VARIANTES POR URHS, RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA

URHs	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta em solo raso	848,20	0,06	0,18	4,21	0,60	0,00	0,10
Floresta em solo profundo	996,10	0,12	0,02	2,80	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo raso	1.073,60	0,10	0,09	2,12	0,60	0,00	0,10
Agricultura em solo profundo	975,40	0,07	0,09	2,81	0,60	0,00	0,10
Campo em solo raso	296,90	0,25	0,13	2,63	0,60	0,00	0,10
Campo em solo profundo	403,90	0,05	0,12	1,80	0,60	0,00	0,10
Várzea	151,10	0,16	0,12	1,65	0,60	0,00	0,10
Áreas semi-impermeáveis	331,20	0,05	0,11	1,73	0,60	0,00	0,10
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

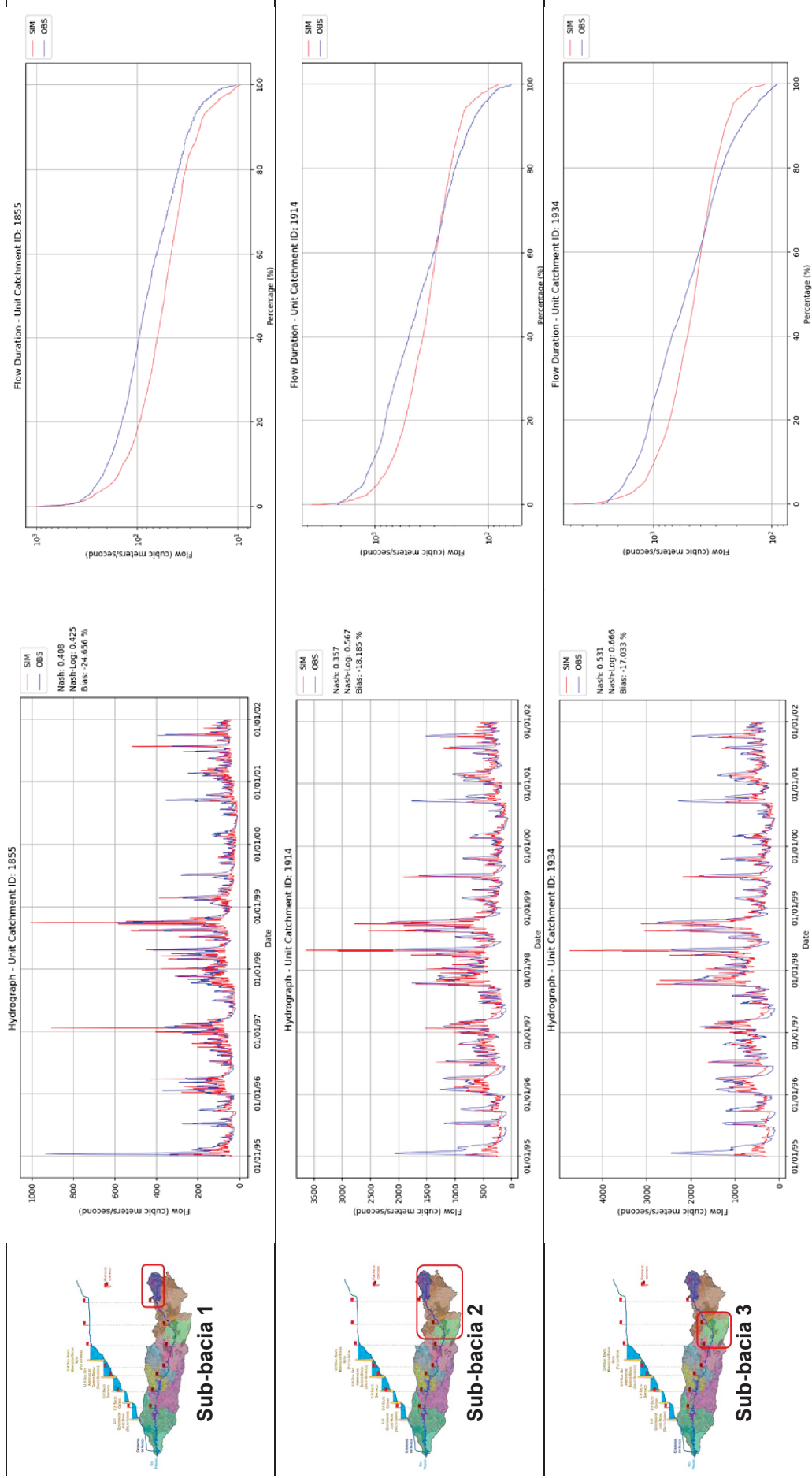
FONTE: DA AUTORA (2023).

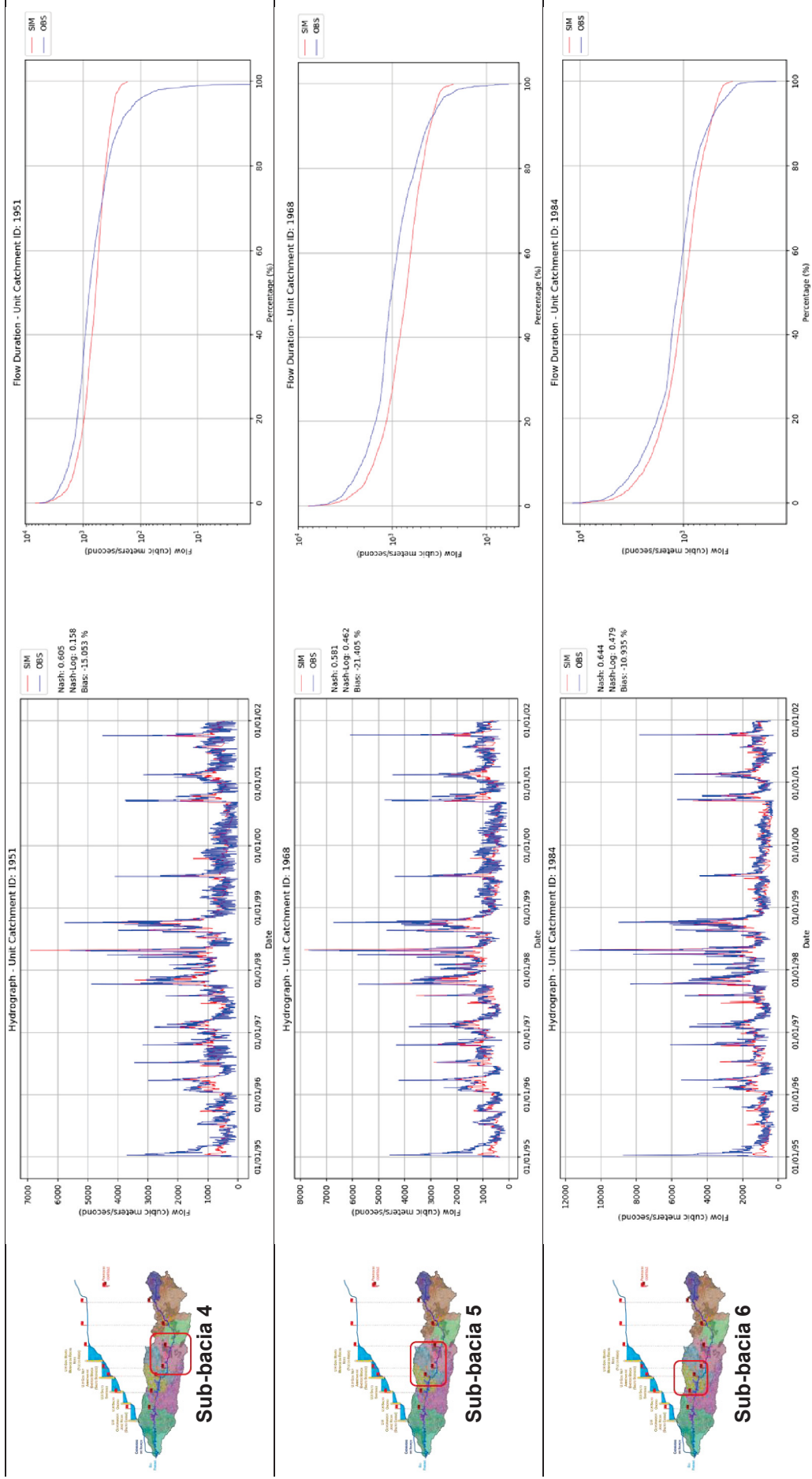
TABELA 3.7 – PARÂMETROS CONSTANTES POR URHS RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO PARA A BACIA COMPLETA

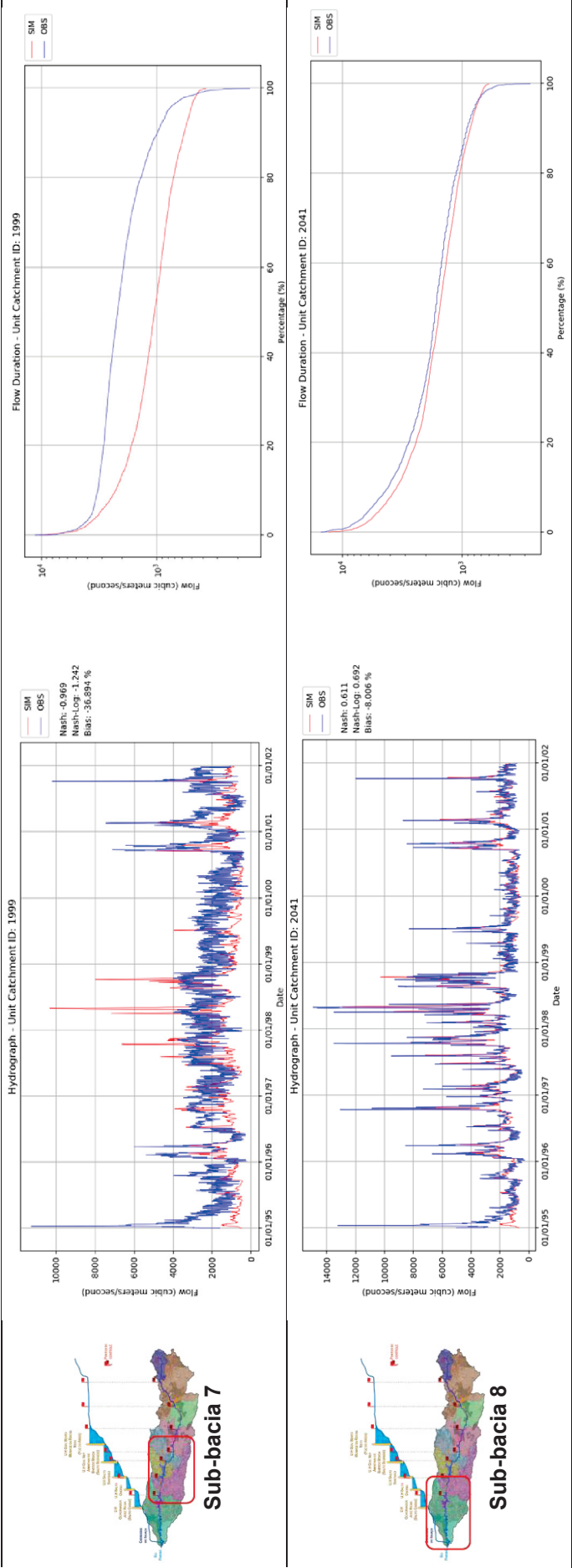
Parâmetro	Valor
CS	5,16
CI	181,17
CB (h)	8.925,28
QB (m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²)	0,01

FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.15 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8







FONTE: DA AUTORA (2023).

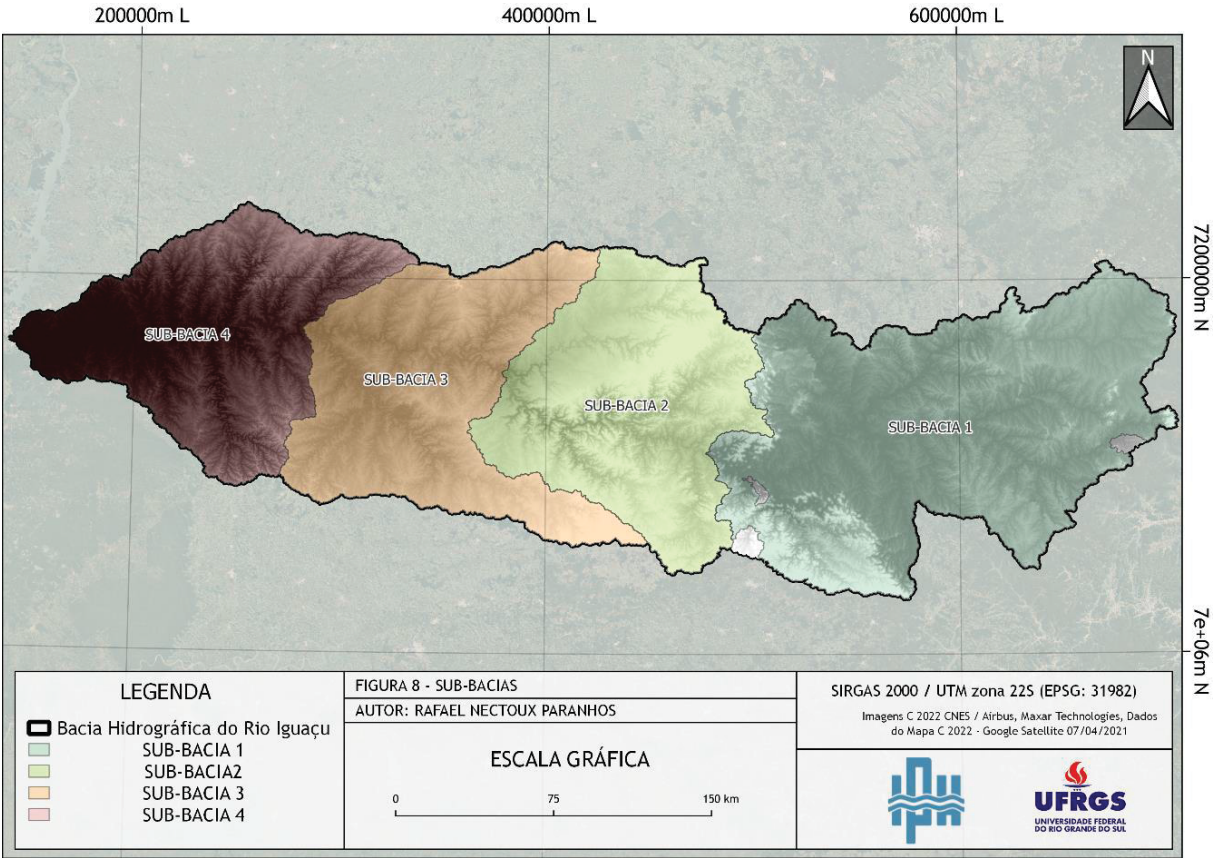
3.5.3 Calibração de Paranhos (2023)

A última calibração utilizada no presente estudo foi a de Paranhos (2023), que utilizou o MGB e sua ferramenta de calibração automática para avaliar a importância da disponibilidade de dados de precipitação em regiões mais afastadas da calha principal de uma bacia hidrográfica, tendo como área de estudo de caso também a bacia hidrográfica do rio Iguaçu.

Para tanto, Paranhos (2023) utilizou a versão BHO2MGB do plugin de pré-processamento de informações para o MGB, o qual utiliza o *Software Google Earth Engine* como repositório dos dados. Para a discretização da bacia neste plugin, o autor utilizou a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescala da ANA - BHO 2017 50k (ANA, 2017), o Modelo Digital de Elevação MERIT DEM 90m, além das informações de uso e ocupação do solo do Projeto Mapbiomas para o ano de 2010 (Mapbiomas, 2010) para a geração das URHs (Paranhos, 2023).

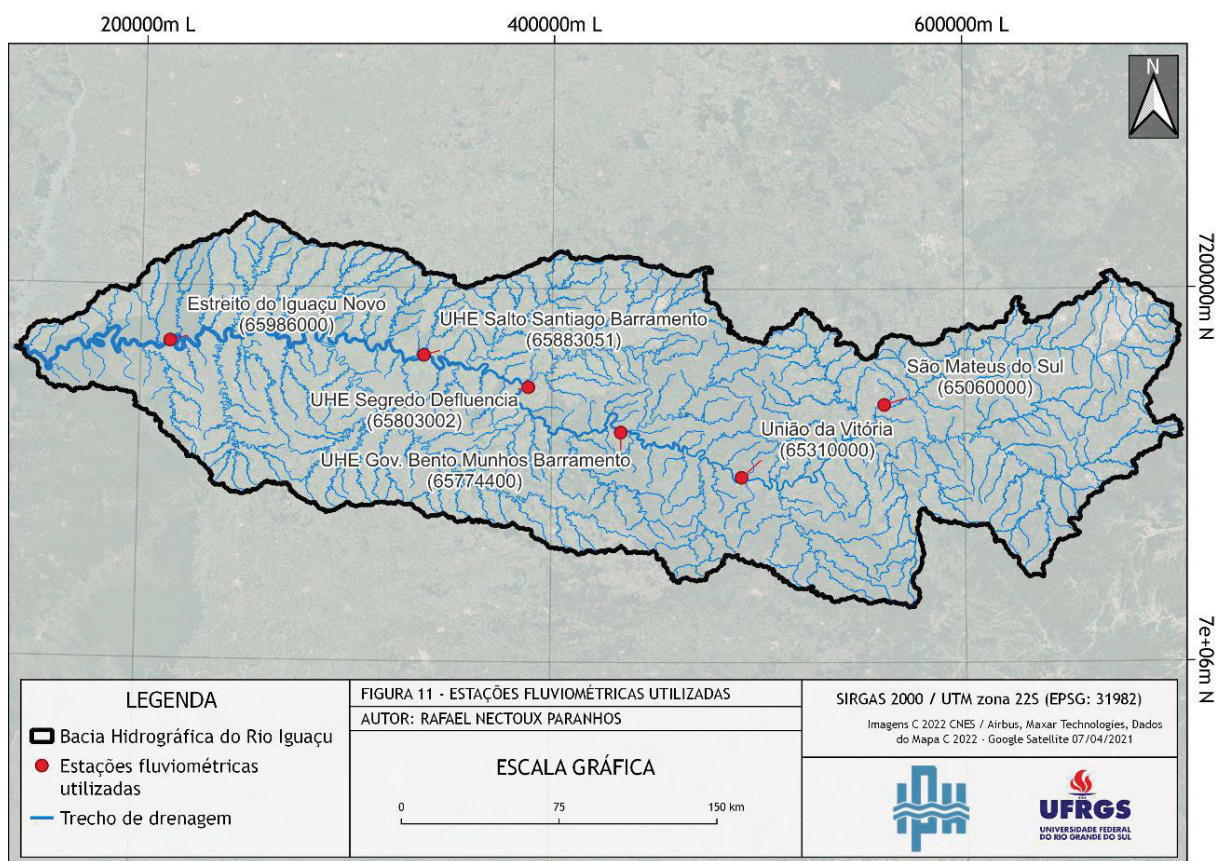
Para a simulação, o autor dividiu a bacia hidrográfica do rio Iguaçu em quatro sub-bacias (Figura 3.16) e utilizou seis postos fluviométricos para a aferição do modelo (Figura 3.17). Ademais, foi utilizado o modelo inercial para a simulação do período compreendido entre os anos de 1992 e 2012, adotando-se os parâmetros de vegetação (fixos) apresentados na Tabela 3.8, e de solo (calibráveis) variáveis e constantes, conforme disposto na Tabela 3.9 e Tabela 3.10, respectivamente (Paranhos, 2023).

FIGURA 3.16 - SUB-BACIAS UTILIZADAS NO ESTUDO DE PARANHOS (2023)



FONTE: PARANHOS (2023).

FIGURA 3.17 - POSTOS FLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS NO ESTUDO DE PARANHOS (2023)



FONTE: PARANHOS (2023).

TABELA 3.8 – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO, VARIANTES POR URHS

URH	Albedo	IAF	Altura média da vegetação (m)	Resistência da superfície (s.m-1)
Floresta Úmida	0,14	6,0	20,0	100,0
Pastagem Úmida	0,16	3,0	8,0	80,0
Terra Agrícola Úmida	0,20	2,0	1,2	70,0
Floresta de Planalto	0,14	6,0	20,0	100,0
Pastagem de Planalto	0,16	3,0	8,0	80,0
Terra Agrícola de Planalto	0,20	2,0	1,2	70,0
Floresta de Encosta	0,14	6,0	20,0	100,0
Pastagem de Encosta	0,16	3,0	8,0	80,0
Terra Agrícola de Encosta	0,20	2,0	1,2	70,0
Semi-Permeável	0,15	1,0	0,5	70,0
Água	0,08	1,0	0,1	0,0

FONTE: PARANHOS (2023).

TABELA 3.9 – PARÂMETROS DE SOLO INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, VARIANTES POR URHS

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta Úmida	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Pastagem Úmida	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Terra Agrícola Úmida	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Floresta de Planalto	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Pastagem de Planalto	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Terra Agrícola de Planalto	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Floresta de Encosta	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Pastagem de Encosta	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Terra Agrícola de Encosta	1.000,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Semi-Permeável	300,00	1,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

FONTE: PARANHOS (2023).

TABELA 3.10 – PARÂMETROS INICIAIS PARA A CALIBRAÇÃO, CONSTANTES POR URHS

Parâmetro	Valor
CS	20,00
CI	150,00
CB (h)	2.000,00
QB (m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²)	0,01

FONTE: PARANHOS (2023).

Para a calibração do modelo, Paranhos (2023) buscou atingir os melhores valores para o NSE, utilizando a ferramenta de calibração automática do MGB, descrita no Anexo A, de duas formas: (i) calibrando cada sub-bacia separadamente, considerando apenas os dados do posto fluviométrico inserido nela; e (ii) calibrando a bacia como um todo, considerando todos os posto fluviométricos selecionados, mas tomando como base as calibrações de cada sub-bacia geradas na primeira etapa, os quais foram reunidos em um único arquivo. Dessa forma, Paranhos (2023) obteve os valores apresentados na Tabela 3.11 e Tabela 3.12, de parâmetros calibrados variáveis e constantes por classe de URH, os quais foram utilizados em todos os testes realizados pelo autor e geraram resultados satisfatórios para o NSE.

TABELA 3.11 – PARÂMETROS DE SOLO CALIBRADOS POR PARANHOS (2023), VARIANTES POR URHS

Sub-bacia	URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
1	Floresta Úmida	163,2	0,17	1,17	3,06	6	0	1
	Pastagem Úmida	163,2	0,17	1,17	3,06	6	0	1
	Terra Agrícola Úmida	163,2	0,17	1,17	3,06	6	0	1
	Floresta de Planalto	209,9	0,54	1,17	3,88	6	0	1
	Pastagem de Planalto	209,9	0,54	1,17	3,88	6	0	1
	Terra Agrícola de Planalto	209,9	0,54	1,17	3,88	6	0	1
	Floresta de Encosta	108,9	0,48	2,78	3,32	6	0	1
	Pastagem de Encosta	108,9	0,48	2,78	3,32	6	0	1
	Terra Agrícola de Encosta	108,9	0,48	2,78	3,32	6	0	1
	Semi-Permeável	415,6	0,16	0,5	3,18	6	0	1
	Água	0	0	0	0	0	0	0
2	Floresta Úmida	454,8	0,17	1,15	3,18	6	0	1
	Pastagem Úmida	454,8	0,17	1,15	3,18	6	0	1
	Terra Agrícola Úmida	454,8	0,17	1,15	3,18	6	0	1
	Floresta de Planalto	290	0,13	2,28	3,24	6	0	1
	Pastagem de Planalto	290	0,13	2,28	3,24	6	0	1
	Terra Agrícola de Planalto	290	0,13	2,28	3,24	6	0	1
	Floresta de Encosta	267,8	0,25	2,05	3,24	6	0	1
	Pastagem de Encosta	267,8	0,25	2,05	3,24	6	0	1
	Terra Agrícola de Encosta	267,8	0,25	2,05	3,24	6	0	1
	Semi-Permeável	182,3	0,73	0,4	1,97	6	0	1
	Água	0	0	0	0	0	0	0
3	Floresta Úmida	651,9	0,18	1,31	1,18	6	0	1
	Pastagem Úmida	651,9	0,18	1,31	1,18	6	0	1
	Terra Agrícola Úmida	651,9	0,18	1,31	1,18	6	0	1
	Floresta de Planalto	420,5	0,16	2,22	3,3	6	0	1
	Pastagem de Planalto	420,5	0,16	2,22	3,3	6	0	1
	Terra Agrícola de Planalto	420,5	0,16	2,22	3,3	6	0	1
	Floresta de Encosta	230	0,21	2,82	3,78	6	0	1
	Pastagem de Encosta	230	0,21	2,82	3,78	6	0	1
	Terra Agrícola de Encosta	230	0,21	2,82	3,78	6	0	1
	Semi-Permeável	184,4	0,86	0,42	1,49	6	0	1
	Água	0	0	0	0	0	0	0
4	Floresta Úmida	269,1	0,28	1,31	5,19	6	0	1
	Pastagem Úmida	269,1	0,28	1,31	5,19	6	0	1
	Terra Agrícola Úmida	269,1	0,28	1,31	5,19	6	0	1
	Floresta de Planalto	276,2	0,3	2,41	3,29	6	0	1
	Pastagem de Planalto	276,2	0,3	2,41	3,29	6	0	1
	Terra Agrícola de Planalto	276,2	0,3	2,41	3,29	6	0	1

Sub-bacia	URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
	Floresta de Encosta	114,8	0,19	2,05	2,42	6	0	1
	Pastagem de Encosta	114,8	0,19	2,05	2,42	6	0	1
	Terra Agrícola de Encosta	114,8	0,19	2,05	2,42	6	0	1
	Semi-Permeável	346,1	0,56	1,68	3,52	6	0	1
	Água	0	0	0	0	0	0	0

FONTE: PARANHOS (2023).

TABELA 3.12 – PARÂMETROS CALIBRADOS POR PARANHOS (2023), CONSTANTES POR URHS

Sub-bacia	CS	CI	CB
1	11,58	128,02	898,13
2	10,42	120,42	2.093,69
3	5,41	115,56	796,07
4	14,08	155,7	1.196,53

FONTE: PARANHOS (2023).

De modo a permitir a utilização no presente trabalho desses parâmetros calibrados, foram necessárias algumas adaptações. Primeiramente, foi analisada a divisão das sub-bacias, para as quais verificou-se que a equivalência entre elas, conforme apresentado na Figura 3.18. Em seguida, foi preciso identificar uma possível equivalência entre as classes de URH utilizadas em ambos os trabalhos, uma vez que as bases utilizadas inicialmente de uso e ocupação do solo e tipo de solo não foram as mesmas.

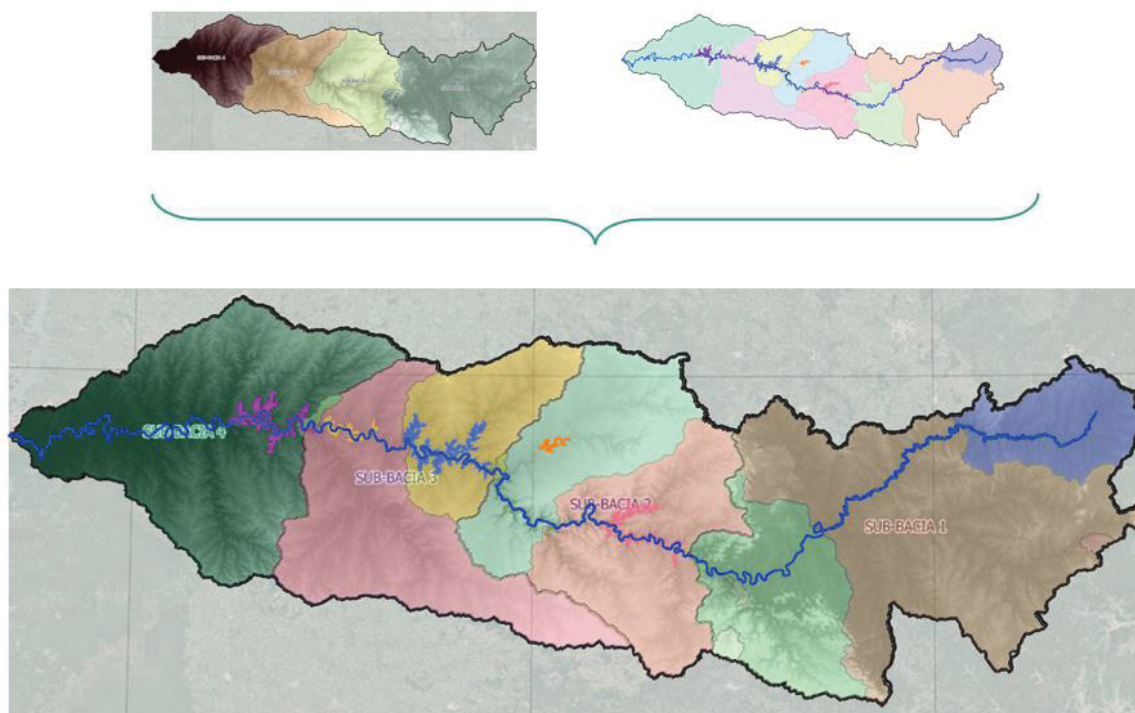
Para tanto, foram realizadas simulações correlacionando de diferentes formas as referidas classes, novamente observando-se os resultados do NSE para identificar a melhor combinação. Assim, para o presente trabalho, foram adotadas as seguintes combinações:

- Parâmetros de encosta de Paranhos (2023) para solos rasos;
- Parâmetros de planalto de Paranhos (2023) para solos profundos;
- Para várzea foi adotado $Wm=200$, $b=0,12$, $Kbas=0,05$, $Kint=2$ e os demais parâmetros mantidos iguais para todos.

Por fim, os valores adotados no presente trabalho para cada uma das oito sub-bacias simuladas, dos parâmetros referenciados a Paranhos (2023), são

apresentados na Tabela 3.13 e Tabela 3.14. Os hidrogramas e curvas de permanência resultantes da simulação com os parâmetros adaptados de Paranhos (2023) podem ser conferidos na Figura 3.19.

FIGURA 3.18 – EQUIVALÊNCIA DAS SUB-BACIAS VERIFICADAS



FONTE: DA AUTORA, COM ADAPTAÇÃO DE PARANHOS (2023).

TABELA 3.13 – PARÂMETROS DE SOLO ADAPTADOS DE PARANHOS (2023), VARIANTES POR URHS

Sub-bacia	URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
1	Floresta em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	415,60	0,16	0,50	3,18	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Floresta em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00

Sub-bacia	URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
	Agricultura em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	415,60	0,16	0,50	3,18	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Floresta em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	108,90	0,48	2,78	3,32	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	209,90	0,54	1,17	3,88	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	415,60	0,16	0,50	3,18	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Floresta em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	182,30	0,73	0,40	1,97	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Floresta em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	267,80	0,25	2,05	3,24	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	290,00	0,13	2,28	3,24	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	182,30	0,73	0,40	1,97	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Floresta em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	184,40	0,86	0,42	1,49	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	Floresta em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00

Sub-bacia	URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
	Floresta em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	230,00	0,21	2,82	3,78	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	420,50	0,16	2,22	3,30	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	184,40	0,86	0,42	1,49	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	Floresta em solo raso	114,80	0,19	2,05	2,42	6,00	0,00	1,00
	Floresta em solo profundo	276,20	0,30	2,41	3,29	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo raso	114,80	0,19	2,05	2,42	6,00	0,00	1,00
	Agricultura em solo profundo	276,20	0,30	2,41	3,29	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo raso	114,80	0,19	2,05	2,42	6,00	0,00	1,00
	Campo em solo profundo	276,20	0,30	2,41	3,29	6,00	0,00	1,00
	Várzea	200,00	0,12	0,05	2,00	6,00	0,00	1,00
	Áreas semi-impermeáveis	346,10	0,56	1,68	3,52	6,00	0,00	1,00
	Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

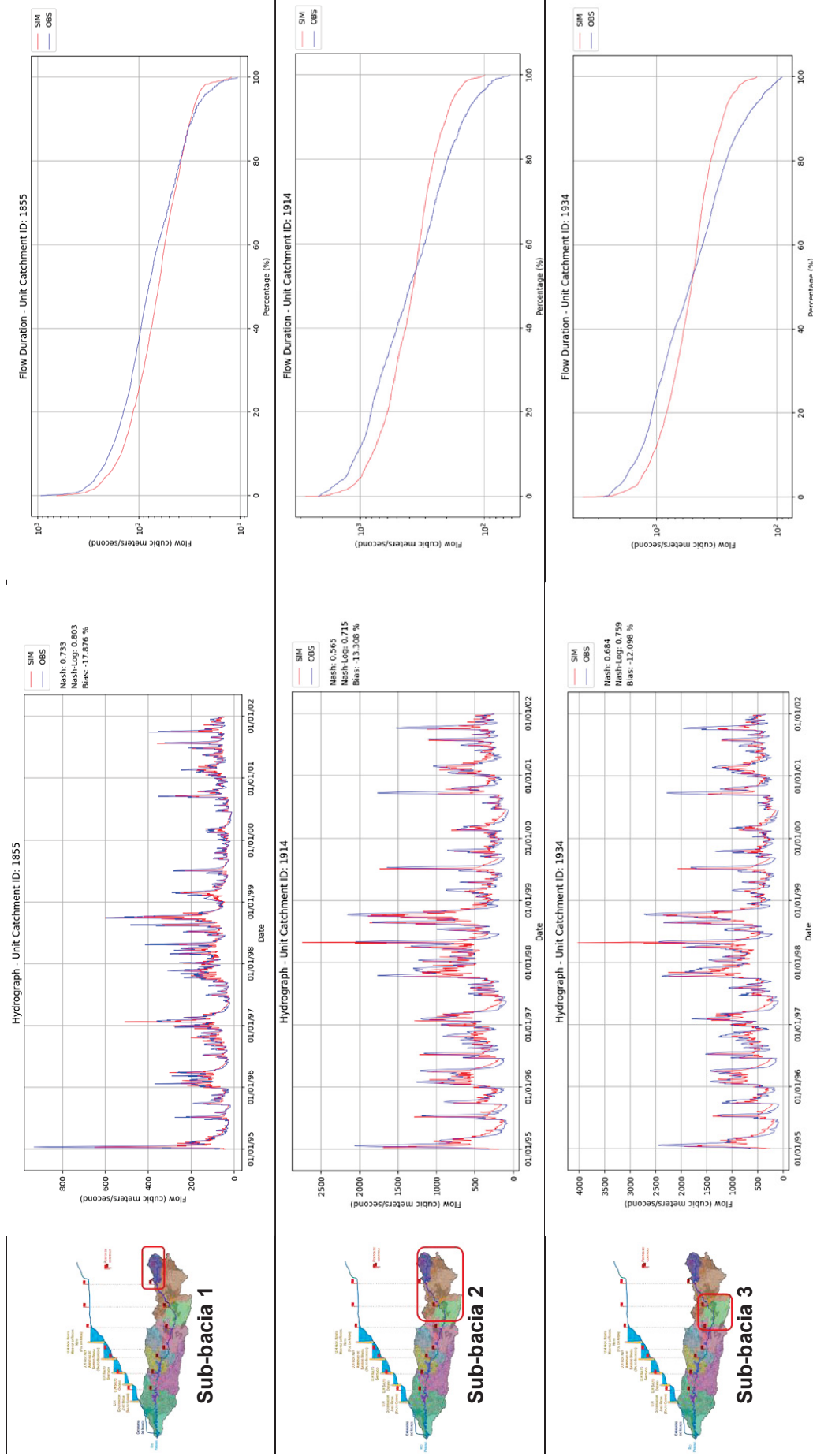
FONTE: DA AUTORA, COM ADAPTAÇÃO DE PARANHOS (2023).

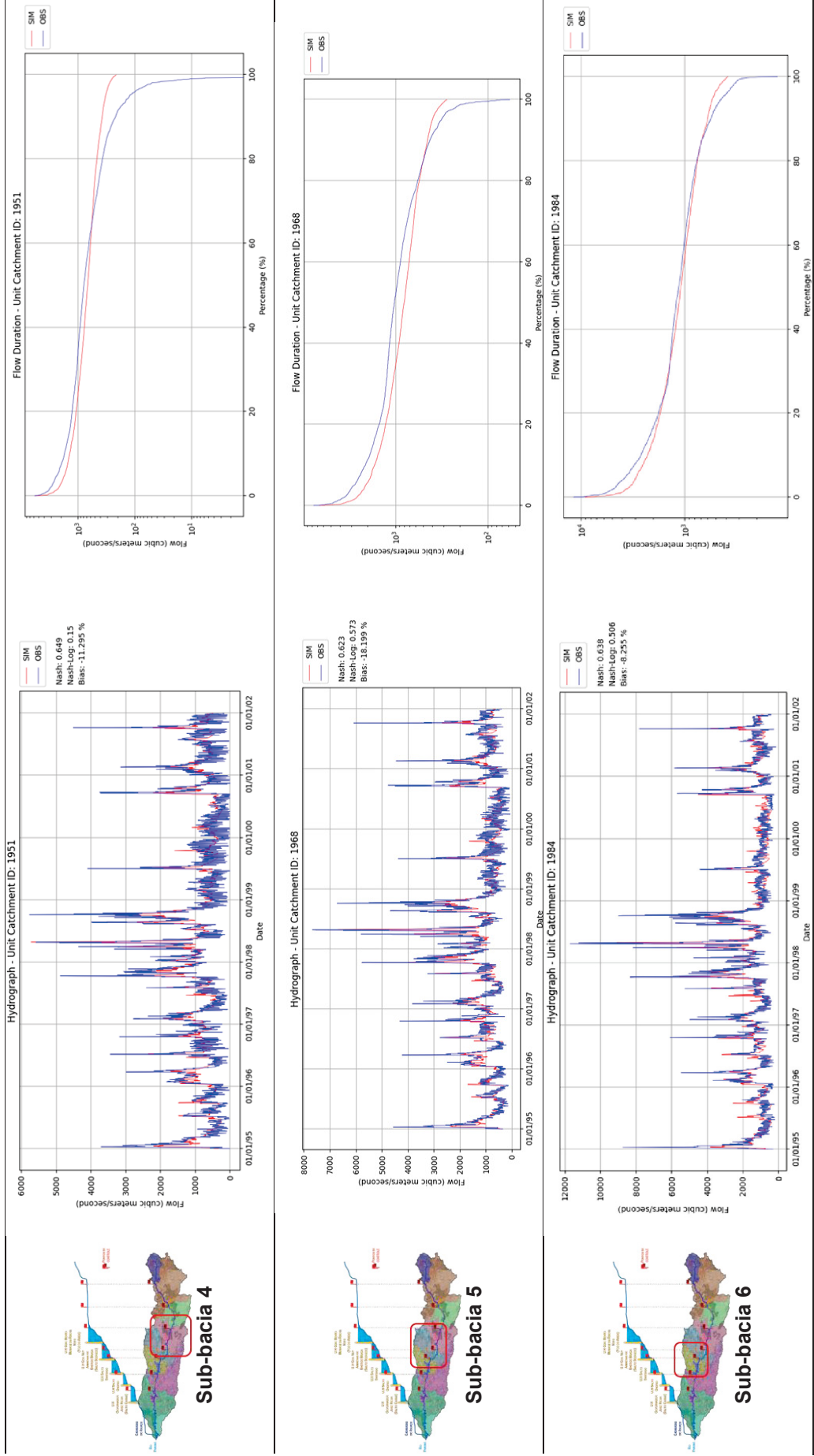
TABELA 3.14 – PARÂMETROS ADAPTADOS DE PARANHOS (2023), CONSTANTES POR URHS

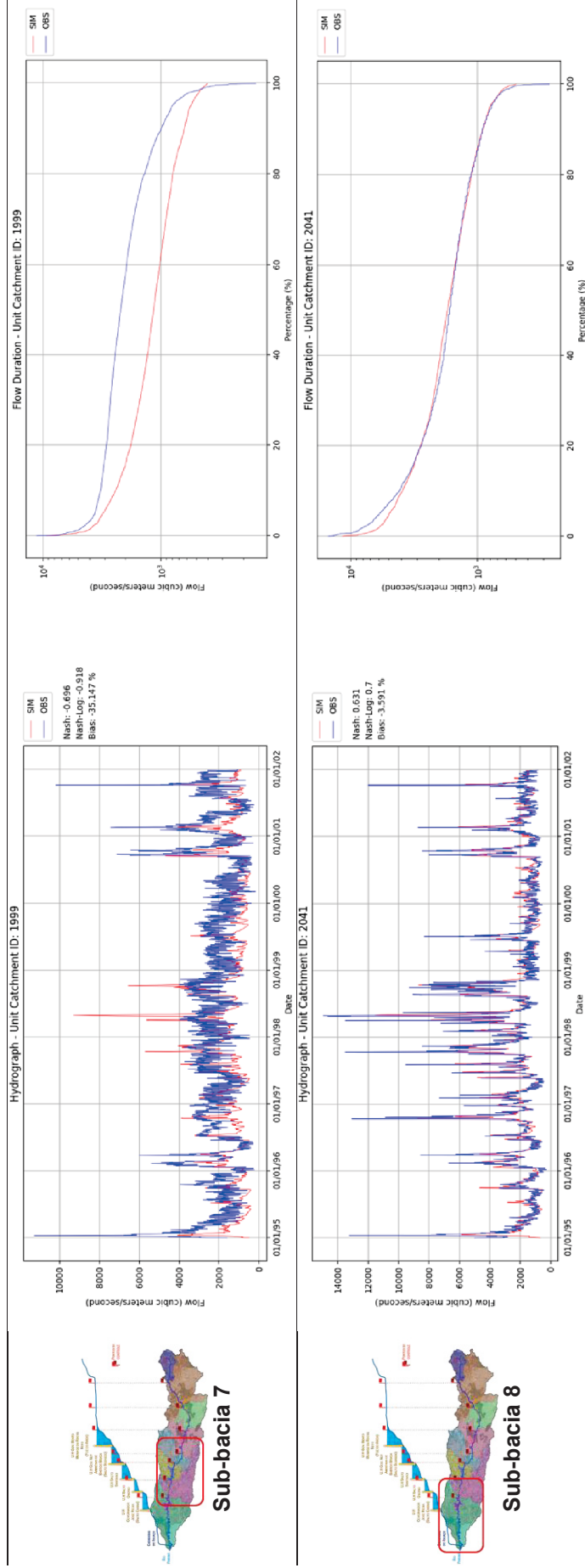
Sub-bacia	CS	CI	CB
1	11,58	128,02	898,13
2	11,58	128,02	898,13
3	11,58	128,02	898,13
4	10,42	120,42	2.093,69
5	10,42	120,42	2.093,69
6	5,41	115,56	796,07
7	5,41	115,56	796,07
4	14,08	155,7	1.196,53

FONTE: DA AUTORA, COM ADAPTAÇÃO DE PARANHOS (2023).

FIGURA 3.19 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023)







FONTE: DA AUTORA (2023).

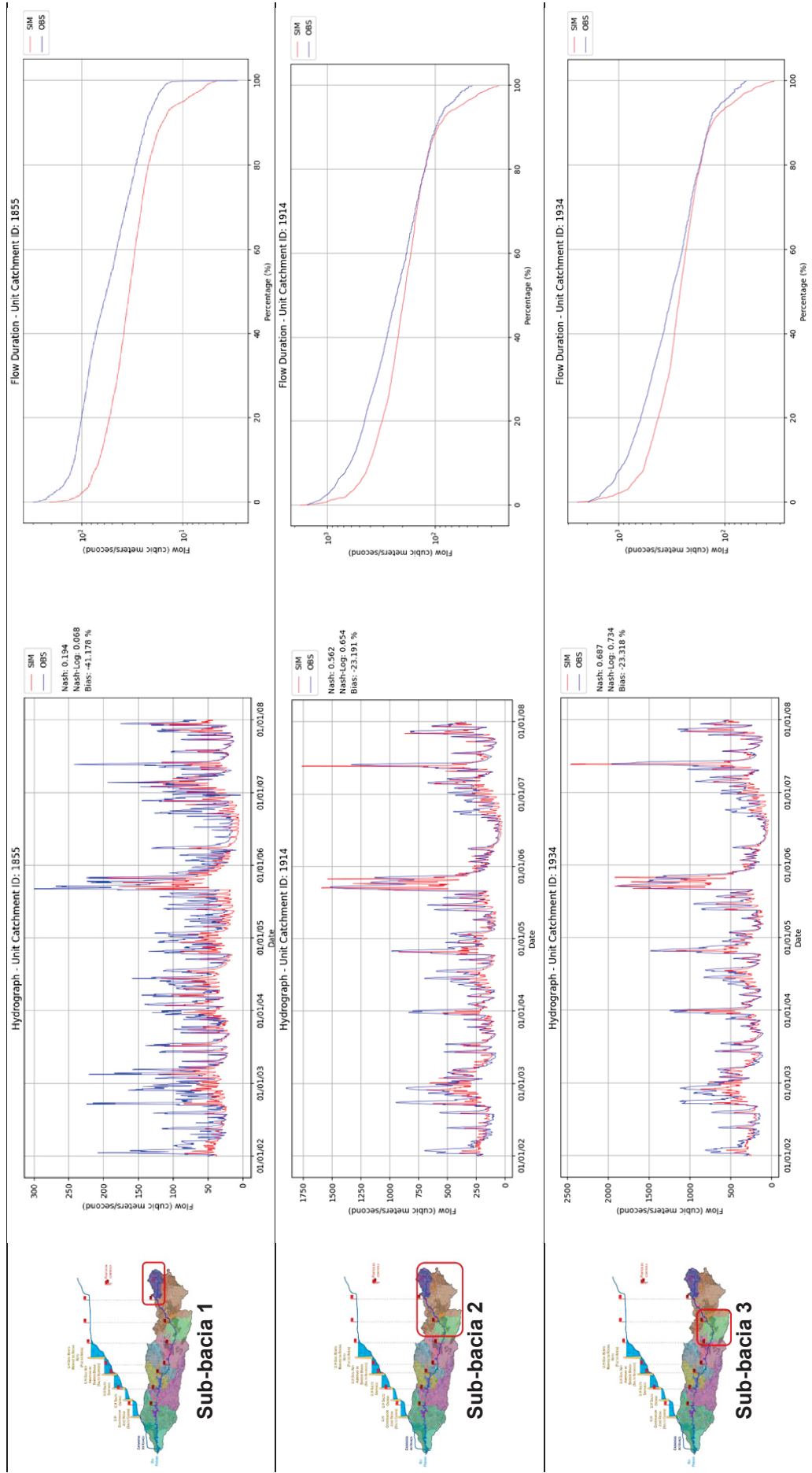
3.6 VALIDAÇÃO DO MODELO

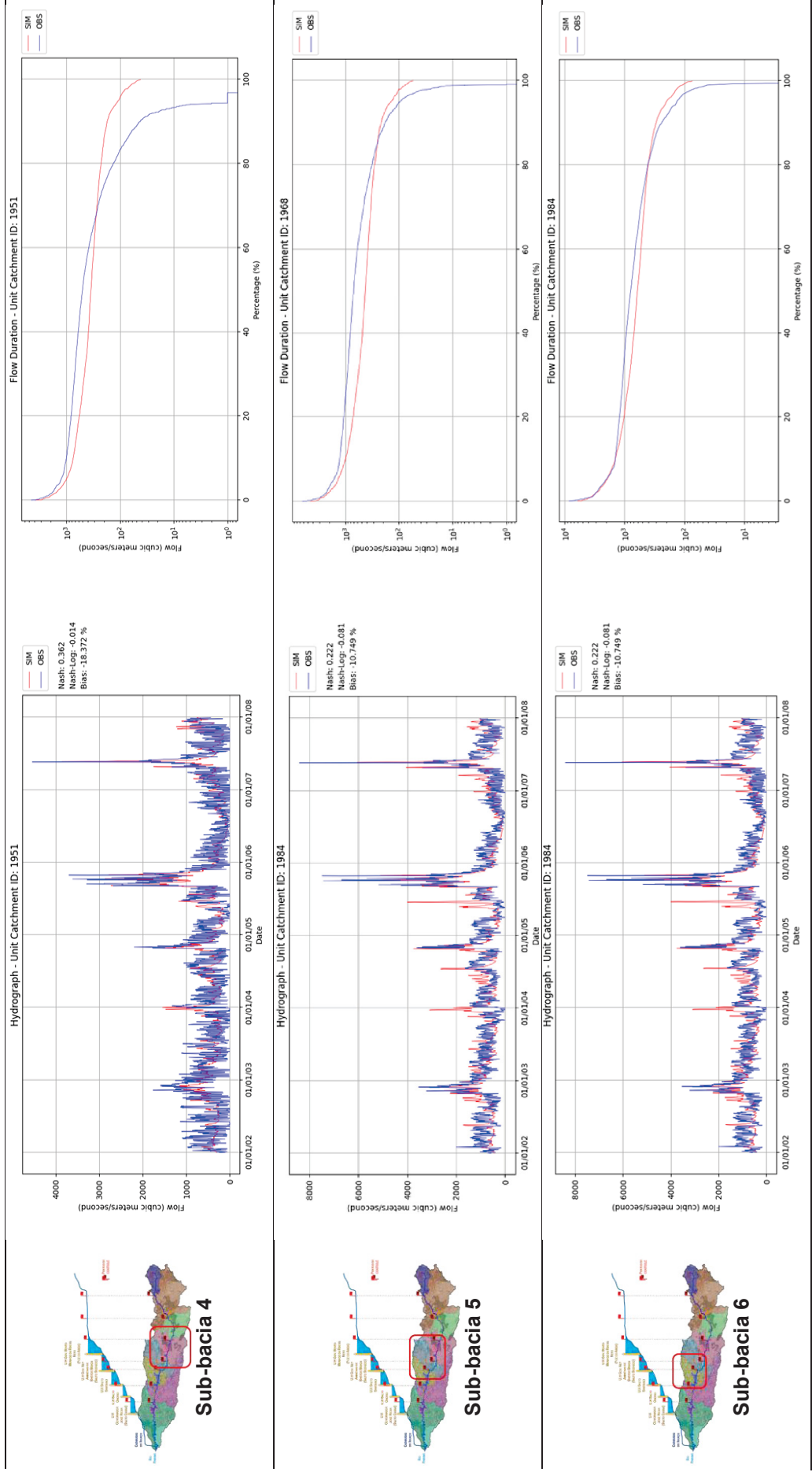
A validação das calibrações foi realizada para dois períodos: (i) de 2002 a 2007; e (ii) de 2008 a 2014. Contudo, ao verificar os dados, foram identificadas falhas nas séries das estações fluviométricas de Porto Amazonas (65035000), de 2006 a 2009, e de 2011 a 2014, que prejudicariam tal processo de verificação.

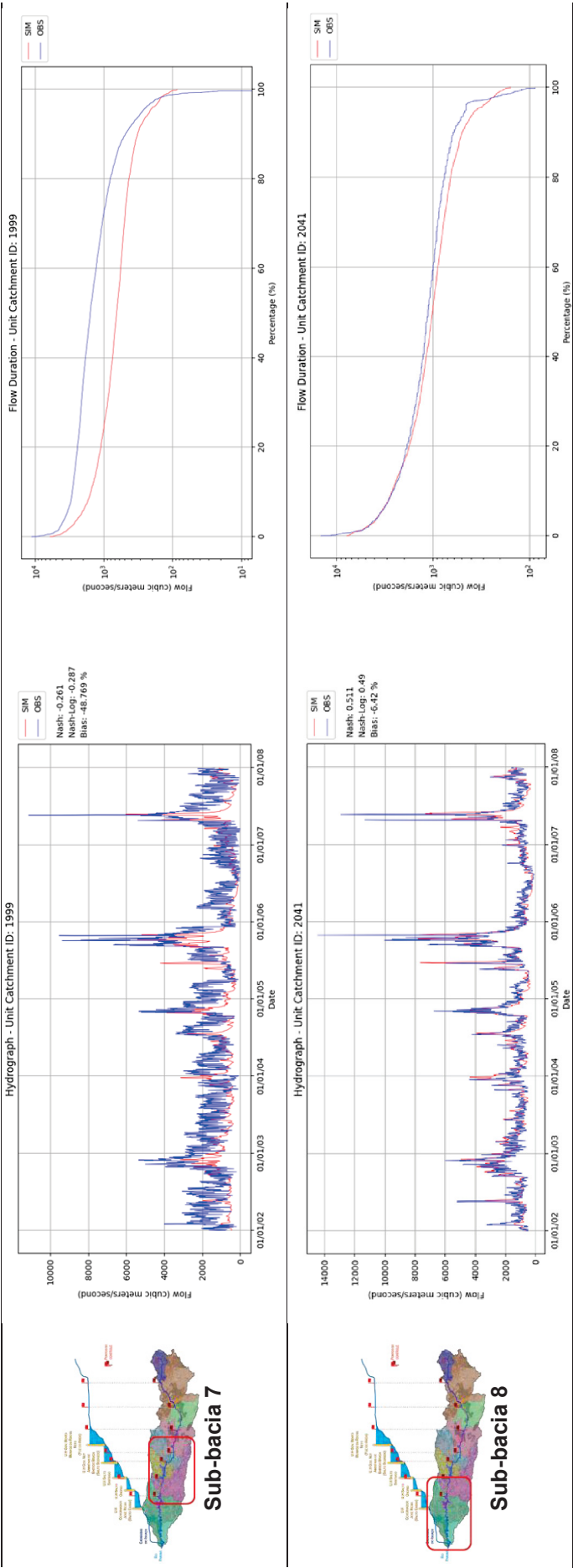
Portanto, para o período de 2006 a 2009 foi utilizada diretamente a estação UHE Gov. Ney Aminthas Porto Amazonas (65035001), disponível no Portal Hidroweb (ANA, 2022), uma vez que ambas estão na mesma localização; e para o período de 2011 a 2014 foi utilizada a estação de São Mateus do Sul (65060000), também disponível no Portal Hidroweb (ANA, 2022), e que está localizada próxima da estação de Porto Amazonas, com a qual possui correlação entre as vazões de 84%, tendo sido utilizado o método de regressão linear para o preenchimento.

Os hidrogramas e curvas de permanência resultantes das validações para os períodos de 2006 a 2010 e de 2012 a 2014 estão, respectivamente, apresentados na Figura 3.20 e Figura 3.21 para a calibração da bacia toda, Figura 3.22 e Figura 3.23 para a calibração apenas com a sub-bacia 8, e na Figura 3.24 e Figura 3.25 para a calibração adaptada de Paranhos (2023).

FIGURA 3.20 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA

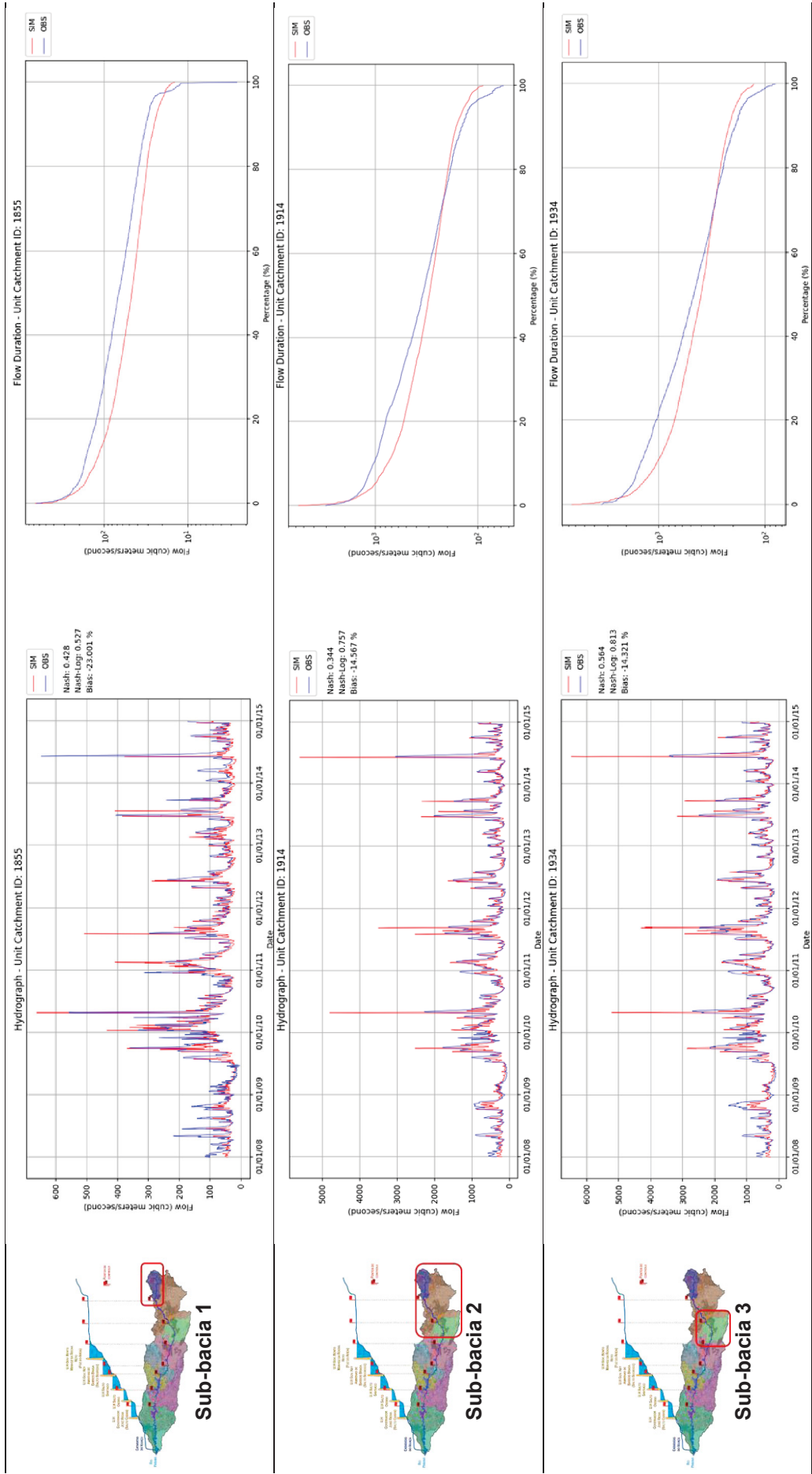


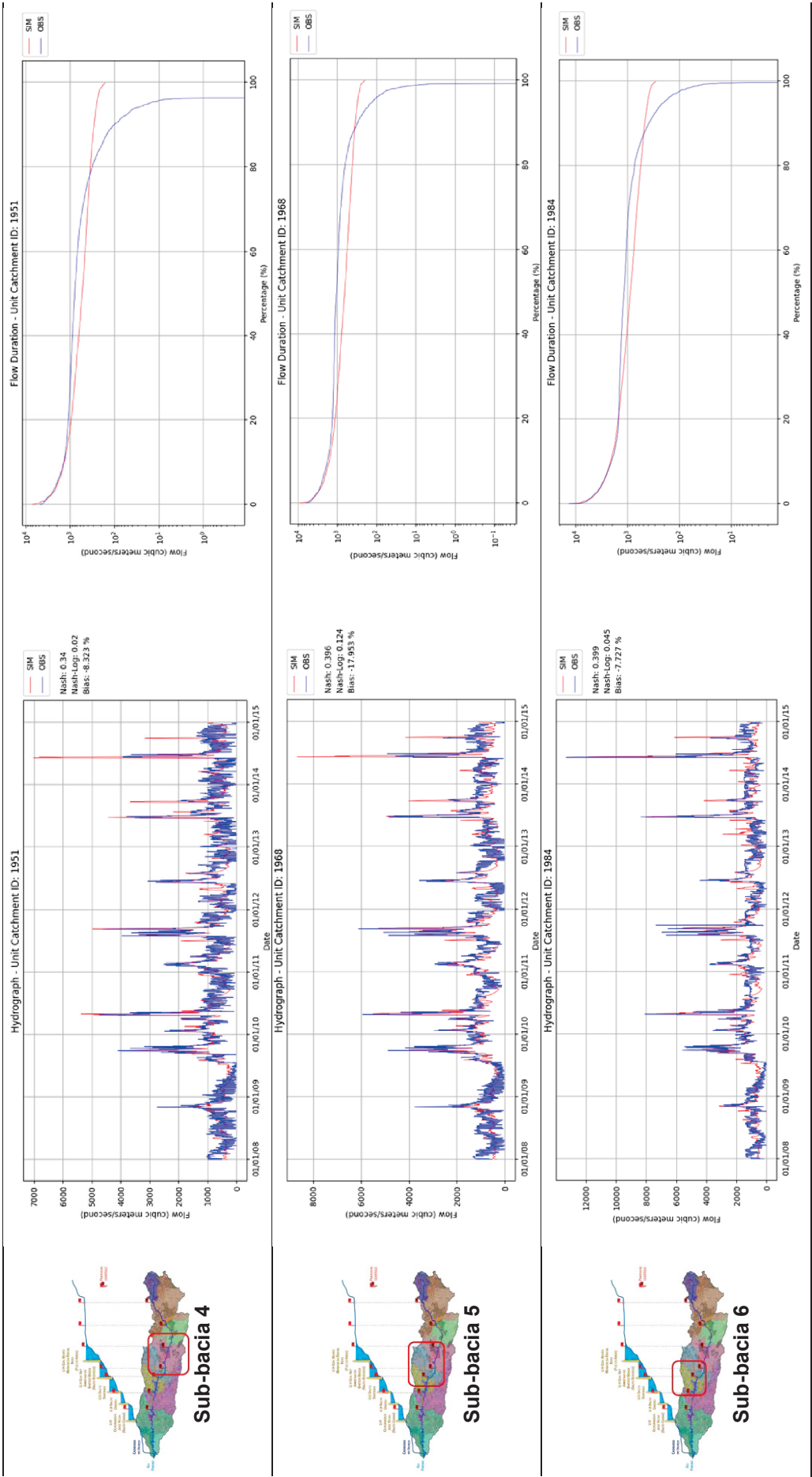


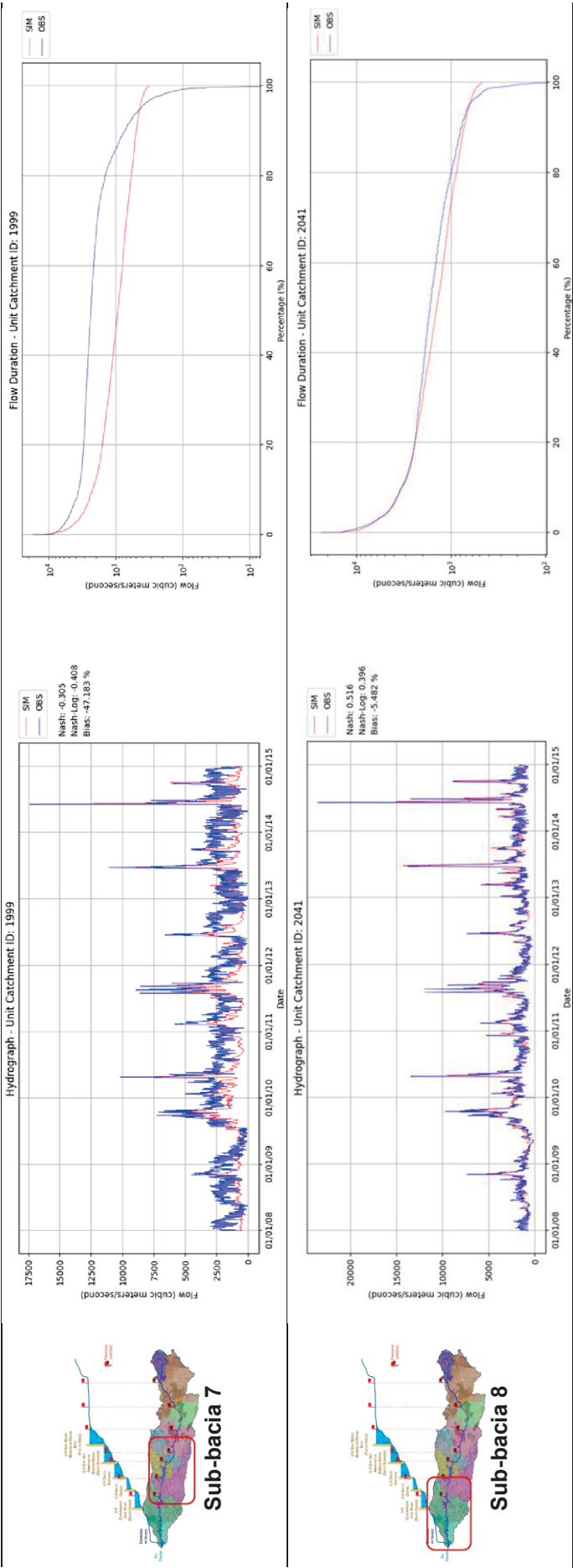


FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.21 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO DA BACIA COMPLETA

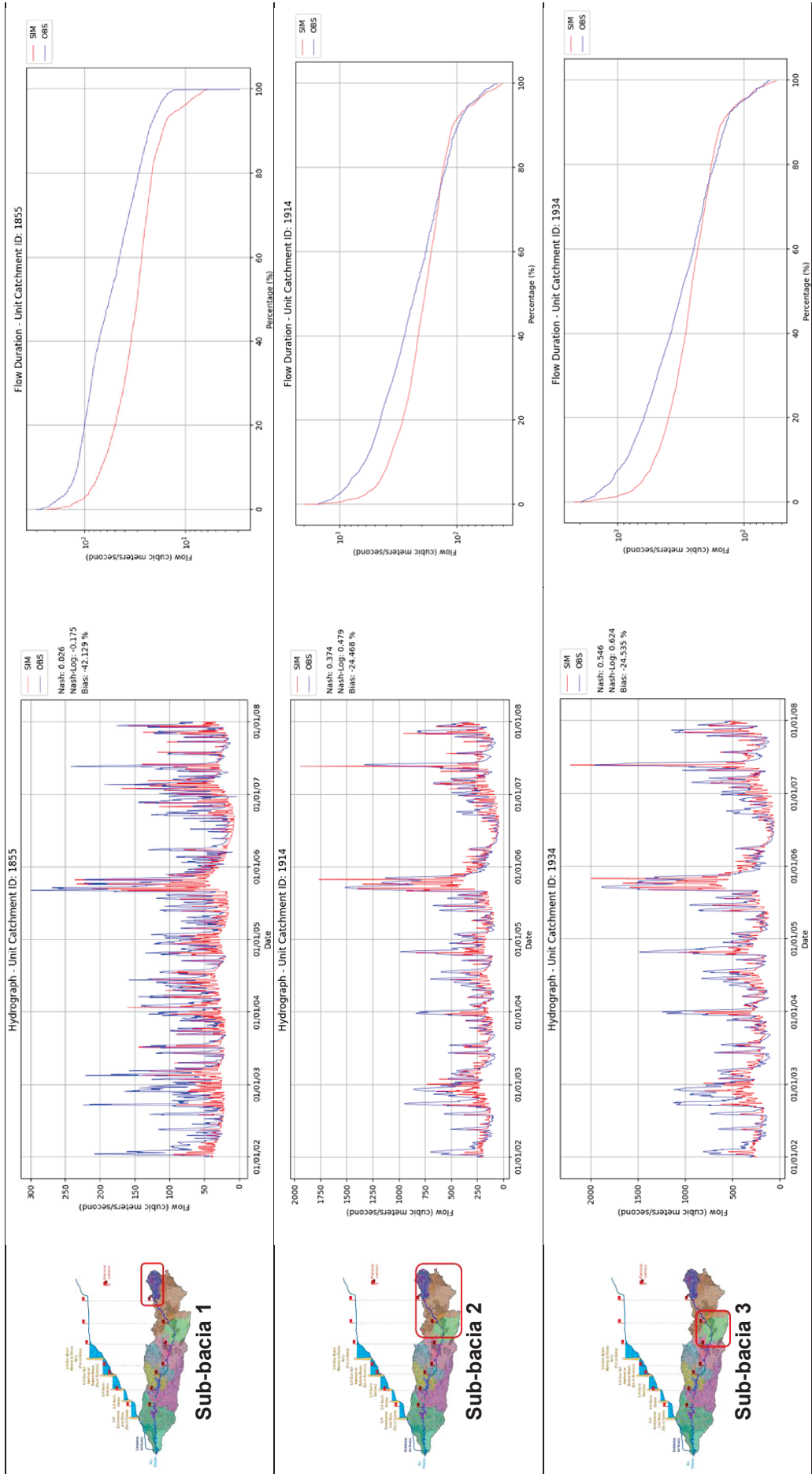


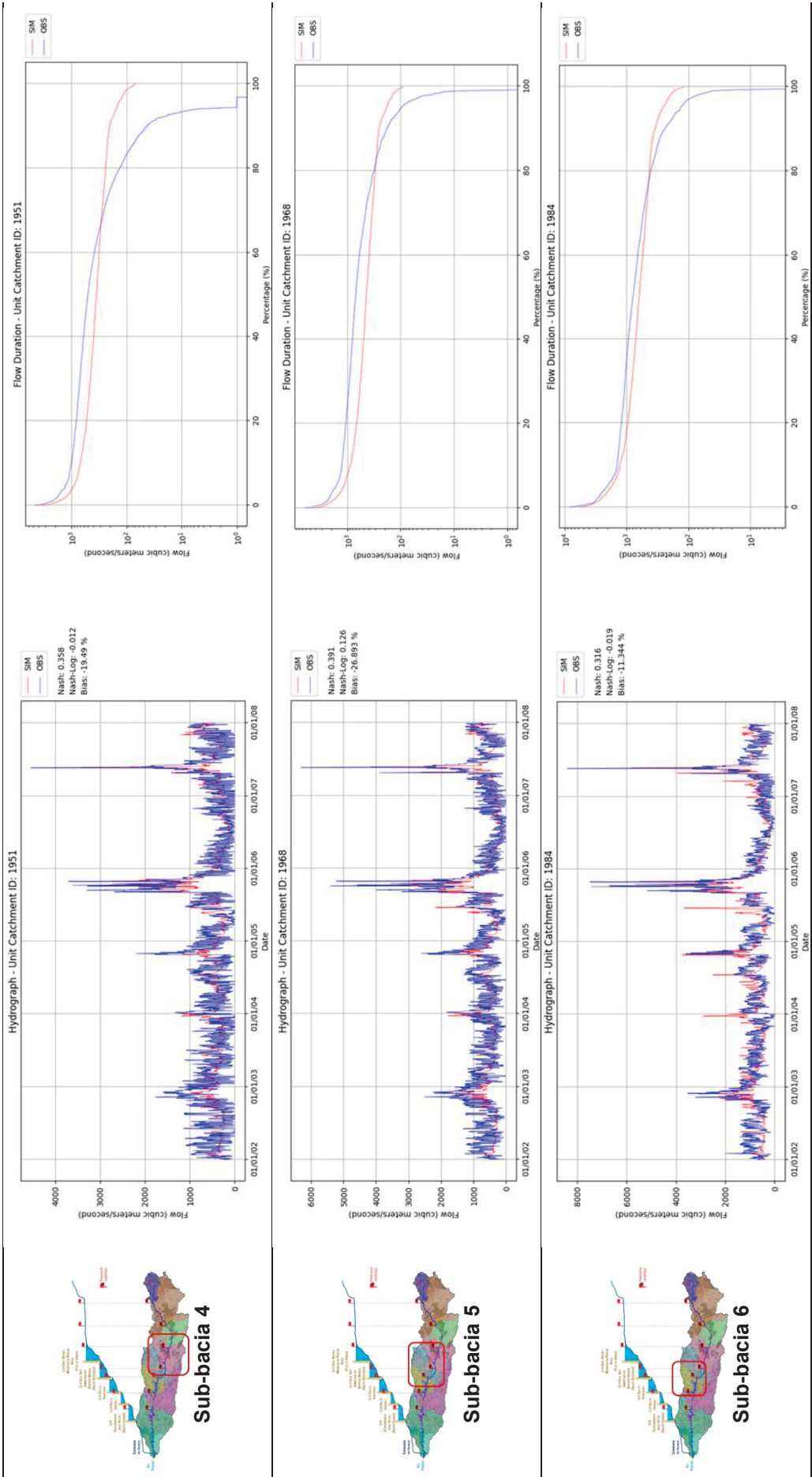


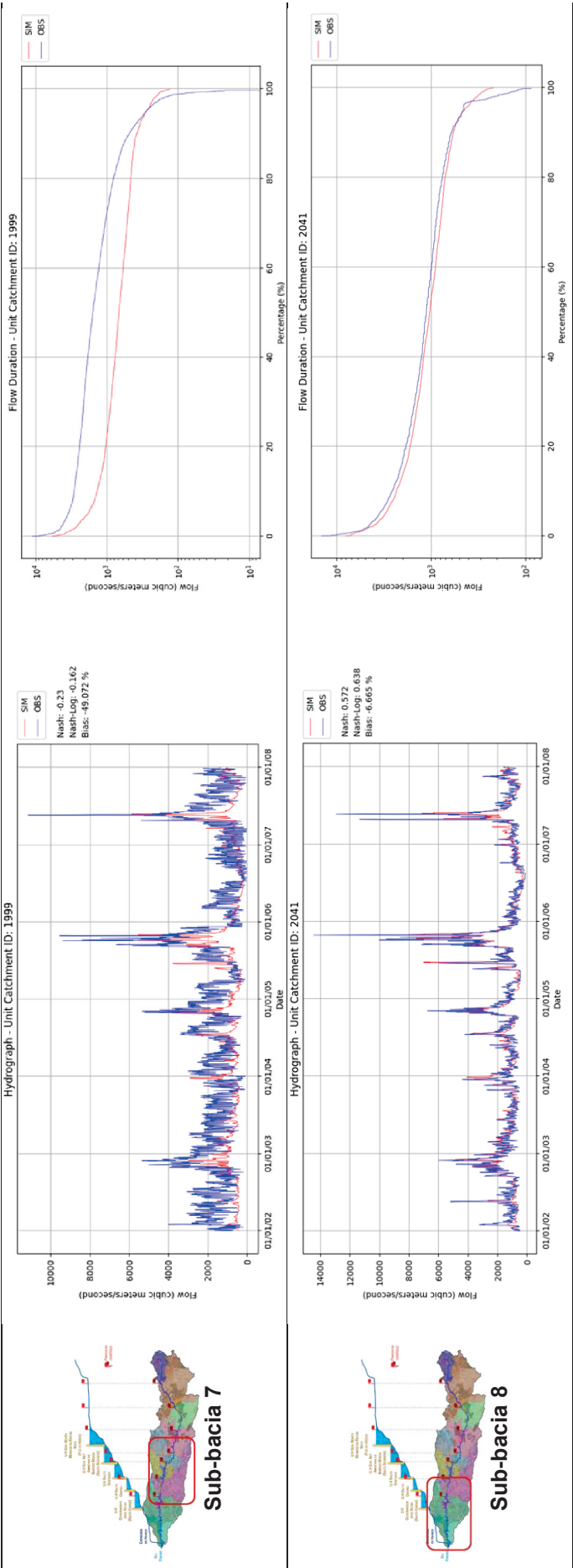


FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.22 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8

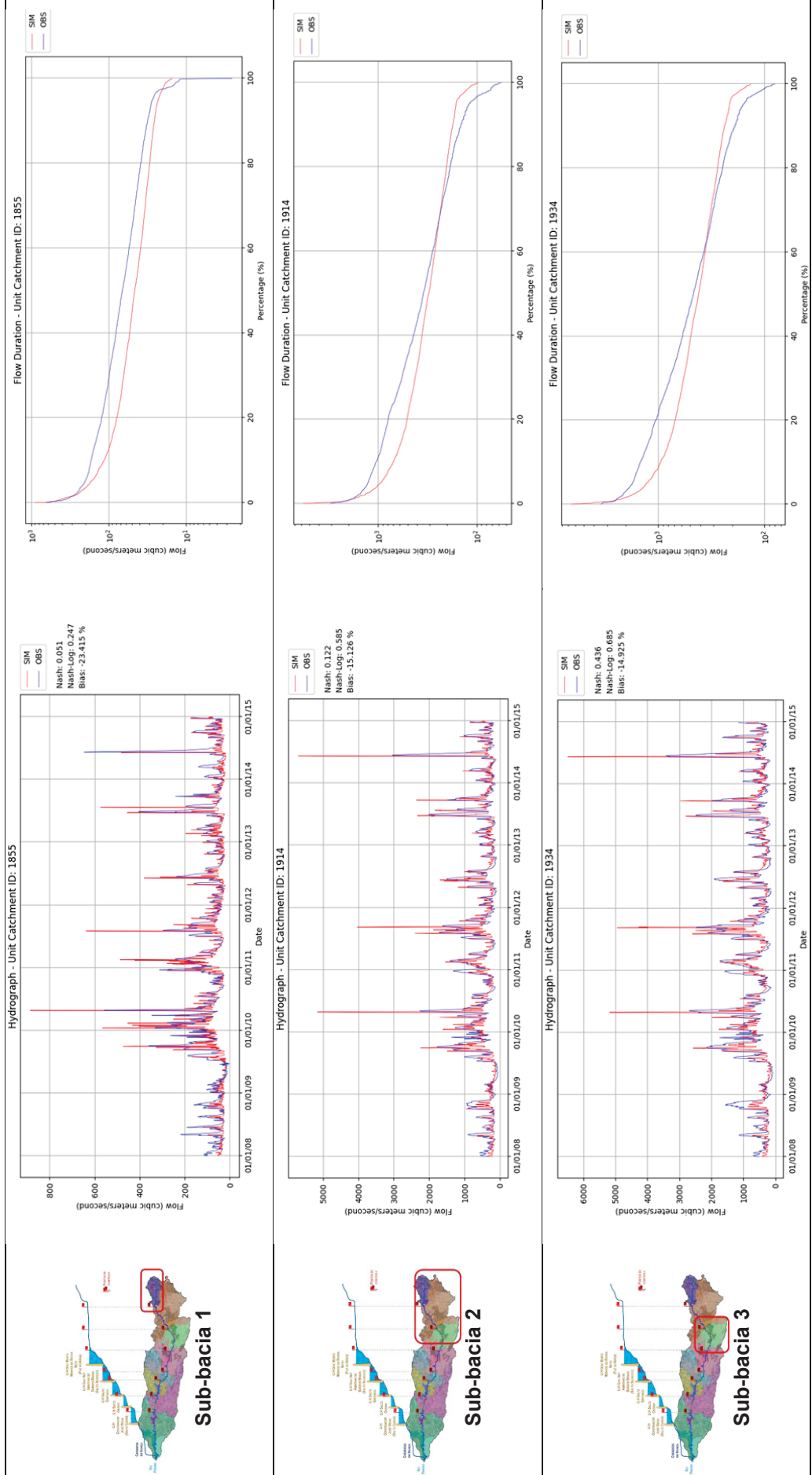


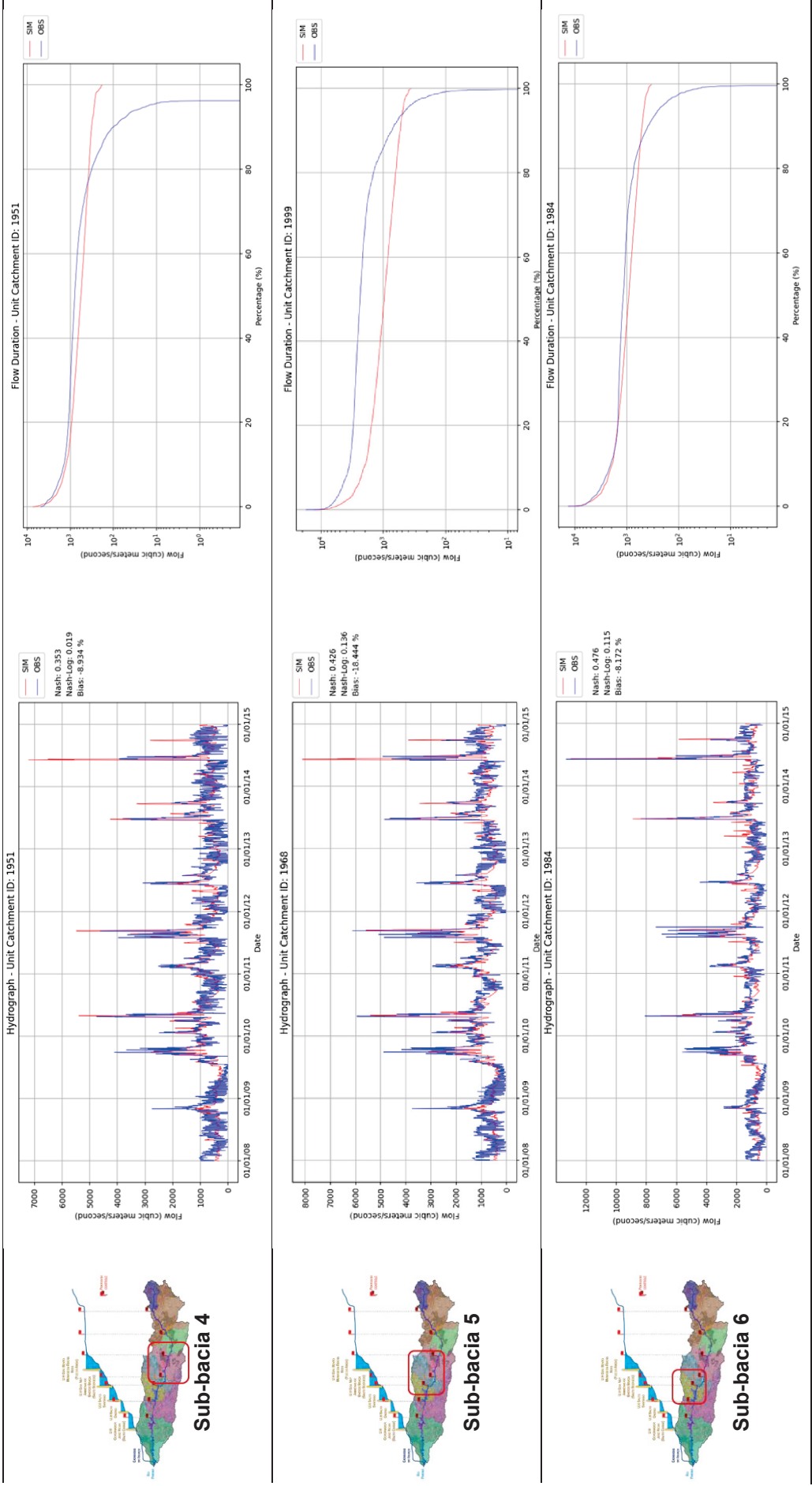


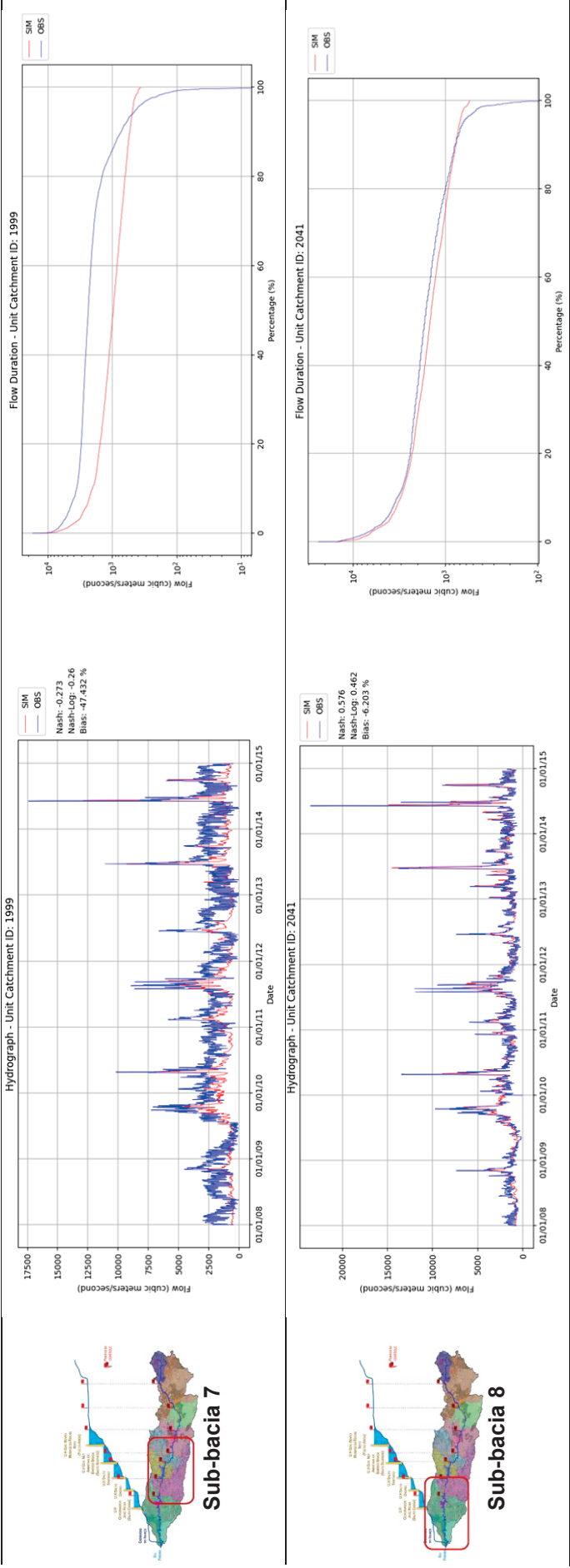


FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.23 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO APENAS COM A SUB-BACIA 8

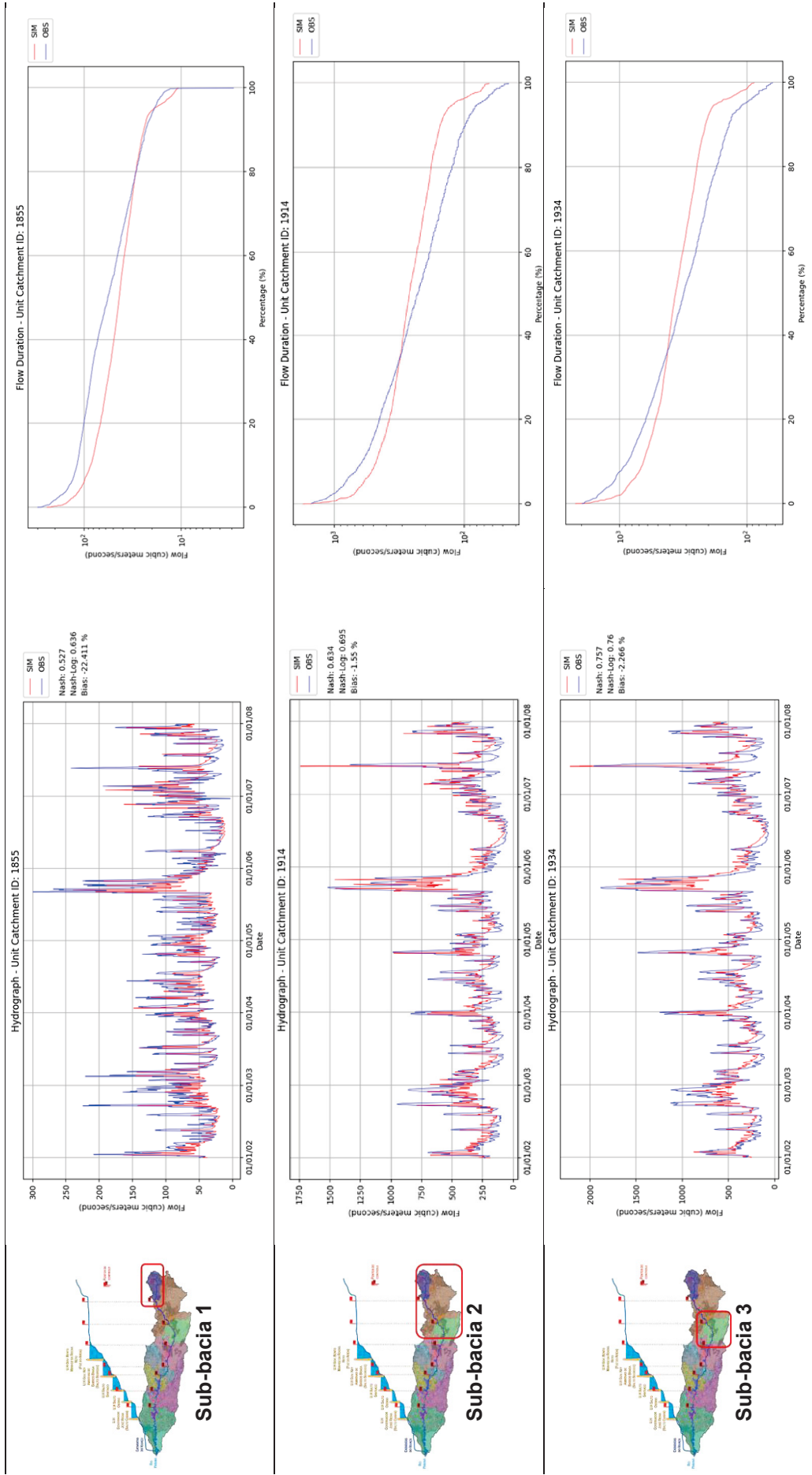


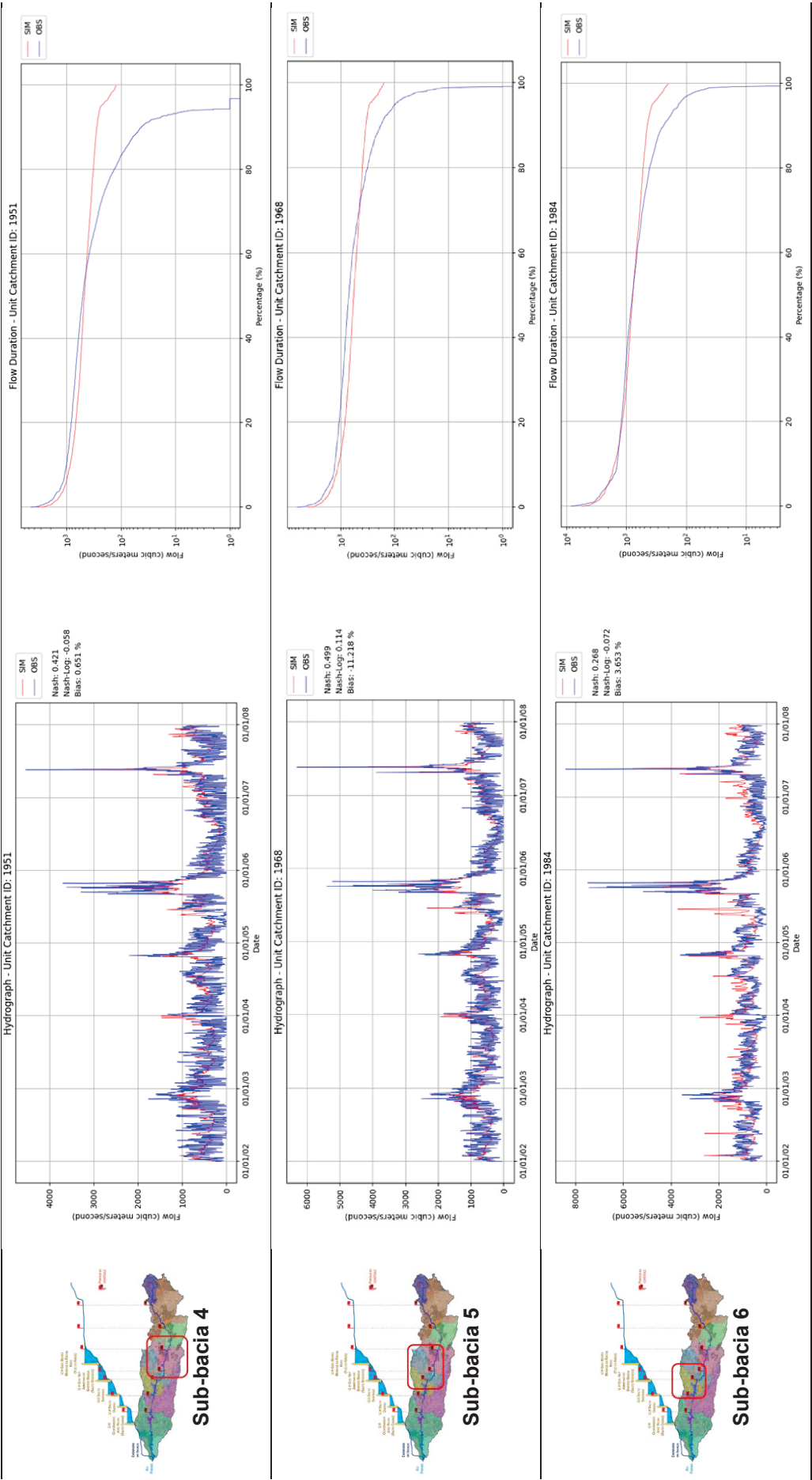


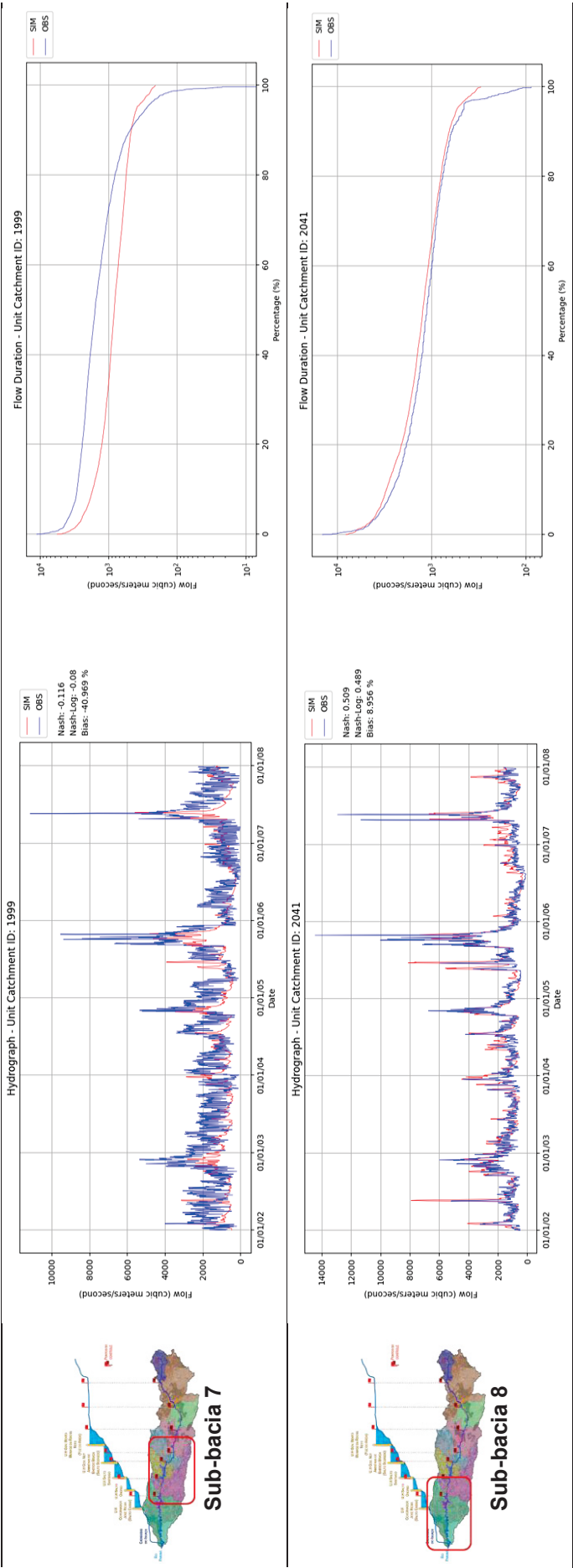


FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.24 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2002-2007 PARA A CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023)

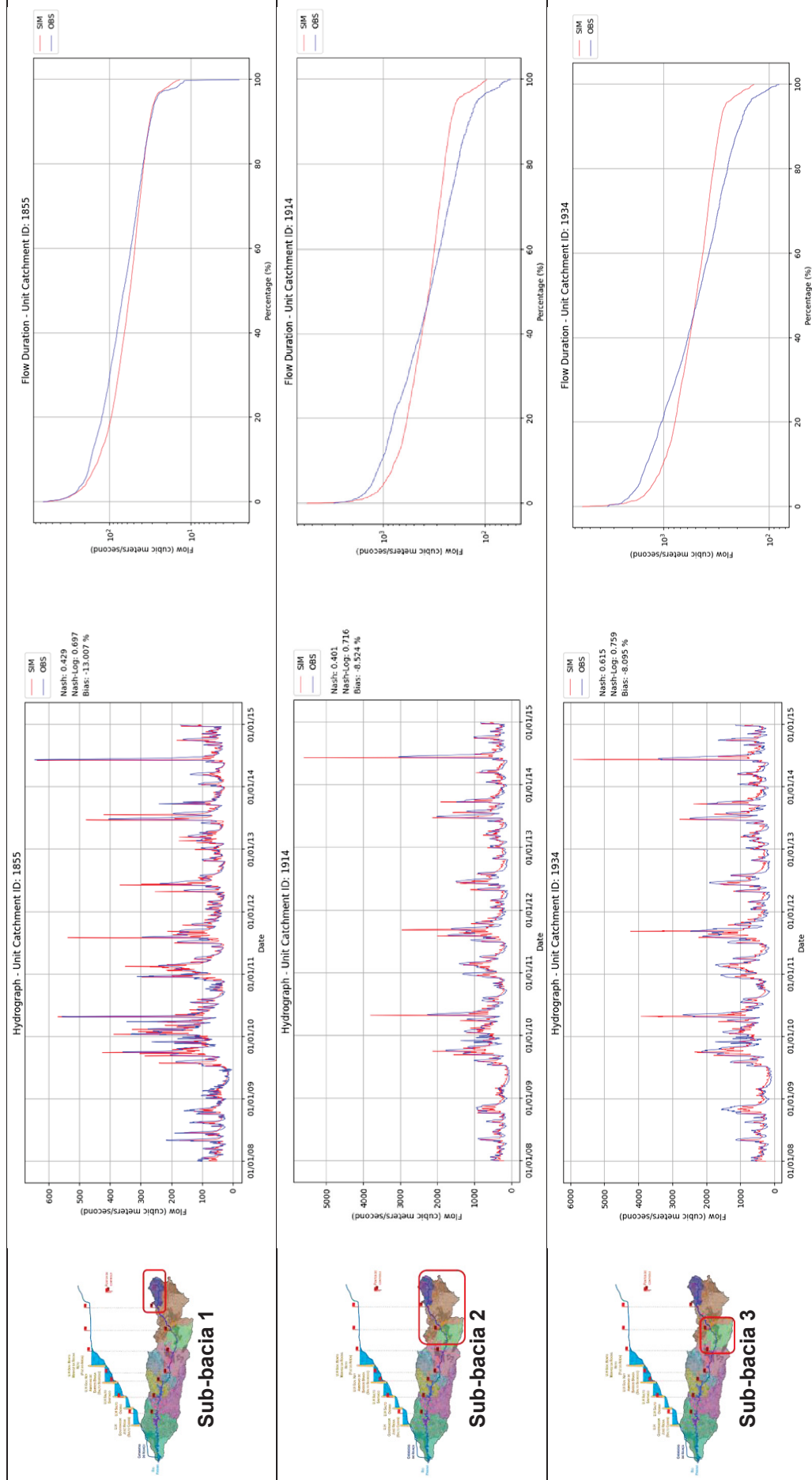


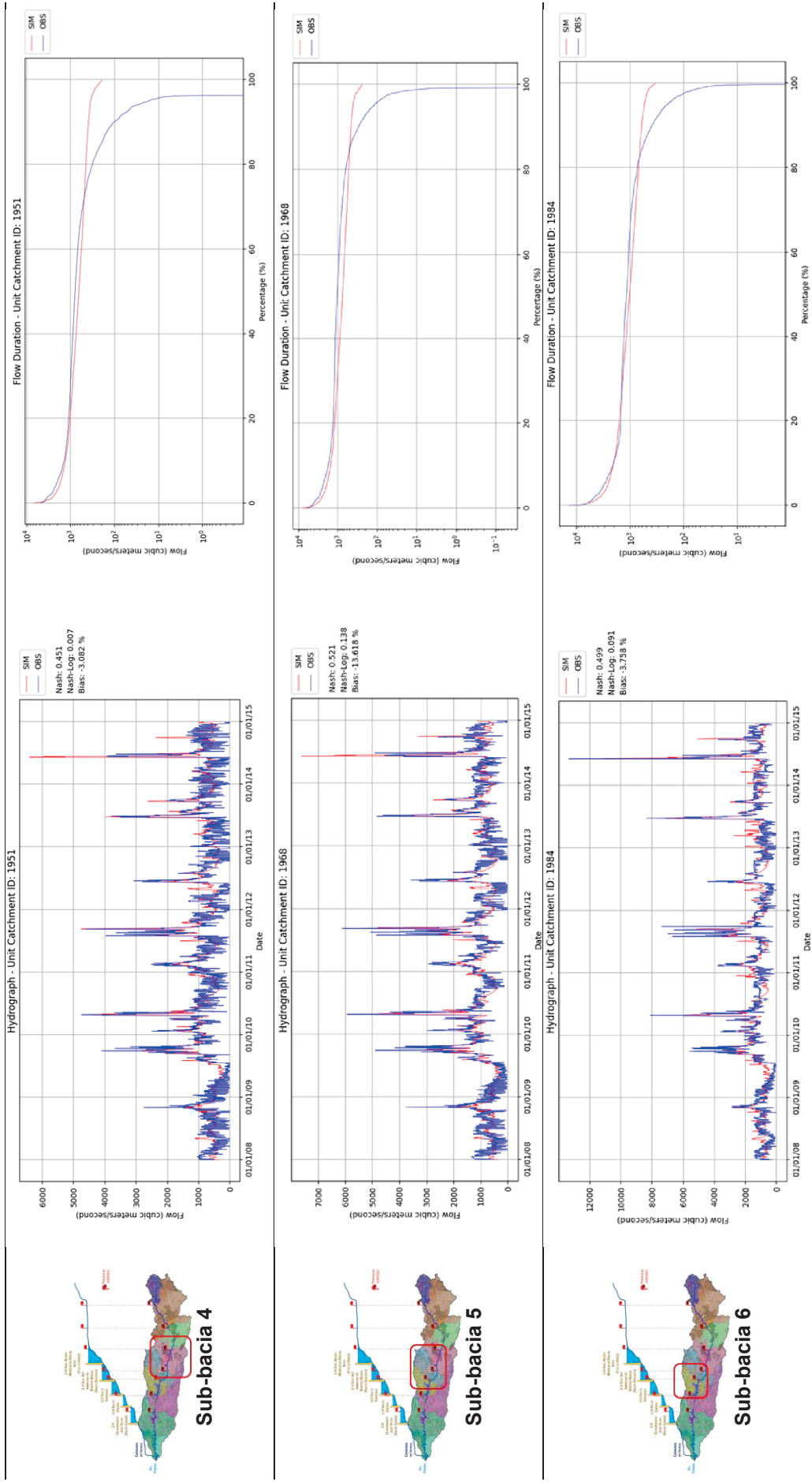


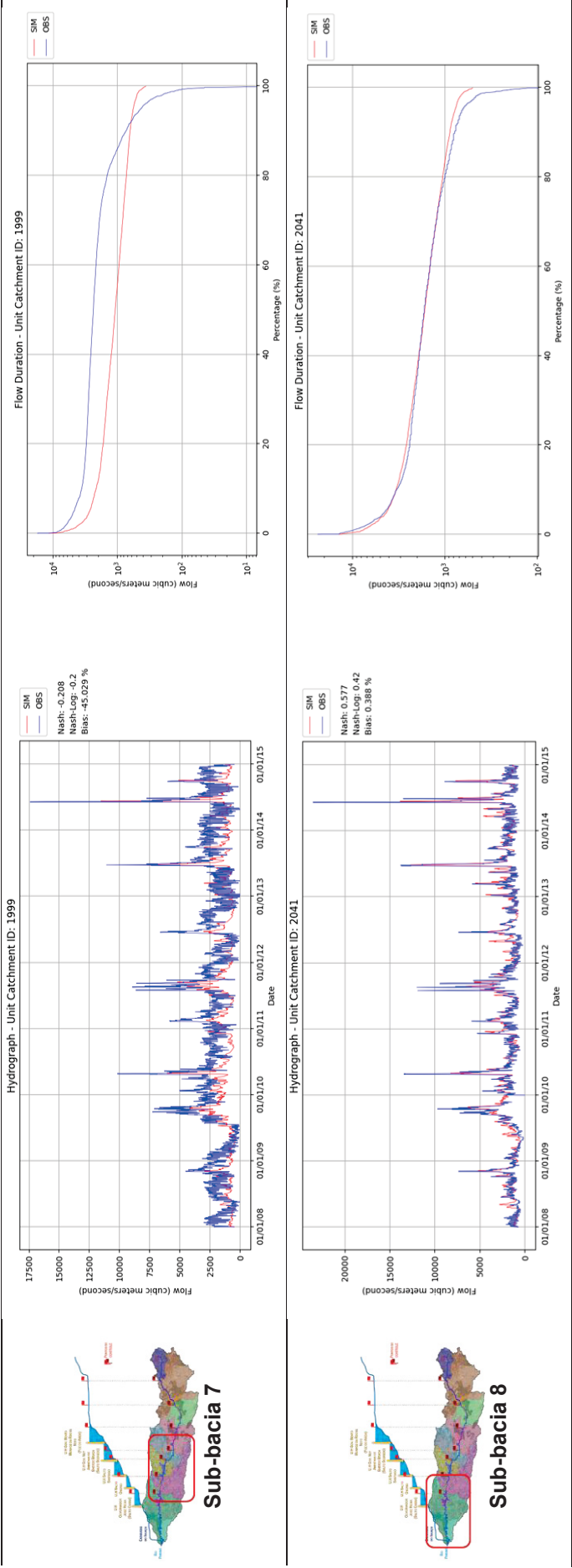


FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 3.25 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DA VALIDAÇÃO DE 2008-2014 PARA A CALIBRAÇÃO ADAPTADA DE PARANHOS (2023)







FONTE: DA AUTORA (2023).

3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados a área de estudo, bem como o modelo hidrológico utilizado, além das diferentes bases de dados, calibrações e validações realizadas. Contudo, faz-se importante destacar alguns pontos.

Com exceção da sub-bacia 7, todas tiveram valores dos coeficientes de eficiência NSE e logNSE acima de 0,5 para o período de calibração, e NSE de 0,4 e logNSE de 0,3 para os dois períodos de validação com as URHs de Fan *et al.* (2015), que foram tidas como base para todos tais procedimentos.

Embora a calibração seja imprescindível no processo da modelagem hidrológica, e ela tenha sido realizada de formas diferentes no presente trabalho, os processos e aprofundamentos para que se tenham melhores calibrações não são o foco deste trabalho, de modo que os resultados apresentados para tais etapas são considerados satisfatórios.

Além disso, ao analisar os hidrogramas e curvas de permanência, as maiores discrepâncias verificam-se em vazões de cheia, o que pode ter ocorrido em decorrência da função-objetivo relacionada a estas não ter sido escolhida no processo de calibração, uma vez que a disponibilidade hídrica se dá em função de vazões mínimas. Ao olhar estas vazões mínimas, por sua vez, é possível verificar que a calibração respondeu bem a simulação, com exceção novamente da sub-bacia 7.

Dessa forma, como o objeto do trabalho está intimamente ligado às vazões mínimas e tais resultados corroboram que a calibração e validação estão dentro do esperado para o propósito, prosseguiu-se com a simulação também para o período compreendido entre 1995 e 2014 e utilizando os resultados das calibrações apresentadas no presente capítulo, porém agora considerando as URHs geradas com o uso e ocupação da terra do Mapbiomas (2021). Tais resultados, por sua vez, são objeto do próximo capítulo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a realização da calibração e validação do modelo utilizando como base as URHs de Fan *et al.* (2015), os parâmetros obtidos das três diferentes calibrações foram aplicados às URH geradas com o uso e ocupação da terra do Mapbiomas (2021), também compreendendo o período de 1995 a 2014, para que se pudesse comparar o impacto das diferentes bases e calibrações nas disponibilidades hídricas.

Assim, a Tabela 4.1 apresenta os resultados dos coeficientes de eficiência calculados pelo próprio MGB para ambas as URHs simuladas, para complementar a avaliação visual dos hidrogramas e curvas de permanência gerados, enquanto os hidrogramas e curvas de permanência também resultantes das seis diferentes simulações podem ser visualizados na Figura 4.1, onde também foram incluídas as vazões naturalizadas do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2022) para comparação.

A calibração adaptada de Paranhos (2023) foi a que obteve os melhores resultados dos coeficientes calculados nas duas combinações de URHs, sendo que com as geradas por Fan *et al.* (2015) que se conseguiu os melhores valores, o que pode ser em decorrência do fato da adaptação dos parâmetros do autor terem sido realizados baseando-se nessas URHs.

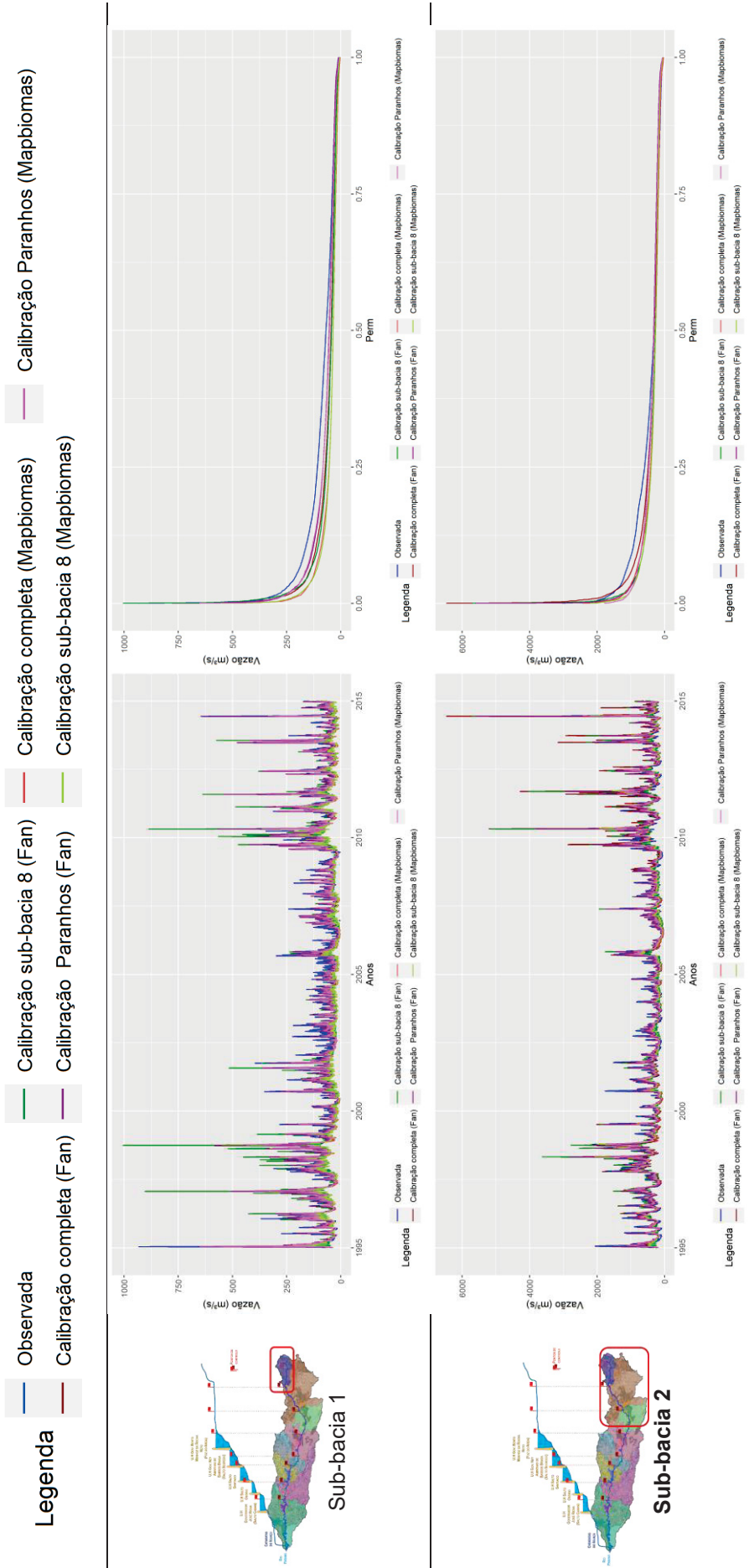
De maneira geral, todas as calibrações tiveram melhores resultados quando combinadas com as URHs de Fan *et al.* (2015), também em decorrência desta ter sido utilizada como base principal tanto para as calibrações efetuadas, como para a referida adaptação.

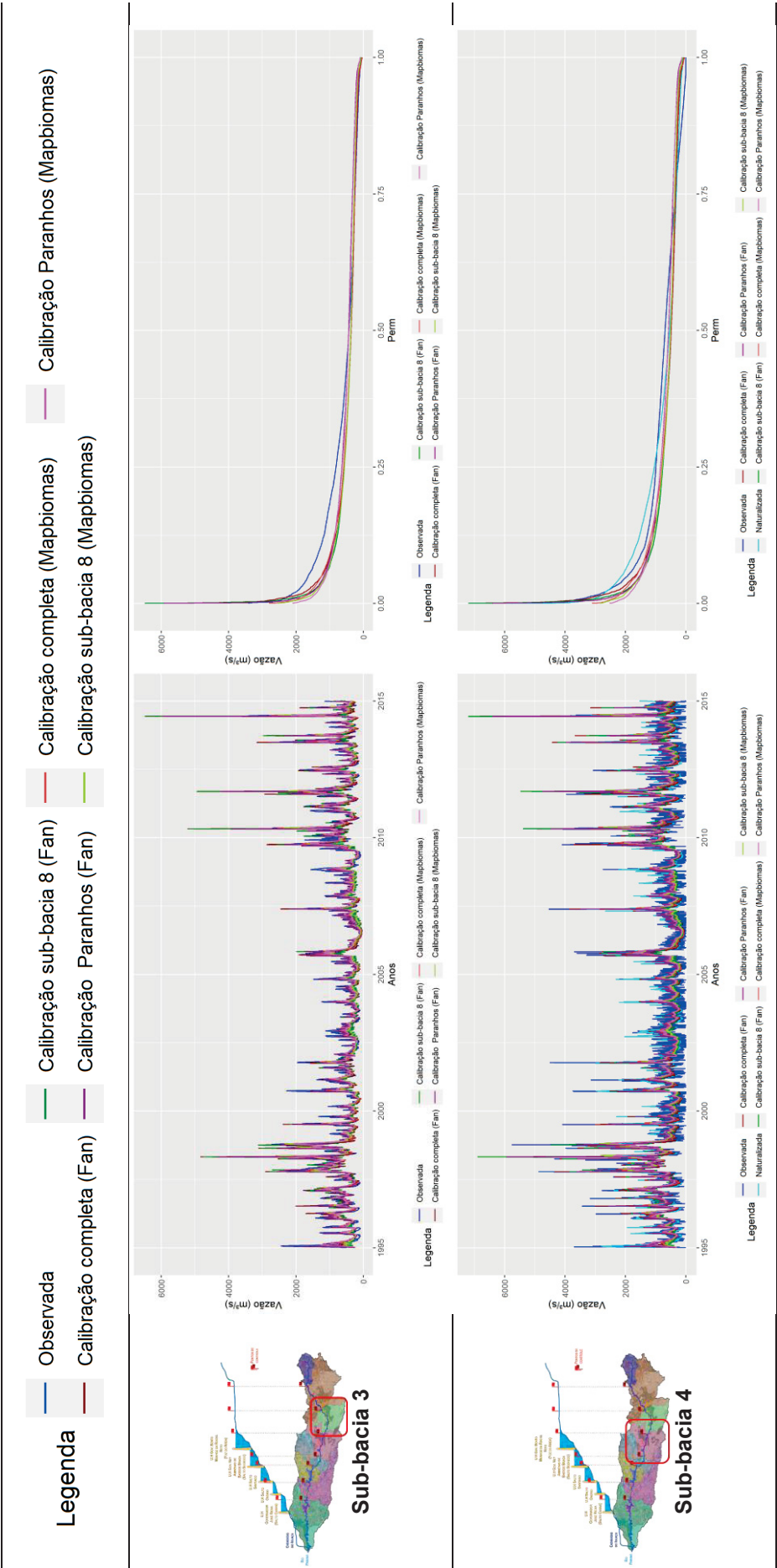
TABELA 4.1 - COEFICIENTES DE EFICIÊNCIA DAS CALIBRAÇÕES E VALIDAÇÕES DO MGB PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU

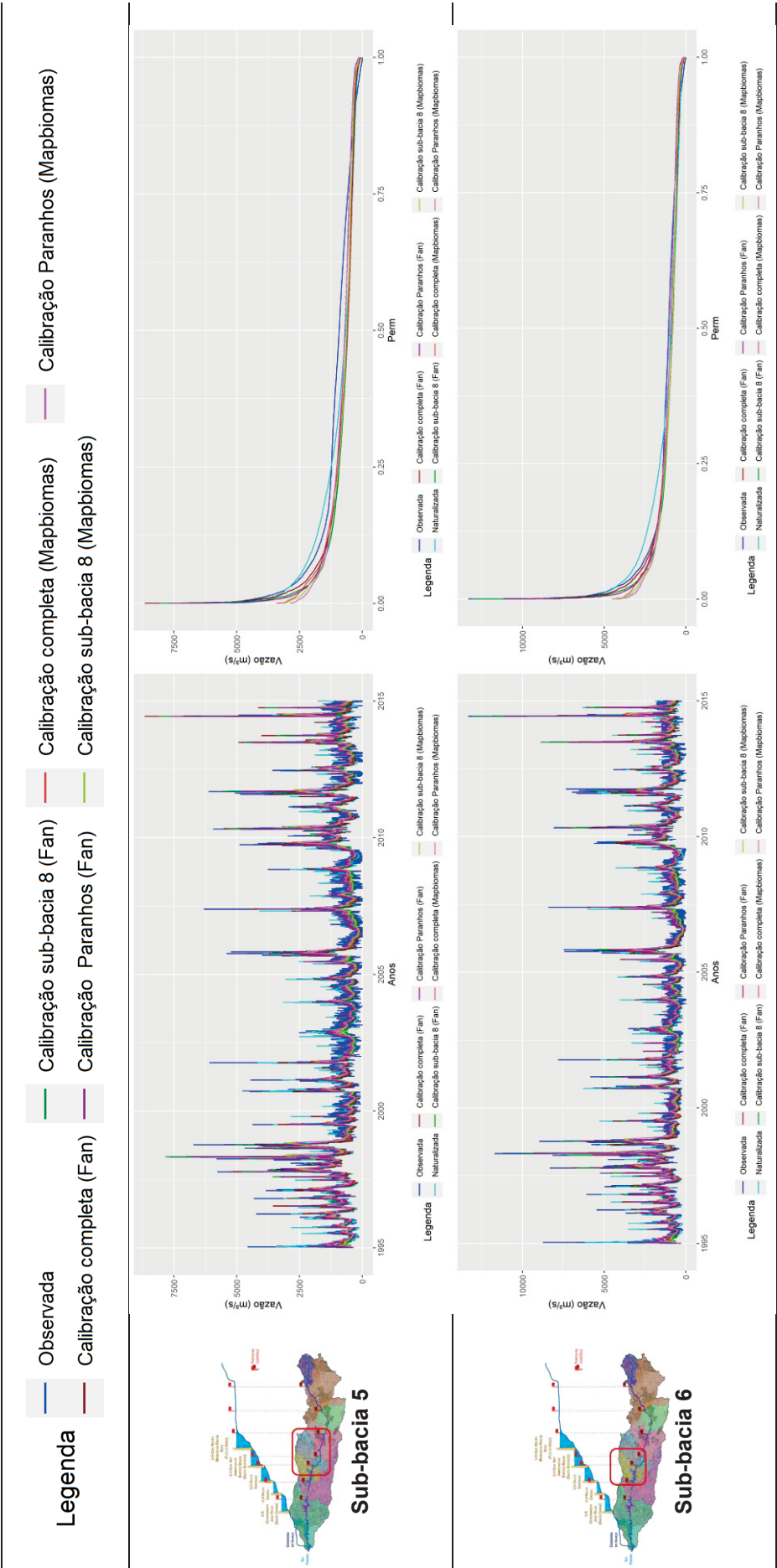
Sub-bacia	Coeficiente	URHs de Fan et al. (2015)								URHs com Mapbiomas (2021)							
		Bacia toda				Só sub-bacia 8				Paranhos (2023)				Bacia toda			
		1995-2001	2002-2007	2008-2014	2015-2020	1995-2001	2002-2007	2008-2014	2015-2020	1995-2001	2002-2007	2008-2014	2015-2020	1995-2001	2002-2007	2008-2014	2015-2020
1	NSE	0,67	0,194	0,428	0,408	0,408	0,026	0,051	0,733	0,527	0,429	0,318	-0,403	0,342	0,321	-0,425	0,319
	logNSE	0,619	0,068	0,527	0,425	-0,175	0,247	0,803	0,636	0,697	-0,044	-1,297	0,046	0,079	-1,067	0,119	0,662
	Bias	-24,5%	-41,2%	-23,0%	-24,7%	-42,1%	-23,4%	-17,9%	-22,4%	-13,0%	-41,0%	-59,9%	-41,1%	-40,5%	-59,5%	-40,3%	-18,6%
2	NSE	0,519	0,562	0,344	0,357	0,374	0,122	0,565	0,634	0,401	0,641	-0,544	0,671	0,572	0,451	0,63	0,594
	logNSE	0,73	0,654	0,757	0,567	0,479	0,585	0,715	0,695	0,716	0,652	0,528	0,716	0,608	0,513	0,684	0,669
	Bias	-17,6%	-23,2%	-14,6%	-18,2%	-24,5%	-15,1%	-13,3%	-1,6%	-8,5%	-21,8%	-28,7%	-19,0%	-22,0%	-29,1%	-19,0%	-13,5%
3	NSE	0,644	0,687	0,564	0,531	0,546	0,436	0,684	0,757	0,615	0,57	0,516	0,576	0,513	0,422	0,541	0,491
	logNSE	0,789	0,734	0,813	0,666	0,624	0,685	0,759	0,76	0,759	0,592	0,532	0,642	0,53	0,477	0,594	0,543
	Bias	-16,3%	-23,3%	-14,3%	-17,0%	-24,5%	-14,9%	-12,1%	-2,3%	-8,1%	-17,7%	-24,8%	-15,8%	-18,1%	-25,6%	-16,1%	-15,6%
4	NSE	0,639	0,362	0,34	0,605	0,358	0,353	0,649	0,421	0,451	0,326	0,388	0,281	0,3	0,357	0,305	0,316
	logNSE	0,165	-0,014	0,02	0,158	-0,012	0,019	0,15	-0,058	0,007	0,169	0,035	0,06	0,154	0,026	0,051	0,144
	Bias	-14,4%	-18,4%	-8,3%	-15,1%	-19,5%	-8,9%	-11,3%	65,1%	-3,1%	-15,3%	-19,4%	-9,4%	-15,7%	-20,2%	-9,7%	-14,2%
5	NSE	0,585	0,382	0,396	0,581	0,391	0,426	0,623	0,499	0,521	0,209	0,362	0,174	0,197	0,327	0,199	0,214
	logNSE	0,342	0,123	0,124	0,462	0,126	0,136	0,573	0,114	0,138	0,257	0,172	0,155	0,315	0,159	0,146	0,359
	Bias	-20,8%	-26,1%	-18,0%	-21,4%	-26,9%	-18,4%	-18,2%	-11,2%	-13,6%	-21,8%	-27,1%	-19,0%	-22,2%	-27,7%	-19,2%	-20,9%
6	NSE	0,606	0,222	0,399	0,644	0,316	0,476	0,638	0,268	0,499	0,255	0,346	-0,56	0,256	0,36	0,197	0,269
	logNSE	0,333	-0,081	0,045	0,479	-0,019	0,115	0,506	-0,072	0,091	0,315	0,084	-0,29	0,388	0,121	0,193	0,419
	Bias	-10,4%	-10,8%	-7,7%	-10,9%	-11,3%	-8,2%	-8,3%	3,7%	-3,8%	-14,0%	-16,1%	-49,7%	-14,4%	-16,5%	-11,8%	-11,6%
7	NSE	-1,06	-0,261	-0,305	-0,969	-0,23	-0,273	-0,696	-0,116	-0,208	-0,942	-0,223	-0,377	-0,907	-0,246	-0,541	-0,756
	logNSE	-1,689	-0,287	-0,408	-1,242	-0,162	-0,26	-0,918	-0,08	-0,2	-1,501	-0,131	-0,609	-1,228	-0,053	-0,207	-0,892
	Bias	-36,5%	-48,8%	-47,2%	-36,9%	-49,1%	-47,4%	-35,2%	-41,0%	-45,0%	-39,5%	-52,3%	-48,9%	-39,8%	-52,5%	-49,9%	-37,7%
8	NSE	0,586	0,511	0,516	0,611	0,572	0,576	0,631	0,509	0,577	-0,05	0,088	-0,047	-0,005	0,131	-0,006	0,041
	logNSE	0,624	0,49	0,396	0,692	0,638	0,462	0,7	0,489	0,42	-0,125	0,239	0,062	-0,007	0,366	0,132	0,105
	Bias	-7,4%	-6,4%	-5,5%	-8,0%	-6,7%	-6,2%	-3,6%	9,0%	0,4%	-14,7%	-16,2%	-14,3%	-14,8%	-15,7%	-14,2%	-9,0%

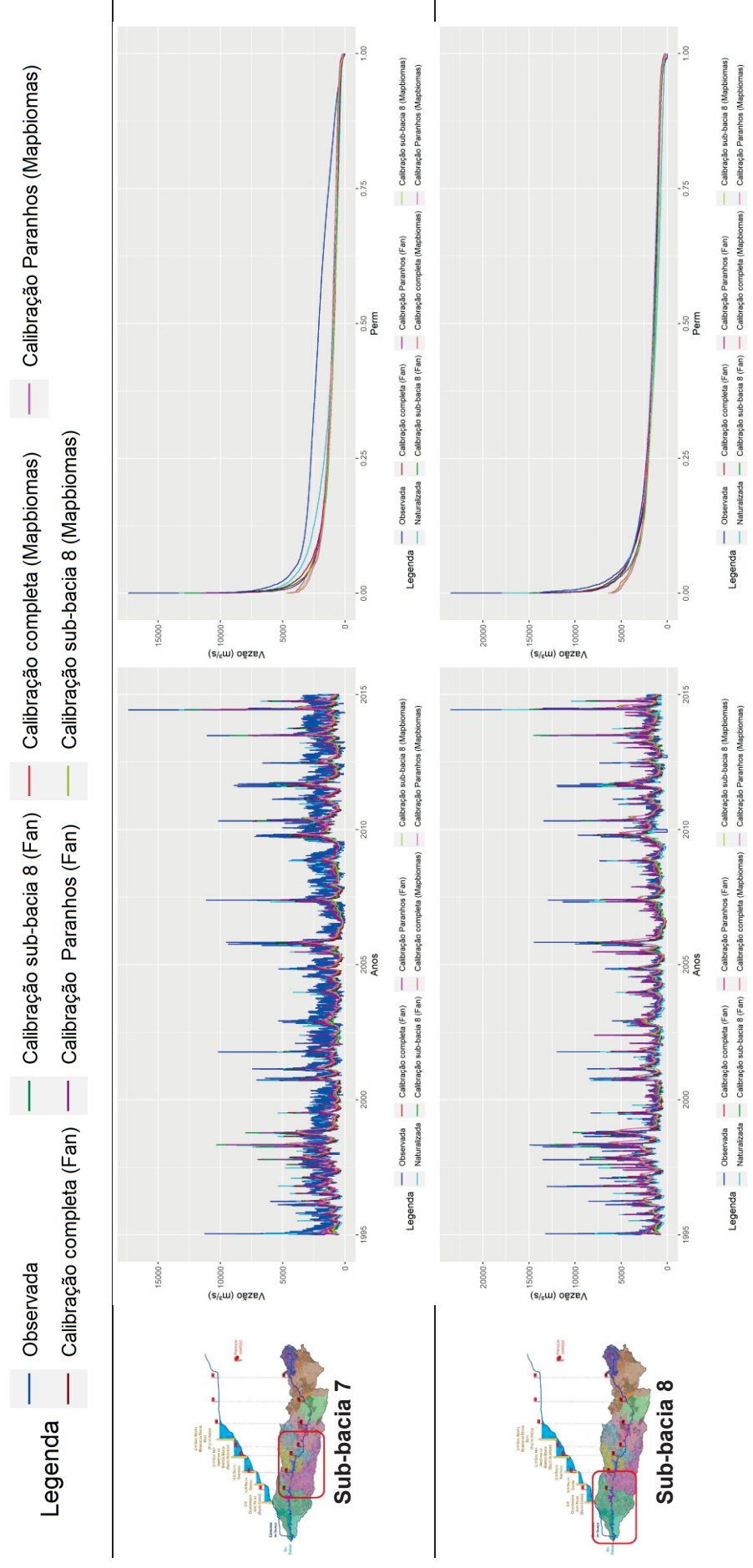
FONTE: DA AUTORA (2023).

FIGURA 4.1 - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES COM AS URHS DE FAN ET AL. (2015) E MAPBIOMAS (2021), PARA TODAS AS CALIBRAÇÕES









A sub-bacia 1 apresentou os melhores resultados tanto dos coeficientes de eficiência como na análise visual do hidrograma e curva de permanência, o que pode ser atribuído ao fato desta não estar sob influência de reservatórios e o modelo simular as vazões naturais da bacia.

O mesmo ocorre na análise visual das sub-bacias 2 e 3, para as quais a calibração da bacia completa e a adaptada de Paranhos (2023) apresentaram os melhores resultados, enquanto a calibração apenas com a sub-bacia 8 resultou em picos superestimados e vazões mínimas subestimadas, como é possível observar nos respectivos hidrogramas (Figura 4.1), o que ocorre em decorrência do método dessa calibragem ter sido focada no exutório da bacia.

A partir da sub-bacia 4, os hidrogramas das vazões observadas já demonstram o comportamento de regularização característico da defluência dos reservatórios, de forma que os resultados da simulação convergem para as vazões naturalizadas. Tal efeito pode ser observado principalmente na curva de permanência da sub-bacia 7, onde as vazões observadas se destacam significativamente uma vez que a sub-bacia parece acumular os efeitos dos reservatórios. Tais efeitos, contudo, mostram-se já atenuados na sub-bacia 8. Nesse sentido, sabendo-se que o MGB simula as vazões naturalizadas, ao eliminar as vazões observadas da análise, fica claro o referido padrão de maior diferença nas vazões máximas (Tabela 4.2), uma vez que os dados observados refletem o efeito dos reservatórios na regularização das vazões.

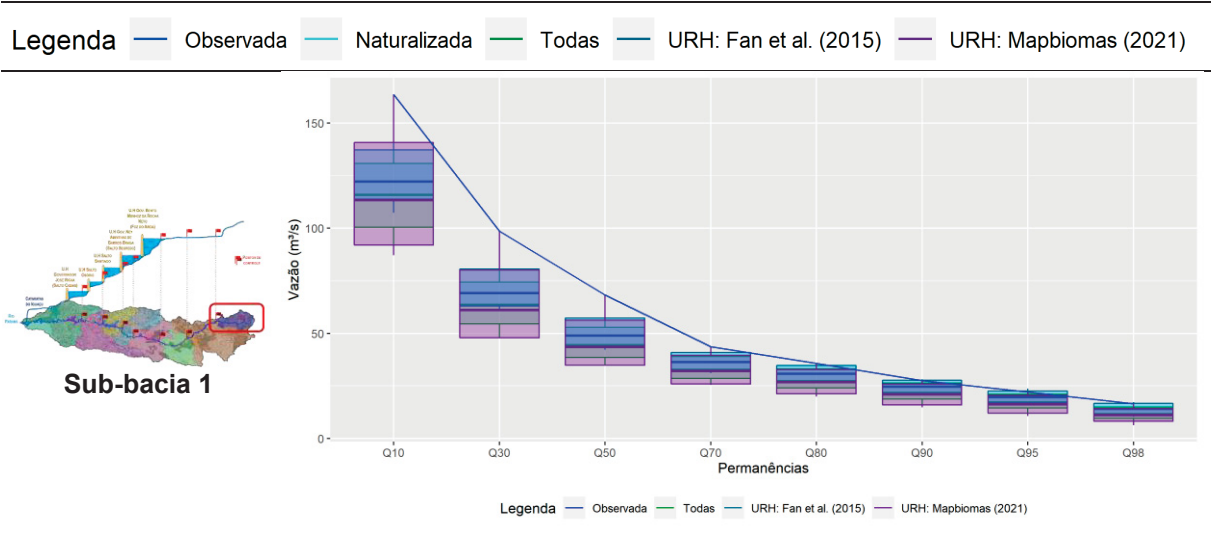
De maneira geral, é possível perceber que os maiores impactos, tanto nas simulações com as diferentes bases de URHs como com as diferentes calibrações, estão nas vazões com as maiores permanências. Para observar melhor os efeitos das diferentes simulações nas vazões com diferentes permanências, foram gerados gráficos box-plot, apresentados na Figura 4.2, cujas vazões propriamente ditas podem ser conferidas na Tabela 4.3.

TABELA 4.2 – DIFERENÇA ENTRE AS MAIORES E MENORES VAZÕES SIMULADAS PARA CADA PERMANÊNCIA

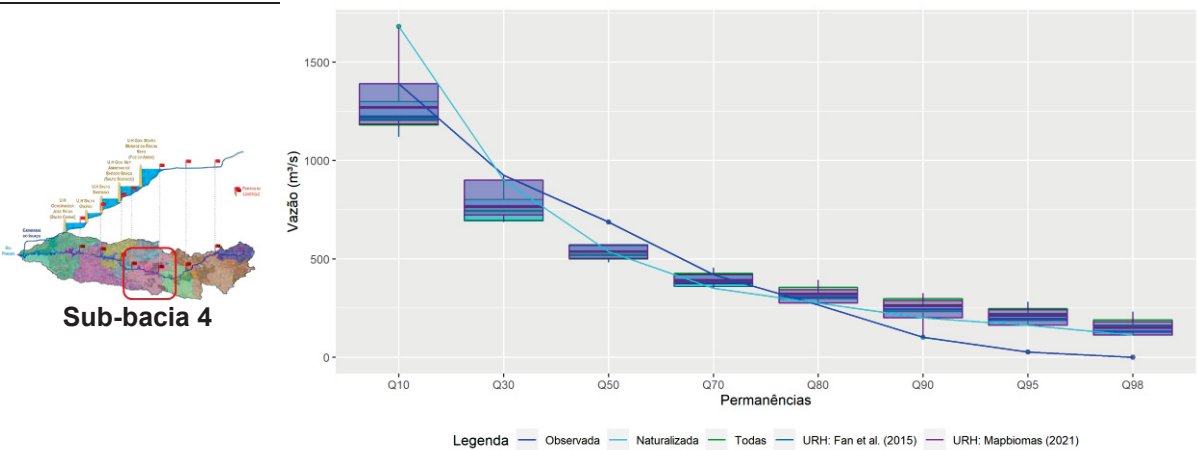
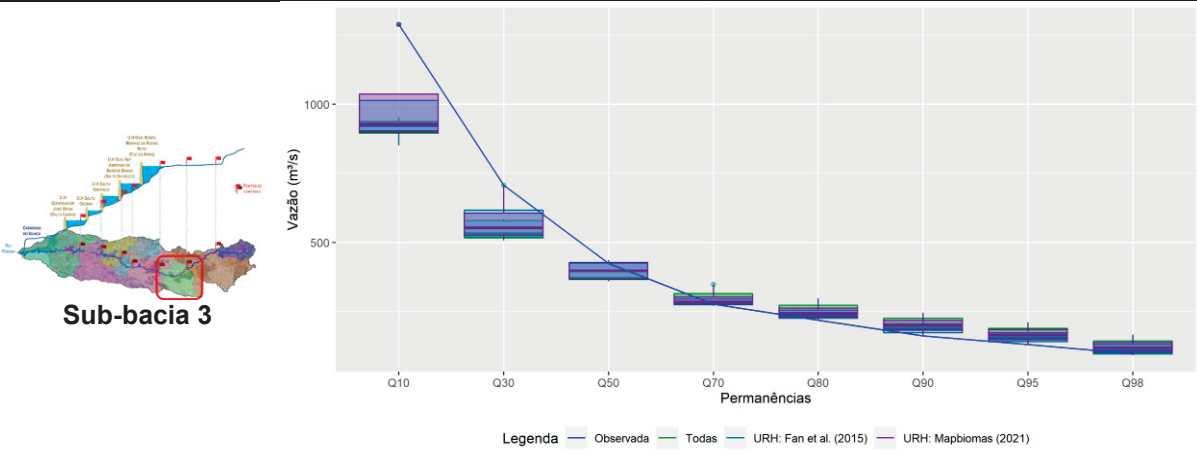
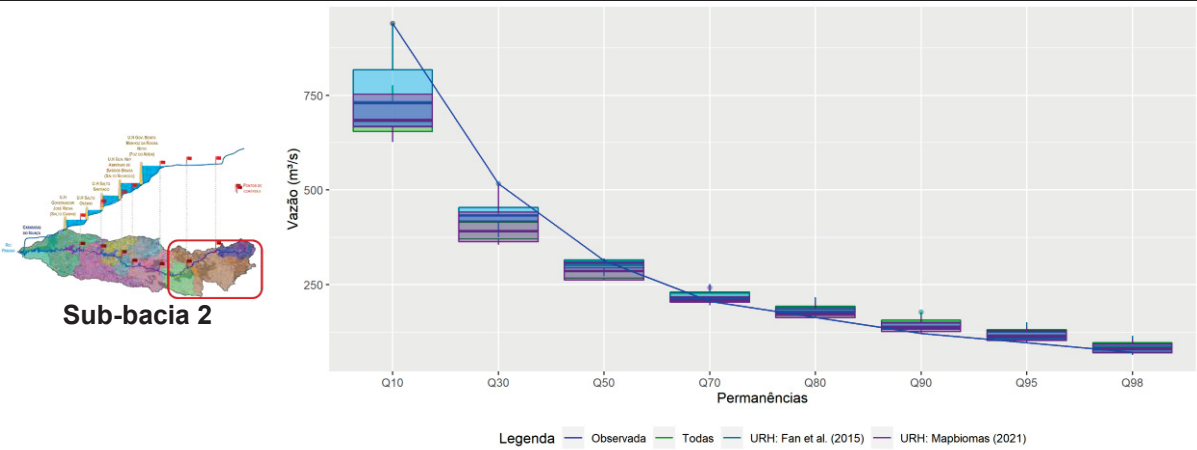
Considerações	Vazões (m³/s)	Sub-bacia							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Naturalizadas	Q ₁₀	76,5	312,8	436,8	561,6	607,7	775,7	812,7	667,0
	Q ₃₀	50,9	161,4	199,0	213,4	233,7	259,3	256,0	234,7
	Q ₅₀	33,4	57,6	76,5	89,8	110,4	137,4	145,4	365,3
	Q ₇₀	18,2	55,9	77,8	103,8	113,2	163,3	181,2	415,2
	Q ₈₀	15,8	54,8	79,3	118,5	123,2	170,0	189,2	405,9
	Q ₉₀	13,4	55,8	83,7	126,0	131,3	194,6	212,5	396,6
	Q ₉₅	13,2	54,0	80,3	120,2	128,7	175,7	188,7	387,7
	Q ₉₈	10,9	50,4	74,2	118,9	128,6	174,8	188,7	320,8
Observadas (com influência dos reservatórios)	Q ₁₀	76,5	312,8	436,8	561,6	607,7	775,7	1.373,7	667,0
	Q ₃₀	50,9	161,4	199,0	238,4	348,7	259,3	1.403,0	234,7
	Q ₅₀	33,4	57,6	76,5	205,6	334,1	241,8	1.236,5	365,3
	Q ₇₀	18,2	55,9	77,8	103,8	231,8	210,0	913,0	415,2
	Q ₈₀	15,8	54,8	79,3	127,5	137,0	170,0	637,0	405,9
	Q ₉₀	13,4	55,8	83,7	224,0	131,3	194,6	364,0	396,6
	Q ₉₅	13,2	54,0	80,3	256,0	186,7	229,7	188,7	387,7
	Q ₉₈	10,9	50,4	74,2	231,9	227,5	274,8	188,7	320,8

FONTE: DA AUTORA (2023).

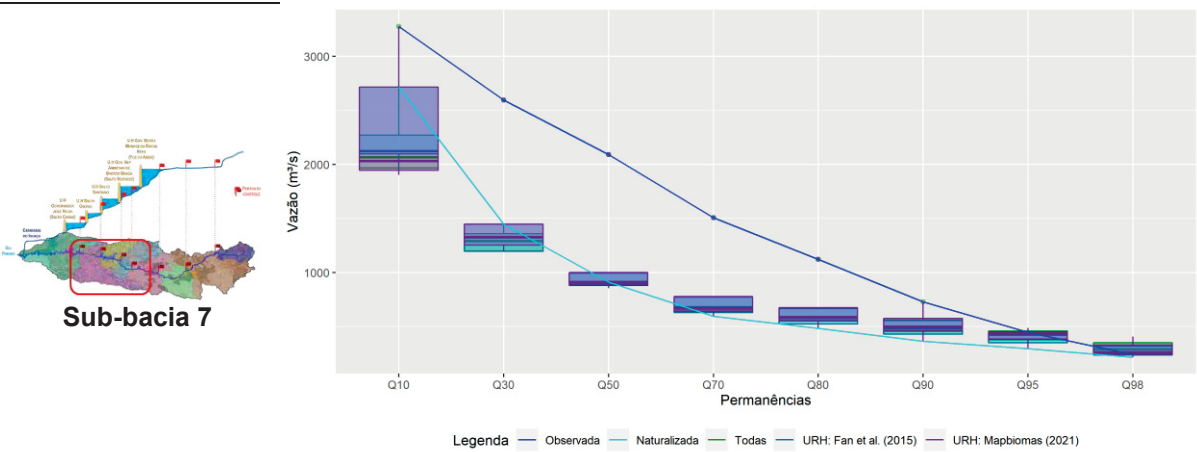
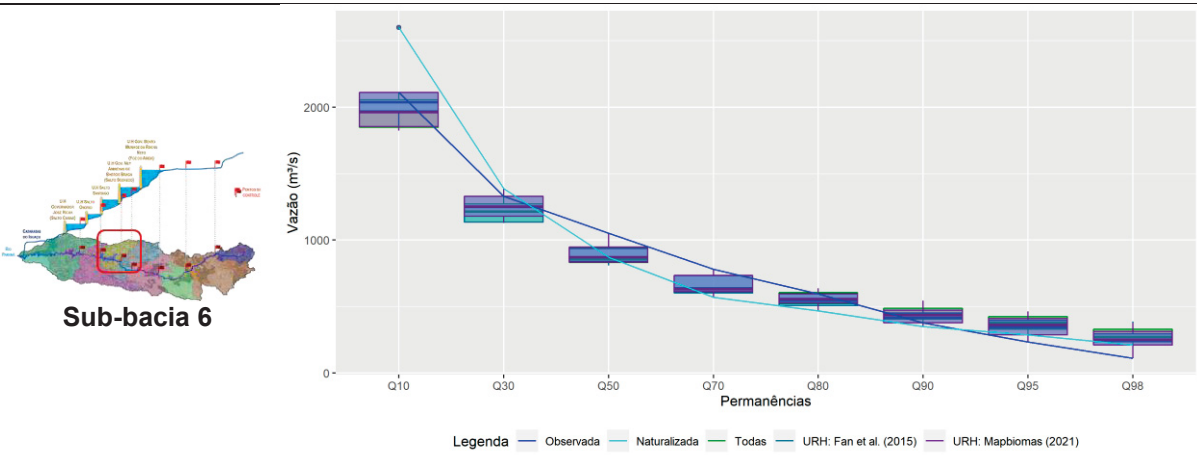
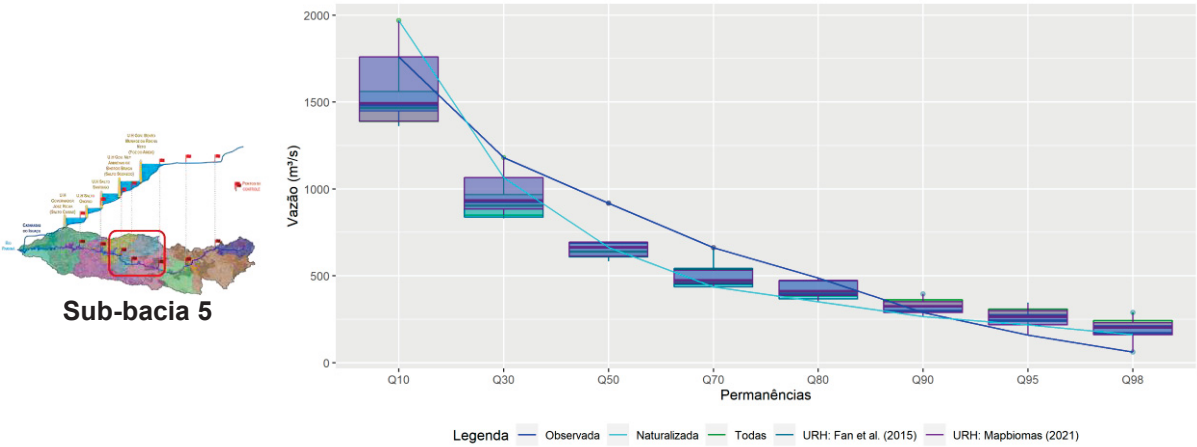
FIGURA 4.2 – BOX-PLOT DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES REALIZADAS



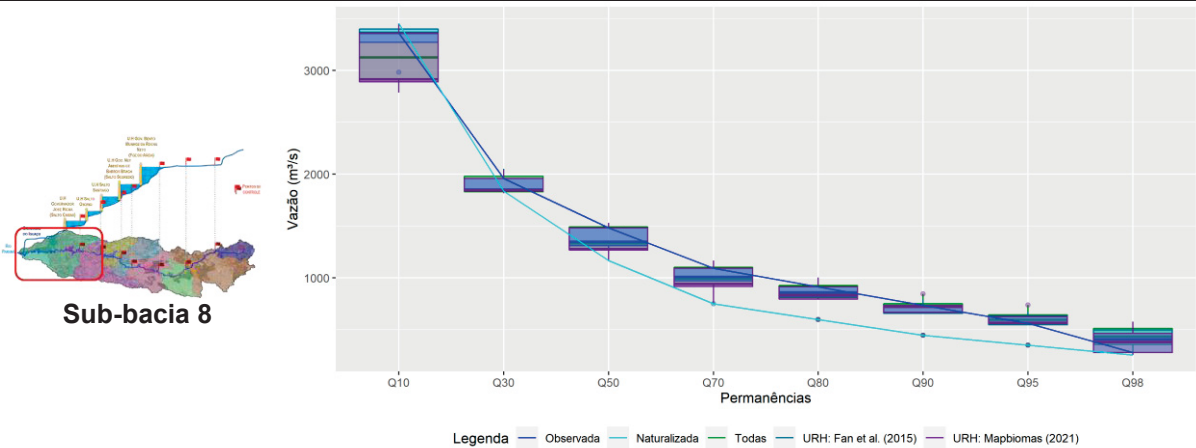
Legenda Observada Naturalizada Todas URH: Fan et al. (2015) URH: Mapbiomas (2021)



Legenda Observada Naturalizada Todas URH: Fan et al. (2015) URH: Mapbiomas (2021)



Legenda Observada Naturalizada Todas URH: Fan et al. (2015) URH: Mapbiomas (2021)



FONTE: DA AUTORA (2023).

TABELA 4.3 - VAZÕES DE DIFERENTES PERMANÊNCIAS PARA TODAS AS SIMULAÇÕES

Sub-bacia	Vazões (m³/s)	Observada	Naturalizada	URH: Fan <i>et al.</i> (2015)			URH: Mapbiomas (2021)		
				Calib. Completa	Calib. Sub-bacia 8	Calib. Paranhos	Calib. Completa	Calib. Sub-bacia 8	Calib. Paranhos
1	Q ₁₀	163,6	-	115,9	107,4	128,5	93,6	87,2	133,1
	Q ₃₀	98,5	-	63,6	60,8	74,7	48,0	47,7	74,0
	Q ₅₀	68,3	-	44,4	42,2	53,6	34,9	34,8	52,2
	Q ₇₀	43,6	-	32,6	31,0	39,9	25,4	26,1	38,1
	Q ₈₀	35,7	-	27,2	26,4	34,3	20,0	21,7	31,9
	Q ₉₀	27,5	-	20,9	21,6	28,1	14,7	16,4	25,3
	Q ₉₅	22,1	-	16,4	17,1	23,8	10,6	12,4	20,0
	Q ₉₈	16,5	-	10,2	11,5	17,2	6,3	8,7	13,4
2	Q ₁₀	939,7	-	777,0	626,9	681,8	678,7	629,5	690,5
	Q ₃₀	516,7	-	432,4	374,7	432,9	366,4	355,3	416,4
	Q ₅₀	313,7	-	301,8	271,9	319,1	261,5	262,7	308,7
	Q ₇₀	206,2	-	219,9	203,8	251,8	195,9	209,0	241,9
	Q ₈₀	163,8	-	181,1	174,1	216,7	161,9	179,5	205,8
	Q ₉₀	121,4	-	135,8	139,1	177,3	128,0	145,7	166,5
	Q ₉₅	97,1	-	105,0	115,3	151,0	104,9	124,4	138,6
	Q ₉₈	72,0	-	69,1	86,4	115,0	64,5	89,4	104,7
3	Q ₁₀	1.287,6	-	921,7	850,8	921,4	952,7	884,5	905,0
	Q ₃₀	707,1	-	520,6	513,6	586,2	532,2	508,1	572,3
	Q ₅₀	424,6	-	359,9	371,2	436,4	363,5	370,5	426,9
	Q ₇₀	277,7	-	270,7	279,2	348,5	278,4	292,3	339,2
	Q ₈₀	220,0	-	228,1	241,6	299,3	234,9	253,7	292,8
	Q ₉₀	163,0	-	177,9	193,0	246,7	190,7	211,3	242,3
	Q ₉₅	131,9	-	144,9	162,1	212,2	154,0	180,1	200,5
	Q ₉₈	98,6	-	93,5	120,8	167,7	106,0	132,7	156,8

Sub-bacia	Vazões (m³/s)	Observada	Naturalizada	URH: Fan <i>et al.</i> (2015)			URH: Mapbiomas (2021)		
				Calib. Completa	Calib. Sub-bacia 8	Calib. Paranhos	Calib. Completa	Calib. Sub-bacia 8	Calib. Paranhos
4	Q ₁₀	1.390,0	1.682,0	1.222,8	1.120,4	1.204,0	1.269,9	1.167,8	1.185,7
	Q ₃₀	926,0	901,0	695,8	688,9	767,5	722,6	687,6	763,6
	Q ₅₀	687,0	537,0	481,4	501,2	571,2	495,1	501,7	568,3
	Q ₇₀	419,0	351,0	359,8	377,3	454,8	376,5	391,0	443,9
	Q ₈₀	266,0	275,0	304,8	324,7	393,5	320,9	343,1	392,5
	Q ₉₀	102,0	200,0	241,6	263,0	326,0	261,8	287,9	325,4
	Q ₉₅	26,2	162,0	193,4	222,5	282,2	210,6	241,0	266,9
	Q ₉₈	-	113,0	130,2	162,4	231,9	149,9	179,4	220,9
5	Q ₁₀	1.760,0	1.969,0	1.481,1	1.361,3	1.447,8	1.493,2	1.382,4	1.390,5
	Q ₃₀	1.180,0	1.065,0	838,5	831,3	923,9	884,3	852,3	933,9
	Q ₅₀	917,0	663,0	582,9	609,0	687,4	610,9	614,6	693,3
	Q ₇₀	662,0	436,0	430,2	455,8	543,4	458,0	472,8	532,1
	Q ₈₀	488,0	351,0	367,0	393,0	470,9	388,6	411,7	474,2
	Q ₉₀	289,0	265,0	297,2	323,1	396,3	325,0	351,3	396,3
	Q ₉₅	159,0	217,0	243,3	276,2	345,7	264,1	298,8	337,9
	Q ₉₈	62,1	161,0	169,3	211,6	289,6	201,5	230,7	277,8
6	Q ₁₀	2.112,0	2.600,0	2.036,4	1.834,4	1.972,3	1.963,2	1.824,3	1.853,4
	Q ₃₀	1.329,0	1.387,0	1.135,8	1.127,7	1.247,5	1.178,9	1.130,3	1.251,6
	Q ₅₀	1.051,0	871,0	809,2	838,0	936,4	832,5	826,1	946,5
	Q ₇₀	780,0	570,0	601,2	636,1	731,0	610,8	630,1	733,3
	Q ₈₀	595,0	467,0	506,2	541,8	630,0	525,4	555,9	637,0
	Q ₉₀	376,0	350,0	413,5	450,9	527,6	435,5	471,8	544,6
	Q ₉₅	233,0	287,0	341,5	394,4	459,6	359,8	410,1	462,7
	Q ₉₈	111,0	211,0	239,6	293,6	385,8	248,4	312,9	378,0
7	Q ₁₀	3.276,0	2.715,0	2.122,1	1.970,9	2.095,7	2.032,2	1.902,3	1.945,6
	Q ₃₀	2.594,0	1.447,0	1.191,0	1.196,5	1.325,5	1.252,2	1.201,6	1.327,8
	Q ₅₀	2.090,0	910,0	853,5	895,5	992,8	882,6	873,8	998,9
	Q ₇₀	1.508,0	595,0	628,1	678,5	772,3	644,3	666,0	776,2
	Q ₈₀	1.122,0	485,0	524,1	577,4	665,2	556,4	587,1	674,2
	Q ₉₀	728,0	364,0	428,5	480,6	554,1	462,4	498,7	576,5
	Q ₉₅	448,0	297,0	351,2	425,4	484,1	384,4	435,2	485,7
	Q ₉₈	242,0	217,0	239,6	318,8	404,2	261,7	331,1	405,7
8	Q ₁₀	3.361,3	3.453,0	3.271,1	2.982,2	3.399,9	2.915,3	2.786,0	2.890,6
	Q ₃₀	1.957,7	1.836,0	1.851,4	1.816,4	2.051,1	1.845,7	1.816,9	2.043,2
	Q ₅₀	1.482,9	1.166,0	1.308,6	1.350,0	1.511,4	1.276,4	1.267,7	1.531,3
	Q ₇₀	1.091,8	751,0	972,0	1.010,5	1.130,4	918,4	939,6	1.166,2
	Q ₈₀	913,1	598,0	814,2	860,0	959,1	794,5	832,7	1.003,9
	Q ₉₀	734,0	448,0	657,7	724,1	792,9	667,8	721,7	844,6
	Q ₉₅	562,5	351,0	546,7	634,5	672,9	567,1	625,7	738,7
	Q ₉₈	281,4	257,0	408,1	498,5	552,6	381,5	463,8	577,8

FONTE: DA AUTORA (2023).

Como é possível verificar nos gráficos da Figura 4.2, as maiores variações entre vazões das diferentes simulações são observadas nas maiores permanências, enquanto nas vazões de menores permanências a variação ocorre com menor significância. Tais resultados são esperados, uma vez que estas são vazões de períodos de estiagem e, portanto, mantidas principalmente pelas descargas de aquíferos (Collischonn e Dornelles, 2015), não apresentando tanta repercussão com a alteração do uso e ocupação da terra.

Pode-se perceber que, mesmo alterando as bases de uso e ocupação da terra, combinando ainda com diferentes métodos de calibração, houve pouca variação da faixa de vazões simuladas, principalmente nas vazões de estiagem que são a principal referência para determinação da disponibilidade hídrica a ser utilizada em planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Contudo, quando avaliado em termos percentuais, o que permite suprimir a diferença entre as grandezas das vazões máximas e mínimas, é notável que as maiores diferenças ocorrem nas vazões de maior permanência, ou seja, nas vazões mínimas, como mostra a Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – DIFERENÇA EM TERMOS PERCENTUAIS ENTRE AS MAIORES E MENORES VAZÕES SIMULADAS PARA CADA PERMANÊNCIA

Considerações	Vazões	Sub-bacia							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Naturalizadas	Q ₁₀	47%	33%	34%	33%	31%	30%	30%	19%
	Q ₃₀	52%	31%	28%	24%	22%	19%	18%	11%
	Q ₅₀	49%	18%	18%	16%	16%	15%	15%	24%
	Q ₇₀	42%	22%	22%	23%	21%	22%	23%	36%
	Q ₈₀	44%	25%	26%	30%	26%	27%	28%	40%
	Q ₉₀	48%	31%	34%	39%	33%	36%	37%	47%
	Q ₉₅	55%	36%	38%	43%	37%	38%	39%	52%
	Q ₉₈	63%	44%	44%	51%	44%	45%	47%	56%
Observadas (com influência dos reservatórios)	Q ₁₀	47%	33%	34%	33%	31%	30%	42%	19%
	Q ₃₀	52%	31%	28%	26%	30%	19%	54%	11%
	Q ₅₀	49%	18%	18%	30%	36%	23%	59%	24%
	Q ₇₀	42%	22%	22%	23%	35%	27%	61%	36%
	Q ₈₀	44%	25%	26%	32%	28%	27%	57%	40%
	Q ₉₀	48%	31%	34%	69%	33%	36%	50%	47%
	Q ₉₅	55%	36%	38%	91%	54%	50%	39%	52%
	Q ₉₈	63%	44%	44%	100%	79%	71%	47%	56%

FONTE: DA AUTORA (2023).

A diferença média nas principais vazões naturais mínimas utilizadas como referência para os instrumentos de gestão de recursos hídricos (Q_{90} , Q_{95} e Q_{98}) foi de 43%, o que permite inferir que, embora as diferenças em valores absolutos de vazão tenham sido pequenas, elas são significativas quanto a tomada de decisão em gestão de recursos hídricos, como por exemplo, a concessão de uma outorga.

Ademais, é sabida da complexidade de se reproduzir processos naturais e estimar suas repercussões com precisão, seja pelas incertezas intrínsecas às simplificações necessárias para a reprodução desses processos por meio da modelagem, e/ou ainda pelas limitações quali-quantitativas referentes aos dados.

Diante disso, pode-se dizer que a estimativa da quantidade de água disponível para ser utilizada como um valor absoluto se encaixa em uma espécie de paradoxo, uma vez que ela pode variar conforme a metodologia empregada para sua quantificação, a base de dados utilizada nessa modelagem e o período analisado, dentre muitas outras vertentes que influenciam nesse complexo conceito.

Portanto, entende-se que, principalmente para a gestão e planejamento de recursos hídricos devido à importância dessas atividades para a sustentabilidade do sistema sociedade-meio ambiente, a adoção de faixas de disponibilidade hídrica pode ser um conceito interessante quando associado aos instrumentos de gestão de recursos hídricos, como por exemplo a outorga de direito de uso e a cobrança pelo uso, que estão intimamente ligados com o conceito e preservação da disponibilidade hídrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O saber da quantidade de água que se tem disponível para o uso, não apenas pela sociedade, mas por todos os meios e sistemas dependentes desse recurso, consiste na base da gestão e planejamento dos recursos hídricos, uma vez que a disponibilidade hídrica está relacionada a todos os instrumentos previstos na respectiva legislação brasileira. Contudo, sua estimativa não é uma tarefa trivial, já que envolve diversas possibilidades metodológicas, bases de dados, tipos de dados, além da própria limitação da representação matemática dos processos e fenômenos naturais.

Isso confere uma complexidade ao processo que, por si só, traz seu grau inerente de incertezas, com as quais o planejamento precisa ser capaz de lidar. Contudo, na atividade prospectiva, ainda há o desconhecido ou imprevisível – como descrito por Morin (2004): "há um princípio de incerteza de que não pode ser evitada e que deve nos fazer saber que ainda estamos fazendo apostas".

Quando se tem um valor absoluto para um conceito, pode-se tender a acreditar que tal valor é a verdade irrefutável, não cabendo espaço para inclusão do desconhecido. No contexto do planejamento de algo tão essencial como a água, faz-se mais do que necessário que seja incluída o mínimo dessa incerteza, de modo que aumente a segurança e a sustentabilidade hídrica.

Nesse sentido, entende-se que uma possibilidade para a inclusão de incertezas no conceito de disponibilidade hídrica voltado ao planejamento da gestão de recursos hídricos pode-se dar pela adoção de faixas de disponibilidade hídrica, com diferentes permanências ao invés da utilização de um número fixo. Como desenvolvido no presente trabalho, tais faixas podem ser obtidas utilizando-se diferentes bases de dados, metodologias, e períodos analisados, de modo a incluir fatores que, porventura, não tenham sido identificados no processo pelos mais diversos motivos. Além disso, nesta pesquisa, as faixas de incerteza foram obtidas com a utilização de um modelo hidrológico e, portanto, refletem o efeito das entradas e saídas de processos hidrológicos com suas características de aleatoriedade.

À essa obtenção das faixas de disponibilidade hídrica, poderiam, ainda, ser incluídos diferentes cenários de mudanças climáticas e suas consequentes implicações nas chuvas, diferentes cenários de uso e ocupação da terra, incorporação dos efeitos de regularização dos reservatórios, e outras tantas variáveis

que influem na complexidade e, conseqüentemente, nas incertezas que cercam o valor da disponibilidade hídrica e que podem ser alvo de outros trabalhos e estudos.

Por fim, o presente trabalho procurou contribuir para dirimir uma pequena parte dessas incertezas sobre a disponibilidade hídrica, e espera-se que ele ajude a despertar o interesse de demais pessoas em uma atividade que exige o empenho da sociedade como um todo, que é a gestão dos recursos hídricos, de modo participativo e descentralizado como previsto na Lei das Águas (Brasil, 1997).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PEIXE VIVO. **Entendimento da utilização das águas na área de influência do Aquífero Urucuia e Aquífero Cárstico na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. P01 - Plano de Trabalho. Profill Engenharia e Ambiente. Março, 2021. Disponível em: <https://siga.cbhsaofrancisco.org.br/sigasf/download/documento/113_26c18a61-0c7b-4ec2-b7e9-3a55c8e8ca52.pdf>. Acessado em jan. 2024.

AGÊNCIA PEIXE VIVO. **Plano Diretor de Recursos Hídricos (PDRH) e do Enquadramento dos Corpos de água para a Bacia Hidrográfica dos Afluentes do Alto São Francisco**. P01 - Plano de Trabalho. Consórcio Ecoplan-Skill. Fevereiro, 2020. Disponível em: <https://pdrhsf1.com.br/wp-content/uploads/2020/04/PDRH-SF1_R1V3.pdf>. Acessado em jan. 2024.

AGHSAEI, H., DINAN, N. M.; MORIDI, A.; ASADOLAH, Z.; DELAVAR, M.; FOHRER, N.; WAGNER, P. D. **Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran**. Science of the Total Environment, v. 712, p. 136449, 2020.

ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D. 2020. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools**. Manual Técnico. Hidrologia de Grande Escala (HGE), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>>. Acessado em ago. 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021**. 2021a. Disponível em <<http://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io>>. Acessado em nov. 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Nota Técnica nº 46/2018/SPR**. Documento nº 00000.040424/2018-44. Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014 (BHO_CN). Brasília, junho de 2018. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67/attachments/NOTA_TECNICA_46_2018_SPR.pdf>. Acessado em set. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 50k (BHO 2017 50k)**. Brasília, 2017. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/4fd91f0d-f34f-4fca-a961-c2dcb3e0446e>>. Acessado em set. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Nota Técnica Conjunta nº 3/2021/SRE/SOE/SFI/SPR/SGH**. Brasília, maio de 2021. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventos-criticos/salas-de-acompanhamento/parana/NTC_3_2021_ANA.pdf>. Acessado em nov. 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Portal Hidroweb**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em nov./2022

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Resolução ANA nº 77 de 1º de junho de 2021**. Declara situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná. 2021c. apresentacao>. Acesso em nov./2022.

ARINO, O.; RAMOS PEREZ, J. J.; KALOGIROU, V.; BONTEMPS, S.; DEFOURNY, P.; VAN BOGAERT, E. **Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009)**. © European Space Agency (ESA) & Université Catholique de Louvain (UCL), doi:10.1594/PANGAEA.787668. 2012.

BRASIL. **Lei 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. Brasília: 1997.

BRITO NETO, R. L.; TAGLIAFERRE, C.; LEMOS, O. L.; ROCHA, F. A.; PAULA, A. **Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo**. Ciência Florestal. Ci. Fl., Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-213, jan./mar. 2021

BUARQUE D.C., PAZ, A. R., COLLISCHONN, W. **Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização de modelos hidrológicos**. Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2008.

CARDWELL, H. E.; COLE, R. A.; CARTWRIGHT, L. A.; MARTIN, L. A. **Integrated Water Resources Management: Definitions and Conceptual Musings**. Journal of contemporary water research & education, v. 135, n. 1, p. 8-18, 2006.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; ADDOR, N.; Fan, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A. **CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil**. Earth Syst. Sci. Data, v.12, p.2075–2096, set/2020.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA; B. C.; TUCCI, C. E. **The MGB model for large-scale rainfall—runoff modelling**. Hydrological Sciences Journal, 52(5), 878-895. 2007.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre: 2ª edição revisada e ampliada. 2015. 336p.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A.S. **Manual de Referência Teórica do MGB**. Hidrologia de Grande Escala (HGE), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>>. Acesso em abril de 2023.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2001. 199p.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência**. 2008. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). V. 13. Jan/Mar 2008, p.111-124.

DIAS, R. M. M. S. **Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o plugin MGB**. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense. Wagner Rambaldi Telles, orientador ; Thiago Jordem Pereira, coorientador. Volta Redonda, 2021. 135 p.

DUNNE T.; BLACK R. D. **Partial area contributions to storm runoff in a small New-England watershed**. Water Resources Research 6(5): 1296–1311. 1970. DOI: 10.1029/WR006i005p01296

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

FAN, F.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). 2014. V.19.p243-254.

FERNANDES *et al.*. **Projeto Iguaçu: Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos**. Bases de dados. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR). s.d. Disponível em: <<https://sites.google.com/view/projetoiguau/home?authuser=0>>. Acesso em 08/2022.

FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. F.; PASSAIA, O. A.; WONGCHUIG, S. C.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; MARQUES, G. F.; COLLISCHONN, W. **Regional scale hydrodynamic modeling of the river-floodplain-reservoir continuum**. Journal of Hydrology, Volume 596, 126114, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126114>. 2021.

FLEISCHMANN, A.S., SIQUEIRA, V., PARIS, A., COLLISCHONN, W., PAIVA, R., PONTES, P., CRÉTAUX, J.; BERGÉ-NGUYEN, M.; BIANCAMARIA, S.; GOSSET, M.; CALMANT, S.; Tanimoun, B. **Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands**. Journal of hydrology, 561, 943-959. 2018.

GOOGLE EARTH. Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu. Imagem Landsat/Copérnicus. 2023.

HAYDAR, S.; ARSHAD, M.; AZIZ, J.A. **Evaluation of drinking water quality in urban areas of Pakistan: A case study of Southern Lahore**. Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000 – BC250**. Versão 2021. Shapefile de Pedologia. 2021.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande (PRH-BIG)**. Plano de Trabalho. Profill Engenharia e Ambiente. Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.cbhbig.org.br/plano/produtos/00%20-%20Plano%20de%20Trabalho%20-%20PT.pdf>>. Acessado em jan. 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Normais Climatológicas: 1961/1990**. Brasília - DF, 1992.

IPARDES/ITCG. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social; Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. **Mapa de Uso do Solo - 2001/2002**. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/uso_solo_2001.zip>. Acessado em out. 2022.

ITCG. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia. **Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra - Ano de referência: 2012**. Instituto Água e Terra. Governo do Paraná. Disponível em: <ftp://geo_iat:geo_iat@200.189.114.112>. Acessado em out. 2022.

JARVIS, A.; H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m**. Database: <https://srtm.csi.cgiar.org>. 2008.

JAVADINEJAD, S.; DARA, R.; JAFARY, F. **Impacts of Extreme Events on Water Availability**. Annals of Geographical Studies, 2(3), pp. 16-24. 2019.

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A. **A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes**. Journal of Hydrology, 565 (2018) 177-196. 2018.

MACHADO R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese de doutorado de agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. São Paulo, 2002.

MACHADO, B. P.; KRÜGER, D. A. V. História das Barragens no Paraná. In: **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Coordenador, supervisor: Flavio Miguez de Mello; editor: Corrado Piasentin. Rio de Janeiro : CBDB, 2011. 524 p. : il. ; 29 cm

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias. **Coleção 7.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**, para os anos de 2009 e 2021. 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em out. 2022.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias. **Coleção 7.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**, para o ano de 2010. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em out. 2022.

MARHAENTO, H.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. **Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment**. Hydrological sciences journal, v. 63, n. 9, p. 1368-1385, 2018.

MATIAS, R. S. **Projeção de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas. Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior. Maceió, 2022. 67 p.

MENDES, L. A. **Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2007. 189p.

MMA/CNRH. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012**. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Brasília, 2012.

MORIN, E. **Ethique de la complexité et le problème des valeurs au XXème siècle**. Entretiens du XXème siècle sous la direction de Jérôme Bindé. Paris: Editions Unesco; Albin Michel, 2004.

MUHLENHOFF, A. P. **Calibração de modelo hidrológico considerando a importância amostral dos parâmetros hidrológicos utilizando técnica de Inteligência Artificial**. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGERHA-UFPR). Curitiba, 2023.

MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M.; FAN, F. M. **Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes**. Journal of Hydrology, 564 (2018) 424-441. 2018.

NASCIMENTO, N. de O.; HELLER, L. **Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento**. Eng. Sanit. Ambient.: Artigos Técnicos. Vol.10 - Nº 1 - jan/mar 2005, 36-48.

OLIVEIRA, R. F.; ZOLIN, C. A.; VICTORIA, D. C.; LOPES, T. R.; VENDRUSCULO, L. G.; PAULINO, J. **Hydrological calibration and validation of the MGB model for water resource management in the upper Teles Pires River basin in the Amazon-Cerrado ecotone in Brazil**. ACTA Amazonica, VOL. 49(1) 2019: 54 – 63. 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Atualização de Séries Históricas de Vazões – Período 1931 a 2021**. Portal SINtegre. 2022.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. Dezembro de 1987.

PAIVA, R. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. **Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach.** Journal of Hydrology, 406(3-4), 170-181. 2011.

PARANÁ. **O Paraná e suas águas: águas no planeta Terra, no Brasil e no Paraná.** Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. 2021. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2021-10/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_PR_e_suas_Aguas.pdf>. Acessado em nov. 2022.

PARANHOS, R. N. **A influência do número de estações pluviométricas na eficiência do modelo MGB utilizando a autocalibração dos parâmetros de solo.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da UFRGS. Orientador: Fernando Mainardi Fan. 2023.

PHAN T. D.; BAXTER G. S.; PHAN H. A. D.; MAI L. S.; TRINH H. D. **An integrated approach for predicting the occurrence probability of an elusive species: the Southwest China serow.** Wildlife Research 46, 386-397. 2019

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; de PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIN, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. **MGB model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS.** Environmental Modelling & software, 94, 1-20. 2017.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: **Handbook of Hydrology**, edited by Maidment, D. R. McGraw-Hill, 1424p. 1993.

REED, P.; KASPRZYK, J. **Water Resources Management: The Myth, the Wicked, and the Future.** Journal of Water Resources Planning and Management. Nov/Dez, 2009. 411-413p.

RUTHES, J. M. **A curva de permanência e a disponibilidade hídrica para outorga no estado do Paraná.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017 . 62p.

SANTOS, G. B. dos. **Balanço hídrico quantitativo das águas superficiais na bacia hidrográfica do Rio Jaguarão.** Orientador: Gilberto Loguercio Collares. 2022. 117f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. **Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica.** XII Congresso Nacional de Tecnologias de La Información Geográfica. Granada, 2006. “El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas”. p. 465-479.

SCHLAEPFER, D., BRADFORD, J., LAUENROTH, W. *et al.* **Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils.** Nat Commun 8, 14196 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms14196>. 2017.

SCHUSTER, R C.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. **Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon's Basin**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Versão On-line. ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 25, e9, 2020.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: **Handbook of Hydrology**, edited by Maidment, D. R. McGraw-Hill, 1424p. 1993.

SILVA, D. S.; MEDEIROS, J. D. F. **Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu**. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió, 2018.

SINGH, V. P. **Hydrologic modeling: progress and future directions**. *Geoscience Letters*, 5 (15). 2018. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>.

SIQUEIRA, P. C.; PONS, N. A. D.; SILVA, B. C.; SIQUEIRA JUNIOR, P.; MOREIRA, L. A.; MARTINS, A. M. **Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para Simulação de Cenários de Uso do Solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG)**. Revista Brasileira de Geografia Física v.15, n.05. 2414-2429. 2022

SWAIN, S. S.; MISHRA, A.; SAHOO, B.; CHATTERJEE, C. **Water scarcity-risk assessment in data-scarce river basins under decadal climate change using a hydrological modelling approach**. Journal of Hydrology, 590 (2020) 125260. 2020.

TODINI, E. **Hydrological catchment modelling: past, present and future**. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11 (1), 468-482. 2007. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/468/2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2ª edição – Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2005. 678p.

HEMA, V. K.; SUDHEER, K. P. **Towards quick parameter estimation of hydrological models with large number of computational units**. Journal of Hydrology, 587 (2020) 124983. 2020.

VOGEL, R.M.; FENNESSEY, N.M. **Flow Duration Curves: New Interpretation and Confidence Intervals**. Journal of Water Resources Planning and Management, 120, 485-504. 1994.

WONGCHUIG, C.S.; PAIVA, R.C.D.; SIQUEIRA, V.; COLLISCHONN, W. **Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin**. Journal of Hydrology, 570 (2019) 755-773. 2019.

WORLD BANK. **Water Resources Management**. 05 out. 2022. Disponível em: <>. Acessado em out. 2023.

WU, L.; ZHANG, X.; HAO, F.; WU, Y.; LI, C.; XU, Y. **Evaluating the contributions of climate change and human activities to runoff in typical semi-arid area, China**. Journal of Hydrology, v. 590, p. 125555, 2020.

ZHANG, H.; WANG B.; LIU, D. L.; ZHANG, M.; LESLIE L. M.; YU, Q. **Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia.** Journal of Hydrology, v. 585, p. 124822, 2020.

ANEXOS

A. CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A calibração dos parâmetros de uma bacia é uma das etapas fundamentais a aplicação de um modelo chuva-vazão, para que o modelo reproduza adequadamente o hidrograma observado. Para tanto, o modelo pode ser calibrado manualmente, por tentativa e erro, ou então utilizando-se de algoritmos que otimizem a busca pelo melhor conjunto de parâmetros, tornando automática a atividade de calibração.

Contudo, esses algoritmos são alvos de inúmeras críticas, como listado por Collischonn e Tucci (2001), dentre as quais destacam que surgiu em decorrência de se basearem em técnicas de otimização local, as quais podem ser encontrados valores de parâmetros diferentes, dependendo do ponto ou dos pontos em que se iniciou o procedimento e, portanto, gerando resultados considerados não confiáveis.

Quanto maior o número de processos hidrológicos que o modelo seja capaz de representar, mais complexo é esse processo por envolver uma grande quantidade de parâmetros (Gontijo, 2007). Portanto, o processo de calibração torna-se ainda mais desafiador quando modeladas bacias hidrográficas com características fortemente heterogêneas (Muhlenhoff, 2023), o que pode dificultar a obtenção de um conjunto ótimo de parâmetros em decorrência da parametrização excessiva dos modelos, que é um problema bem conhecido na modelagem de chuva-vazão (Duan *et al.*, 1992; Van Griensven *et al.*, 2006).

Nesse sentido, Muhlenhoff (2023) traz uma síntese sobre a calibração de modelos hidrológicos, uma vez que diversos algoritmos foram desenvolvidos para representar conceitualmente os processos hidrológicos por meio de equações tradicionais em conjunto com esquemas de otimização para a calibração dos parâmetros desses modelos, destacando que as pesquisas apontam que os algoritmos de otimização global superam os métodos de pesquisa local para problemas complexos de alta dimensão.

Ademais, conforme Yapo *et al.* (1998), a experiência prática demonstra que mesmo que seja cuidadosamente escolhida uma única função-objetivo, ela pode não representar adequadamente as maneiras pelas quais o modelo falha em corresponder às características importantes dos dados observados, principalmente quando são modelos distribuídos, onde as variáveis e os fluxos das bacias devem ser simulados e mensurados em inúmeras localidades.

ALGORITMO MOCOM-UA

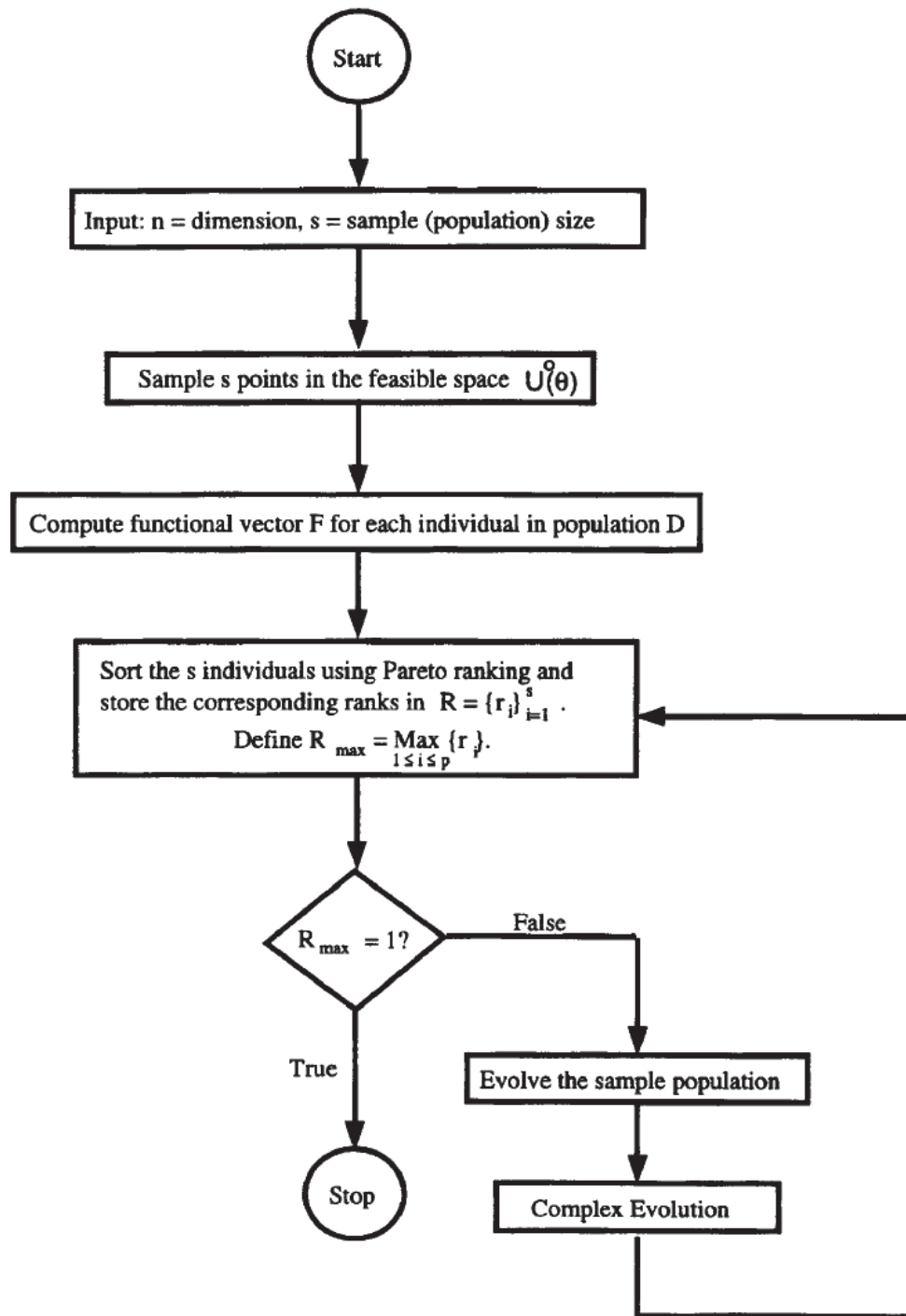
Idealizado como uma alternativa tanto a calibração manual, que consome maior tempo devido seu processo envolver naturalmente tentativas e erros, como a calibração global com apenas uma função-objetivo, Yapo *et al.* (1998) apresentaram um método eficiente e efetivo para resolução de problemas de otimização global multiobjetivo, ao qual denominaram *Multi-Objective Complex Evolution* (MOCOM-UA). Conforme indicado no guia prático do código-fonte do MGB (Breda *et al.*, 2020), este algoritmo utilizado para a calibração automática no modelo.

O algoritmo inicia com uma amostra inicial de s pontos distribuídos aleatoriamente ao longo do espaço de parâmetros viáveis n -dimensional $U^\circ(\theta)$, que representa a incerteza do parâmetro inicial, sendo usada uma distribuição de amostragem uniforme quando não há informações prévias sobre o ótimo de Pareto. Para cada ponto, o vetor multiobjetivo $F(\theta)$ é calculado, organizado e classificado conforme o procedimento denominado Classificação de Pareto-ranking (Goldberg, 1989), em que se identifica todos os indivíduos não-dominantes na população, aos quais é conferido o valor “um”. Retira-se, então, temporariamente esses indivíduos da população, e os não-dominantes identificados na população restante recebem a classificação “dois”. O processo é repetido até que cada ponto tenha uma classificação.

É então selecionado os *simplexes*, que consistem num grupo de $n+1$ pontos onde n é o número de parâmetros a otimizar no espaço, da amostra, utilizando-se um método robusto de seleção baseado em classificação, e cada *simplex* é desenvolvido em uma direção de melhoria de acordo com os passos da estratégia de Evolução Complexa, a qual produz novos pontos, em média melhores que os pontos originais. A aplicação iterativa dos procedimentos de classificação e evolução faz com que a população convirja para o conjunto de Pareto, terminando quando todos os pontos da amostra se tornam mutuamente não-dominantes. O fluxograma da estratégia utilizada pelo MOCOM-UA é apresentado na Figura A.1, com a estratégia de Evolução Complexa podendo ser verificada na Figura A.2.

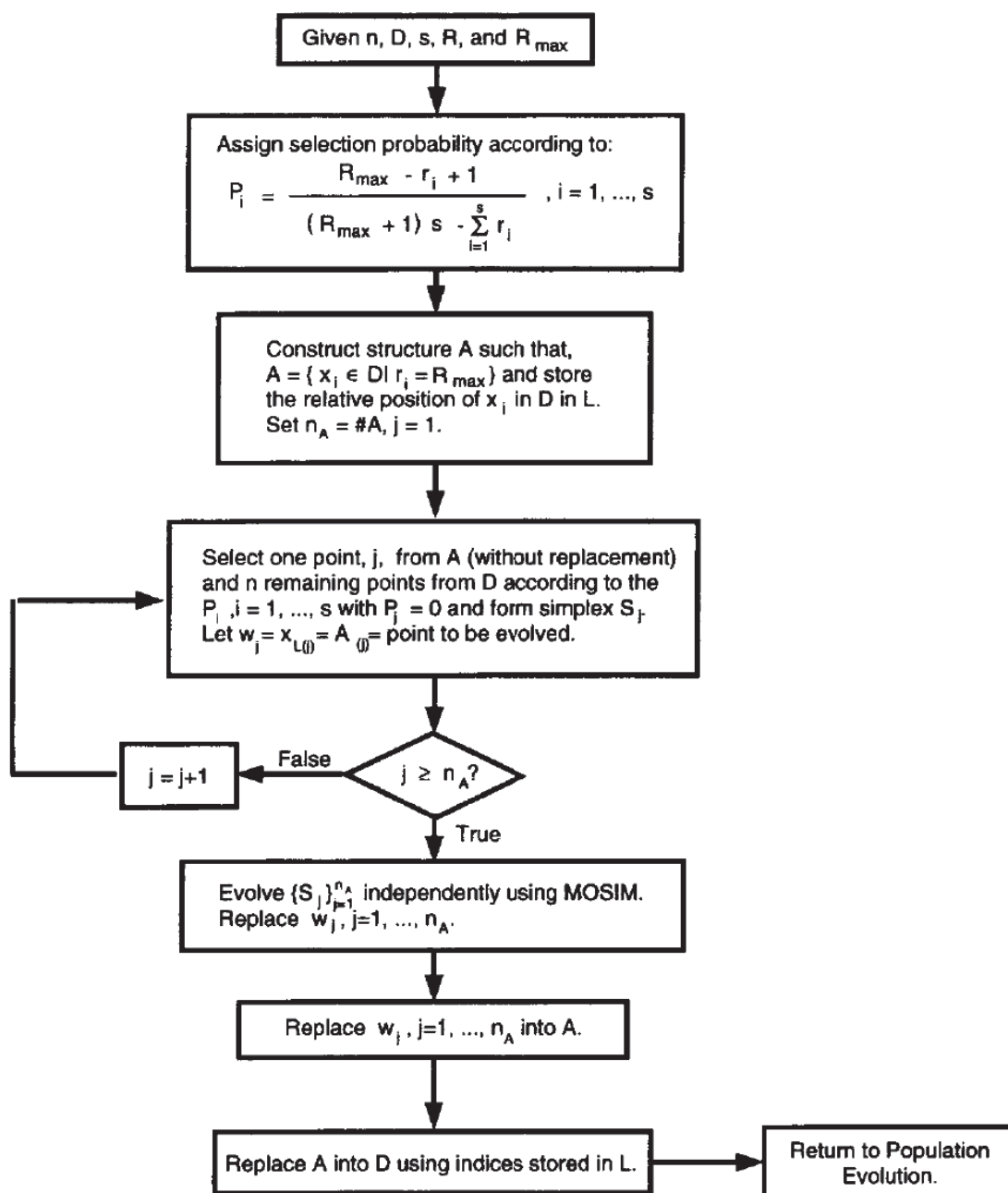
O devido detalhamento do algoritmo MOCOM-UA, bem como dos procedimentos e conceitos incluídos em seu funcionamento, é documentado em Yapo *et al.* (1997).

FIGURA A.1 – FLUXOGRAMA DA ESTRATÉGIA DO ALGORITMO MOCOM-UA



FONTE: YAPO ET AL. (1998)

FIGURA A.2 – ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO COMPLEXA



FONTE: YAPO ET AL. (1998)

REFERÊNCIAS

BREDA, J. P. F.; SORRIBAS, M. V.; GAMA, C. H. A.; PAIVA, R.C.D. **Guia Prático de Código-Fonte: Rotinas do MGB. Manual Técnico**. Hidrologia de Grande Escala (HGE), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2019/03/manual_MGB_2018_QGIS_FINAL_02.pdf>. Acesso em 16/08/2023.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do Modelo IPH-2. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2001.

GOLDBERG, D.E. Genetic Algorithms. In: **Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 412 pp. 1989.

MUHLENHOFF, A. P. **Calibração de modelo hidrológico considerando a importância amostral dos parâmetros hidrológicos utilizando técnica de Inteligência Artificial**. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGERHA-UFPR). Curitiba, 2023.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. A **Multiobjective Global Optimization Algorithm with application to calibration of Hydrologic Models**. Technical Report No. 97 -050. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona. 1997.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. **Multi-objective global optimization for hydrologic models**. Journal of hydrology, v. 204, n. 1-4, p. 83-97, 1998.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de frequência entre as precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 2007. 175p.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models**. Water Resources Research, v. 20, n. 4, p. 1015-1031. 1992.

B. ARTIGO XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Aceito para publicação nos anais do XXV SBRH, realizado em Aracaju, Sergipe, de 19 a 24 de novembro de 2023.



XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPAS DE USO DO SOLO: REFLEXÕES SOBRE IMPLICAÇÕES EM MODELOS HIDROLÓGICOS E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

*Juliana Cristina Jansson Kissula¹; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes² & Daniel
Henrique Marco Detzel³*

Abstract: Water is an essential resource for life and therefore is necessary its sustainable planning today and for the future, which is a challenge. In this context, hydrological models coupled to Geographic Information Systems (GIS) can be tools to assist in the inclusion of different variables that interfere in the water availability of a watershed, in addition to the hydrological variables present in conventional modeling. Faced with this, the present paper presents an evaluation of different sources and resolutions of land use maps, with the Iguaçu River Basin as the study area. The results indicate significant differences considering different areas analyzed, demonstrating the importance and necessity of the prior evaluation of this information, so that it is in accordance with the design of the objective to which it is proposed and that one has knowledge of its possible implications and inferences in the expected product, such as in hydrological modeling.

Resumo: A água é um recurso essencial a vida e por isso é necessário que seu planejamento seja sustentável atual e futuramente, o que é um desafio. Nesse contexto, os modelos hidrológicos acoplados a Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) podem ser ferramentas que auxiliam na inclusão de diferentes variáveis que interferem na disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, além das variáveis hidrológicas presentes na modelagem convencional. Diante disso, o presente trabalho apresenta uma avaliação sobre diferentes fontes e resoluções de mapas de uso da terra, tendo a Bacia do Rio Iguaçu como área de estudo. Os resultados apontam diferenças significativas considerando diferentes áreas analisadas, demonstrando a importância e necessidade da avaliação prévia dessas informações, para que estejam de acordo com o delineamento do objetivo a que se propõe e que se tenha conhecimento de suas possíveis implicações e inferências no produto esperado, como por exemplo, em modelagem hidrológica.

Palavras-Chave – gestão de recursos hídricos; uso e ocupação do solo.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida humana e à vida em diferentes ecossistemas e, por meio do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global, é um elemento essencial para a regulação do clima terrestre, como destacado por Nascimento e Heller (2004). Porém, as mudanças no regime de precipitação, o aumento da temperatura global e do nível do mar, juntamente com as pressões socioeconômicas atuais, são considerados os principais impulsionadores da escassez desse recurso, o

1) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA-UFPR). Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR. julianacjkis@gmail.com

2) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA-UFPR). Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR. cris.dhs@ufpr.br

3) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA-UFPR). Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR. detzel@ufpr.br



que aumenta o desafio de gerir os múltiplos usos da água (PHAN et al., 2019). Dessa forma, é preciso planejar para que seja possível garantir que, agora e futuramente, haja água em quantidade e qualidade necessária para os diversos usos, o que vai ao encontro das demandas e reflexões dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (1987).

Nesse contexto, enfatiza-se a importância de a geração atual planejar as necessidades de água da próxima geração, tendo relevância a utilização da chamada Modelagem Construtiva, a qual incorpora diversas perspectivas e objetivos de uma visão compartilhada da gestão das águas (Balchin, 1960 apud Reed e Kasprzyk, 2009). Tal conceito de modelagem tem uma abordagem mais abrangente que a dos modelos hidrológicos frequentemente utilizados, principalmente frente às preocupações atuais como as mudanças climáticas, alterações nos padrões de usos e ocupação da terra, e o aumento da população.

No Brasil, a gestão e o planejamento dos recursos hídricos são regidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a qual foi instituída pela Lei nº 9.433/97 (BRASIL, 1997). Para atingir seus objetivos, são previstos seis instrumentos de gestão, dentre os quais os Planos de Recursos Hídricos possuem um papel central e estratégico no planejamento dos diferentes usos da água, principalmente na escala de bacias hidrográficas (ANA, 2021a). No conteúdo mínimo desse instrumento, disposto tanto na PNRH como na Resolução CNRH nº 145/2012 (MMA/CNRH, 2012), que trata especificamente dos Planos de Bacia, é estabelecida a necessidade da estimativa da disponibilidade hídrica para a realização do balanço com as demandas, possibilitando a identificação de conflitos pelo uso de água – informação esta que é essencial para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos.

De acordo com Cruz e Tucci (2008), a disponibilidade hídrica consiste na parcela da água que se tem disponível para utilização pela sociedade em seu desenvolvimento, considerando ainda que parte dela é necessária para a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos e aspectos ambientais. A questão da disponibilidade abordada a partir da caracterização de curvas de permanência, apesar de limitações e incertezas quanto a caracterização de sua série histórica, é, de fato, uma forma relevante de estabelecimento de garantias para estratégias de enquadramento e de outorga de usos (CRUZ, 2001).

Porém, Cruz e Tucci (2008) ressaltam, ainda, que é questionável a escolha de uma função que represente a disponibilidade hídrica em virtude da capacidade de representação dos processos físicos e ambientais que envolvem o ciclo hidrológico, bem como que a disponibilidade está condicionada às variáveis que podem interferir no hidrograma, como as mudanças climáticas e o uso e ocupação do solo. Essas variáveis, por sua vez, têm sido alvo de diversos estudos recentes na área da hidrologia, como de Zhang et al. (2020), Aghsaei et al. (2020), Marhaento, Booij e Hoekstra (2018) e Wu et al. (2020). Essas pesquisas apontam que os impactos das atividades humanas no uso do solo sobrepuseram os das mudanças climáticas no escoamento da bacia de estudo, demonstrando a importância de se considerar as variações do padrão de ocupação do solo nas modelagens hidrológicas.

Para simular os processos físicos do ciclo hidrológico de maneira mais aproximada da realidade das bacias hidrográficas é que foram desenvolvidos os modelos hidrológicos, os quais ainda auxiliam a suprir a escassez de dados hidrológicos (TUCCI, 2005). Contudo, como indicado por Machado (2002), a principal limitação dos modelos hidrológicos consiste na dificuldade de se trabalhar com um grande número de dados que caracterizam a heterogeneidade dos sistemas naturais, mesmo com os modelos de parâmetros distribuídos, sendo tal dificuldade agravada pela complexidade decorrente da manipulação desse volume grande de dados, tanto de natureza espacial ou não. Nesse sentido, o autor destaca a vantagem de se utilizar os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) acoplados aos modelos hidrológicos, os quais permitem a geração de um banco de dados que funciona como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos.



Dessa forma, além das variáveis hidrológicas propriamente ditas, seria possível a realização de previsões considerando, dentre outros, resultados decorrentes de mudanças no uso e ocupação do solo e no clima, servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (SANTOS et al., 2006).

O presente trabalho apresenta uma reflexão sobre diferentes bases de dados de uso e ocupação do solo frente a implementação de um modelo hidrológico georreferenciado, e as possíveis incertezas associadas à disponibilidade hídrica para a gestão de recursos hídricos, sendo a Bacia do Rio Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba, a área para o estudo de caso.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia do Rio Iguaçu (Figura 1), é a maior do estado do Paraná, com cerca de 70 mil km², dos quais 80% encontram-se em território paranaense, 17% no estado de Santa Catarina, e 3% em domínio argentino. Nela, habitam 4,5 milhões de pessoas, o que representa quase metade da população total do estado do Paraná. Consequentemente, o abastecimento público caracteriza o maior consumidor das águas da bacia, representando pouco mais de 80% da demanda de recursos hídricos na região, seguido do setor industrial, com 10%. As nascentes do Rio Iguaçu originam-se no Planalto de Curitiba, próximas à Serra do Mar, seguindo um curso de 1.320 km através dos três planaltos paranaenses, até seu desague no Rio Paraná (PARANÁ, 2021).

Figura 1 - Bacia do Rio Iguaçu: a área de estudo, com destaque para a Região Metropolitana (RM) de Curitiba e municípios com mais de 30.000 habitantes



Fonte: elaboração própria com dados de Fernandes et. al (s.d.) e Google Earth (2023).

A região do Alto Iguaçu é considerada uma das bacias mais relevantes do Paraná, visto sua importância política e econômica, já que nela se localiza a capital do estado e por ser o principal manancial de abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba. Nessa área há uma grande concentração de população, com significativa atividade industrial, comercial e de serviços, enquanto na região do Médio e do Baixo Iguaçu predomina a atividade agropecuária, destacando-se a soja e trigo como principais culturas, além de pastagens (PARANÁ, 2021).

Segundo ANA (2021a), uma parte da Bacia Hidrográfica do Paraná, a qual inclui a Bacia do Rio Iguaçu, registrou períodos úmidos entre os anos de 2016 e 2017, cenário este diferente do identificado a partir de 2018, em que houve registro de seca na região. Tal situação gerou os estudos apresentados na Nota Técnica Conjunta nº 3/2021/SRE/SOE/SFI/SPR/SGH (ANA, 2021b), a qual recomendou a emissão pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) da Declaração de



situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná, que foi instituída posteriormente por meio da Resolução nº 77/2021 (ANA, 2021c). Segundo a referida Nota Técnica, os usos mais afetados seriam os não consuntivos, como lazer e turismo, navegação e geração hidrelétrica, sendo que, para este último, foi previsto o impacto para o atendimento do Sistema Interligado Nacional (SIN), o que foi concretizado na recente crise energética do Brasil que culminou na situação de escassez hídrica verificada também em outras bacias do país.

As análises foram realizadas tanto considerando a bacia como um todo, como também as sub-bacias do Projeto Iguaçu (Fernandes et. al, s.d.), que podem ser visualizadas na Figura 2, para um melhor detalhamento das informações.

Figura 2 - Sub-bacias do Projeto Iguaçu



Fonte: adaptado de Fernandes et. al (s.d.).

Bases de dados de uso e ocupação do solo

Sabendo-se das consequentes implicações que o uso e ocupação do solo pode ter na estimativa da disponibilidade hídrica, para que pudesse ser realizada uma análise comparativa e detalhamentos na bacia hidrográfica estudada, foram obtidos os dados de uso e ocupação do solo de diferentes fontes, que variam na abrangência das informações disponibilizadas e na resolução desses dados. Assim, selecionou-se as seguintes fontes:

- Projeto GlobCover da *European Space Agency* (ESA), que, em parceria com a *Université Catholique de Louvain* (ARINO et al., 2012), desenvolveu uma base de uso e ocupação do solo com resolução de 400m e abrangência global, tendo como referência o ano de 2009;
- Projeto Mapbiomas (MAPBIOMAS, 2022), desenvolvido por uma rede colaborativa de especialistas em sensoriamento remoto e mapeamento de vegetação de ONGs, universidades e startups de tecnologia, com resolução de 90 m e abrangendo o território brasileiro. Por consistir numa base de dados atualizada anualmente, com informações a partir de 1985, foram escolhidos os anos de referência de 2009 e 2021, para comparação com o Projeto GlobCover e possibilitar uma análise da mudança do uso e ocupação do solo ocorrida nesses doze anos;
- Ipardes/ITCG (2002) para 2001, abrangendo o estado do Paraná e que não possui informação de resolução; e
- Projeto Multissetorial para o Desenvolvimento do Paraná (ITCG, 2012), tendo 2012 como ano de referência, 2 m de resolução e também abrangendo o Paraná.

Estes dados foram recortados e processados em ferramenta SIG, permitindo que fossem calculadas as áreas de cada classificação de usos para a área de estudo, sendo, ainda, consolidadas essas classes de forma a viabilizar a comparação entre as diferentes fontes.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparativo das diferentes informações de uso e ocupação do solo

O resultado da consolidação da classificação de cada uma das diferentes bases de uso e ocupação do solo em uma classe adaptada pode ser verificada no Quadro 1, de modo que foram obtidas nove classes finais. Essas novas classes permitiram que fossem comparados os dados das diferentes fontes, sendo essa comparação apresentada para toda a extensão brasileira da bacia na Figura 3, na qual é possível verificar que o uso e ocupação da base de dados do IPARDES/ICTG (2002) é a que mais difere dentre as demais, atribuindo 80% do território da bacia para a atividade agrícola, enquanto esse valor fica em torno de 30% em todas as demais fontes. Além disso, tal mapeamento não identificou nenhuma parcela de área urbana na bacia, o que pode ser em decorrência de uma baixa resolução das imagens que o originaram.

Quadro 1 - Consolidação das diferentes classes de uso e ocupação do solo

Classe adaptada	Classes originais das fontes			
	Mapbiomas	GlobCover	Ipardes/ICTG	ICTG
Agricultura	Agricultura	Terras cultivadas de sequeiro	Agricultura	Culturas de ciclo curto (milho, trigo, soja, tubérculos e hortaliças).
	Algodão			
	Arroz			
	Cafê			
	Cana			
	Citrus	Mosaico de agricultura (50-70%)/vegetação (pastagem, arbustos, floresta) (20-50%)		Frutíferas perenes (Cafê, Seringueira, Banana).
	Lavoura Perene			
	Lavoura Temporária			
	Outras Lavouras Perenes			
	Outras Lavouras Temporárias			
Soja				
Área não vegetada	Afloramento Rochoso	Área descoberta	-	Áreas sem vegetação, podendo ser ocupada por mineração, exploração de jazidas, lavras, extração de areia
	Mineração			
	Outras Áreas não-Vegetadas			
	Praia, Duna e Areal			
Área urbana	Área Urbanizada	Superfície artificial e áreas associadas (Áreas urbanas>50%)	-	Edificações e sistema viário, metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados

Classe adaptada	Classes originais das fontes			
	Mapbiomas	GlobCover	Ipardes/ICTG	ICTG
Corpo d'água	Aquicultura	Corpos d'água	Hidrografia	Rios de margem dupla, lagos, lagoas, barragens, represas, canais naturais ou artificiais, tanques d'água
	Rio, Lago e Oceano			
Floresta	Formação Florestal	Floresta latifoliada perene ou semi-decídua (>5m) - densa à esparsa (>15%)	Cobertura Florestal	Floresta Estacional Semi-Decidual; Floresta Ombrófila Mista; Floresta Ombrófila Densa, Aluviais, Submontana, Montana e Altomontana
	Formação Savânica	Floresta latifoliada decídua (>5m) - densa (>40%)		
	Mangue	Floresta latifoliada decídua/ Floresta lenhosa (>5m) - esparsa (15-40%)		
	Restinga Arborizada			
Formação natural	Apicum	Arbusto (folha agulhada e latifoliada, perene ou decídua) (<5m) - densa à esparsa (>15%)	Reflorestamento	Espécie Nativa (Araucaria angustifolia) e Espécies Exótica/Silvicultura (Pinus spp e Eucalyptus spp) e Sistemas Agroflorestais.
	Campo Alagado e Área Pantanosa			
	Formação Campestre	Vegetação Esparsa		Formação pioneira com influência fluvial e/ou lacustre, com - comunidades arbóreas, arbustivas e herbáceas
	Outras Formações não Florestais			
	Restinga Herbácea	Pastagem ou vegetação lenhosa em solos regularmente alagados ou inundados (Água fresca, salobra ou salgada) - densa à esparsa (>15%)		
	Silvicultura			
Mosaico	Mosaico de Usos	-	Uso Misto	-
Pastagem	Pastagem	Mosaico de vegetação (pastagem, arbustos, floresta) (50-70%)/ Agricultura (20-50%)	Pastagem e Campo	Pecuária/Estepe Gramíneo-Lenhosa, Savana Arborizada, Parque, Refúgios Ecológicos
		Mosaico de Florestas e vegetação arbustiva (50-70%)/Pastagem (20-50%)		
		Mosaico de Pastagem (50- 70%)/Florestas e vegetação arbustiva (20-50%)		

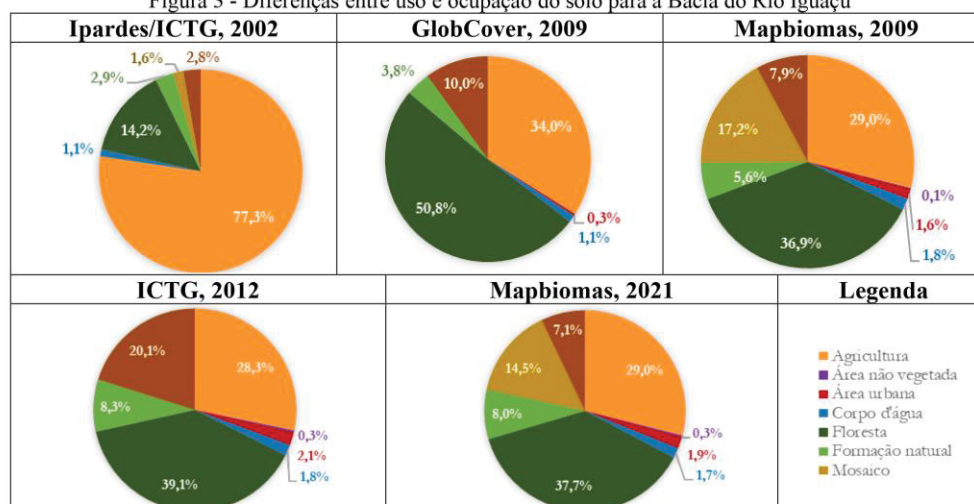
Fonte: adaptado de Arino et al. (2012), Mapbiomas (2022), Ipardes/ITCG (2002) e ICTG (2012)



Quanto às demais fontes, verifica-se, ainda na Figura 3, que as classificações do Mapbiomas (2022) não demonstram grande alteração de padrões do uso e ocupação do solo na bacia entre os anos de 2009 e 2021, sendo as porcentagens de cada uso muito semelhantes, ainda, às porcentagens do Projeto Multissetorial para o Desenvolvimento do Paraná (ITCG, 2012), principalmente ao considerar as áreas de mosaico de agricultura e pastagem do Mapbiomas como sendo exclusivamente classificadas como pastagem.

Já a classificação do projeto GlobCover (ARINO et al., 2012), embora apresente parcelas semelhantes tanto ao Mapbiomas quanto ao Projeto Multissetorial para alguns usos, como a agricultura, verificam-se diferenças expressivas em classes de cobertura como florestas, pastagem e até mesmo a área urbana, cuja abrangência na base do projeto GlobCover em 2009 representa apenas 16% do total identificado pelo Mapbiomas no mesmo ano de referência. Tais divergências podem ter impacto significativo nos resultados de modelagem hidrológica que utilize essas informações, como por exemplo nos modelos SWAT e MGB-IPH, que utilizam a metodologia de Unidades de Resposta Hidrológica em seu processamento, de modo que se faz necessário estar ciente dessa questão quando forem realizadas as análises dos seus resultados.

Figura 3 - Diferenças entre uso e ocupação do solo para a Bacia do Rio Iguaçu



Fonte: adaptado de Arino et al. (2012), Mapbiomas (2022), IPARDES/ITCG (2002) e ICTG (2012)

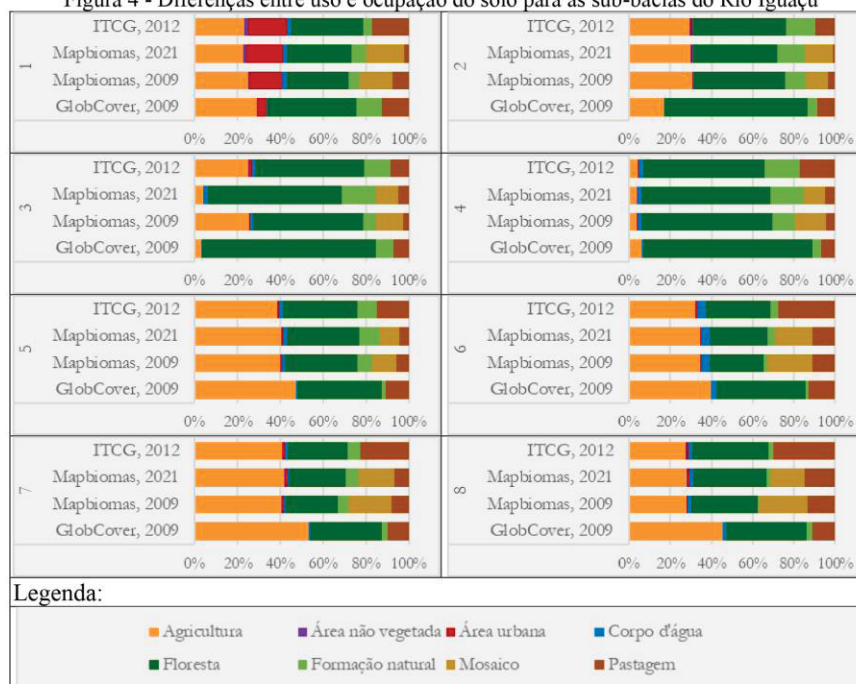
Ademais, também foram examinadas as parcelas de coberturas de uso e ocupação de solo inseridas em cada sub-bacia, as quais são apresentadas na Figura 4, onde optou-se por ocultar os resultados do IPARDES/ITCG (2002) devido sua grande discrepância já identificada na avaliação da bacia como um todo com as demais fontes.

Assim, ao analisar menores áreas, é possível constatar que a sub-bacia 4, entre as estações Barra do Espingarda e Jusante Foz do Itatim, possui a maior semelhança das parcelas de classes de uso e ocupação entre as fontes analisadas, enquanto as sub-bacias 5, 6, 7 e 8 mantém equivalência entre as classes, com exceção da agricultura, que tem maior destaque segundo o projeto GlobCover. Essa mesma fonte apresenta a menor área urbana para a sub-bacia 1, onde está localizada a Região Metropolitana de Curitiba e, portanto, possui relevante parcela de sua ocupação nesta classe, de maneira que novamente o projeto GlobCover se distingue das demais fontes.

Curiosamente, a sub-bacia 3, entre Fluvópolis e Barra do Espingarda, apresenta grande diminuição da sua área agrícola, na ordem de 20%, e aumento da floresta e formação natural entre 2009 e 2021, 11% e 10% respectivamente, segundo o Mapbiomas (2022). Ao verificar suas classes

originais, identifica-se que tal variação pode ser decorrente da redução das áreas de lavouras temporárias não especificadas enquanto registrou-se crescimento da silvicultura nesse período.

Figura 4 - Diferenças entre uso e ocupação do solo para as sub-bacias do Rio Iguaçu



Fonte: adaptado de Arino et al. (2012), Mapbiomas (2022), Ipardes/ITCG (2002) e ICTG (2012)

CONCLUSÕES

A avaliação do uso e ocupação do solo de diferentes fontes permitiu constatar grandes diferenças entre os resultados, ainda que considerado um mesmo ano de referência. Essas diferenças ficam ainda mais evidentes quando analisadas áreas menores, como no caso das sub-bacias apresentadas. Isso evidencia a necessidade da escolha adequada da resolução das informações a serem processadas na modelagem hidrológica, conforme a escala em que se pretende analisar, uma vez que dados generalizados podem gerar resultados imprecisos, acarretando maior incerteza no processo de modelagem. Por outro lado, dados muito detalhados para áreas grandes requerem um esforço computacional maior, o que pode resultar em um maior tempo de processamento, mas que nem sempre significará resultados mais precisos.

A escolha adequada dos dados de entrada, como o uso e ocupação do solo, pode ter implicações importantes na modelagem hidrológica, desde os esforços necessários para obtenção dos resultados como consequência de bases desnecessariamente detalhadas, podendo gerar maiores custos financeiros e temporais, até em valores de disponibilidade hídrica que não representem a realidade da região analisada.

Quando, ainda, o propósito da modelagem for a gestão de recursos hídricos, tal escolha pode inferir no cumprimento de prazos estipulados para os estudos, no orçamento estabelecido para o mesmo, mas, principalmente, em problemas de ordem gerencial e que afetem a bacia como um todo, como a concessão de outorgas de uso de água menores que podem limitar o crescimento econômico



e expansão da região, ou, em caso de outorgas acima do que o sistema suporte, uma crise hídrica que afete todos os sistemas dependentes dessa bacia hidrográfica.

Por fim, como já citado, a modelagem hidrológica associada ao SIG proporciona diversas vantagens para a gestão dos recursos hídricos. Contudo, os resultados do presente estudo demonstraram a necessidade de que o operador tenha conhecimento não apenas do modelo utilizado, mas que também é preciso cautela na escolha da base de dados e avalie se estas estão de acordo com o detalhamento do objetivo a que se propõe, considerando as possíveis implicações e inferências que tais informações poderão gerar em seus resultados.

REFERÊNCIAS

- AGHSAEI, H. et al. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. *Science of the Total Environment*, v. 712, p. 136449, 2020.
- ALVES, M.E.; MEYER, A.O.; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D. 2020. Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico. Hidrologia de Grande Escala (HGE), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>>. Acessado em ago. 2022.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021. 2021a. Disponível em <<http://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io>>. Acessado em nov. 2022.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. Nota Técnica Conjunta nº 3/2021/SRE/SOE/SFI/SPR/SGH. Brasília, maio de 2021. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventos-criticos/salas-de-acompanhamento/parana/NTC_3_2021_ANA.pdf>. Acessado em nov. 2022.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. Resolução ANA nº 77 de 1º de junho de 2021. Declara situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná. 2021c. apresentacao>. Acesso em nov./2022.
- ARINO, O.; RAMOS PEREZ, J. J.; KALOGIROU, V.; BONTEMPS, S.; DEFOURNY, P.; VAN BOGAERT, E. Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009). © European Space Agency (ESA) & Université Catholique de Louvain (UCL), doi:10.1594/PANGAEA.787668. 2012.
- BRASIL. Lei 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. Brasília: 1997.
- CRUZ, J. C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2001. 199p.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. 2008. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*. V. 13. Jan/Mar 2008, p.111-124.
- FERNANDES et. al. Projeto Iguaçu: Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos. Bases de dados. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (PPGERHA/UFPR). s.d. Disponível em: <<https://sites.google.com/view/projetoiguau/home?authuser=0>>. Acesso em 08/2022.



GOOGLE EARTH. Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu. Imagem Landsat/Copérnicus. 2023.

IPARDES/ITCG. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social; Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Mapa de Uso do Solo - 2001/2002. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/uso_solo_2001.zip>. Acessado em out. 2022.

ITCG. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia. Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra - Ano de referência: 2012. Instituto Água e Terra. Governo do Paraná. Disponível em: <ftp://geo_iat:geo_iat@200.189.114.112>. Acessado em out. 2022.

MACHADO R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese de doutorado de agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. São Paulo, 2002.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas – Coleção 7.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, para os anos de 2009 e 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em out. 2022.

MARHAENTO, H.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrological sciences journal*, v. 63, n. 9, p. 1368-1385, 2018.

MMA/CNRH. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Brasília, 2012.

NASCIMENTO, N. de O.; HELLER, L. Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. *Eng. Sanit. Ambient.: Artigos Técnicos*. Vol.10 - Nº 1 - jan/mar 2005, 36-48.

ONU. Organização das Nações Unidas. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. Dezembro de 1987.

PARANÁ. O Paraná e suas águas: águas no planeta Terra, no Brasil e no Paraná. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. 2021. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2021-10/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_PR_e_suas_Aguas.pdf>. Acessado em nov. 2022.

PHAN, T. D. et al. An integrated approach for predicting the occurrence probability of an elusive species: the Southwest China serow. *Wildlife Research*, v. 46, n. 5, p. 386-397, 2019.

REED, P.; KASPRZYK, J. Water Resources Management: The Myth, the Wicked, and the Future. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Nov/Dez, 2009. 411-413p.

SANTOS, S. et al. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. XII Congresso Nacional de Tecnologias de La Información Geográfica. Granada, 2006. “El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas”. p. 465-479.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2ª edição – Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2005. 678p.

WU, L. et al. Evaluating the contributions of climate change and human activities to runoff in typical semi-arid area, China. *Journal of Hydrology*, v. 590, p. 125555, 2020.

ZHANG, H. et al. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, v. 585, p. 124822, 2020.