



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

**EFEITO DAS INCERTEZAS DA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA
SUPERFICIAL POR MODELAGEM HIDROLÓGICA NA APLICAÇÃO DA
OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS**

ÚDSON RENAN DOS SANTOS SILVA

SALVADOR
2019

ÚDSON RENAN DOS SANTOS SILVA

**EFEITO DAS INCERTEZAS DA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA
SUPERFICIAL POR MODELAGEM HIDROLÓGICA NA APLICAÇÃO DA
OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Andrea Sousa Fontes

Coorientadora: Prof^a Dr^a. Yvonilde Dantas Pinto Medeiros

SALVADOR

2019

S586 Silva, Udson Renan dos Santos Silva.
Efeitos das incertezas na estimativa da disponibilidade hídrica superficial por modelagem hidrológica na aplicação da outorga de direito de uso de recursos hídricos / Udson Renan dos Santos Silva. -- Salvador, 2019.
147 f. : il

Orientadora: Profª Drª Andrea Sousa Fontes.

Coorientadora: Profª Drª Yvonilde Dantas Pinto Medeiros

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2019.

1. Incertezas hidrológicas. 2. Disponibilidade hídrica. 3. SWAT. 4. SUFI-2. 5. Gestão da outorga. I. Fontes, Andrea Sousa. II. Medeiros, Yvonilde Dantas Pinto, III. Título

CDD: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

Údson Renan dos Santos Silva

Efeitos das incertezas da estimativa da disponibilidade hídrica superficial por modelagem hidrológica na aplicação da outorga de direito de uso de recursos hídricos

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a Andrea Sousa Fontes _____
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^a. Dr^a Yvonilde Dantas Pinto Medeiros _____
Universidade Federal da Bahia

Prof^a. Dr^a Iara Brandão de Oliveira _____
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo _____
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Salvador, 29 de abril de 2019

AGRADECIMENTOS

À professora orientadora Dr^a Andrea Fontes por me receber muitíssimo bem na pós-graduação, por flexibilizar os horários (que eram bem cedos) que me permitiram conciliar as atividades profissionais e acadêmicas, pelas orientações, aulas, críticas, sugestões e elogios durante todo o processo que me favoreceram crescer intelectualmente com a pesquisa. Fica minha admiração e feliz pela convivência e apoio!

À professora coorientadora Dr^a Yvonilde Medeiros, que me recebeu de braços abertos no meu retorno à Universidade sendo durante todo o período atenciosa e flexível, pelas aulas no curso, e pelas excelentes contribuições, questionamentos e ponderações que foram aos poucos moldando a pesquisa. Fica meu inestimável agradecimento e satisfação por suas orientações e da professora Andrea. Grato pela parceria de ambas!

À prof. Dr^a Karla Esquerre pelos elogios e valiosas contribuições ao projeto de dissertação, que ajudaram a direcionar várias temáticas vinculadas à pesquisa;

Aos professores Dr. Jorge Rabelo e Dr^a Iara Brandão pela disposição, atenção e valiosos comentários na etapa final no seminário de pesquisa;

Aos professores do MAASA (Dr^a Viviana Zanta, Dr^a Márcia Marinho, Dr. Severino Agra e Dr. Lafayette Luz) pelos ensinamentos para vivência no universo da pesquisa e que me ajudaram na minha formação como pesquisador;

À Everton Souza e ao Me. Erick Sebadelhe pelas dicas, esclarecimento de dúvidas e discussões para operacionalização do modelo SWAT;

Aos ex-colegas da empresa Geohidro, especialmente às coordenadoras (Andrea Marquesini e Daniela Maltez) pelas oportunidades e por me permitir conciliar os estudos e trabalho durante o período de curso;

Ao ex-professor da UFBA e amigo Jorge Eurico por me inserir no universo da pesquisa na época da graduação, pela amizade, por acompanhar minha vida acadêmica e profissional, e oportunidades oferecidas;

Aos meus pais, Edvaldo e Ilza, pela suas histórias de vida e por seus exemplos de persistência para vencer as adversidades da vida, que me motivaram a seguir até o fim e por compreenderem as minhas ausências. Minha gratidão pelas orações e por se fazerem presentes em “energia” e “pensamento”;

À minha irmã Taís, por se fazer presente em momentos felizes e difíceis, e pelo companheirismo, que tornam minha vida mais leve diante de tantas responsabilidades;

Aos meus amigos e familiares por se fazerem presentes e compreenderem minhas ausências nos últimos anos devido às atividades do curso;

À Deus por me guiar, fortalecer e me tornar persistente diante de todos os desafios que me fizeram crescer humanamente e profissionalmente durante os últimos anos.

À todos meu inestimável agradecimento e felicidade em compartilhar o fechamento dessa etapa de minha vida!

*Os homens preferem geralmente o engano,
que os tranquiliza, à incerteza, que os
incomoda.*

Marquês de Maricá

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do Autor: Údson Renan dos Santos Silva

Assinatura do autor: 

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador – BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 – 4º andar, Federação – Salvador-BA

CEP. 40210-630

E-mail: udson_renan@hotmail.com

RESUMO

A quantificação da disponibilidade hídrica para fins de aplicação da outorga de direito de uso de recursos hídricos a partir de modelagem matemática chuva-vazão envolve incertezas que podem influenciar na gestão das águas. As incertezas dos dados de entrada, das variáveis climáticas, dos valores dos parâmetros e da estrutura dos modelos usualmente são desprezadas, sendo necessárias incluí-las na gestão para a tomada de decisão. O objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos da inserção da análise de incertezas da modelagem hidrológica na estimativa da disponibilidade hídrica outorgável numa sub-bacia do Alto Rio Paraguaçu, Ba. A metodologia aplicada utiliza o modelo hidrológico chuva-vazão *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para a extensão de séries e a simulação de vazões com incertezas. Foram quantificadas as incertezas de medição dos dados de: precipitação diária e de variáveis climáticas (precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar), a partir das quais foram geradas séries sintéticas de dados e realizadas simulações. As incertezas decorrentes dos valores dos parâmetros do modelo (CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, SOL_AWC, ESCO, GW_REVAP_REVAPMN, LAT_TTIME e SOL_Z) foram obtidas a partir da autocalibração pelo método hipercubo latino utilizando-se o algoritmo SUFI-2 do *software SWAT Calibration and Uncertainty Programs*, obtendo-se faixas de valores máximos, médios e mínimos que foram utilizadas para simulações. A partir das séries de vazões simuladas foram construídas curvas de permanência a nível diário para obtenção da vazão de referência $Q_{90\%}$, representativa da disponibilidade hídrica, no qual 80% da vazão corresponde à parcela outorgável. Essas vazões foram posteriormente comparadas com a do sistema de gerenciamento de outorgas do INEMA utilizadas na área de estudo. Os resultados obtidos indicam que a consideração das incertezas de medição da precipitação, das variáveis climáticas e dos valores dos parâmetros do modelo resultaram na simulação de faixas de vazões $Q_{90\%}$ que correspondem em subestimativas de 16 a 95% das vazões utilizadas pelo INEMA para outorga. As vazões $Q_{90\%}$ obtidas com as simulações com a consideração das incertezas citadas, variaram entre 0,20 a 3,38 m³/s, resultando em subestimativas. As incertezas dos valores dos parâmetros foram mais relevantes registrando-se diferenças entre 58% a 95% em relação às vazões do INEMA. As faixas de vazões obtidas nas simulações restringem os usos para outorga, pois registram valores de vazões inferiores a $Q_{100\%}$ e possuem probabilidade de ocorrência de 85 a 100% ao nível diário. Para simulação de vazões a nível diário com fins de outorga não recomenda-se a utilização do modelo SWAT na área de estudo. Contudo, as análises efetuadas demonstram que as incertezas de medição decorrentes dos dados de precipitação e de variáveis climáticas não são desprezíveis, influenciam nas vazões outorgáveis e necessitam ser consideradas na estimativa da disponibilidade hídrica outorgável.

Palavras-chave: Incertezas hidrológicas. Disponibilidade hídrica. SWAT. SUFI-2. Gestão da outorga.

ABSTRACT

The quantification of water availability for the purposes of applying the right to use water resources from rainfall-flow mathematical modeling involves uncertainties that may influence water management. The uncertainties of input data, climatic variables, parameter values and model structure are usually neglected, and it is necessary to include them in management for decision making. The objective of this research was to evaluate the effects of the insertion of uncertainty analysis of the hydrological modeling in the estimation of water availability in a sub-basin of the Upper Rio Paraguaçu, Ba. The applied methodology uses the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) for the extension of series and the simulation of flows with uncertainties. The measurement uncertainties of daily precipitation and climatic variables (precipitation, maximum and minimum temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation) were quantified, from which synthetic data series were generated and simulations were performed. The uncertainties arising from the values of the model parameters (CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, SOL_AWC, ESCO, GW_REVAP_REVAPMN, LAT_TTIME and SOL_Z) were obtained from the autocalibration by the Latin hypercube method using the SWAT Calibration software SUFI-2 algorithm and Uncertainty Programs, obtaining ranges of maximum, average and minimum values that were used for simulations. From the series of simulated flows, daily maintenance curves were constructed to obtain the reference flow rate $Q_{90\%}$, representative of the water availability, in which 80% of the flow corresponds to the installable part. These flows were later compared to the INEMA grant management system used in the study area. The results indicate that the uncertainties in the measurement of precipitation, climatic variables and model parameter values resulted in the simulation of $Q_{90\%}$ flow rates, which correspond to underestimates of 16 to 95% of the flows used by INEMA for granting. The $Q_{90\%}$ flows obtained with the simulations with the consideration of the mentioned uncertainties ranged from 0,20 to 3,38 m³/s, resulting in underestimates. The uncertainties of the parameter values were more relevant, registering differences between 58% and 95% in relation to the INEMA flows. The flow rates obtained in the simulations restrict the uses for granting, since they register flow values lower than $Q_{100\%}$ and have a probability of occurrence of 85 to 100% at the daily level. For the simulation of daily flows for granting purposes it is not recommended to use the SWAT model in the study area. However, the analyzes carried out show that the measurement uncertainties due to precipitation data and climatic variables are not negligible, they influence the flow rates and need to be considered in the estimation of the water availability.

Keywords: Uncertainties hydrological. Water availability. SWAT. SUFI-2. Water permit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Integração entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos da PNRH	46
Figura 2 – Principais fontes de incertezas no uso de modelos hidrológicos chuva-vazão.....	54
Figura 3 - Ilustração conceitual da análise de incertezas pelo algoritmo SUFI-2	59
Figura 4 – Bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e área de estudo.....	64
Figura 5 – Fluxograma metodológico da pesquisa.....	67
Figura 6 – Redelimitação dos tipos de solos na área de estudo	71
Figura 7 – Tipos e usos do solos reclassificados na área de estudo	73
Figura 8 – Delimitação das sub-bacias/UHRs na área de estudo	83
Figura 9 – Resultados da análise de consistência pelo Método Dupla Massa (1960-1989)	90
Figura 10 – Variação gráfica dos anos úmidos e secos no período de 1960-1989 por estação.....	94
Figura 11 – Variação média da relação $P_{total}/P_{médio}$ regional (1960-1989)	94
Figura 12 – Delimitação das áreas de abrangência das estações pluviométricas	95
Figura 13 – Delimitação dos períodos seco e úmido do ano hidrológico na região...97	
Figura 14 – Vazões medidas na estação Porto (1936-2013)	99
Figura 15 – Vazões mínimas medidas na estação Porto (1936-2013) - $< 20 \text{ m}^3/\text{s}$..	100
Figura 16 – Faixa de incertezas da precipitação na estação Lençóis	101
Figura 17 – Faixa de incerteza da precipitação na estação Itaberaba	101
Figura 18 - Faixa de incertezas da temperatura máxima na estação Lençóis.....	101
Figura 19 - Faixa de incertezas da temperatura máxima na estação Itaberaba	101
Figura 20 –Faixa de incertezas da temperatura mínima na estação Lençóis.....	102
Figura 21- Faixa de incertezas da temperatura mínima na estação Itaberaba.....	102
Figura 22 - Faixa de incertezas da umidade relativa na estação Lençóis	102

Figura 23 - Faixa de incertezas da umidade relativa na estação Itaberaba.....	102
Figura 24 - Faixa de incertezas da radiação solar na estação Lençóis	103
Figura 25 - Faixa de incertezas da radiação solar na estação Itaberaba.....	103
Figura 26 - Faixa de incertezas da velocidade do vento na estação Lençóis	103
Figura 27 - Faixa de incertezas da velocidade do vento na estação Itaberaba	103
Figura 28 – Variação do PBIAS a cada autocalibração da 2ª iteração	107
Figura 29 – Simulações da 2ª iteração dentro da faixa satisfatória do PBIAS	107
Figura 30 – Curvas de permanência da 1ª iteração.....	107
Figura 31 – Curva de permanência da 1ª iteração (ajuste das mínimas)	107
Figura 32 – Curvas de permanência da 2ª iteração.....	108
Figura 33 – Curvas de permanência da 2ª iteração (ajuste das mínimas).....	108
Figura 34 – Curvas de permanência da 3ª iteração.....	108
Figura 35 – Curvas de permanência da 3ª iteração (ajuste das mínimas).....	108
Figura 36 – Curva de permanência da 4ª iteração.....	108
Figura 37 – Curva de permanência da 4ª iteração (ajuste das mínimas)	108
Figura 38 – Hidrograma de vazões observadas e calibradas da 2ª iteração (1963-1972).....	109
Figura 39 - Vazões médias mensais observadas e calibradas (1963-1972).....	110
Figura 40- Vazões médias mensais observadas e validadas (1973-1977).....	112
Figura 41 – Comparativo de curvas de permanência (1963-1989).....	115
Figura 42 – Comparativo de curvas de permanência de vazões (vazões mínimas) (1963-1989)	115
Figura 43 – Curvas de permanência com incertezas de medição dos dados de precipitação	117
Figura 44 – Curvas de permanência com incertezas de medição dos dados de precipitação (vazões mínimas)	117

Figura 45 – Curvas de permanência com incertezas de medição das variáveis climáticas.....	118
Figura 46 – Curvas de permanência com incertezas de medição das variáveis climáticas (vazões mínimas)	118
Figura 47 – Curvas de permanência com incertezas (Iteração1).....	121
Figura 48 – Curvas de permanência com incertezas (Iteração 2)	121
Figura 49 - Curvas de permanência com incertezas (Iteração 3).....	121
Figura 50 - Curvas de permanência com incertezas (Iteração 4).....	121
Figura 51 – Hidrograma de vazões observadas e simuladas obtidas na 2º iteração com envoltória de incertezas (1963-1972)	122
Figura 52 – Curva de permanência das vazões mínimas com incertezas (1963-1972)	123
Figura 53 – Curva de permanência com faixas de incertezas dos valores dos parâmetros	124
Figura 54 – Curva de permanência das vazões mínimas com as faixas de incertezas dos valores dos parâmetros	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados gerais da estação pluviométrica selecionada.....	68
Tabela 2 – Dados das estações pluviométricas da região de estudo (1960-1990) ...	69
Tabela 3 - Dados das estações meteorológicas da região de estudo	69
Tabela 4 – Dados de solo da área de estudo.....	70
Tabela 5 – Correspondência entre os solos do SiBCS e da WRB/FAO na área de estudo.....	70
Tabela 6 – Tipos de uso do solo na área de estudo.....	72
Tabela 7 – Reclassificação do tipo de uso e ocupação do solo na bacia.....	72
Tabela 8 – Incertezas quanto a operação de instrumentos meteorológicos.....	78
Tabela 9 – Resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as médias mensais das estações pluviométricas (1960-1989).....	89
Tabela 10 – Valores de Dn obtidos com a aplicação do teste de Kolmogorv Sminorv nas séries de precipitações mensais.....	91
Tabela 11 – Resultados da análise de estacionariedade pelo teste T de comparação de médias.....	92
Tabela 12 – Percentual de anos secos e úmidos por estação pluviométrica no período 1960-1989	93
Tabela 13 – Diferenças percentuais entre os totais mensais observados e totais mensais com incertezas do Tipo B (1960-1989)	97
Tabela 14 – Comparativo das vazões observadas e calibradas (1963-1972) – Calibração manual	105
Tabela 15 – Valores das melhores calibrações (BEST SIM) obtidos na autocalibração com o SUFFI-2	106
Tabela 16 – Comparativo das vazões observadas e calibradas (1963-1972) – calibração automática da 2ª iteração.....	110
Tabela 17 - Vazões médias mensais observadas e calibradas (1963-1972)	111
Tabela 18 – Comparativo das vazões observadas e validadas (1973-1977)	112

Tabela 19 - Vazões médias mensais observadas e validadas (1973-1977).....	113
Tabela 20 – Vazões de referência estendidas da estação Porto (1963-1989)	115
Tabela 21 - Vazões de referência com incertezas de medição dos dados de precipitação (1963-1989).....	117
Tabela 22 - Vazões de referência com faixas de incertezas de medição das variáveis climáticas (1963-1989).....	119
Tabela 23 - Incertezas dos valores dos parâmetros obtidos na autocalibração	120
Tabela 24 – Vazões de referência com faixas de incertezas obtidas na 2ª iteração da autocalibração (1963-1972)	123
Tabela 25 – Valores dos parâmetros do modelo utilizados nas simulações do período de 1963-1989.....	124
Tabela 26 – Vazões de referência obtidas devido as incertezas dos valores dos parâmetros (1963-1989)	125
Tabela 27 – Dados da estação fluviométrica Fértem adotada pelo INEMA para outorga	126
Tabela 28 – Comparativo das vazões $Q_{90\%}$ com a consideração das incertezas de medição da precipitação	128
Tabela 29 – Comparativo das vazões $Q_{90\%}$ com a consideração das incertezas de medição dos parâmetros climáticos.....	129
Tabela 30 – Comparativo das vazões $Q_{90\%}$ com a consideração das incertezas dos valores dos parâmetros	130
Tabela 31 – Resumo das disponibilidades hídricas estimadas e outorgáveis com incertezas	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos modelos hidrológicos	49
Quadro 2 – Experiências envolvendo a abordagem das incertezas na gestão das águas.....	61
Quadro 3 – Critérios para definição de conceitos para os postos fluviométricos quanto a vazões mínimas	77
Quadro 4 - Descrição dos parâmetros climáticos do modelo SWAT	80
Quadro 5 - Descrição dos parâmetros de solos do modelo SWAT	81
Quadro 6 – Parâmetros calibráveis selecionados do modelo SWAT	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA	Fator alfa do fluxo de base (1/dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
AWBM	<i>Australian Water Balance Model</i>
BHAP	Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu
BHP	Bacia hidrográfica do Paraguaçu
CH_N2	Valor de "n" de Manning para o canal principal
CN2	Valor padrão de CN para condição de umidade II usado para a cobertura do solo nas HRUs
DEWPT	Temperatura média de ponto de orvalho diário para cada mês (°C) ou umidade relativa pode ser inserida (%)
DREAM	<i>Differential Evolution Adaptive Metropolis</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GLUE	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
GW_DELAY	Atraso das águas subterrâneas (dias)
GWQMN	Profundidade limiar da água no aquífero raso para que o fluxo de retorno ocorra (mm H ₂ O)
GW_REVAP	Coeficiente "revap" da água subterrânea
HBV	<i>Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning</i>
HYMOD	<i>Hydrological MODel</i>
IAHS	<i>International Association of Hydrological Sciences</i>
IHACRES	<i>Identification of Unit Hydrographs and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow Data</i>
INEMA	Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRA	Índice de Retirada de Água
LAT_TTIME	Tempo de escoamento lateral para contribuição ao rio
MCMC	Monte Carlo via Cadeias de Markov
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MODHAC	Modelo Hidrológico Autocalibrável
PBIAS	Percentual de Tendências

PCPMM	Precipitação total média ou média mensal (mm H ₂ O)
PCPD	Número médio de dias de precipitação no mês
PCPMM	Precipitação total média ou média mensal (mm H ₂ O)
PCPSTD	Desvio padrão para a precipitação diária no mês (mm H ₂ O/dia)
PCPSKW	Coeficiente de inclinação para precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de um dia molhado após um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de um dia molhado após um dia chuvoso no mês
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RADAM	Projeto Radar da Amazônia
BRASIL	
RAINHHNX	Precipitação máxima de 0,5 hora em todo o período de registro por mês (mm H ₂ O)
RCHRG_DP	Fração de percolação do aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade limiar da água no aquífero raso para "revap" ocorrer (mm H ₂ O)
RMS	Região Metropolitana de Salvador
RRMT	<i>Rainfall-runoff modeling toolbox</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIGO	Sistema de Gerenciamento de Controle de Outorga
SIMHYD	<i>Simplified Hydrolog</i>
SLSUBBSN	Comprimento médio do declive (m)
SMHI	<i>Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
SOLARAV	Média da radiação solar diário no mês (MJ/m ² /dia)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da primeira camada de solo (mm H ₂ O/mm do solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada da camada do solo (mm/h)
SOL_Z	Profundidade para baixo da camada do solo (mm)
SUFI-2	<i>Sequential Uncertainty Fitting</i>
SURLAG	Tempo de atraso do escoamento superficial (dias)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWAT CUP	<i>SWAT Calibration and Uncertainty Programs</i>

TMPMX	Média da temperatura máxima diária do ar por mês (°C)
TMPMN	Média da temperatura mínima diária por mês (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão para a temperatura máxima diária do ar no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão para a temperatura mínima diária do ar no mês (°C)
TOPMODEL	<i>Topography-based hydrological model</i>
WGEN	<i>Weather Generator</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WNDV	Velocidade média diária do vento no mês (m/s)

SUMÁRIO

1	Introdução.....	33
2	Objetivos.....	37
2.1	Objetivo geral	37
2.2	Objetivos específicos	37
3	Referencial teórico.....	39
3.1	Disponibilidade hídrica	39
3.1.1	Vazões de referência mínimas	40
3.1.2	Aplicabilidade da disponibilidade hídrica aos instrumentos de gestão das águas 43	
3.1.3	Métodos para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial em cursos d'água.....	46
3.2	Modelos hidrológicos chuva-vazão	49
3.3	Análise de incertezas na modelagem hidrológica chuva vazão	53
3.3.1	Incerteza de medição dos dados hidrológicos.....	54
3.3.2	Incerteza dos valores dos parâmetros do modelo	56
3.4	Experiências de aplicação da análise de incertezas de vazões na gestão das águas.....	59
4	Metodologia.....	63
4.1	Área de estudo.....	63
4.1.1	Características físicas e climáticas da bacia.....	64
4.2	Descrição das etapas metodológicas.....	65
4.2.1	Obtenção e análise de dados físicos e hidroclimatológicos da bacia hidrográfica	67
4.2.2	Análise dos dados pluviométricos e suas incertezas de medição	73
4.2.3	Análise dos dados fluviométricos.....	77
4.2.4	Análise dos dados climatológicos e suas incertezas de medição.....	77

4.2.5	Simulação hidrológica chuva –vazão	79
4.2.6	Quantificação da disponibilidade hídrica a partir dos critérios adotados pelo gestor de outorgas	85
4.2.7	Avaliação do efeito das incertezas da modelagem chuva-vazão na aplicação da outorga	87
5	Resultados e discussões	89
5.1	Análise dos dados das estações pluviométricas e suas incertezas de medição	89
5.1.1	Análise de consistência dos dados pluviométricos	89
5.1.2	Análise da estacionariedade das séries pluviométricas	92
5.1.3	Análise da representatividade hidrológica das séries	92
5.1.4	Análise da representatividade espacial das estações	95
5.1.5	Delimitação dos períodos secos e úmidos	96
5.1.6	Incetezas de medição dos dados pluviométricos diários	97
5.2	Análise dos dados fluviométricos.....	99
5.1	Incetezas de medição dos dados das estações climatológicas.....	100
5.1	Simulação hidrológica chuva-vazão	104
5.1.1	Calibração.....	104
5.1.2	Validação	112
5.1.3	Análise de sensibilidade global dos parâmetros	114
5.1.4	Simulação para extensão da série hidrológica de vazões diárias	114
5.1.5	Simulação com influência da incerteza de medição dos dados de precipitação	116
5.1.6	Simulação com influência da incerteza de medição dos dados climáticos	117
5.1.7	Simulação com influência da incerteza dos valores dos parâmetros ..	119

5.2	Efeito das incertezas na aplicação da outorga de uso de recursos hídricos	126
5.2.1	Disponibilidade hídrica adotada pelo gestor de outorgas	126
5.2.2	Efeito da incerteza de medição dos dados de precipitação	127
5.2.3	Efeito da incerteza de medição dos dados climáticos	129
5.2.4	Efeito da incerteza dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico	130
5.2.5	Síntese dos efeitos das incertezas na aplicação da outorga	131
6	Conclusões.....	135
7	Referências.....	141

1 INTRODUÇÃO

Na gestão das águas, a quantificação da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica constitui-se em informação essencial, o que a torna objeto de investigações recorrentes objetivando maior precisão na aplicação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, dentre eles a outorga de direito de uso de recursos hídricos.

Em situações de crise hídrica, nas quais a demanda é superior à disponibilidade, como a que se registra desde 2012 em diversas regiões do Brasil, observam-se prejuízos em diversos setores usuários, principalmente abastecimento humano, o que motiva o maior uso racional da água (ANA, 2017). Logo, emerge a discussão quanto aos reais volumes de água disponíveis, principalmente nos mananciais superficiais, como forma de melhor estimar e gerir os limitados recursos hídricos disponíveis.

Contudo, a quantificação das águas superficiais depara-se com a limitação de dados hidrológicos (quantidade e qualidade), resultando na utilização de técnicas de extrapolação ou transposição de informações entre bacias hidrográficas, a partir de métodos empíricos, estatísticos ou modelos matemáticos. Nesse contexto existem as incertezas, que referem-se aos erros dos dados, modelos e outros, a serem considerados na estimativa do risco, sendo este relacionado à probabilidade que pretende-se assumir para o desenvolvimento de uma ação, plano ou projeto. Contudo, em geral os mesmos são desconsiderados para fins de aplicação de instrumentos de gestão como a outorga.

Especificamente, a inclusão da análise das incertezas na hidrologia trata-se de uma questão ética, havendo a necessidade de que estas sejam melhor compreendidas e reduzidas, evitando a negligência na propagação de erros e na geração de estimativas irreais (MANZIONE, 2014). Em virtude da relevância dessa abordagem a *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS) recomendou como necessidade de pesquisa para a década 2013-2022, compreender e lidar com a gestão das incertezas nas estimativas e previsões hidrometeorológicas (MONTANARI et al, 2013). Destaca-se que atualmente diferentes níveis de incertezas são menosprezados, e podem estar influenciando na aplicação de instrumentos de gestão das águas, como a outorga, e com reflexo nos demais instrumentos. Neste âmbito, pode-se estar superestimando ou subestimando a utilização das águas, além de possivelmente estar contribuindo

para a falta de controle numa situação de escassez hídrica, favorecendo o conflito entre usuários e prejuízos para o ambiente.

Dentre os métodos disponíveis para suprir a deficiência de informações, os modelos matemáticos do tipo chuva-vazão acabam oferecendo maiores possibilidades para análises prognósticas e agregação de informações físicas e climáticas. Quanto à utilização desses modelos destaca-se que as incertezas estão relacionadas aos dados de entrada, ao conjunto de valores arbitrados para os parâmetros do modelo e na própria estrutura e condições de contorno das equações matemáticas (SHRESTHA, 2009).

Especificamente, quanto aos dados de entrada, como precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e outros, emerge a questão da incerteza de medição dos mesmos, e quanto aos valores dos parâmetros há a questão da não unicidade, que pode ser trabalhada com distribuições de probabilidade que permitem modelar a aleatoriedade. A inserção desses tipos de análises na aplicação de instrumentos de gestão das águas pode ser considerada como embrionária, em virtude das limitadas e inconclusivas experiências quanto às reais contribuições desta abordagem (GUILLAUME et al, 2017).

Constata-se a partir da análise de literatura a necessidade de uma nova estratégia de abordagem na gestão das águas, especificamente a investigação quanto à influência das incertezas das vazões estimadas por esses modelos chuva-vazão e seu reflexo na aplicação do instrumento de outorga. No caso, a aplicação da outorga em cursos d'água superficiais depende do conhecimento relativo à disponibilidade hídrica que é representada por vazões de alta garantia, como a $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, comumente obtidas por análise estatística das séries de vazões. Ressalta-se que é importante comunicar as incertezas àqueles que usam os resultados da modelagem hidrológica, contudo, a rara aplicação dos avanços recentes da análise de incertezas e do mapeamento probabilístico de riscos relacionados a água são limitados (UNESCO, 2018; MC MILLAN et al, 2017).

O campo de análise de incertezas na modelagem hidrológica é amplo e sua investigação é necessária, não sendo possível anular todas as imprecisões, mas diversas pesquisas mostram a necessidade de abordagens para flexibilizar a convivência com a mesma, assim como inseri-la na tomada de decisão (GUILLAUME et al, 2017; MC MILLAN et al, 2017; FAN et al, 2016; MONTANARI et al, 2013).

Diante das justificativas expostas anteriormente quanto a relevância do tema emerge a seguinte pergunta de pesquisa proposta para investigação:

- Como as incertezas de medição dos dados de entrada, de variáveis climáticas e dos valores dos parâmetros de um modelo hidrológico chuva-vazão podem influenciar na estimativa da disponibilidade hídrica superficial utilizada na aplicação do instrumento de outorga de direito de uso de recursos hídricos superficiais?

Os resultados da pesquisa visam promover a inserção do conhecimento técnico relativo à análise de incertezas na modelagem hidrológica aplicado à outorga. É de interesse discutir uma abordagem em que os tomadores de decisão devem ser dotados de conhecimento quanto às imprecisões das informações utilizadas na gestão das águas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos quantitativos da utilização de vazões superficiais estimadas com incertezas a partir de modelo chuva-vazão na aplicação da outorga de direito de uso de recursos hídricos numa sub-bacia hidrográfica do rio Paraguaçu-Bahia.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar as incertezas dos dados de entrada e dos valores dos parâmetros físicos utilizados no modelo matemático chuva-vazão;
- Quantificar a disponibilidade hídrica superficial anual com as respectivas faixas de incertezas obtidos com o modelo matemático chuva- vazão;
- Quantificar a disponibilidade hídrica superficial anual a partir dos critérios adotados pelo gestor de outorgas do Estado da Bahia;
- Avaliar os efeitos quantitativos da disponibilidade hídrica estimada com incertezas na aplicação da outorga.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Disponibilidade hídrica

O conhecimento da disponibilidade hídrica e das demandas de usos hídricos são de fundamental importância no planejamento das ações de gestão das bacias hidrográficas, as quais são objeto de análise qualitativa e quantitativa nos planos de recursos hídricos, de acordo com a Lei Nº 9.433/97. Especificamente, a disponibilidade hídrica total de uma bacia hidrográfica para fins de gestão considera a parcela superficial, subterrânea e transferências de vazões entre bacias.

A disponibilidade hídrica de água superficial está relacionada à quantidade disponível para o atendimento de usos hídricos, a qual considera determinado nível de garantia de atendimento no tempo (ANA, 2017). Essa disponibilidade corresponde aos volumes de águas nos cursos d'água, lagos e reservatórios, sendo estes últimos construídos como forma de potencializar a disponibilidade hídrica, garantindo o atendimento em períodos de estiagem e diminuindo as influências sazonais das vazões.

Por outro lado a disponibilidade hídrica subterrânea está associada com a produtividade dos aquíferos, sendo que os sistemas aquíferos sedimentares são os que possuem maior potencial de armazenamento de água, enquanto que os aquíferos fraturados são considerados de baixa produtividade de água. Os aquíferos são classificados em três domínios: fraturado, onde as águas circulam pelas fraturas das rochas; poroso (rochas sedimentares), onde as águas circulam pelos poros das rochas; e o cárstico, no qual a circulação das águas está condicionada às fraturas de rochas carbonáticas (ANA, 2017).

Contudo, ressalta-se que a disponibilidade hídrica a ser usada para o atendimento dos usos hídricos está condicionada à qualidade das águas, as quais são influenciadas pelo regime de chuvas, escoamento superficial, geologia, cobertura vegetal, impactos antrópicos e manejo dos solos.

Para fins de gestão das águas são estabelecidas vazões que caracterizam a disponibilidade hídrica e que são nomeadas como vazões de referência, sendo que estas possuem probabilidade reduzida de falha, objetivando garantir com segurança

o atendimento das demandas hídricas. Dentre as vazões de referência utilizadas na gestão, a ANA (2013) destaca:

- Vazões sazonais, que podem corresponder às vazões mensais correspondentes aos meses mais úmidos e aos meses mais secos, permitindo ao órgão gestor maior flexibilidade na alocação das vazões;
- Vazões regularizadas, considerada como disponibilidade hídrica de reservatórios, e que corresponde à vazão que pode ser fornecida a longo prazo, sem que o volume mínimo ou morto seja atingido. A maior vazão que pode ser regularizada é a vazão média de longo tempo;
- Vazão de restrição em trechos a jusante de reservatórios, corresponde a uma vazão mínima que deve ser mantida a jusante em 100% do tempo. À medida que se avança para jusante usualmente adiciona-se as vazões produzidas nas áreas incrementais a partir do barramento. Essa abordagem é válida para todos os reservatórios de regularização e;
- Vazões mínimas, em trechos de rios em condições naturais sem influência de reservatórios.

3.1.1 Vazões de referência mínimas

Especificamente, as vazões mínimas são adotadas como vazões de referência para fins de aplicação de instrumentos de gestão dos recursos hídricos no Brasil conforme previsto na Lei Nº 9.433/1997 (ANA, 2013; CRUZ & TUCCI, 2008), tendo em vista o uso múltiplo das águas. Em síntese, as vazões de referência mínimas correspondem àquelas que indicam o limite superior de utilização do curso d'água para o atendimento dos usos hídricos.

No Brasil, as estimativas de vazões de referência para fins de aplicação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos consideram somente as características do regime anual, enquanto se tem discutido a influência da sazonalidade das vazões e os respectivos impactos da não consideração desta variabilidade na gestão dos recursos hídricos (OLIVEIRA et al, 2013; CRUZ e TUCCI, 2008). A determinação das vazões de referência mínimas é dependente de séries históricas de observações fluviométricas. Contudo, a deficiência das redes de monitoramento, a qualidade dos

dados e bacias sem monitoramento implicam na utilização de métodos hidrológicos que permitem estimar informações com diferentes níveis de incertezas.

As vazões mínimas possuem como principal contribuição o escoamento das águas subterrâneas, proveniente da infiltração da água de chuva, do excesso de água de irrigação, da percolação proveniente de rios, canais e lagos, como também da recarga artificial (FEITOSA, 2000; OLIVEIRA, 2013; GARCÍA, 2016). Destaca-se que existem diferentes iterações rio-aquífero, quando trata-se de contribuição das águas subterrâneas, dentre as quais do tipo influente, no qual o rio pode alimentar um aquífero, sendo que a cota do nível d'água do rio é superior à cota potenciométrica do aquífero, ou pode ser do tipo efluente, no qual a cota do nível d'água é menor que a cota potenciométrica, no qual o rio é alimentado pelo aquífero. Geralmente as vazões mínimas no leito dos rios ocorrem após a precipitação suprir o déficit de água na zona de aeração do solo, sendo também dependente da hidrogeologia, topografia, dos processos de evapotranspiração e das características estruturais e texturais do solo (OLIVEIRA, 2013; WMO, 2008b, NOVAES, 2005).

No Brasil, as vazões de referência são determinadas por cada unidade federativa sendo usuais a vazão $Q_{7,10}$ (vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos) e as vazões $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ a nível diário obtidas a partir da curva de permanência. A curva de permanência representa o histograma de frequências acumuladas relativas das vazões de um curso d'água, na qual é expressa a relação entre a vazão e a frequência com que essa vazão é superada ou igualada. A curva é gerada calculando-se os valores dos quantis de 1 a 99%.

Usualmente estudos de disponibilidade hídrica são realizados com base em séries de vazões observadas, desconsiderando-se, em alguns casos, que estas séries não representam a situação natural da bacia, devido às retiradas de água, que correspondem às outorgas e as captações irregulares. Logo, a utilização dessas séries de vazões não naturais podem resultar em estimativas de disponibilidade hídrica inferiores às que realmente seriam observadas considerando as condições naturais de uma bacia. A importância dessa observação foi pesquisada por Oliveira *et al* (2008) na bacia do rio Paracatu, no trecho alto do rio São Francisco, no qual mostrou-se que não se constitui preocupação o uso de vazões naturais na estimativa de vazões médias, mas no caso, de vazões mínimas, o impacto foi mais expressivo, o que indica neste caso a necessidade de incluir a reconstituição de vazões naturais.

É válido destacar que essas vazões apresentam comportamento sazonal ao longo do ano, sendo que a consideração desta característica hidrológica somente emergiu na década de 90 (CRUZ & TUCCI, 2008). Segundo a ANA (2013) a consideração dessa variação permitiria uma maior disponibilidade hídrica nos meses mais úmidos e maiores restrições nos meses mais secos, influenciando na alocação da água, na flexibilidade e na otimização do uso da água.

A análise da sazonalidade das vazões usualmente objetiva a delimitação de períodos com comportamento hidrológico distintos e homogêneos, podendo-se definir a critério períodos quinzenais, mensais, trimestrais, quadrimestrais e semestrais (período seco e período úmido), a depender do regime climático local. A identificação destes períodos pode ser baseada na análise da média dos dados pluviométricos e fluviométricos, considerando o ano hidrológico, ou na utilização de testes de detecção de tendências como o teste de Mann-Kendall, o teste de Kendall sazonal, o teste de regressão linear, o método de Sen e o Moving Average over Shifting Horizon (MASH) (ANGLIERI et al, 2014).

Estudo realizado por Oliveira *et al* (2013) considerando a sazonalidade da disponibilidade hídrica na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, em Minas Gerais, avaliou o impacto da substituição das vazões anuais pelas mensais para fins de outorga, assim como a alteração do percentual outorgável. No caso foi avaliado a mudança de 30% para 50% da $Q_{7,10}$, da parcela outorgável, tanto anual, quanto mensal, constatando que a mudança pela base mensal resultou num aumento da disponibilidade hídrica. Outra constatação foi o aumento de até 209% no percentual dos trechos em que o somatório das vazões outorgadas não superou a vazão máxima outorgável.

Outra investigação na avaliação do uso de vazões sazonais é apresentada por Silva *et al* (2015), que avaliou períodos quadrimestrais (seco com vazões mínimas, normal com vazões médias e chuvoso com vazões máximas) e semestrais (seco e chuvoso) em comparação ao período anual das vazões de referência $Q_{7,10}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, na bacia do rio Paraopeba, localizado no Estado de Minas Gerais. Os resultados indicaram que a utilização da $Q_{7,10}$ resultou em aumentos de até 126% da vazão disponível para outorga, e na utilização das vazões de permanência $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ considerando aumentos de até 99% nos períodos chuvosos, mas em períodos mais secos a disponibilidade foi inferior àquela estimada considerando a série anual.

Além da questão sazonal das vazões, Cruz & Tucci (2008) analisaram critérios diferentes para obtenção das vazões de referência a partir de curvas de permanência e sua representatividade para caracterizar a disponibilidade hídrica. Ao comparar dois critérios: série toda, mais usual e ano a ano constataram significativas diferenças em virtude da diferença como os dados são tratados. Enquanto no critério da série toda considera-se a série completa de vazões disponíveis no período histórico de dados, no critério ano a ano, cada ano hidrológico é analisado como sendo um evento independente de uma série de ocorrências anuais. O critério ano a ano é destacado como promissor, pois não limita o uso da água para atividades socioeconômicas viáveis pelo limite inferior de disponibilidade (critério série toda), contudo, requer uma gestão racional e a utilização de uma outorga de risco negociado. Ressalta-se ainda que a utilização dos percentis entre 90 a 99% da vazão de permanência é segura, mas que não é a melhor opção econômica, pois utiliza-se valores de vazões menores para atendimento dos usos hídricos, principalmente para a irrigação. Contudo, a utilização de percentis menores, ou seja, maiores valores de vazão resulta num maior o risco de não atendimento, mas nesse caso, constata-se que uma análise do custo benefício deve ser avaliada pelo usuário. Oliveira et al (2013) ainda destaca que em regiões com variabilidade fluviométrica sazonal notável a utilização de vazões de referência considerando o período anual é restritivo para o uso da água, sendo este um valor pouco registrado na maior parte do ano.

3.1.2 Aplicabilidade da disponibilidade hídrica aos instrumentos de gestão das águas

Na gestão das águas o conhecimento das vazões mínimas de referência constitui-se em informação de relevância para a aplicação dos cinco instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH): os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Considerados como planos diretores, os Planos de Recursos Hídricos fundamentam e orientam a implementação da PNRH e o gerenciamento dos recursos hídricos, a partir de um diagnóstico da situação qualitativa e quantitativa das águas. Atualmente, o conhecimento quantitativo necessário ao diagnóstico baseia-se nas informações do

Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (SIRH), o qual coleta, trata, armazena e recupera informações sobre os mesmos.

Conhecida a disponibilidade hídrica da bacia baseando-se nas informações do SIRH torna-se possível a aplicação do instrumento de outorga de direito de uso de recursos hídricos, conforme definido no Art. 11 da PNRH. O instrumento possui como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água sendo aplicado em usos como:

- derivação e captação de água num corpo d'água;
- extração de água em aquífero subterrâneo;
- no lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos e gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição;
- no aproveitamento de potenciais hidrelétricos e em outros que alterem o regime, a quantidade e qualidade da água num corpo d'água.

Usualmente somente uma parcela da disponibilidade hídrica é considerada outorgável, sendo está definida pelo respectivo órgão gestor responsável pela aplicação do instrumento. A disponibilidade hídrica outorgável é definida a partir de um percentual destinado ao atendimento de usos hídricos e outra parcela remanescente é destinada para atendimento de usos hídricos a jusante visando garantir a manutenção do ambiente.

O instrumento de enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água está intimamente vinculado aos instrumentos de Planos de Recursos Hídricos e Outorga de direito de uso de recursos hídricos. De acordo com o Art. 9º da PNRH, o instrumento visa assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas, além de diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes. A definição dos usos e classes dos corpos de água geralmente é realizada de forma concomitante com os Planos de Recursos Hídricos. Com a aprovação da proposta de enquadramento de corpos de água pelo Comitê da bacia e Conselho de Recursos Hídricos, o instrumento de outorga de uso passa a ser o principal responsável em garantir que a qualidade das águas seja compatível com os usos hídricos aprovados na proposta. A fiscalização nesse caso, de acordo com os artigos 29º e 30º, fica sob responsabilidade

dos Poderes Executivo, Estaduais e Distrito Federal, com base na sua esfera de competência.

Por fim, destaca-se o instrumento de cobrança pelo uso de recursos hídricos, o qual de acordo com o Art. 19 da PNRH objetiva reconhecer a água como bem econômico dando ao usuário uma indicação de seu real valor, incentiva a racionalização do uso da água e na obtenção de recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos Planos de Recursos Hídricos. A cobrança é aplicada aos usos sujeitos à outorga, mencionados anteriormente, sendo que o seu estabelecimento deve partir do interesse do Comitê de bacia, assim como a discussão quanto a fixação de valores, que posteriormente serão aprovados pelo conselho de recursos hídricos. Nesse contexto, o instrumento de cobrança fortalece a gestão descentralizada, por conseguir garantir meios para a manutenção das instituições de gestão no âmbito da bacia hidrográfica, e a gestão participativa, pois parte do Comitê a decisão em implementá-la e na definição dos preços e cálculos da cobrança (ANA, 2014).

O potencial de arrecadação com a aplicação da cobrança pelo uso de recursos hídricos parte do conhecimento quanto às disponibilidades hídricas superficiais e subterrâneas da bacia, o que reforça a necessidade de aperfeiçoamento das estimativas de vazões, além do universo de usuários cadastrados no órgão outorgante. Os valores arrecadados por esse instrumento de gestão são aplicados prioritariamente na bacia hidrográfica em que foram gerados.

A Figura 1 apresenta um fluxograma que objetiva destacar de forma sintética as relações entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos descritos anteriormente.

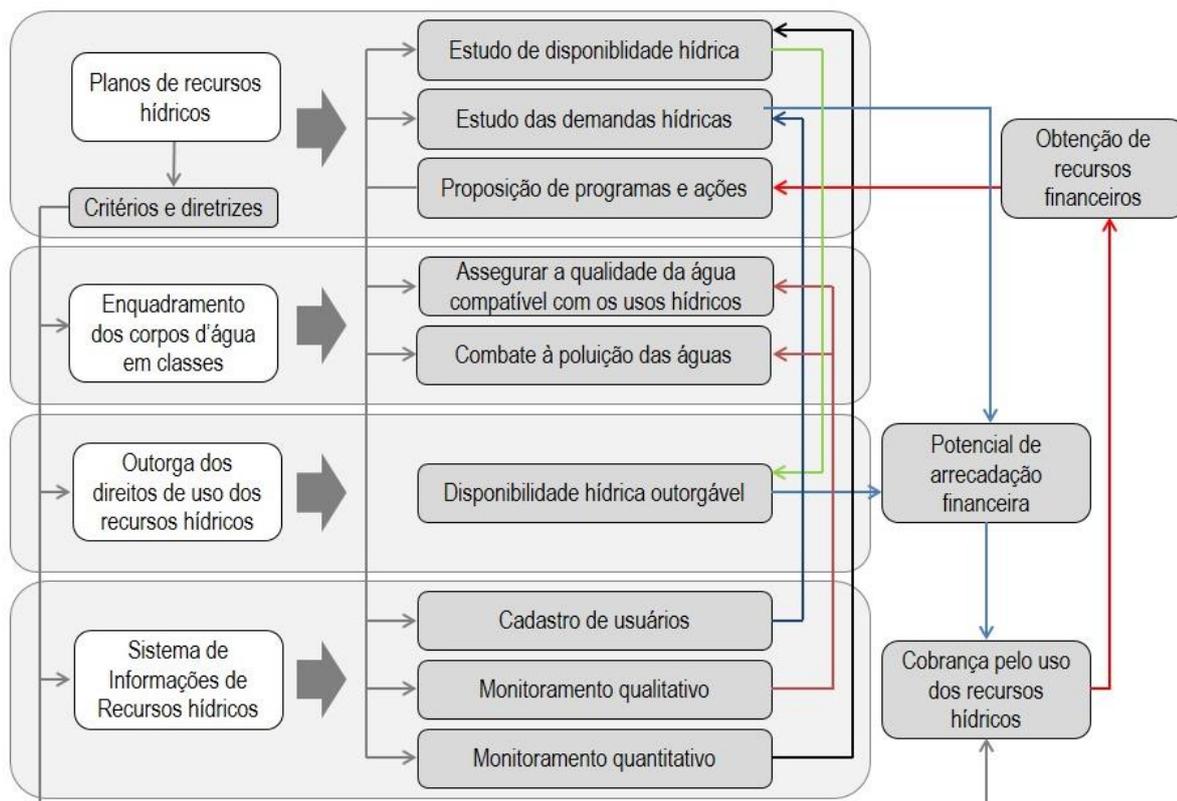


Figura 1 – Integração entre os instrumentos de gestão de recursos hídricos da PNRH

A análise integrada dos instrumentos de gestão de recursos hídricos apresentada anteriormente (Figura 1) mostra as relações diretas entre os mesmos, e como os objetivos de cada um depende da efetividade dos objetivos dos demais. Destaca-se neste âmbito que toda a gestão dos recursos hídricos é planejada em função da disponibilidade hídrica, a qual está sendo estimada com base numa rede de informações limitada, além da adoção de premissas simplificadoras, que desprezam as incertezas envolvidas desde os dados até a precisão dos métodos de estimativa. A melhoria do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos se faz necessária, sendo esta depende de investimentos, o que poderá garantir estimativas de disponibilidade hídrica mais precisas, podendo minimizar as incertezas e favorecer a gestão dos recursos hídricos.

3.1.3 Métodos para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial em cursos d'água

A seleção do método para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial em cursos d'água depende da existência de dados hidrológicos na seção ou bacia hidrográfica

de interesse. Havendo séries históricas de dados fluviométricos disponíveis na seção na qual deseja-se estimar a disponibilidade hídrica pode-se recorrer para a utilização da curva de permanência ou realizar a análise de frequência de vazões mínimas. Contudo, na inexistência de dados em determinadas seções de um curso d'água usualmente, recorre-se ao uso de métodos de regionalização de vazões ou modelos chuva-vazão.

A curva de permanência, citada anteriormente, representa o histograma de frequências acumuladas relativas das vazões de um curso d'água, na qual é expressa a relação entre a vazão e a frequência com que essa vazão é superada ou igualada. Essa curva pode ser obtida a partir de dados diários ou dados mensais de vazão.

Na análise de frequência de vazões mínimas interessa a probabilidade de ocorrência de vazões iguais ou menores do que um determinado limite, sendo comumente realizadas sobre as vazões mínimas de 7 dias, 15 dias ou 30 dias de duração (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Para avaliação da disponibilidade hídrica utiliza-se comumente a partir desse método a vazão de referência mínima $Q_{7,10}$, que corresponde a vazão média de 7 dias de duração com tempo de retorno de 10 anos. Neste tipo de análise de frequência de vazões mínimas, a distribuição normal não se mostra adequada, sendo mais utilizadas as distribuições de probabilidade Tipo I de extremos (Velz e Gannon, 1953); Tipo III (Weibull) (Gumbel, 1963); distribuição Gama (Joseph, 1970); Tipo II e III de extremos (Uehara et al, 1979) (TUCCI, 2017).

No caso da indisponibilidade de registros de séries históricas de vazões para uma determinada seção de rio pode-se optar pelo método de regionalização de vazões, o qual objetiva a obtenção de informações hidrológicas em bacias sem dados ou com poucos dados, baseando-se na similaridade espacial de algumas funções, variáveis físicas e parâmetros que permitem essa transferência de informações (TUCCI, 2017). De acordo com a WMO (2008b) a utilização de métodos empíricos como a regionalização deve ser utilizada em bacias que são geograficamente próximas e com o mesmo regime climático, com hidrogeologia e área física semelhantes, e que preferencialmente seja uma bacia natural, no caso, com pouca ou nenhuma antropização.

Na regionalização de vazões utilizam-se dados de estações fluviométricas conhecidas de uma mesma bacia ou de outras com características similares. Essa técnica pode ser realizada para (TUCCI, 2017):

- Variáveis: quando uma variável pode ser determinada numa região com base em relações estabelecidas através dos dados pontuais existentes, como área da bacia, precipitação, declividade, densidade de drenagem e outras;
- Funções: quando uma função pode ser determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes, como curva de intensidade x duração x frequência, curva de regularização, entre outras;
- Parâmetros: podem ser determinados para uma função ou modelo matemático pela sua relação com características físicas, como tipo e uso do solo;
- Indicadores regionais: definidos como valores médios ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma variável, como a vazão específica média, relações da vazão da curva de permanência, índices de enchente e de vazões mínimas.

Dentre as técnicas citadas, adota-se no Estado da Bahia pelo gestor a vazão específica, que é utilizada no Sistema de Gerenciamento de Controle de Outorga (SIGO) de captação e lançamento de efluentes do Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) utilizando-a para concessão de outorga em bacias hidrográficas de domínio estadual. Esse indicador é definido pela vazão por unidade de área, expressa pela equação 1:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1),$$

Onde q é a vazão específica, em $L / (s.km^2)$; Q é a vazão média de longo período, em m^3/s e A é a área da bacia em km^2 . No estado da Bahia, o INEMA adota Q sendo igual a $Q_{90\%}$ da curva de permanência, que corresponde à vazão de referência para fins de aplicação da outorga. De acordo com Tucci (2017) esse método não é um procedimento preciso, mas que é útil para uma estimativa preliminar da disponibilidade de recursos hídricos em locais sem dados.

Outra alternativa para obtenção de dados de vazões em bacias sem dados refere-se aos modelos hidrológicos chuva-vazão, que são ferramentas que objetivam representar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, a partir de variáveis e parâmetros fixados e previamente definidos que podem influenciar na estimativa do escoamento superficial e subterrâneo.

Esses modelos são constituídos por dados de entrada, usualmente precipitação e evapotranspiração; por uma estrutura matemática do modelo, com sua representação

dos fenômenos e com os respectivos parâmetros e variáveis; e por uma saída, que neste caso corresponde ao hidrograma de vazões. Apesar de serem ferramentas bastante utilizadas, os modelos possuem como limitação a quantidade e qualidade dos dados hidrológicos disponíveis, e a dificuldade de formulação de alguns processos (TUCCI, 1998).

No geral esses modelos podem ser utilizados no entendimento do comportamento hidrológico da bacia, na análise de consistência e preenchimento de falhas de séries históricas de vazões, na projeção de cenários de modificação do uso e ocupação do solo ou alterações climáticas (TUCCI, 1998). Os modelos hidrológicos utilizados para a estimativa de vazões objetivam estimar o escoamento numa bacia para fins de gerenciamento dos recursos hídricos, seja em intervalo de horas, dias ou de meses (SILVA et al, 2006). Ressalta-se que a utilização desses modelos está sujeita à muitas incertezas, uma vez que, a combinação das variáveis que influenciam o escoamento num rio alteram-se com a escala espacial da mesma (COLLISCHONN, 2001).

3.2 Modelos hidrológicos chuva-vazão

As estruturas dos modelos chuva-vazão diferenciam-se pelo tipo de subdivisão espacial e características físicas da bacia, que corresponde à geometria do sistema; quanto aos dados de entrada (*inputs*) necessários, quanto às variáveis do ciclo hidrológico, condições iniciais e limitantes e quanto a forma como são feitas as interligações dos processos (leis governantes) (CHRISTOFOLETTI, 1999; TUCCI, 1998).

Sobre os tipos de modelos utilizados para estimativa de vazão destacam-se os determinísticos e os estocásticos, conforme descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos modelos hidrológicos

Tipo de modelo	Descrição
Determinísticos	São modelos que não consideram a aleatoriedade dos dados de entrada e podem ser subdivididos em modelos conceituais e empíricos. Os modelos conceituais consideram os processos do ciclo hidrológico na formação das vazões, enquanto que os modelos empíricos, conhecidos como caixa preta, se ajustam a uma relação de causa-efeito entre os dados de entrada e saída, e não possuem relação com os processos físicos (TUCCI, 2002 <i>apud</i> NOVAES, 2005)
Estocásticos	São modelos que utilizam séries temporais para reproduzir o comportamento de um determinado fenômeno (DETZEL et al, 2016).

Tipo de modelo	Descrição
	Consideram a aleatoriedade das variáveis de entrada ou parâmetros do modelo e não consideram os processos físicos de formação das vazões. Subdividem-se em estacionários, quando se considera que não ocorrem alterações significativas nas características estatísticas ao longo do tempo, e não estacionários (periódicos), quando apresentam essas alterações.

Especificamente, os modelos conceituais possuem duas partes principais: transformação de chuva em vazão e a propagação em rios e reservatórios, sendo que existem procedimentos distintos, caso opte-se pela estimativa de curto ou longo prazo. Ressalta-se que ambos modelos, empíricos e conceituais também podem ser usados de forma combinada. Algumas tendências destacadas por Silva et al (2006) são o uso de modelos distribuídos por células, acoplamento entre os modelos atmosféricos e hidrológicos e correção estatística das precipitações de entrada do modelo.

Quanto à subdivisão espacial da bacia os modelos podem ser concentrado, distribuído por sub-bacias ou distribuído por nódulos (CHRISTOFOLETTI, 1999; TUCCI, 1998).

Os modelos também podem ser subdivididos quanto ao tipo de evento que o mesmo pretende simular, podendo ser do tipo evento único ou evento contínuo. Os modelos de evento único simulam o processo de transformação de chuva em vazão, mas não consideram as interações entre as variáveis do ciclo hidrológico, geralmente somente os dados de precipitação e características físicas da bacia. Esses modelos são indicados quando se deseja conhecer o tempo e a vazão de pico ou no hidrograma total de escoamento. Nos modelos de eventos contínuos essa interação é considerada, englobam um maior número de variáveis e são indicados quando deseja-se conhecer e analisar um conjunto de dados hidrológicos em sequência horária, mensal ou anual, por exemplo (SOUZA, 2012).

Silva et al (2006) ressalta que os modelos hidrológicos conceituais do tipo concentrado são mais utilizados, principalmente em bacias pequenas, apesar do desenvolvimento dos modelos distribuídos; isso é justificável em virtude das restrições de dados para sua aplicação. Contudo, há a tendência mundial em utilizar os modelos distribuídos para a previsão de vazões como ocorre em países como a Alemanha e nos EUA.

Dentre os modelos hidrológicos conceituais destacados por Razavi et al (2013) e identificados em 43 estudos internacionais foram o *Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning* (HBV), *Identification of Unit Hydrographs and Component*

Flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow Data (IHACRES), HYMOD, *Rainfall-runoff modeling toolbox* (RRMT), SIMHYD, PDM, *Australian water balance model* (AWBM), Xinanjiang, GR4J e TPMO, *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), TOPMODEL e o Mike 11 NAM. Apesar de os modelos HBV e IHACRES terem sido os mais utilizados nos estudos, Razavi et al (2013) destaca a necessidade de pesquisas quanto ao benefício na utilização de cada um. Não existe na literatura abordagem sobre qual método ou modelo deve ser preferível em cada caso, sendo necessários estudos específicos em cada região para a identificação da melhor abordagem (Razavi et al, 2013).

No Brasil destacam-se em uso os modelos *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), o MODHAC (modelo hidrológico autocalibrável), o Modelo de Grandes Bacias (MGB) e o modelo internacional *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (LOPES, 1994; LANNA, 1997; COLLISCHONN, 2001; ARNOLD, 2012).

No conjunto de modelos citados o SWAT, com aperfeiçoamentos que efetuados num período de 30 anos pelo Serviço de Pesquisa Agrícola e da Universidade A&M do Texas e de outras agências federais dos Estados Unidos destaca-se por ser um modelo físico distribuído com 39 parâmetros calibráveis que vinculam-se aos processos hidrológicos (ARNOLD, 2012). Possui ampla utilização mundial e nacional, e por foi aplicado em outros estudos no estado da Bahia (VALÉRIO & JUNIOR, 2015; FONTES et al, 2010). No Brasil, Bressiani et al (2015) identificaram mais de 100 estudos envolvendo a utilização do SWAT, entre os anos de 1999 a 2015 em revistas, conferências, teses ou dissertações, sendo a maioria voltada para aplicações hidrológicas e com menor percentual para estudos de transporte de sedimentos. A maior dificuldade para aplicação reside na ausência de dados, acesso à forma como os dados são compilados, problemas de processamento de dados, precisão, qualidade e resolução. Os autores destacam a necessidade de expandir a utilização em simulações que sejam úteis para avaliação de questões críticas como mudanças climáticas, mudanças no uso da terra, seca e inundações.

Dentre as limitações para aplicação do modelo no país Bressiani et al (2015) citam o número limitado de estações hidrológicas nas bacias hidrográficas brasileiras, a representação inadequada das características da cultura, a imprecisão quanto a representação da vegetação perene tropical e a inexistência de uma base de acesso mais prática para as informações de entrada. Observou-se que a maioria dos estudos

foram realizados para simulações à nível mensal obtendo-se em cerca de 60% resultados de calibração considerados muito bons, enquanto que nas poucas experiências a nível diário, somente 25% obtiveram boas calibrações. Quanto à escala temporal da simulação Perterson & Hamlett (1998), Varanou et al (2002), Jain et al (2010) e Gassman et al (2014) *apud* Valério (2014) também destacaram que as simulações com à nível diário não se apresentam satisfatórias em relação às de nível mensal.

Observa-se que na literatura não há um consenso ou indicação de modelos hidrológicos mais adequados, sendo mais comum estudos comparativos destes aplicados numa mesma região indicando-se o mais apropriado para a realidade da bacia em estudo (RAZAVI et al, 2013; MONTANARI et al, 2013).

De acordo com Silva (2014) a modelagem hidrológica chuva vazão convencional assume duas hipóteses:

- a) Os erros na estrutura do modelo e nos dados observados são admitidos como desprezíveis e aleatórios, supondo-se que os resíduos da simulação serão nulos, adotando-se neste caso a hipótese da homoscedasticidade ou que seguem a hipótese da normalidade, no qual os valores de Y são normalmente distribuídos para cada valor de X (NAGHETTINI & PINTO, 2007);
- b) Admite-se que toda a informação contida nos dados observados possa ser extraída a partir de um indicador estatístico único (a ser maximizado ou minimizado). Neste aspecto, Silva (2014) foca que diferentes conjuntos de valores dos parâmetros conduzem a estatísticas muito semelhantes, o que torna a escolha do “melhor” conjunto de parâmetros do modelo chuva-vazão subjetiva.

As hipóteses simplificadoras quanto ao uso dos modelos hidrológicos devem ser consideradas com parcimônia ou podem não ser menosprezadas, a depender do objeto que se deseja investigar. É válido mencionar que a minimização das incertezas oriundas dessas simplificações constitui-se numa das áreas mais ativas da modelagem hidrológica, e que se torna de relevância para a melhor aplicação dos instrumentos de gestão da água, principalmente em períodos de crise hídrica. No Brasil, esses modelos geralmente não são usados no gerenciamento dos recursos hídricos pelos órgãos estaduais, sendo usualmente adotado o método de regionalização de vazões, contudo, a ANA em estudos específicos utilizou alguns

como o CN3S (*Curve Number with Three Step Antecedent Precipitation*), IPH II, IPHMEN, SMAP e MGB (ANA, 2013).

3.3 Análise de incertezas na modelagem hidrológica chuva vazão

O conceito de análises de incertezas está associado ao sentido probabilístico por tratar-se da variação nos resultados de um evento aleatório, das desordens derivadas de considerações errôneas ou de erros associados com as quantidades observadas ou estimadas (TAYLOR, 1997). De acordo com Karamouz et al (2013), a incerteza surge basicamente da complexidade do sistema, desconhecimento, imprecisão, dos diferentes graus de aleatoriedade, sendo que a medição é baseada em medidas de distribuição. Na literatura a estimativa de incertezas é tratada sob a perspectiva da calibração de modelos, que buscam minimizar os resíduos do modelo (SILVA et al, 2014).

Estudos mostram a necessidade de inclusão da análise de incertezas em contexto apropriado na área de recursos hídricos, sendo que a mesma é evitada quando permitido, ou tratada de forma limitada, adiando o trabalho adicional de sua análise (GUILLAUME et al, 2017). Destacam-se três fontes de incertezas na modelagem hidrológica, conforme descritas a seguir:

- Dados de entrada e saída ou nas variáveis de estados iniciais, decorrentes de erros nos processos de medição como da precipitação, evaporação e vazões, sendo esta última vinculada às curvas-chave; nas limitações das séries de medições e na variabilidade dos valores observados (SHRESTHA, 2009; RAMPINELLI, 2016).
- Parâmetros e variáveis de estado decorrentes da limitação de medidas precisas dos dados de entrada do modelo, nos quais os valores são obtidos por métodos indiretos, como tentativa e erro (SHRESTHA, 2009);
- Estrutura e condições de contorno do modelo hidrológico, os quais no geral possuem certo grau de simplificações da realidade ou da conversão da estrutura conceitual para o modelo numérico (SHRESTHA, 2009).

Na Figura 2 apresenta-se um fluxograma das principais fontes de incertezas nos 3 componentes principais que envolvem o processo de modelagem chuva-vazão.

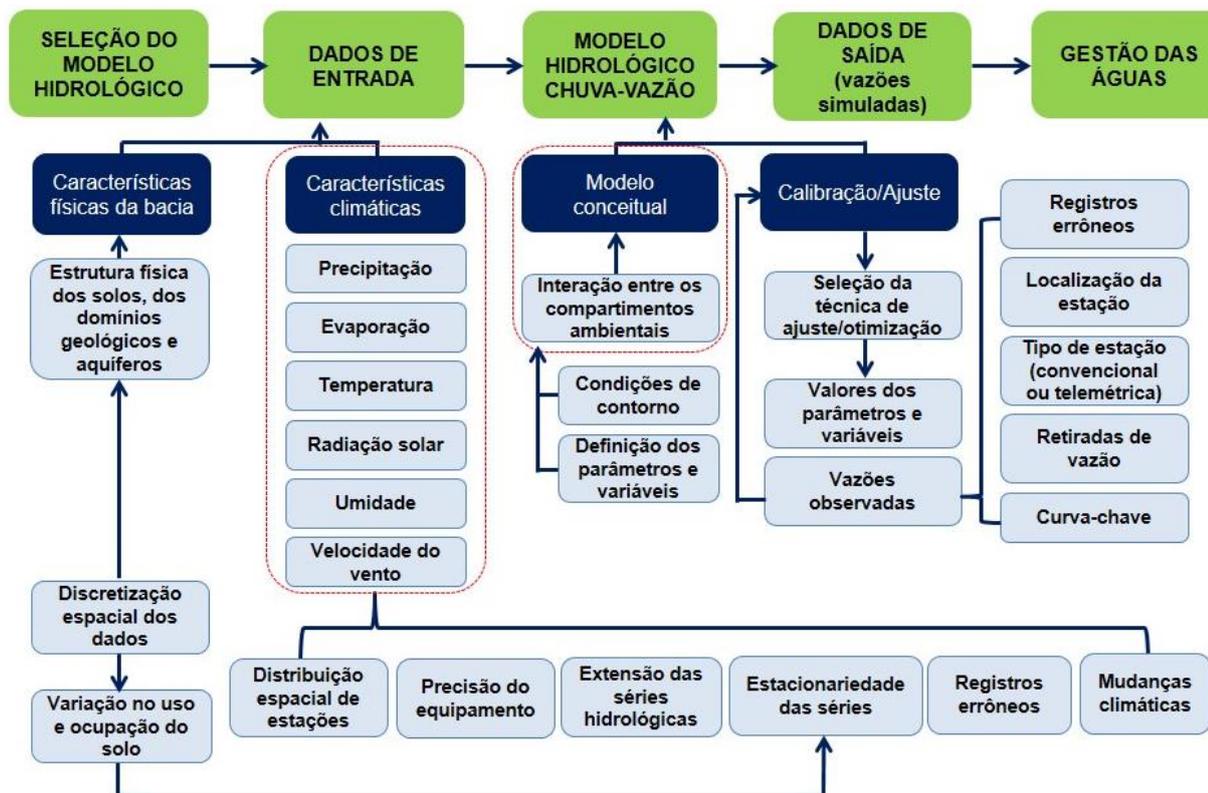


Figura 2 – Principais fontes de incertezas no uso de modelos hidrológicos chuva-vazão

3.3.1 Incerteza de medição dos dados hidrológicos

Os dados hidrológicos de entrada utilizados na modelagem chuva-vazão, como precipitação, temperatura, umidade relativa, evaporação, velocidade do vento e radiação solar são obtidos a partir de instrumentos com registro manual ou automáticos, em diferentes escalas de tempo (horário, diário ou mensal). De acordo com a WMO (2008) os requisitos mais importantes para instrumentos meteorológicos são manter uma incerteza conhecida durante um longo período, confiabilidade e estabilidade. Essa incerteza está associada ao resultado da medição e caracteriza a dispersão de valores que podem ser atribuídos ao mensurando.

No que se refere ao cálculo e expressão da incerteza de medição (u), a WMO (2008a) considera aplicável às práticas de observações meteorológicas o *ISO/IEC Guide 98:1993*, atualmente atualizado como *ISO/IEC Guide 98-3:2008*. O *ISO/IEC Guide 98-3:2008* refere-se ao *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, considerado o método internacional de referência para estimativa da incerteza de medição (JCGM 100:2008).

No geral, o resultado de uma medição trata-se de uma aproximação, sendo que este resultado somente pode ser considerado completo se informado:

- (1) o valor medido, no caso, aquele indicado no instrumento;
- (2) o valor da incerteza de medição, ou seja, o intervalo no qual se espera que o valor verdadeiro esteja com um determinado nível de confiança e
- (3) o nível de confiança ligado à incerteza de medição, no caso, a medida da probabilidade na qual o valor verdadeiro da medida se encontre num intervalo de incerteza definido.

De acordo com a norma JCGM 100 (2008) os componentes de incertezas podem ser divididos em dois tipos: incerteza do Tipo A e do Tipo B. A avaliação da incerteza Tipo A (u_A^2) envolve a análise estatística de séries observadas, através da variância amostral das medidas, sendo o desvio padrão estimado denominado incerteza padrão do Tipo A. O componente de incerteza do Tipo B (u_B^2) é avaliada com base em informações disponíveis sobre a possível variabilidade, como dados de medições anteriores, conhecimento geral sobre os instrumentos, especificações do fabricante, dados fornecidos em calibração e outros certificados; sendo o desvio padrão estimado denominado como incerteza padrão do Tipo B.

Quando a incerteza do mensurando y é obtida pela combinação das incertezas padrão tem-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$, que é a raiz quadrada da variância combinada, dada pela equação 2:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (2)$$

Apesar de a incerteza combinada ser aceitável para a incerteza de um resultado de medição faz-se necessário apresentar uma medida de incerteza que defina um intervalo sobre o resultado de medição, denominada como incerteza expandida. Denotada por U é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , sendo k definido com base no nível de confiança requerido para o intervalo, dado pela equação 3:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3)$$

A utilização de um fator k para a incerteza expandida corresponde a aproximadamente 95% de confiança.

Especificamente quanto à incerteza de medição de variáveis hidrológicas, como precipitação, temperatura, vento e umidade, a World Meteorological Organization (WMO) apresenta no *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* Nº 8 (2008a) os requisitos de incerteza de medição operacional e de desempenho dos mesmos.

3.3.2 Incerteza dos valores dos parâmetros do modelo

Dentre os métodos para avaliação das incertezas dos valores dos parâmetros destacam-se os denominados probabilísticos que se baseiam em duas abordagens estatísticas (PAULINO *et al*, 2003):

- Inferência frequentista ou clássica: capta a variabilidade inerente ao processo. Segundo Brooks (2003), os frequentistas veem o parâmetro como um valor fixo, estimando o mesmo a partir de uma função de verossimilhança ou função de probabilidade. Nesse método assume-se que os resíduos são representados por uma distribuição normal com média zero e desvio padrão conhecido (RAMPINELLI, 2016);
- Inferência subjetiva ou bayesiana: captura o desconhecimento do indivíduo sobre a variável em estudo. Segundo Brooks (2003) os bayesianos veem os parâmetros como um valor fixo, mas que são aleatórios (abordagem estocástica), podendo ser modelados por uma distribuição de probabilidade. Consiste ainda em combinar toda a informação subjetiva à disposição e relacionada a um problema, com a informação oriunda dos dados observados, através de declarações probabilísticas via Teorema de Bayes. Constitui-se numa ferramenta promissora para análise de incertezas em modelos hidrológicos (RAMPINELLI, 2016).

Devido à aleatoriedade dos valores dos parâmetros os mesmos devem ser considerados sob uma modelagem estocástica. A base para a simulação estocástica corresponde à geração de números aleatórios que são distribuídos uniformemente baseados numa função de probabilidade (KARAMOUZ *et al*, 2013). Dentre as técnicas destacam-se: métodos de simulação de Monte Carlo, Hipercubo Latino, Cadeias de Markov e Redes Neurais Artificiais (RNA) (SILVA *et al*, 2014; XIN, 2014; KARAMOUZ *et al*, 2013)

As técnicas de simulação de Monte Carlo são um grupo de métodos que buscam gerar valores de forma mais sistemática a partir de uma Amostragem Aleatória Adaptativa. Nesses métodos o novo valor gerado entorno do atual deve melhorar a função objetivo, caso contrário é rejeitado (KARAMOUZ et al, 2013). O outro método, conhecido como Hipercubo Latino é semelhante ao método de Monte Carlo, mas geralmente converge para melhores resultados, reduzindo o número de execuções necessárias para obtenção de um resultado preciso. O método é baseado no design do quadrado latino, que tem uma única amostra em cada linha e coluna. É utilizado amplamente para a geração de amostras aleatórias controladas (XIN, 2014).

Existem os métodos que utilizam Cadeias de Markov, que consideram a existência de uma dependência de valores futuros do processo baseados em valores passados, e que de acordo com Karamouz (2013) a maioria dos processos hidrológicos seguem esse processo. A utilização de redes neurais artificiais também correspondem a outra alternativa para modelagem da aleatoriedade, e que permitem simular um sistema para o qual existe um grande conjunto de dados, mas nenhum modelo matemático conhecido existe ou simplificando um modelo excessivamente complexo. Contudo, o desempenho e desenvolvimento das redes neurais são muito dependentes dos dados, e não há metodologia estabelecida para o seu desenho e implementação bem sucedidos (KARAMOUZ et al, 2013).

Na literatura encontram-se em uso diferentes métodos como o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) (Abbaspour et al, 2004, 2007), *Particle Swarm Optimization* (PSO), o *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), o Metropolis, o DREAM, o UCODE, o PEST, o ParaSol (Duan et al, 1992) e o Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC). De acordo com Yang et al (2008) não é possível comparar literalmente as técnicas, pois as mesmas são diferentes em suas estruturas, deixando a critério do usuário a escolha da função de probabilidade ou função objetivo. Numa tentativa de comparação, Yang et al (2008) avaliaram cinco métodos de análise de incerteza (GLUE, ParaSol, SUFI-2 e outras derivadas destas) e uma estrutura bayesiana implementada usando Monte Carlo via Cadeias de Markov, na bacia Chaohe no Norte da China. Ao comparar os desempenhos das melhores estimativas de cada procedimento, a base conceitual, eficiência computacional e dificuldade de implementação, Yang et al (2008) destacam que as abordagens bayesianas são mais recomendáveis devido a sólida base conceitual, sendo que constaram que as técnicas

GLUE, SUFI-2 e MCMC levaram a uma previsão similar das bandas de incertezas. Apesar de técnica MCMC ter sido recomendada, a mesma apresenta dificuldade de implementação sob o aspecto computacional.

Destaca-se que o maior número de experiências se concentra no uso do *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2), o qual foi selecionado para essa pesquisa. O algoritmo SUFI-2 tem sido utilizado para investigação de incertezas relacionadas aos dados de entrada de precipitação em modelos hidrológicos, análise de sensibilidade de parâmetros e comparação com outras técnicas de análise de incertezas (NETO et al, 2018, KHALID et al, 2016, YANG et al, 2008). Ressalta-se ainda que o uso do método resulta num menor número de execuções de simulações alcançando boas bandas de incertezas de predição de desempenho de modelos hidrológicos (KHOI et al, 2015; YANG et al, 2008).

3.3.2.1 Algoritmo de análise de incertezas *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2)

Constitui-se num método semiautomático de autocalibração e de análise de incertezas dos valores dos parâmetros. De acordo com Abbaspour (2015) a incerteza dos valores é representada através de uma distribuição uniforme de probabilidade, no qual o processo de iteração finaliza com um intervalo de incerteza com 95% de probabilidade das vazões simuladas contornarem a faixa de vazões observadas, assim como quando a espessura dessa faixa for considerada pequena. No SUFI-2 a incerteza nos parâmetros é expressa em intervalos, onde são contabilizadas todas as fontes de incertezas. A propagação das incertezas nos parâmetros leva a incertezas nas variáveis de saída do modelo, que são expressas por distribuições de probabilidade de 95%, que é referido como incerteza da previsão de 95%, ou 95PPU, numa abordagem de calibração estocástica (ABBASPOUR, 2015). O algoritmo opera executando várias iterações, geralmente inferiores a 5, onde a região do espaço dos valores dos parâmetros são aumentadas, produzindo melhores resultados. Os parâmetros são sempre atualizados gerando intervalos sempre menores do que os intervalos anteriores. O conceito de análise de incerteza do algoritmo SUFI-2 é representado graficamente na Figura 3, onde a propagação da incerteza dos parâmetros é representada pela região sombreada.

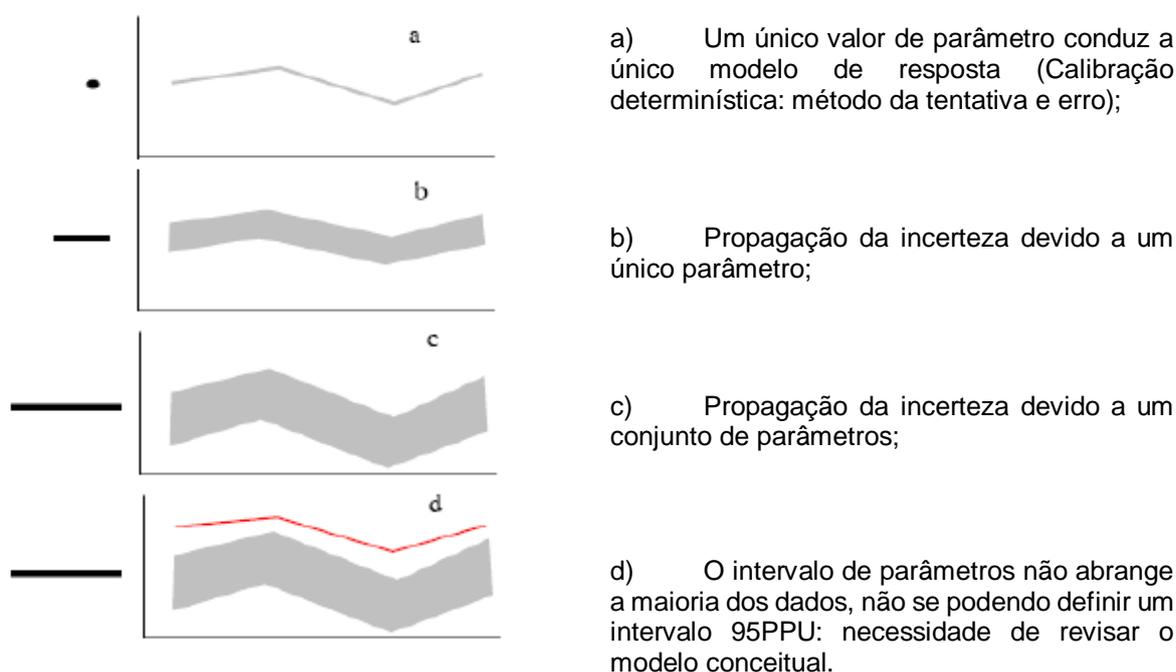


Figura 3 - Ilustração conceitual da análise de incertezas pelo algoritmo SUFI-2

Fonte: Abbaspour, 2015

A qualidade do ajuste entre as observações e o resultado da melhor simulação pode ser verificada por diferentes funções objetivo. Contudo, Abbaspour (2015) ressalta que a proposta do algoritmo não corresponde pela busca da melhor solução como num procedimento determinístico, mas que a melhor solução corresponde ao intervalo de parâmetros finais do processo iterativo. Caso o intervalo de 95PPU obtido ao final não compreender os dados observados indica-se que o modelo conceitual seja revisado, pois neste caso não corresponde a um problema de calibração de parâmetros.

3.4 Experiências de aplicação da análise de incertezas de vazões na gestão das águas

Na literatura encontram-se experiências de aplicação de análise de incertezas de vazões na gestão das águas, constando-se que a maioria objetiva dotar os tomadores de decisão de mais informações, assim como destacando as diferentes possibilidades e limitações dos resultados. No que se trata de experiências relacionadas a esse assunto em recente pesquisa realizada por Guillaume et al (2017) foi investigada a

forma de discussão das incertezas em pesquisa de recursos hídricos, baseando-se na análise de 177 resumos da revista *Water Resources* publicadas no ano de 2015. Os resultados mostraram que 40% dos resumos consideram o fato de evidenciar a incerteza como algo suficiente e que existe, enquanto que em 5% dos resumos ela é quantificada. Em virtude dos resultados os autores destacaram que ainda há a necessidade de debate para decidir em quais contextos a abordagem das incertezas se apresentariam de forma apropriada.

Ressalta-se que são escassos os trabalhos que analisem as quantificações econômicas dos benefícios da utilização de sistemas probabilísticos na gestão das águas (PAPPENBERGER et al, 2015), contudo, identificam-se algumas experiências como as de Goharian et al (2018) e estudos de caso de MC Millan et al (2017) a nível internacional, e de Fan et al (2015) a nível nacional, apresentadas no Quadro 2.

As experiências citadas anteriormente mostram que as análises de incertezas são abordadas de forma distintas, mas em todos os casos, observa-se a preocupação em dotar os gestores e tomadores de decisão de informações quanto às diferentes possibilidades de resultados, que nestes casos, foram as vazões usadas na gestão. Em todos os casos, os resultados apresentaram contribuições relevantes ao assunto, o que mostra a necessidade de novas pesquisas.

Quadro 2 – Experiências envolvendo a abordagem das incertezas na gestão das águas

Áreas de aplicação das incertezas na gestão das águas	Experiências
Abastecimento de água	Goharian <i>et al</i> (2018) modelaram a partir de modelo chuva vazão três bacias hidrográficas: Karaj, Latyan e Lar, no Irã, e que são responsáveis pelo atendimento de água de algumas localidades. O objetivo foi analisar as incertezas associadas à simulação hidrológica utilizando um algoritmo de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC) visando avaliar a propagação dessas incertezas no desempenho de reservatórios e sistemas de abastecimento de água. Os resultados obtidos mostraram que as incertezas associadas aos parâmetros do modelo hidrológico se propagaram resultando numa ampla variação no armazenamento dos reservatórios, registrando-se valores variáveis de até 70% em relação aos observados, e variação no desempenho dos sistemas de abastecimento de água. Os autores destacaram a partir dos resultados a necessidade de avaliar esses sistemas de abastecimento de água sob condições de incertezas a fim de apoiar os gestores de água para processos de tomada de decisão mais eficientes.
Setor hidrelétrico	Mc Millan <i>et al</i> (2017) destacam um estudo de caso, onde foram demonstrados altos custos econômicos associados a erros de dados de vazões utilizadas para manter as vazões mínimas a jusante de hidrelétricas na Noruega. Na operação dessas hidrelétricas erros na curva chave entorno de 1 m ³ /s poderiam gerar perdas econômicas entorno de 5.000 euros por dia. Ao constatar erros de medição numa determinado período de tempo foi obtida uma nova curva chave utilizando análise bayesiana com intervalos de garantia de 95%, ao invés de realizarem investimentos para melhoria da precisão da curva chave a partir de medições de vazões observadas. De acordo com os autores, os custos para a realização de medições seriam bem mais vantajosos, do que assumir o risco de 5% de erro das vazões, que resultariam em perdas econômicas bem superiores ou sujeito a taxas de penalização devido a não manutenção das vazões mínimas a jusante.
Águas subterrâneas	Mc Millan <i>et al</i> (2017) destacam um estudo de caso na Ilha Norte da Nova Zelândia onde o governo local desejava determinar um limite de captação de água para o Lago Rotorua, objetivando controlar o uso da terra na bacia e visando melhorar a qualidade da água a partir da redução das entradas de nitrogênio e fósforo. A problemática estava relacionada com a quantificação das vazões de contribuição das águas subterrâneas para o lago, sendo que as contribuições superficiais poderiam ser estimadas com precisão. No estudo foram estimados os escoamentos superficiais com faixas de incertezas a partir de dados de precipitação e área de contribuição, obtendo-se o escoamento subterrâneo por diferença a partir dos dados de vazões medidas; os desvios das medições de vazões também foram considerados. As incertezas das vazões estimadas foram apresentadas a partir de mapas com limites máximo e mínimo da fronteira de captação de água subterrânea, o que produziria impacto na mudança do uso da terra. Essas informações foram fornecidas ao público e governo sendo discutidas em audiências públicas as regras de gerenciamento do uso da terra.
Qualidade da água	Mc Millan <i>et al</i> (2017) refere-se aos erros de vazões estimadas pelo modelo hidrológico e usadas para avaliação das tendências de qualidade da água na Nova Zelândia. Nesse trabalho o governo da Nova Zelândia realizou uma análise da qualidade da água em escala nacional, contudo, anteriormente foram realizadas estimadas de vazões médias diárias a partir de modelo hidrológico em virtude da inexistência de vazões medidas nos locais de amostragem. Em virtude da preocupação do governo quanto incertezas relacionadas as estimativas de vazões dos modelos foi realizada uma análise comparativa da qualidade da água, em determinadas seções, considerando as vazões observadas e simuladas. Os erros comparativos foram considerados pequenos,

Áreas de aplicação das incertezas na gestão das águas	Experiências
	apesar de o modelo ter estimado vazões maiores, e as vazões estimadas pelo mesmo foram aproveitadas em locais sem informação.
Tomada de decisão compartilhada	Fan <i>et al</i> (2015) discutiram o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para a tomada de decisão a partir de um jogo realizado durante o XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em 2013, em Bento Gonçalves junto ao público participante. Nesse jogo os participantes eram dotados de informações de previsão de vazão com e sem informações probabilísticas. A situação simulada foi a tomada de decisão relativa a abrir ou não uma comporta que serve de proteção contra eventos de cheia em uma cidade localizada a jusante da comporta, onde eram dadas três opções ao jogador: abrir a comporta, não abrir a comporta e a não ocorrência de cheia, juntamente com informações de previsão do nível do curso d'água. Para cada situação estavam associados prejuízos financeiros e de infraestrutura. Com a participação de 179 jogadores, Fan <i>et al</i> (2015) após analisarem os resultados constataram que a existência da informação de incerteza influenciou na decisão das pessoas sendo mais propensas ao risco, resultou em melhores sequências de decisões, com menores perdas econômicas e decisões mais coerentes entre os participantes.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

Localizada no estado da Bahia, a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (BHP) situa-se na região centro-oeste com uma área total de 54.877 km², delimitada pelas coordenadas 11°17' e 13°36' latitude sul e 38°50' e 42°01' longitude oeste. Dentre os seus afluentes destacam-se os rios Jacuípe, Capivari, Cumbica, Cochó, Bonito, Santo Antônio, Utinga, Serrano, Preto, Una e do Peixe. A BHP é subdividida em três regiões: Alto, Médio e Baixo Paraguaçu, que possui características físicas e climáticas distintas.

Justifica-se a seleção da área de estudo, por ser uma bacia estratégica, responsável pelo abastecimento de água para a Região Metropolitana de Salvador (RMS) a partir da barragem de Pedra do Cavalo, tendo sido objeto de diversas pesquisas acadêmicas (SILVA et al, 2017; VALÉRIO & JÚNIOR, 2015; SILVA, 2012; SILVA, 2014; FONTES et al, 2010; GENZ, 2006). Em virtude da maior presença de cursos d'água perenes e intermitentes, a região do Alto Paraguaçu (BHAP) possui grande concentração de barramentos e maior número de pontos de outorgas de direito de uso de recursos hídricos, em especial na região do rio Utinga, e rede fluviométrica e pluviométrica nos principais cursos d'água.

Para essa pesquisa selecionou-se a bacia hidrográfica delimitada pela estação fluviométrica de Porto, localizada nas coordenadas latitude -12,49° e longitude -41,33° e que abrange cerca de 37% da região do Alto Paraguaçu (BHAP). Na apresenta-se a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, com destaque para a região de estudo.

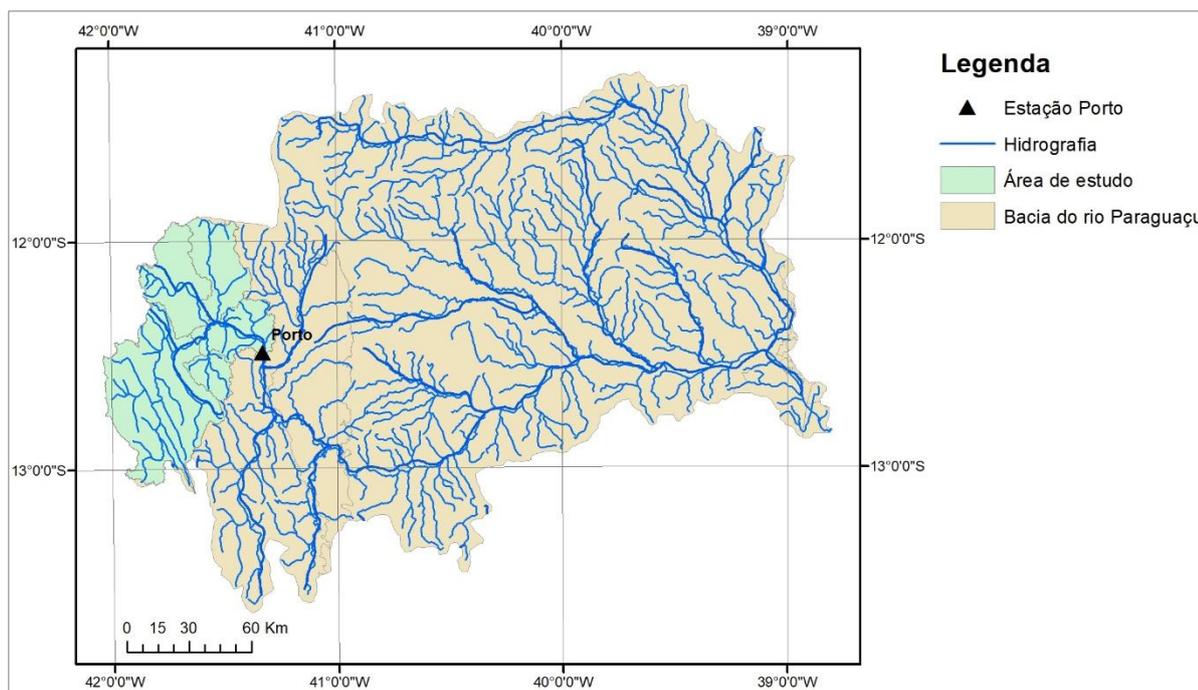


Figura 4 – Bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e área de estudo

4.1.1 Características físicas e climáticas da bacia

A BHAP apresenta três tipos de regimes climáticos: semiárido, semiúmido e úmido. O regime semiárido observa-se na região da cabeceira, compreendendo os municípios de Boninal, Ibiquera até Mulungu do Morro, registrando-se esse mesmo comportamento na região central da bacia, até a região limítrofe entre a sub-bacia do rio Jacuípe com a bacia do rio Itapicuru.

Na cabeceira o relevo predominante são os Planaltos e Serras da Chapada Diamantina, de norte a sul, entre os municípios de Morro do Chapéu até Mucugê. Nessa região localizam-se também as Chapadas dos rios Irecê e Utinga, como uma faixa de transição entre os planaltos e serras citados para a região da Depressão Sertaneja, que abrange toda a área do Médio Paraguaçu. A região da cabeceira apresenta as maiores altitudes da bacia, sendo variáveis entre 400 a 1000 metros, entre Lençóis, Barra da Estiva e Morro do Chapéu, enquanto que nas regiões do médio e baixo Paraguaçu estão entorno de 200 a 300 metros.

As conformações de relevo citadas na região do Alto Paraguaçu são constituídas de coberturas metassedimentares, que de acordo com Pereira (2006), favorecem o escoamento superficial em bacias com regime pluviométrico mais intenso, como na

BHAP onde os totais anuais variam entre 700 e 1000 mm. Destaca-se que registram-se chuvas frequentes que contribuem para o escoamento superficial, favorecendo a manutenção do fluxo no rio Utinga até a confluência com o rio Paraguaçu.

A exceção quanto ao escoamento superficial no Alto Paraguaçu, refere-se a áreas com formações cársticas (Formação Salitre), que são constituídas por rochas carbonáticas com alta porosidade e permeabilidade, além de serem potenciais armazenadoras de água subterrânea (FEITOSA & FILHO, 2000, p. 27). Estas formações estão localizadas na região dos municípios de Mulungu do Morro e Souto Soares na cabeceira das nascentes do rio Santo Antônio, que contribui para o rio Utinga, e na região entre Utinga, Nova Redenção e Itaeté, destacando-se que esse tipo de ocorrência se registra somente na área do Alto Paraguaçu.

4.2 Descrição das etapas metodológicas

A pesquisa de perfil exploratório subdivide-se em quatro procedimentos metodológicos que se inter-relacionam e que abrangem um conjunto de atividades para alcance dos objetivos propostos.

O desenvolvimento da pesquisa previu inicialmente a obtenção e análise de dados físicos e hidroclimatológicos da área de estudo em fontes oficiais de informações. Esses dados foram verificados quanto a consistência, qualidade e nível de representatividade espacial das estações pluviométricas e fluviométricas.

Previamente foi realizado a calibração manual e validação do modelo hidrológico, e posteriormente realizou-se a autocalibração utilizando-se o método hipercubo latino, acoplado ao *software* SWAT CUP a partir do algoritmo SUFI-2. O método hipercubo latino permite gerar valores para os parâmetros de forma sistemática. Na fase de autocalibração são calculadas as incertezas dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico, no caso, a faixa de valores dos parâmetros. O conjunto de valores dos parâmetros melhor avaliado na autocalibração foi utilizado para a simulação que objetivou a extensão da série de vazões diárias, e para análise dos efeitos das incertezas de medição das precipitações diárias e das variáveis climáticas na geração das vazões.

As incertezas de medição dos dados de entrada: precipitação diária das estações pluviométricas e variáveis climáticas (precipitação, temperatura, umidade, radiação

solar e velocidade do vento) das estações climatológicas foram quantificados com base no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (JCGM 100:2008) e recomendações da WMO (2008). A partir da quantificação das incertezas de medição dos dados de entrada e das variáveis climáticas foram geradas séries sintéticas de dados, que consideram a faixa superior e inferior dos valores medidos, as quais foram utilizadas para simulações chuva-vazão.

As simulações chuva-vazão que consideram as incertezas dos valores dos parâmetros foram efetuadas com os valores máximos, mínimos e médios obtidos na fase de autocalibração do modelo.

Em seguida, a partir dos resultados de cada simulação foram construídas curvas de permanência a nível diário obtendo-se as vazões de referência ($Q_{50\%}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$) sendo a vazão $Q_{90\%}$, adotada no Estado da Bahia para a finalidade de outorga e por ser uma vazão de alta garantia, sendo esta considerada como objeto de análise.

Com as disponibilidades hídricas obtidas, com e sem a inclusão da análise das incertezas, foram realizadas as análises comparativas quantitativas entre as vazões outorgáveis simuladas com incertezas, em relação àquelas adotadas pelo gestor. A metodologia proposta para essa pesquisa apresenta-se esquematizada na Figura 5 onde são destacados os objetivos específicos e as atividades correlacionadas.

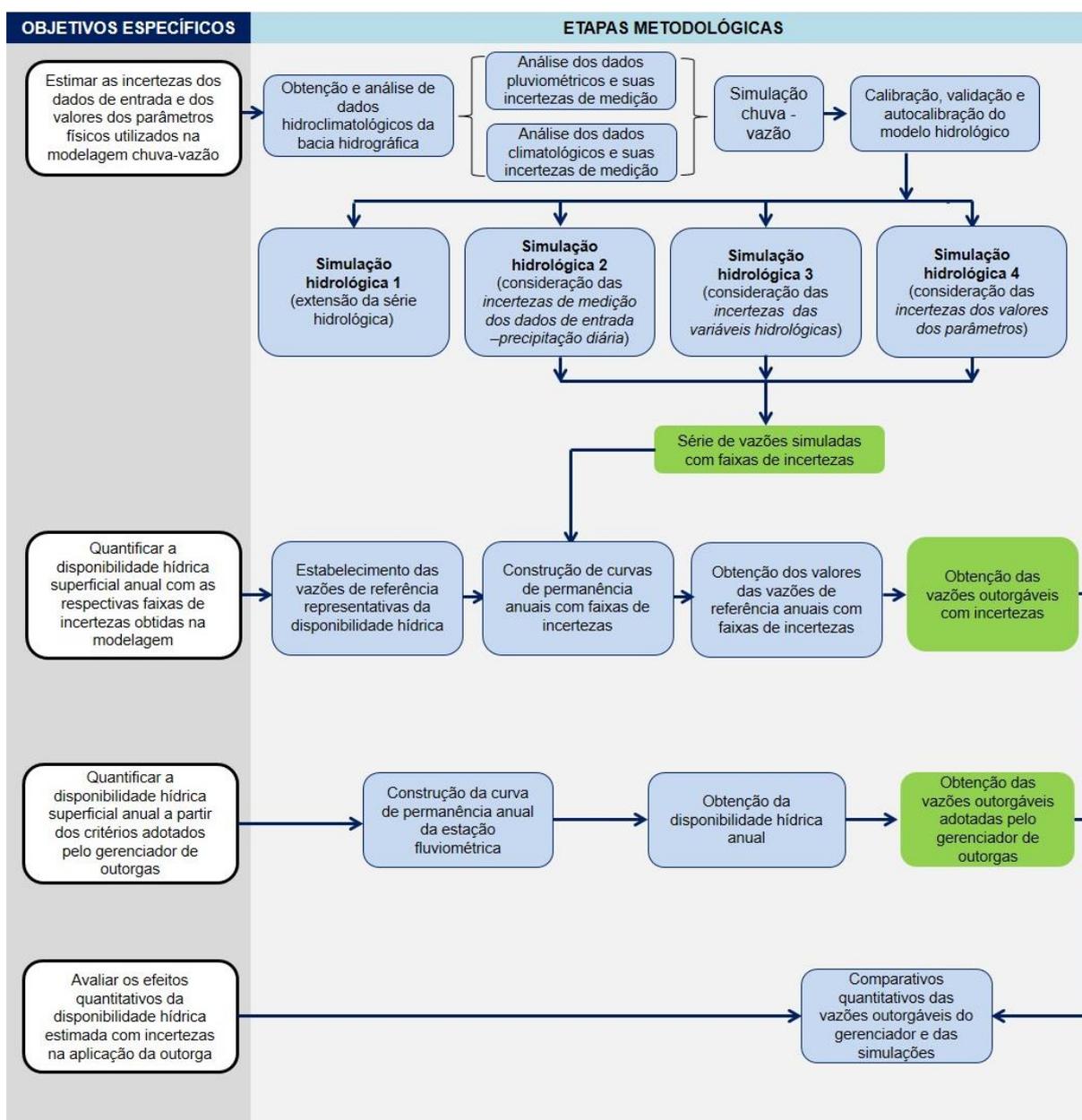


Figura 5 – Fluxograma metodológico da pesquisa

4.2.1 Obtenção e análise de dados físicos e hidroclimatológicos da bacia hidrográfica

4.2.1.1 Modelo Digital de Elevação

Para a construção da base topográfica e geração da malha hidrográfica utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pela Embrapa Monitoramento por Satélite, no formato GEOTIFF, com resolução espacial de 90 metros e Datum WGS

84 obtida pela *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. De acordo com Miranda (2005) o MDE foi gerado por interferometria de radar e cálculo da resolução da elevação da superfície, com uma acurácia vertical de 16 metros (90% de confiança) (EMBRAPA, 2005). Nesta pesquisa foram utilizadas as cartas SD-23-X-B, SD-24-V-C, SD-24-V-A e SD-24-Y-C com escala de 1:250.000.

4.2.1.1 Estação fluviométrica

Foram identificadas na região do Alto Paraguaçu cerca de 44 estações fluviométricas no sistema HidroWeb da ANA. Constatou-se que na região somente 5 estações fluviométricas possuíam registros diários de vazões até o ano de 2017: Itaeté, Fertém, Porto, Andaraí e Utinga, compreendendo um período de 68 anos. Para a pesquisa selecionou-se a sub-bacia delimitada pela estação Porto por ser uma região com maior predominância de cursos d'água perenes e intermitentes. Na Tabela 1 apresentam-se informações gerais da estação fluviométrica selecionada na região de estudo, sendo utilizado somente o período de 1960-1990.

Tabela 1 – Dados gerais da estação fluviométrica selecionada

Código	Estação	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)	Período de registro total	
					Início da série	Final da série
51140000	Porto	-12,49	-41,33	6.180	Fev/1935	Mar/2018

Fonte: Adaptado do Hidroweb (2017)

4.2.1.1 Estações pluviométricas

Os dados de precipitação e vazão são obtidos no Sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo que foram identificadas na área em estudo cerca de 33 estações e na circunvizinhança 16 estações. Em virtude da limitação na distribuição espacial, o período de registro selecionado com conjunto de estações melhor distribuídas espacialmente na bacia correspondeu a 1960-1990 (31 anos), no qual 13 estações foram identificadas. Na Tabela 2 apresentam-se informações gerais das estações pluviométricas identificadas na região de estudo.

Tabela 2 – Dados das estações pluviométricas da região de estudo (1960-1990)

Código	Estação	Latitude	Longitude	Responsável	Período de registro total	
					Início da série	Final da série
01240012	Itaeté	-12,99	-40,96	ANA	mar/33	abr/18
01241008	Andaraí	-12,80	-41,33	ANA	jul/43	abr/18
01341015	Novo Acre	-13,43	-41,10	DNOCS	nov/26	jun/91
01241022	Seabra	-12,42	-41,77	DNOCS	jan/60	dez/91
01141012	Bonito (Ibiapora)	-11,97	-41,27	DNOCS	mai/33	jun/90
01241018	Wagner (Itacira)	-12,29	-41,17	DNOCS	nov/37	nov/90
01241017	Porto	-12,50	-41,30	ANA	jul/41	mar/18
01341006	Piatã (Anchieta)	-13,15	-41,78	DNOCS	jun/18	abr/91
01341009	Inubia (Ipiranga)	-13,12	-41,98	DNOCS	jan/60	dez/96
01140026	Ventura	-11,64	-40,95	DNOCS	set/43	dez/94
01341013	Ituaçu	-13,82	-41,30	DNOCS	mai/11	dez/85
01341021	Ituaçu	-13,81	-41,30	INMET	jan/77	fev/89
01341029	Ituaçu	-13,81	-41,30	ANA	ago/84	abr/18

Fonte: Adaptado do Hidroweb (2017)

A estação Ituaçu apresentada na Tabela 2 foi considerada como uma estação única, com série histórica constituída a partir dos dados das estações 1341013, 1341021 e 1341029.

4.2.1.1 Estações climatológicas

No banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) identificam-se 6 estações meteorológicas de superfície cadastradas na região, contudo, as estações mais próximas são Lençóis e Itaberaba, conforme apresentadas na Tabela 3, sendo estas consideradas para a área de estudo. O período considerado para análise das séries climatológicas foi de 1973-1980.

Tabela 3 - Dados das estações meteorológicas da região de estudo

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Série histórica disponível
83244	Itaberaba	12°31'S	40°17'W	249,9	01/1961 – 12/2017
83242	Lençóis	12°34'S	41°23'W	438,7	01/1961 – 12/2017

Fonte: Adaptado INMET (2018)

4.2.1.2 Dados de solos

O mapa de solos foi obtido com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), atualizado com base no novo sistema brasileiro de classificação de solos. Identificam-se na região de estudo 7 tipos de solos: Argissolos Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Luvisolo Crômico e Neossolo Litólico. Predomina na maior área da bacia os solos Latossolos abrangendo cerca de 78% da região. A Tabela 4 apresenta a quantificação dos solos identificados na área de estudo.

Tabela 4 – Dados de solo da área de estudo

Tipo de solo	Área (km²)	Área (%)
Neossolo Litólico	3.195,25	19,34%
Latossolo Amarelo	9.065,35	54,87%
Luvisolo Crômico	232,77	1,41%
Argilossolo Vermelho-Amarelo	171,63	1,04%
Latossolo Vermelho	3.625,89	21,95%
Latossolo Vermelho-Amarelo	229,87	1,39%
Total	16.520,77	100,00%

As características dos solos foram obtidas a partir do *Harmonized World Soil Database v 1.2*, que se constitui num banco de dados de propriedades físicas, químicas e biológicas de solos de todo o mundo divulgados pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2019)*. No banco de dados foram obtidas informações quanto à profundidade da camada de solo, o teor de carbono orgânico, de argila, areia e de rocha por camada de solo. Para a utilização dos dados de solos da FAO considerou-se a correspondência entre classes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), disponibilizado pela Embrapa (2018) e as classes da WRB/FAO. Na Tabela 5 e na Figura 6 apresenta-se a redelimitação dos tipos de solos na área de estudo.

Tabela 5 – Correspondência entre os solos do SiBCS e da WRB/FAO na área de estudo

Tipo de solo (SiBCS)	Tipo de solo correspondente (WRB/FAO)
Neossolo Litólico	Leptosols
Latossolo Amarelo	Ferralsols
Luvisolo Cromico	Luvisols
Argilossolo Vermelho-Amarelo	Acrisols

Tipo de solo (SiBCS)	Tipo de solo correspondente (WRB/FAO)
Latossolo Vermelho	Ferralsols
Latossolo Vermelho-Amarelo	Ferralsols

As propriedades hidráulicas dos solos foram estimadas pelas equações de Saxton e Rawls (2006). Em virtude da correspondência apresentada na Tabela 5 os solos da área de estudo foram reclassificados em 4 classes: Leptosols, Ferralsols, Luvisols e Acrisols (Figura 6).

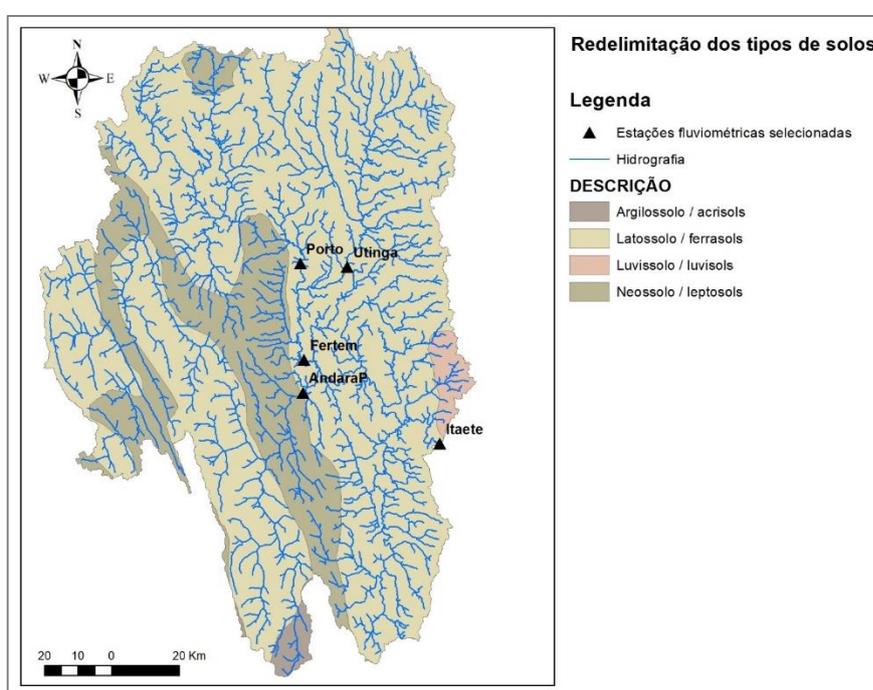


Figura 6 – Redelimitação dos tipos de solos na área de estudo

4.2.1.1 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo considerado refere-se ao mapeamento elaborado pela divisão de Cartografia do Projeto RADAM BRASIL, organizado na escala 1:250.000 e construído a partir da análise de imagens de radar/SLAR na década de 80. As folhas do mapeamento selecionadas e que abrangem a região de estudo referem-se a: SD.23 – Brasília-1982, SC.24 Aracaju/Recife -1983 e SD.24 Salvador-1981. Justifica-se a seleção das folhas do projeto citado pelo fato de o mesmo ser resultante do mapeamento realizado na década de 70 a 80, correspondendo ao mesmo período de

registro de vazões da estação fluviométrica selecionada. Logo considera-se que o mesmo seja representativo para o período de histórico selecionado para o estudo. Foram identificadas na área de estudo 30 classificações de uso do solos, sendo reorganizados em 8 classes de uso conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Tipos de uso do solo na área de estudo

Tipos de uso do solo	Área (km ²)	%
Floresta estacional semidecidual e decidual montana	384,34	2,33%
Caatinga (Savana)	2.836,94	17,17%
Agricultura	6.075,55	36,78%
Área urbana	26,87	0,16%
Pecuária (pasto) ¹	4.814,64	29,14%
Corpo d'água	16,94	0,10%
Formações pioneira de influência fluvial (Zonas alagadas e de deposição de sedimentos)	111,82	0,68%
Refúgio vegetacional montano (Campos de altitude ou arbustiva)	2.253,66	13,64%
Total	16.520,77	100,00%

Notas:

¹ Inclui a parcela de vegetação secundária

Fonte: Adaptado IBGE, 1981; IBGE, 2012.

Para fins de modelagem hidrológica o uso e ocupação do solo foi reclassificado de acordo com as classificações do modelo SWAT, conforme apresentado na Tabela 7, destacando a predominância da agricultura e pasto na maior área da bacia (Figura 7).

Tabela 7 – Reclassificação do tipo de uso e ocupação do solo na bacia

Tipos de usos do solo	Descrição SWAT	Código SWAT adotado	% da área
Floresta	Forest-Evergreen	FRSE	2,33%
Caatinga	Range-Brush	RNGB	17,17%
Agricultura	Agricultural Land-Row Crops	AGRR	36,78%
Área urbana	Residential-Low Density	URLD	0,16%
Pecuária (pasto)	Pasture	PAST	29,14%
Corpo d'água	Water	WATR	0,10%
Formações pioneira de influência fluvial ¹	Wetlands-Mixed	WETL	0,68%
Refúgio vegetacional montano (campos de altitude ou arbustiva) ²	Range-Grasses	RNGE	13,64%
TOTAL	-	-	100,00%

Notas:

¹ Zonas alagadas e de deposição intensiva de sedimentos. Tendem a ocorrer sobre solos formados por deposição fluvial (Neossolo Flúvico) ou em solos com lençol freático alto (Gleissolos)

² Constitui uma “vegetação relíquia”, com espécies endêmicas, que persiste em situações especialíssimas, como é o caso de comunidades localizadas em altitudes acima de 1 800 metros.

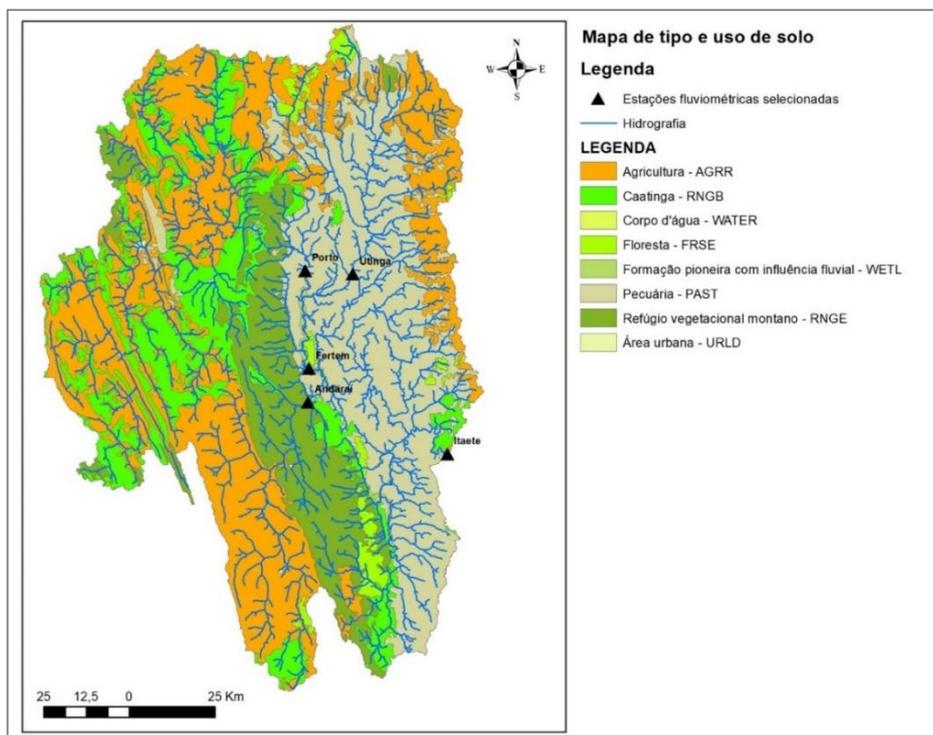


Figura 7 – Tipos e usos do solos reclassificados na área de estudo

4.2.2 *Análise dos dados pluviométricos e suas incertezas de medição*

4.2.2.1 *Análise de consistência e normalidade das séries de precipitação*

Com a análise de consistência permite-se identificar estações pluviométricas com tendências errôneas devido aos registros diários cumulativos, permitindo a realização de uma pré-seleção de estações, e posteriormente a delimitação de períodos sazonais secos e úmidos. Os valores diários de precipitação não foram preenchidos devido à grande variação espacial e temporal para eventos de frequência pequena, conforme recomendado por Tucci (1998), realizando-se preenchimento somente a nível mensal a partir do método da ponderação regional.

A seleção dos postos com dados mensais falhos foi efetuada a partir da avaliação do coeficiente de correlação de Pearson (r) obtido por regressão linear entre os dados mensais de cada estação correlacionada com as demais. Franzblau (1958) apresenta a seguinte categorização para o coeficiente r , também adotada nessa pesquisa para seleção de estações na etapa de preenchimento de falhas mensais:

- Se $r=0$, não existe relação linear entre as variáveis;
- Se $|r| < 0,20$, a correlação é negligenciável;
- Se $0,20 < |r| < 0,40$, a correlação é fraca;
- Se $0,40 < |r| < 0,60$, a correlação é moderada;
- Se $0,60 < |r| < 0,80$, a correlação é forte;
- Se $|r| > 0,80$, a correlação é muito forte.

Aplicou-se o teste de significância para a correlação de Pearson, com nível de significância $\alpha = 0,05$ e a estatística de teste com base na distribuição *t de Student* com $(n-2)$ graus de liberdade, sob a hipótese nula $H_0: \rho=0$ (inexistência de correlação na população).

Com os dados mensais preenchidos verificou-se a consistência pelo método da Dupla Massa, desenvolvido pelo Geological Survey (USA), visando identificar mudanças no comportamento da precipitação ao longo do tempo, ou mesmo no local de observação (SEARCY & HARDISON, 1960). Nessa pesquisa as estações identificadas como inconsistentes foram desconsideradas.

A utilização das médias e desvios padrões do conjunto de dados pluviométricos consistidos depende da verificação da normalidade das séries, ou seja, se o conjunto de dados se aproxima da distribuição normal. Essa verificação consistiu na aplicação do teste não paramétrico de normalidade de Kolmogorov-Sminorv, com nível de significância $\alpha = 0,05$. Esse teste foi aplicado à cada série de totais mensais do período de 1960-1989 das estações pluviométricas, sendo cada série formada por 30 dados.

4.2.2.1 Análise da estacionariedade das séries de precipitação

A verificação da estacionariedade das séries foi efetuada a fim de comprovar as invariância das observações amostrais, com relação à cronologia de suas ocorrências a partir do teste paramétrico *t-student* para a comparação de médias de dois grupos independentes, com populações subjacentes e ambas com distribuição normal. Adotou-se o nível de significância $\alpha = 0,05$ (nível de confiança = 95%).

Para a aplicação desse teste as séries hidrológicas de cada estação foi dividida em duas amostras com tamanhos iguais, cada qual com 182 meses. A amostra 1

compreendeu um período mais antigo, entre jan/1960 a jun/1975 e a amostra 2, o período mais recente, compreendido entre jul/75 a dez/1990. Esse teste foi aplicado nas séries de estações pluviométricas consideradas como consistentes pelo Método de Dupla Massa. Os resultados desse teste serviram como um dos critérios para a seleção das estações pluviométricas, onde caso constatada a não estacionariedade da série hidrológica, se desconsidera a estação do estudo.

4.2.2.1 *Análise da representatividade hidrológica das séries hidrológicas*

A fim de avaliar a representatividade do período selecionado em simular anos secos e úmidos foram avaliados os totais anuais precipitados por estação pluviométrica pré-selecionada, a partir da precipitações adimensionais apresentadas nas equações 4 e 5:

- Se $\frac{P_t}{P_m} > 1$, considera-se ano úmido (4)

- Se $\frac{P_t}{P_m} < 1$, considera-se ano seco (5)

Onde P_t é a precipitação total de um ano t e P_m é a precipitação média de todos os anos registrados na estação, independente do período histórico selecionado na pesquisa (BERTONI & TUCCI, 2005). Essa avaliação permitiu verificar possíveis tendências da série hidrológica a ser utilizada na modelagem hidrológica, em condicionar somente a representação de períodos secos ou úmidos.

4.2.2.2 *Análise da representatividade espacial das estações pluviométricas*

Essa análise foi baseada na densidade espacial, no que se refere à área de abrangência utilizando-se o método Polígonos de Thiessen. A utilização deste método na pesquisa limitou-se somente ao cálculo da área de influência de cada posto, sendo este adotado como um dos critérios para seleção final das estações pluviométricas para a modelagem hidrológica.

Os resultados dessa análise objetivaram selecionar as estações pluviométricas finais a serem utilizadas na modelagem hidrológica, sendo o último critério de seleção dentre os procedimentos citados anteriormente, assim como avaliar a relevância na representação espacial da precipitação da região.

4.2.2.1 Delimitação dos períodos secos e úmidos da série

A partir das estações pluviométricas selecionadas foram calculadas mensalmente as médias mensais, desvio padrão e coeficiente de variação de cada estação e posteriormente a média mensal do período selecionado. Em função das médias foi delimitado o ano hidrológico, formado por 12 meses e a delimitação de dois períodos sazonais: seco e úmido. Para a delimitação desses períodos os dados mensais foram reorganizados agrupando-se os meses com menores precipitações (período seco) e os meses com maiores precipitações (período úmido). A delimitação final do período seco e úmido baseou-se numa análise visual do gráfico precipitações mensais *versus* meses.

4.2.2.1 Análise de incertezas de medição dos dados pluviométricos

Na modelagem hidrológica da pesquisa são utilizados dados diários de precipitação, obtidos a partir de registro manual por observadores da ANA, os quais anotam as precipitações acumuladas em pluviômetros num período de 24 horas. Em virtude disso, a avaliação de incertezas dos dados diários do Tipo A, que envolve a análise estatística de séries observadas, não se aplica, pois é realizada uma única medição diariamente. Neste caso considerou-se somente a avaliação de incertezas dos dados diários do Tipo B, que baseia-se em informações de medições anteriores, sobre os instrumentos de medição e outros. Quanto a incerteza Tipo B, a WMO (2008) apresenta os requisitos de incerteza de medição operacional e desempenho de instrumentos meteorológicos onde para precipitações diárias onde estima-se uma componente de incerteza de $\pm 0,1$ mm para média diária ≤ 5 mm/dia, e de 2% para médias diárias > 5 mm/dia.

Por fim, para fins de modelagem hidrológica foram geradas séries sintéticas de dados de precipitações diárias (máximas e mínimas) com a inclusão da incerteza do Tipo B a partir da equação 4, sendo estas utilizadas posteriormente para a simulação de séries de vazões com incertezas devido a medição dos dados pluviométricos. .

$$Pv = Pme \pm u \quad (4)$$

Onde:

P_v = precipitação diária verdadeira (mm);

P_{me} = precipitação diária medida em campo (mm);

u = componente de incerteza (mm).

4.2.3 Análise dos dados fluviométricos

4.2.3.1 Análise da curva-chave

Os dados fluviométricos foram obtidos no Sistema Hidroweb da ANA objetivando verificar a estabilidade da seção de medição da estação fluviométrica e o ajuste da curva-chave disponibilizado pelo órgão para estimativa de vazões na seção. A qualidade da curva-chave da estação fluviométrica para estimativa de vazões mínimas foi classificada de acordo com o Quadro 3 no qual são definidos conceitos em função da magnitude da extrapolação entre as vazões observadas e as vazões estimadas.

Quadro 3 – Critérios para definição de conceitos para os postos fluviométricos quanto a vazões mínimas

Descrição	Conceito
Pouca ou nenhuma extrapolação inferior da curva-chave (< 50 cm); existência de uma única curva-chave na parte baixa, demonstrando estabilidade da seção de medição, especialmente do fundo. Boa cobertura de medições de vazão na parte inferior da curva.	A
Extrapolação de alguma importância (entre 50 cm e 1 m). Algumas alterações do talvegue e do fundo sem grandes migrações; dispersão das - medições das vazões na parte inferior da curva-chave. Oscilações da área da seção de escoamento.	B
Extrapolação grande da curva-chave (> 1,0 m). Grandes alterações do fundo do rio e pequenas modificações do talvegue; dispersão nas medições de vazão. Existência de duas ou mais curvas-chave na parte inferior. Aceitável com restrições.	C
Grandes extrapolações inferiores da curva-chave ($\leq 1,20$ m); alterações total do talvegue e do fundo do rio. Grandes dispersões de medições. Inaceitável para regionalização.	D.

Fonte: IPH, 1993 *apud* TUCCI, 2017, p.88.

4.2.4 Análise dos dados climatológicos e suas incertezas de medição

Para as estações climáticas selecionadas foram obtidos os dados de 6 variáveis climáticas: precipitação diária, temperatura máxima/mínima do ar, insolação, velocidade do vento e umidade relativa das estações climáticas Lençóis e Itaberaba. Os dados de insolação foram convertidos em valores de radiação solar a partir da

equação de Angström-Prescott, sendo a radiação solar o dado de entrada necessário para o modelo hidrológico. (ANGSTRÖM, 1924).

Os dados climáticos das estações climáticas selecionadas foram obtidos em escala diária ressaltando que a entrada dos dados dos parâmetros climáticos no modelo hidrológico é realizada na escala mensal. Nessa análise utilizou-se a série de dados diários medidos no período de 1973-1980 das variáveis climáticas citadas. Assim como na análise de incertezas de medição dos dados pluviométricos, considerou-se somente a avaliação de incertezas dos dados diários do Tipo B. Quanto a incerteza Tipo B, a WMO (2008) indica as faixas de incertezas apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Incertezas quanto a operação de instrumentos meteorológicos

Variável climática	Faixa	Mensuração da incerteza nos dados diários
Temperatura do ar	Faixa -80 - 60°C	0,3 para $\leq -40^{\circ}\text{C}$
		0,1 para $> -40^{\circ}\text{C}$ e $\leq 40^{\circ}\text{C}$
		0,3 para $> 40^{\circ}\text{C}$
Umidade relativa	0-100%	1%
Velocidade do vento	0-75 m/s	0,5 m/s para ≤ 5 m/s
		10% para > 5 m/s
Precipitação (diária)	0-500 mm	0,1 mm para ≤ 2 mm
		2% para > 5 mm
Radiação diária	-	0,4 MJ.m ⁻² para ≤ 8 MJ.m ⁻²
		5% para > 8 MJ.m ⁻²

Fonte: WMO (2008)

Por fim, para fins de modelagem hidrológica foram geradas séries sintéticas de dados diários de cada variável climática com a inclusão da incerteza do Tipo B, a partir da equação 5, sendo estas posteriormente utilizadas para a geração dos valores médios mensais dos parâmetros climáticos do modelo selecionado (14 parâmetros).

$$P_c = P_{cm} \pm u \quad (5)$$

Onde:

P_c = valor verdadeiro do parâmetro climático (unidade);

P_{cm} = valor do parâmetro climático medido em campo (unidade);

u = componente de incerteza (mm).

4.2.5 Simulação hidrológica chuva – vazão

4.2.5.1 Justificativa para a seleção do modelo

A seleção do modelo matemático chuva-vazão baseou-se inicialmente na análise do modelo hidrológico conceitual da bacia, no qual foram compreendidos os processos hidrológicos ocorrentes a partir da superposição de diversos temas físicos, como clima, relevo, hidrografia, solos, geologia e intervenções antrópicas. Constatou-se que a BHP apresenta regiões com comportamentos hidrológicos distintos no espaço da bacia, tanto na fase terrestre quanto na fase subterrânea, o que implica em considerá-la como um sistema que necessita ser discretizado de forma distribuída. Em virtude da heterogeneidade física da bacia hidrográfica selecionou-se o modelo chuva-vazão SWAT, que trata-se de um modelo físico distribuído, com ampla utilização em estudos hidrológicos, e por já ter sido aplicado em outros estudos na bacia. Exemplificações da aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Paraguaçu são citadas por Valério & Junior (2015) e por Fontes *et al* (2010), que realizaram estudos à nível mensal. Destaca-se também que no Brasil, Bressiani *et al* (2015) identificaram cerca de 113 estudos com a aplicação do modelo, em diferentes regiões brasileiras, indicando que a utilização do mesmo no país é promissora.

4.2.5.2 Modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e o SWAT CUP

O SWAT é um modelo hidrológico chuva-vazão, semi-distribuído, com intervalo de tempo contínuo e que permite a simulação de processos físicos numa bacia hidrográfica, sendo útil como ferramenta para avaliação do efeito do manejo de solo, transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas na produção da vazão líquida, com precisão razoável em grandes bacias. Atualmente com a extensão denominada ArcSWAT, permite-se a utilização do modelo com o *software* de geoprocessamento ArcGIS ArcView (ESRI, 1999). Outra interface do modelo conhecida como SWAT-CUP, utilizada na pesquisa corresponde a um programa de análise de sensibilidade, autocalibração estocástica e análise de incertezas, selecionando-se o algoritmo SUFI-2 que se baseia no método hipercubo latino.

4.2.5.3 Principais dados de entrada e parâmetros

A utilização do modelo hidrológico SWAT com a interface ArcSWAT necessita de dados cartográficos e tabulares, dentre os quais citam-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), do qual foram extraídas informações da topografia; mapa de tipos de solos da bacia (pedologia), com as respectivas propriedades e mapa de uso e ocupação do solo. Os demais dados, no caso tabulares, correspondem a informações das características físicas dos solos e de clima. O modelo apresenta uma estrutura na qual se propõe a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias agrupadas em categorias: clima, unidade de resposta hidrológica (HRU's), açudes, águas subterrâneas e o canal principal ou extensão. As HRU's são áreas dentro de sub-bacias formadas por única cobertura de terra e solo (NEITSCH et al, 2011).

Para cada HRU é realizado o balanço hídrico, sendo que o escoamento individual simulado em cada unidade se constitui numa parcela do valor total do escoamento da bacia hidrográfica, favorecendo uma melhor representação do comportamento hidrológico. Nesta pesquisa selecionou-se para a estimativa do escoamento superficial pelo modelo o método Número de Curva do *Soil Conservation Service* (SCS) e a estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith.

Ressalta-se que nas séries de precipitação diária com falhas de registro foi utilizado o gerador de clima WGEN/Wetaher Generator acoplado ao modelo hidrológico para realizar o preenchimento dos dados diários (NEITSCH et al, 2011).

Os parâmetros climáticos de entrada no gerador climático WGEN constam no Quadro 4, os quais foram obtidos para as estações climatológicas de Lençóis e Itaberaba, e os parâmetros de solos no Quadro 5, que foram obtidos a partir de dados secundários do *Harmonized World Soil Database v 1.2* citado anteriormente.

Quadro 4 - Descrição dos parâmetros climáticos do modelo SWAT

Parâmetro	Descrição
TMPMX (mon)	Média da temperatura máxima diária do ar por mês (°C)
TMPMN (mon)	Média da temperatura mínima diária por mês (°C)
TMPSTDMX (mon)	Desvio padrão para a temperatura máxima diária do ar no mês (°C)
TMPSTDMN (mon)	Desvio padrão para a temperatura mínima diária do ar no mês (°C)
PCPMM (mon)	Precipitação total média ou média mensal (mm H ₂ O)

Parâmetro	Descrição
PCPSTD (mon)	Desvio padrão para a precipitação diária no mês (mm H ² O/dia)
PCPSKW (mon)	Coefficiente de inclinação para precipitação diária no mês
PR_W(1, mon)	Probabilidade de um dia molhado após um dia seco no mês
PR_W(2, mon)	Probabilidade de um dia molhado após um dia chuvoso no mês
PCPD (mon)	Número médio de dias de precipitação no mês
RAINHHNX (mon)	Precipitação máxima de 0,5 hora em todo o período de registro por mês (mm H ² O)
SOLARAV (mon)	Média da radiação solar diário no mês (MJ/m ² /dia)
DEWPT (mon)	Temperatura média de ponto de orvalho diário para cada mês (°C) ou umidade relativa pode ser inserida (%)
WINDAV (mon)	Velocidade média diária do vento no mês (m/s)

Fonte: Adaptado Arnold (2012).

Para a geração dos dados climáticos constantes no Quadro 4 utilizou-se o *software* SWAT Weather Database v.0.16.06 para a geração dos parâmetros climáticos nas escala mensal utilizados no SWAT. Os dados de entrada para o *software* são: umidade relativa (HMD), precipitação (PCP), radiação solar (SLR), temperatura máxima e mínima (TMP) e velocidade do vento (WND).

Quadro 5 - Descrição dos parâmetros de solos do modelo SWAT

Parâmetro	Descrição
NLAYERS	Número de camadas do solo
HYDRGRP	Grupo hidrológico (A, B, C ou D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima para o desenvolvimento da raiz no solo (mm)
SOL_Z	Profundidade, da superfície até o fundo da camada (mm)
SOL_BD	Densidade do solo (g/cm ³)
SOL_AWC	Quantidade de água possível de ser armazenada no solo (mmH ₂ O/mm solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)
SOL_CBN	Quantidade de carbono orgânico (% do peso do solo)
SOL_CLAY	Quantidade de argila (% peso do solo)
SOL_SILT	Quantidade de silte (% do peso do solo)
SOL_SAND	Quantidade de areia (% do peso do solo)
SOL_ROCK	Quantidade de rochas (% do peso do solo)
SOL_ALB	Albedo do solo (%)
USLE_K	Fator de erodibilidade

Fonte: Adaptado Arnold (2012).

O parâmetro de quantidade de água disponível no solo (SOL_AWC) foi obtido pela função de pedotransferência de Saxton & Rawls (2006), que utiliza apenas

granulometria e teor de matéria orgânica. No Quadro 6 apresentam-se 15 parâmetros calibráveis do modelo SWAT selecionados previamente como representativos para a pesquisa e indicados na literatura como mais relevantes para o ajuste (VALÉRIO & JÚNIOR, 2015; BRESSIANI et al, 2015; BALDISSERA, 2005)

Quadro 6 – Parâmetros calibráveis selecionados do modelo SWAT

Parâmetro	Descrição	Influência no processo hidrológico
ALPHA_BF	Fator alfa do fluxo de base (1/dias)	Escoamento subterrâneo
CH_N2	Valor de "n" de Manning para o canal principal	Escoamento superficial
CN2	Valor padrão de CN para condição de umidade II usado para a cobertura do solo nas HRUs	Escoamento superficial
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	Escoamento superficial
SURLAG	Tempo de atraso do escoamento superficial (dias)	Escoamento superficial
SLSUBBSN	Comprimento médio do declive (m)	Escoamento superficial
GW_DELAY	Atraso das águas subterrâneas (dias)	Escoamento subterrâneo
GW_REVAP	Coefficiente "revap" da água subterrânea	Escoamento subterrâneo
GWQMN	Profundidade limiar da água no aquífero raso para que o fluxo de retorno ocorra (mm H ₂ O)	Escoamento superficial
RCHRG_DP	Fração de percolação do aquífero profundo	Escoamento subterrâneo
REVAPMN	Profundidade limiar da água no aquífero raso para "revap" ocorrer (mm H ₂ O)	Escoamento subterrâneo
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da primeira camada de solo (mm H ₂ O/mm do solo)	Escoamento subterrâneo e superficial
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada da camada do solo (mm/h)	Escoamento subterrâneo e superficial
SOL_Z	Profundidade para baixo da camada do solo (mm)	Escoamento subterrâneo e superficial
LAT_TTIME	Tempo de percurso do fluxo lateral (dias)	Escoamento superficial

Fonte: Adaptado Arnold (2012).

4.2.5.4 Calibração e validação

Previamente delimitou-se os períodos para a modelagem hidrológica: período de aquecimento de 3 anos, correspondente a 1960-1962; período de calibração entre 1963-1972 (10 anos) e período de validação entre 1973-1977 (5 anos). Inicialmente se realizou-se uma análise de sensibilidade pelo método *One at a Time*, que mostra a sensibilidade de um parâmetro quando os demais são mantidos constantes e pelo método de tentativa e erro.

Na fase de avaliação da calibração os ajustes dos hidrogramas de vazões observadas e simuladas foi avaliado pela função Desvio Percentual (PBIAS) (Equação 6), apresentada a seguir, que avalia o ajuste das vazões mínimas:

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (6)$$

Onde Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada, Q_{obs} é a vazão observada e n é o número total de dados observados. Na avaliação dos resultados de simulações com o SWAT, Moriasi *et al* (2007) indica como simulações satisfatórias com resultados $\leq \pm 25\%$ para o PBIAS, sendo que resultados com $\leq \pm 10\%$ são considerados muito bons.

A estratégia de calibração manual dos valores dos parâmetros do modelo baseou-se nas recomendações de Abbaspour *et al* (2015) e de Baldissera (2005). Para a bacia em estudo foram delimitadas 19 sub-bacias/HRUs conforme apresentado na Figura 8 destacando como exutórios a sub-bacia 10 (Porto).

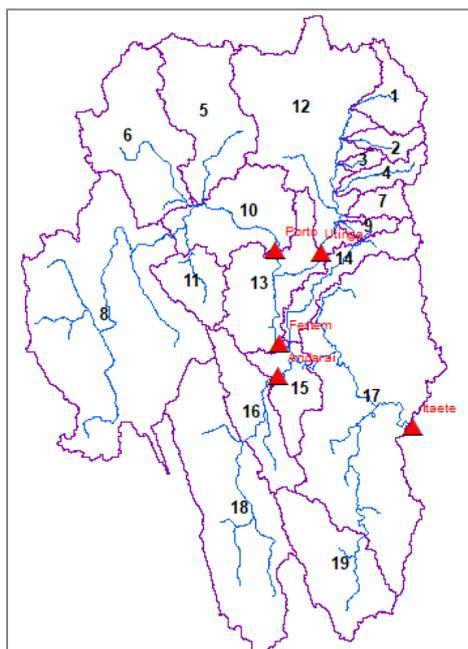


Figura 8 – Delimitação das sub-bacias/UHRs na área de estudo

Posteriormente à calibração manual realizou-se a calibração estocástica/automática pelo SWAT CUP, utilizando-se o algoritmo SUFFI-2 (método hipercubo latino) e realizando-se 4 processos iterativos, cada qual com 300 ajustes, visando melhorar o

ajuste obtido manualmente. Selecionou-se o melhor ajuste (BEST SIM) pela função PBIAS, pela análise visual dos hidrogramas e curvas de permanência.

Além do melhor ajuste obtido pelo SWAT-CUP, foram obtidas as incertezas dos valores dos parâmetros do modelo, que correspondem às faixas de valores possíveis com probabilidade de 95PPU de resultarem na melhor simulação, e construídas as curvas de permanência com incertezas das vazões L95PPU (faixa inferior) e U95PPU (faixa superior).

4.2.5.5 Simulações hidrológicas

4.2.5.5.1 Extensão da série de vazões (Simulação 1)

Essa simulação objetivou estender a série de vazões para o período de 1963-1989 a partir do conjunto de valores dos parâmetros (BEST SIM) obtidos na autocalibração. Apesar da existência de dados de vazões nesse período a extensão da série foi efetuada, pois na década de 80, houve maior intensificação das atividades agrícolas na região, sendo que as décadas anteriores (60-70) utilizadas na calibração e validação foram de menor antropização. O objetivo dessa simulação foi minimizar a influência das possíveis retiradas de água que se intensificaram na bacia após a década de 80. A partir da série de vazões obteve-se a disponibilidade hídrica ($Q_{90\%}$) com a construção da curva de permanência de vazões a nível diário.

4.2.5.5.2 Consideração das incertezas de medição dos dados de precipitação (Simulação 2)

Esta simulação objetivou considerar a faixa de incerteza de medição dos dados de precipitação diários, que resultaram na geração de duas séries sintéticas de vazões diárias (máximas e mínimas). Nesta simulação utilizou-se os valores dos parâmetros obtidos na calibração (BEST SIM). A partir das séries simuladas obteve-se a faixa da disponibilidade hídrica ($Q_{90\%}$) devido à incerteza de medição dos dados de precipitação.

4.2.5.5.3 Consideração das incertezas de medição dos dados climáticos (Simulação 3)

Esta simulação objetivou considerar os dados dos 14 parâmetros climáticos (Quadro 4) obtidos a partir das séries sintéticas dos dados diários de 6 variáveis climáticas: precipitação diária, temperatura máxima/mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa das estações climáticas de Lençóis e Itaberaba, com a consideração da incerteza de medição ($\pm u$). A partir dessas séries sintéticas com incertezas foram gerados novos valores para os 14 parâmetros climáticos (TMPMX, TMPMN, TMPSTDMX, TMPSTDMN, PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PR_W(1), PR_W(2), PCPD, RAINHHNX, SOLARAV, DEWPT e WNDV) do modelo SWAT a partir do *software* SWAT Weather Database v.0.16.06. Nesta simulação utilizou-se os valores dos parâmetros obtidos na calibração (BEST SIM) obtendo-se séries de vazões diárias (máximas e mínimas). Os dados de precipitação diária das estações pluviométricas nesta simulação correspondem aos dados medidos, sem influência da incerteza de medição. A partir das séries simuladas obteve-se a faixa da disponibilidade hídrica ($Q_{90\%}$) devido à incerteza de medição dos dados climáticos.

4.2.5.5.4 Consideração das incertezas dos valores dos parâmetros do modelo (Simulação 4)

Esta simulação objetivou considerar os valores máximos, mínimos e médios da faixa de valores dos parâmetros obtidos na autocalibração do modelo, e que correspondem às incertezas dos mesmos. Os dados de precipitação diária das estações pluviométricas nesta simulação correspondem aos dados observados e os dados dos parâmetros climáticos correspondem àqueles obtidos com os dados das séries observadas, sem influência das incertezas de medição.

4.2.6 Quantificação da disponibilidade hídrica a partir dos critérios adotados pelo gestor de outorgas

A disponibilidade hídrica outorgável, ou seja, a parcela que pode ser destinada para o atendimento dos usos hídricos pelo INEMA foi obtida com base no percentual definido pelo Decreto Estadual Nº 6.296/1997, do estado da Bahia. No Art. 14, esse decreto

estabelece como limite do somatório das parcelas outorgáveis da vazão de referência ($Q_{90\%}$):

- 80% da vazão de referência do manancial estimada com base na vazão de até 90% de permanência a nível diário ($Q_{90\%}$), quando não houver barramento;
- nos casos de abastecimento humano, esse limite pode atingir 95% da vazão $Q_{90\%}$, e
- o limite máximo individual por usuário é de 20% da vazão de referência.

Neste caso, a parcela de 20% corresponde às vazões remanescentes que devem ser mantidas no curso d'água para a manutenção do ambiente.

Para fins de diluição, transporte ou disposição final de esgotos domésticos, a Instrução Normativa Nº 03, de 8 de novembro de 2007, da extinta Superintendência de Recursos Hídricos (SRH), atual INEMA, estabelece no Art. 5º, que o somatório das vazões reservadas para as finalidades citadas, para cada ponto de análise, será de no máximo 50% da $Q_{90\%}$.

De acordo com Silva (2016) para os trechos do rio Paraguaçu são adotadas pelo INEMA para fins de outorga 6 estações fluviométricas de referência: Fertém, Wagner, Itaeté, Bonito, Franca e Andaraí. Para os trechos do rio Antônio, que insere-se na área da bacia delimitada pela estação Porto, o INEMA adota como referência para fins de outorga os dados da estação fluviométrica Fértem (Código: 51190000). A estação Fértem, localiza-se na latitude -12,76 e longitude -41,33 e possui área de drenagem de 9.670 km².

Para fins de aplicação da outorga, o INEMA utiliza o método de regionalização de vazões com 90% de permanência. Para aplicação deste método foi determinada a vazão com 90% de permanência da série de vazões observadas da estação Fértem e posteriormente a vazão específica, conforme expressa na equação 7:

$$Q_{\text{específica}} = \frac{Q_{90\% \text{ a nível diário}}}{\text{Área de drenagem}} = \frac{L}{s}/\text{km}^2 \quad (7)$$

Para fins de análise comparativa considerou-se os dados de vazões do período de 1963-1989 da estação Fértem.

4.2.7 Avaliação do efeito das incertezas da modelagem chuva-vazão na aplicação da outorga

Essa avaliação contemplou uma análise comparativa e quantitativa entre as vazões $Q_{90\%}$ e as respectivas parcelas outorgáveis estimadas com incertezas a partir da modelagem chuva-vazão em relação às vazões adotadas pelo gestor de outorga (INEMA) na área de estudo. Nessa avaliação verificou-se as faixas de variação das vazões e a variação percentual quando comparadas com a vazão adotada pelo INEMA, indicando-se as situações de superestimativa e subestimativa de vazões. Também foram analisados o atendimento de usos prioritários na situação de escassez hídrica e as faixas de probabilidade de ocorrência das vazões à nível diário devido às diferentes incertezas mencionadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise dos dados das estações pluviométricas e suas incertezas de medição

5.1.1 Análise de consistência dos dados pluviométricos

Nesta análise foram verificadas as falhas mensais e anuais das estações selecionadas, onde constatou-se que dentre as estações somente 6 possuem $\geq 90\%$ da série totalmente preenchida, 3 estações entre 70 a 80% dos dados preenchidos, e 5 estações possuem preenchimento inferior a 70%. Os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as médias mensais (12 meses) das diferentes estações visando o preenchimento de falhas estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as médias mensais das estações pluviométricas (1960-1989)

Código	Estação	Itaeté	Andaraí	Novo Acre	Seabra	Bonito (Ibiapora)	Wagner (Itacira)	Porto	Piatã (Anchieta)	Inubia (Ipiranga)	Ventura	Ituaçu	Lençóis
1240012	Itaeté	X	0,96	0,96	0,84	0,80	0,98	0,95	0,87	0,90	0,93	0,95	0,93
1241008	Andaraí		X	0,98	0,91	0,75	0,98	0,98	0,90	0,93	0,90	0,97	0,94
1341015	Novo Acre			X	0,86	0,74	0,98	0,95	0,82	0,87	0,90	0,93	0,87
1241022	Seabra				X	0,69	0,88	0,94	0,89	0,90	0,75	0,85	0,93
1141012	Bonito (Ibiapora)					X	0,83	0,81	0,82	0,73	0,88	0,75	0,76
1241018	Wagner (Itacira)						X	0,98	0,87	0,88	0,95	0,94	0,91
1241017	Porto							X	0,92	0,90	0,92	0,93	0,95
1341006	Piatã (Anchieta)								X	0,92	0,85	0,92	0,94
1341009	Inubia (Ipiranga)									X	0,77	0,95	0,93
1140026	Ventura										X	0,88	0,84
1341013	Ituaçu											X	0,93
83242	Lençóis												X

Nota:

¹ A estação Inúbia possui três séries históricas registradas em estações com códigos diferentes, mas referem-se ao mesmo local. Nesta pesquisa optou-se por uma série histórica genérica obtida com os dados das estações 1341009 e 1341029.

Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que os coeficientes de correlação de Pearson variaram entre 0,69 a 0,98, o que indica uma correlação positiva entre todas as estações. De acordo com a categorização proposta por Franzblau (1958) as correlações obtidas são classificadas como correlações forte a muito forte entre os dados de médias mensais. Os testes de significância efetuados para cada par de

estações com α (nível de significância) = 0,05, n (número de dados) = 12, gl (grau de liberdade) = 10 indicaram que a hipótese nula pode ser rejeitada, ou seja, há existência de correlação significativa entre as médias mensais com grau de confiança de 95% (nível de significância $\alpha = 0,05$).

Após o preenchimento das médias mensais das séries históricas aplicou-se o Método da Dupla Massa com os dados de totais mensais do período 1960-1989 (360 meses por estação) verificando-se que todos os postos pluviométricos possuem consistência nos dados pelo fato de os pontos estarem alinhados segundo uma única reta, com exceção das estações Inúbia e Ventura, localizados na região externa da bacia. As diferenças registradas nas estações não consistidas, constatadas graficamente pode ser justificada por estarem situadas em regiões de transição climática entre um clima mais úmido e seco. Em virtude disso, as estações pluviométricas não consistidas foram desconsideradas do conjunto de estações pré-selecionadas. A Figura 9 apresenta os resultados da aplicação do Método de Dupla Massa com as estações pluviométricas.

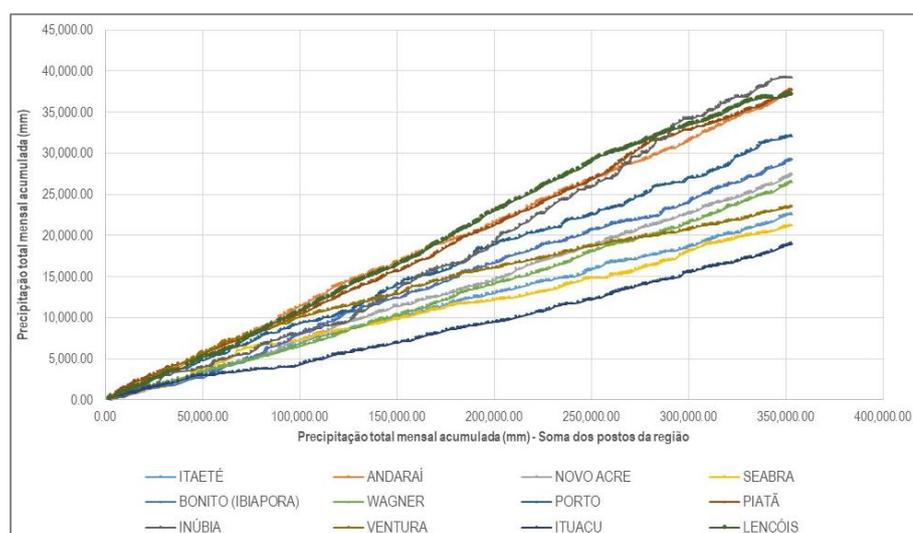


Figura 9 – Resultados da análise de consistência pelo Método Dupla Massa (1960-1989)

Dentre as 10 estações pluviométricas com dados considerados consistentes, aplicou-se o teste de Kolmogorov –Sminorv às séries de totais mensais de cada estação pluviométrica, e que são utilizados para o cálculo das médias mensais da região para o período 1960-1989. Para o número de dados $n=30$ e para o nível de significância α

= 0,05 o valor crítico foi obtido por $1,36/\sqrt{n} = 0,24$. O valor comparado (D_n) ao valor crítico, corresponde ao valor máximo da diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados. Para valores de D_n inferiores ao valor crítico a hipótese de normalidade dos dados pode ser aceita.

Os resultados da aplicação do teste de Kolmogorov Sminorv estão apresentados na Tabela 10, especificamente os valores de D_n . Constatou-se que para todas as estações pluviométricas os valores de D_n foram inferiores ao valor crítico 0,24 com exceção de alguns meses das estações de Itaeté, Seabra e Ituaçu. A hipótese de normalidade dos dados mensais não foi aceita para o mês de agosto da estação Itaeté; para os meses de fevereiro, maio e setembro da estação Seabra, e para o mês de julho da estação de Ituaçu. Assim, os totais mensais dos meses citados das estações, Itaeté, Seabra e Ituaçu, para o período de 1960-1989 são diferentes, e não devem ser considerados no conjunto de dados.

Tabela 10 – Valores de D_n obtidos com a aplicação do teste de Kolmogorv Sminorv nas séries de precipitações mensais

Código	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1240012	Itaeté	0,19	0,17	0,17	0,17	0,15	0,21	0,10	0,35	0,21	0,13	0,14	0,17
1241008	Andaraí	0,19	0,21	0,20	0,17	0,12	0,19	0,23	0,15	0,19	0,16	0,11	0,17
1341015	Novo Acre	0,13	0,15	0,13	0,14	0,16	0,24	0,21	0,18	0,23	0,15	0,17	0,21
1241022	Seabra	0,18	0,27	0,21	0,16	0,29	0,21	0,17	0,15	0,25	0,21	0,17	0,18
1141012	Bonito (Ibiapora)	0,22	0,22	0,16	0,19	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,22	0,16
1241018	Wagner (Itacira)	0,17	0,14	0,19	0,12	0,19	0,14	0,15	0,20	0,22	0,17	0,20	0,15
1241017	Porto	0,14	0,13	0,20	0,19	0,16	0,17	0,14	0,14	0,16	0,21	0,15	0,17
1341006	Piatã (Anchieta)	0,20	0,12	0,13	0,11	0,16	0,10	0,08	0,14	0,18	0,08	0,12	0,18
1341013 /1341029 /1341021	Ituaçu	0,17	0,20	0,22	0,21	0,17	0,21	0,24	0,21	0,21	0,10	0,11	0,10
OMM: 83242	Lençóis	0,15	0,18	0,16	0,13	0,13	0,15	0,19	0,11	0,17	0,20	0,15	0,13

Nota: Os valores destacados em vermelho indicam que a hipótese de normalidade não foi aceita.

Logo, a distribuição de probabilidade associada ao conjunto de dados de totais mensais pluviométricos pode ser representada por uma distribuição normal, podendo-se considerar na análise os valores médios mensais das 10 estações pré-

selecionadas, considerando as exceções de alguns meses das estações pluviométricas de Itaeté, Seabra e Ituaçu.

5.1.2 Análise da estacionariedade das séries pluviométricas

Os resultados da aplicação do teste T de Student aos dados de totais mensais de precipitação com nível de significância $\alpha = 0,05$ e número de dados igual a 186 meses em cada amostra, apresentam-se na Tabela 11. O valor de *p-valor* corresponde a probabilidade associada ao teste t de Student.

Tabela 11 – Resultados da análise de estacionariedade pelo teste T de comparação de médias

Código	Estação	Média do período (jan/1960 a jun/1975)	Média do período (jul/1975 a dez/1990)	<i>p-valor</i>	Resultado
1240012	Itaeté	64,76	56,73	0,359	Estacionária
1241008	Andaraí	105,93	94,80	0,416	Estacionária
1341015	Novo Acre	71,92	75,76	0,719	Estacionária
1241022	Seabra	62,92	51,02	0,246	Estacionária
1141012	Bonito (Ibiapora)	80,73	76,41	0,574	Estacionária
1241018	Wagner (Itacira)	69,51	72,99	0,710	Estacionária
1241017	Porto	89,01	83,42	0,576	Estacionária
1341006	Piatã (Anchieta)	104,48	98,48	0,540	Estacionária
1341013/1341029	Ituaçu	46,88	55,30	0,303	Estacionária
83242	Lençóis	110,64	89,31	0,052	Estacionária

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostraram que os valores de *p-valor* foram superiores ao nível de significância adotado, o que mostrou que a hipótese nula do teste foi aceita, na qual considera-se que as médias obtidas em períodos históricos distintos pertencem à mesma população. Logo, infere-se que não ocorreram mudanças no comportamento hidrológico da região, ao considerar as médias de longo período, e que as séries hidrológicas são estacionárias, não sendo necessário eliminar estações com base nesse critério.

5.1.3 Análise da representatividade hidrológica das séries

Verificou-se em todas as estações pluviométricas no período de 1960-1989 a predominância foi a ocorrência de anos secos ($\geq 50\%$ dos anos), com exceção das

estações de Seabra, Ituaçu e Lençóis, onde predominaram os anos secos na maior parte da série histórica, conforme apresentado na Tabela 12. Essa análise considerou o total anual de cada ano do período 1960-1989 em relação à média histórica de totais anuais (P_m) de cada estação.

Tabela 12 – Percentual de anos secos e úmidos por estação pluviométrica no período 1960-1989

Código	Estação	Média histórica 1960-1989 (mm/ano) - P_m	Anos úmidos	Anos secos
1240012	Itaeté	728,93	55%	45%
1241008	Andaraí	1204,39	45%	55%
1341015	Novo Acre	886,07	45%	55%
1241022	Seabra	683,64	32%	68%
1141012	Bonito (Ibiapora)	931,90	52%	48%
1241018	Wagner (Itacira)	855,00	45%	55%
1241017	Porto	1034,56	52%	48%
1341006	Piatã (Anchieta)	1217,72	55%	45%
1341013/1341029	Ituaçu	591,28	45%	55%
83242	Lençóis	1199,68	45%	55%

Nota: As células destacadas na cor cinza representam os valores superiores ou iguais a 50%.

Ao analisar o histórico das estações se constatou alternância entre anos secos e úmidos, ou anos contínuos exclusivamente secos ou úmidos. Os períodos contínuos mais secos, ou seja, com maior número de estações com relação $P_i/P_m < 1$ compreendeu 1961-1963 (3 anos), 1971-1972 (2 anos), 1981-1984 (4 anos) e 1986-1987 (2 anos). Os períodos contínuos mais úmidos, ou seja, com maior número de estações com relação $P_i/P_m > 1$ compreendeu 1968-1970 (3 anos), 1974-1975 (2 anos), 1977-1980 (4 anos) e 1988-1989 (2 anos).

A Figura 10 apresenta-se a variação dos anos úmidos e secos das estações pluviométricas selecionadas a partir da relação P_i/P_m , no período 1960-1989. Os valores médios da relação $P_{total}/P_{médio}$ obtidos a partir das estações para cada ano são apresentados na Figura 11.

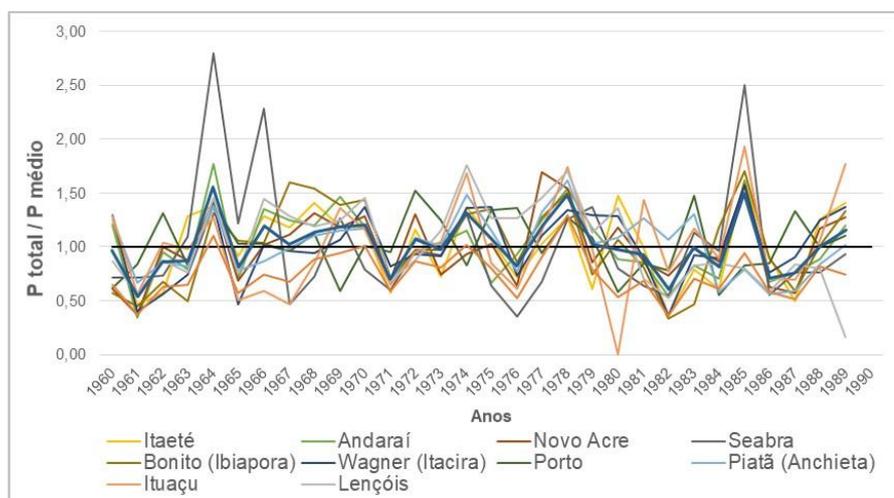


Figura 10 – Variação gráfica dos anos úmidos e secos no período de 1960-1989 por estação

A partir da relação média P_t/P_m , obtido das estações selecionadas e apresentado graficamente na Figura 11, verificou-se que a maior parte do período de 1960-1989 em valores médios foi 50% úmido e 50% seco registrando-se alternância entre períodos secos e períodos úmidos. Os resultados obtidos com a análise ano a ano, e com a relação média P_t/P_m indicaram alternâncias entre os períodos secos e úmidos o que indica que a série apresenta representatividade sazonal considerável para as simulações hidrológicas.

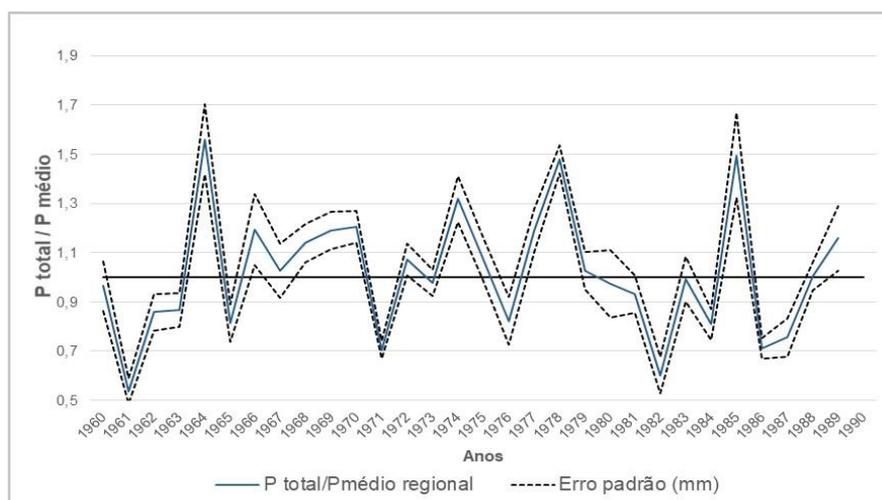


Figura 11 – Variação média da relação $P_{total}/P_{médio}$ regional (1960-1989)

5.1.4 Análise da representatividade espacial das estações

Para aplicação do método foram utilizadas as 10 estações pré-selecionadas para a construção dos polígonos de Thiessen. Na delimitação das áreas de abrangência foram definidas 7 áreas de influências, denominadas como A, B, C, D, F e G. A delimitação ocorreu especificamente na região central da área, devido a presença da Chapada Diamantina, dividindo-se a área de influência da estação Lençóis entre as estações Seabra e Porto, e divisão da área de influência da estação Andaraí com a estação Piatã. As áreas das estações pluviométricas de Itaeté e de Ituaçu, foram respectivamente adicionadas às áreas das estações de Andaraí e Piatã. Os resultados referentes a delimitação da área de influência apresentam-se na Figura 12.

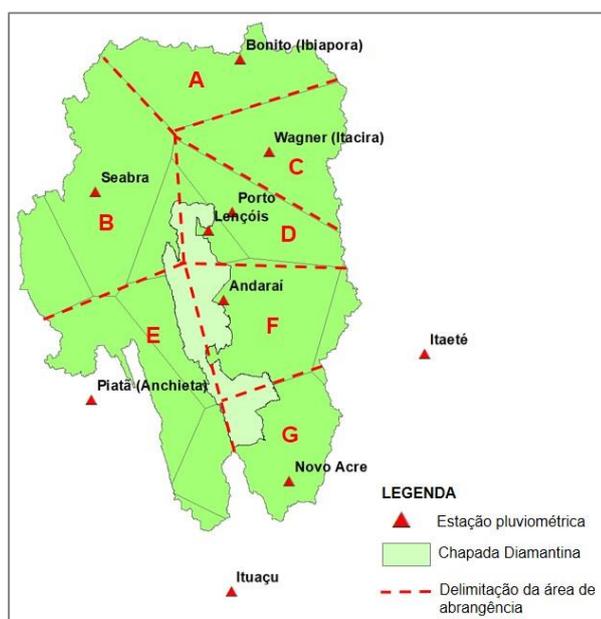


Figura 12 – Delimitação das áreas de abrangência das estações pluviométricas

Com esse rearranjo de estações ficaram estabelecidas 7 estações pluviométricas para a representação das chuvas na região em estudo: Bonito (Ibiapora), Seabra, Wagner (Itacira), Porto, Piatã (Anchieta), Andaraí e Novo Acre. Em síntese, as estações de Lençóis, Itaeté e Ituaçu foram eliminadas em virtude da limitação na área de abrangência, e as estações de Inúbia e Ventura, por inconsistência de dados.

5.1.5 Delimitação dos períodos secos e úmidos

As análises realizadas anteriormente permitiram selecionar 7 estações pluviométricas para a modelagem hidrológica como representativas do comportamento hidrológico da região. Após a realização da análise de consistência realizou-se a verificação do comportamento mensal regional das precipitações com os dados mensais das estações selecionadas, objetivando delimitar os períodos secos e úmidos. Com a aplicação do teste de Kolmogorov Smirnov a hipótese de normalidade dos dados mensais não foi aceita para alguns meses das estações Itaeté e Ituaçu, anteriormente eliminadas pelo critério de representatividade espacial; e para os meses de fevereiro, maio e setembro da estação Seabra, excluindo-se esses dados para o cálculo da média mensal regional.

Constatou-se que na região o total médio anual corresponde a $979,4 \pm 223,7$ mm/ano, o coeficiente de variação (desvio padrão/média) das médias mensais variou entre 17% a 68%, sendo que o período de junho a agosto foi o que apresentou as maiores variações, com coeficientes superiores a 50%.

Na Figura 13 apresenta-se a variação mensal média das precipitações nas estações selecionadas, considerando o ano hidrológico iniciando no mês de maio, onde são registradas as menores precipitações, e finalizando em abril. Verifica-se que o período seco estende-se por 5 meses, entre o mês de maio até setembro, e o período úmido, estende-se por 7 meses, iniciando em outubro e segue até abril.

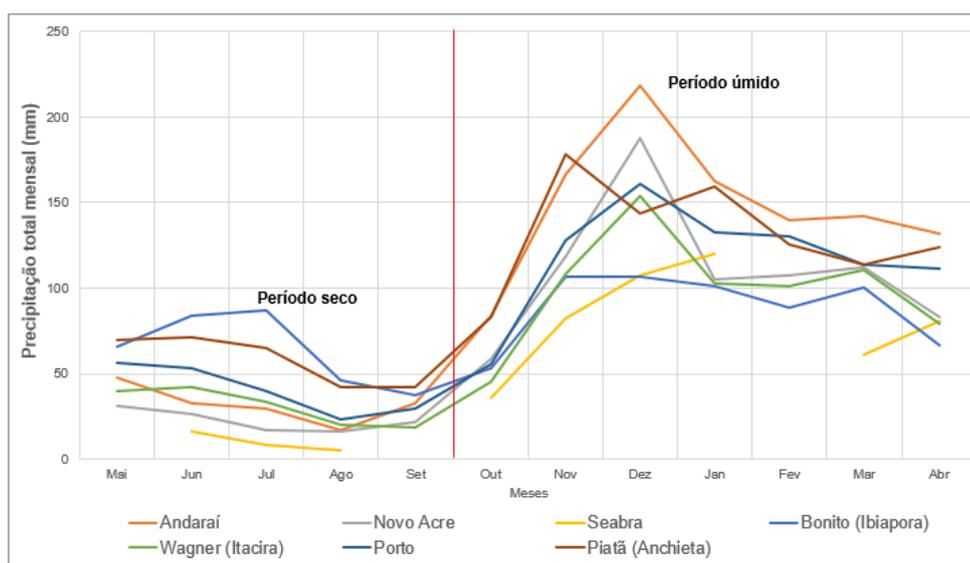


Figura 13 – Delimitação dos períodos seco e úmido do ano hidrológico na região

5.1.6 Incertezas de medição dos dados pluviométricos diários

A análise das incertezas de medição dos dados pluviométricos considerou somente a avaliação da incerteza Tipo B, associado à faixa de leitura do pluviômetro. Para analisar a magnitude da consideração da incerteza Tipo B no conjunto de dados de precipitações observadas realizou-se um comparativo entre os totais médios mensais registrados e os totais médios mensais com incertezas do Tipo B. Esses totais são resultantes da soma das precipitações diárias no mês e contabilizados ano a ano. Na Tabela 13 são apresentados os resultados médios obtidos para o período de 1960-1989 das diferenças percentuais entre totais mensais observados e totais mensais com incertezas do Tipo B.

Tabela 13 – Diferenças percentuais entre os totais mensais observados e totais mensais com incertezas do Tipo B (1960-1989)

Código	Estação	Percentual de variação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1241008	Andaraí	MIN	7	3	3	3	3	5	8	10	8	3	2	2
		MAX	9	10	13	6	18	20	28	181	145	11	5	7
1341015	Novo Acre	MIN	3	2	2	3	4	3	4	6	3	2	2	2
		MAX	19	12	6	10	35	25	36	67	34	12	7	9

Código	Estação	Percentual de variação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1241022	Seabra	MIN	2	2	2	3	4	6	7	5	4	5	7	2
		MAX	20	18	26	25	34	39	43	61	44	28	29	19
1141012	Bonito (Ibiapora)	MIN	3	2	2	3	4	3	4	6	3	2	2	2
		MAX	19	12	8	10	35	25	35	67	34	12	7	9
1241018	Wagner (Itacira)	MIN	2	2	2	2	3	3	3	3	5	2	2	2
		MAX	8	7	14	10	15	15	19	27	104	21	7	8
1241017	Porto	MIN	2	2	2	3	3	3	4	4	3	3	2	3
		MAX	8	12	6	13	14	12	15	32	27	9	6	25
1341006	Piatã (Anchieta)	MIN	2	2	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2
		MAX	6	6	9	4	9	6	6	12	35	9	4	4
Média		MIN	3	2	2	3	3	4	5	5	4	3	3	2
		MAX	13	11	12	11	23	20	26	64	60	15	9	12

Nota:

MIN – diferença percentual entre o total mensal observado e o total mensal obtido com o limite inferior da faixa de incerteza (valor observado – incerteza)

MÁX – diferença percentual entre o total mensal observado e o total mensal obtido com o limite superior da faixa de incerteza (valor observado+incerteza)

Os resultados obtidos mostraram que os totais mensais observados em relação ao totais mensais com incertezas apresentaram diferenças percentuais de 2 a 181%, conforme apresentado na Tabela 13, considerando todas as estações pluviométricas. O percentual de variação MIN, que corresponde à diferença percentual entre o total mensal observado e o total mensal obtido com o limite inferior da incerteza (valor observado-incerteza), resultou em diferenças percentuais de 2 a 10% no conjunto de todas as estações. O percentual de variação MAX, que corresponde à diferença percentual entre o total mensal observado e o total mensal obtido com o limite superior da incerteza (valor observado+incerteza) resultou em diferenças de 4 a 181% no conjunto de estações. Quando se analisa a média do percentual de variação MIN mensal obtido a partir de todas as estações a variação fica entre 2 a 5%, enquanto que a média do percentual de variação MAX mensal fica entre 9 a 64% em relação aos totais mensais observados. Os valores obtidos indicam que a consideração do valor positivo do componente de incerteza de medição (+u) resultou em diferenças percentuais bastante superiores em comparação com as diferenças percentuais resultantes da consideração da componente de incerteza (-u). Logo, constata-se que as incertezas de medição dos dados pluviométricos não são desprezíveis, o que pôde

ser constatado com a verificação do efeito da incerteza do dado diário nos totais mensais precipitados. Ressalta-se que esses resultados podem ser influenciados por ausência ou erros de registros, mas que não foram considerados nessa análise.

5.2 Análise dos dados fluviométricos

As curvas-chave da estação Porto, de acordo com informações da ANA (2018) possuem validade para o período de 02/1935 a 12/2014, sendo que o período selecionado para estudo: 1960-1990 possui 8 equações definidas por período e faixas de cotas. As medições de vazões utilizadas para a construção das curvas da ANA foram realizadas entre 1936 a 2014, totalizando 357 medições, sendo que no período de 1960-1990 foram realizadas 207 medições.

Na Figura 14 e Figura 15 são apresentados a correlação entre as vazões medidas e as cotas para todo o período de medição na estação e destaque para o trecho das vazões mínimas. Os ajuste gráficos mostram que ao considerar todos os dados medidos independente do período de registro, verifica-se que não há correlação positiva entre os mesmos, o que impossibilita o ajuste de uma curva-chave única para a seção. Nota-se dentre as medições realizadas que para uma mesma cota são registradas distintas vazões com faixa de variação grande o que indica instabilidade da seção.

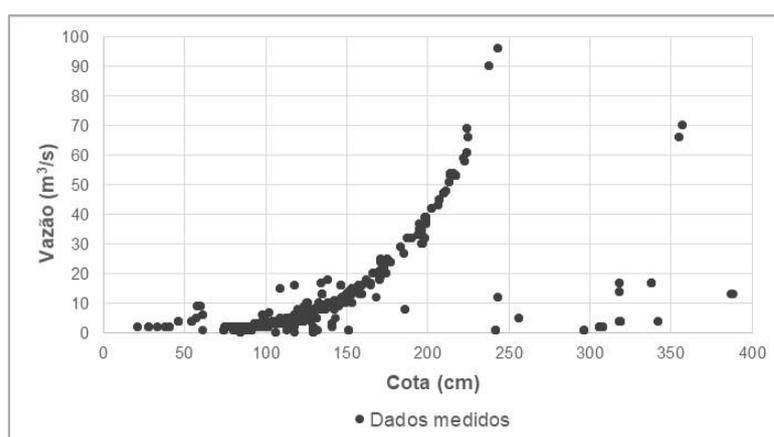


Figura 14 – Vazões medidas na estação Porto (1936-2013)

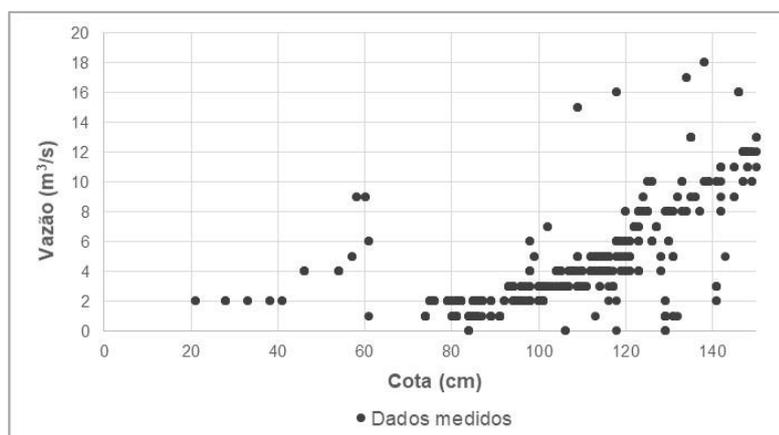


Figura 15 – Vazões mínimas medidas na estação Porto (1936-2013) - $< 20 \text{ m}^3/\text{s}$

Logo, nesta situação considera-se que a estação Porto possui grandes extrapolações na parte inferior da curva-chave para as vazões mínimas adotando-se a classificação B, a qual indica que as curvas-chave disponíveis possuem extrapolações da parte inferior da curva, que podem prejudicar na estimativa das vazões mínimas.

5.1 Incertezas de medição dos dados das estações climatológicas

As variáveis climáticas avaliadas foram precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, das estações climatológicas de Lençóis e Itaberaba com base nos dados do período histórico de 1973-1980. Nessa análise foram consideradas as incertezas do Tipo B com base nas indicações da Tabela 8. As séries de dados observados das variáveis climáticas e as séries geradas com a consideração da incerteza de medição foram posteriormente utilizadas para o cálculo dos parâmetros climáticos do modelo hidrológico do Quadro 4.

Ao analisar a influência das incertezas de medição dos dados de precipitação diária se verificou que na série da estação Lençóis, a ocorrência de variações entre 2,1 a 8,5% em relação ao valor médio diário. Na estação Itaberaba, essas variações devido as incertezas são entre 2,3 a 14,3% do valor médio diário registrado. A Figura 16 e Figura 17 apresentam a faixa de incerteza da precipitação diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

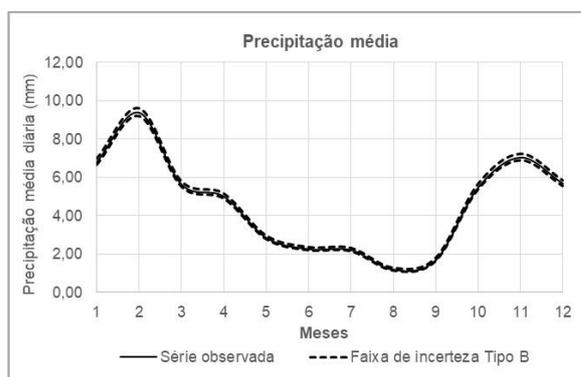


Figura 16 – Faixa de incertezas da precipitação na estação Lençóis

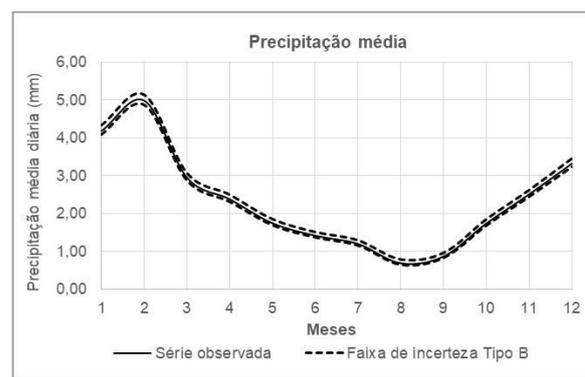


Figura 17 – Faixa de incerteza da precipitação na estação Itaberaba

Quanto à incerteza de medição dos dados de temperatura máxima diária se verificou que na série da estação Lençóis e Itaberaba, a ocorrência de variações entre 0,3 a 0,4% em relação ao valor médio diário. A Figura 18 e Figura 19 apresentam a faixa de incerteza da temperatura máxima diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

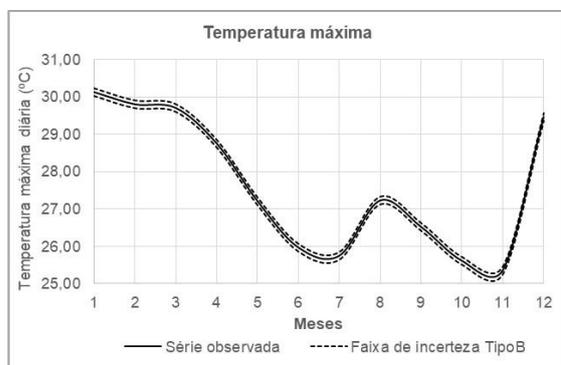


Figura 18 - Faixa de incertezas da temperatura máxima na estação Lençóis

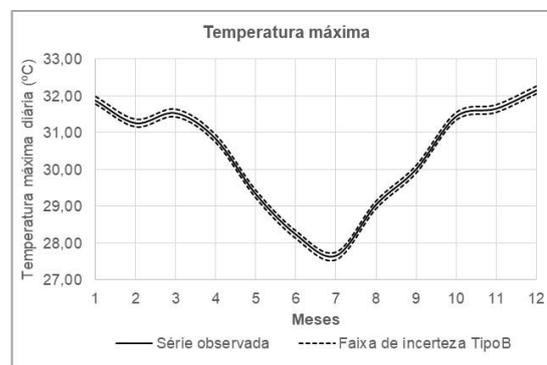


Figura 19 - Faixa de incertezas da temperatura máxima na estação Itaberaba

No caso da incerteza de medição dos dados de temperatura mínima diária, a mensuração corresponde à mesma adotada para a temperatura mínima. Verificou-se na série da estação Lençóis e Itaberaba, a ocorrência de variações entre 0,5 a 0,6% em relação ao valor médio diário, ou seja, na mesma faixa de grandeza as variações obtidas para a temperatura máxima (< 1%). A Figura 20 e Figura 21 apresentam a

faixa de incerteza da temperatura mínima diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

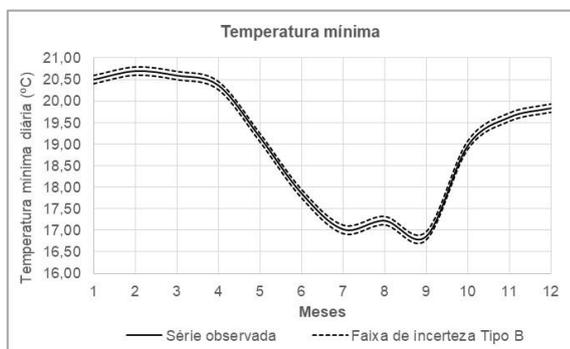


Figura 20 –Faixa de incertezas da temperatura mínima na estação Lençóis

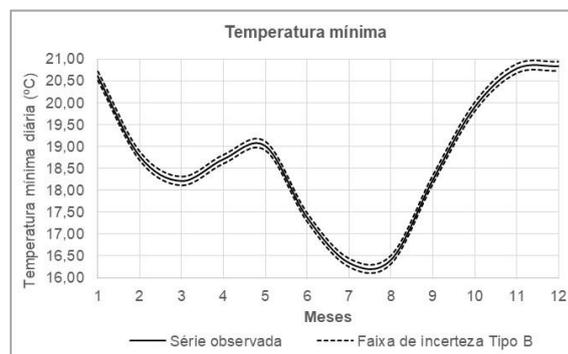


Figura 21- Faixa de incertezas da temperatura mínima na estação Itaberaba

Ao analisar a influência das incertezas de medição dos dados de umidade relativa diária se verificou que na série da estação Lençóis e Itaberaba, a ocorrência de variações de 1% em relação ao valor médio diário. A Figura 22 e Figura 23 apresentam a faixa de incerteza da umidade relativa diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

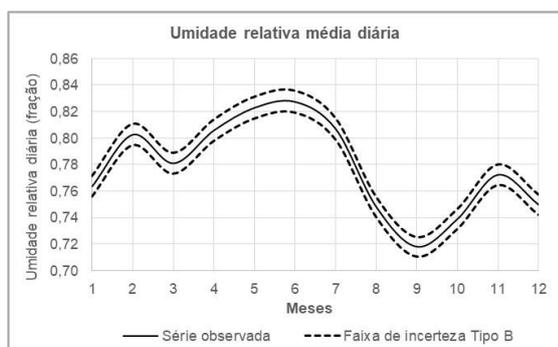


Figura 22 - Faixa de incertezas da umidade relativa na estação Lençóis

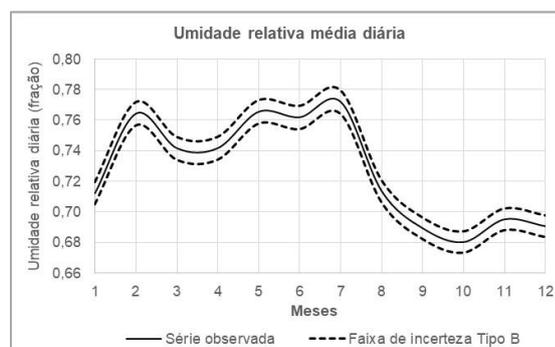


Figura 23 - Faixa de incertezas da umidade relativa na estação Itaberaba

Quanto à incerteza de medição dos dados de radiação solar diária se verificou que na série da estação Lençóis e Itaberaba, a ocorrência de variações de 5% em relação ao valor médio diário. A Figura 24 e Figura 25 apresentam a faixa de incerteza da radiação solar diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

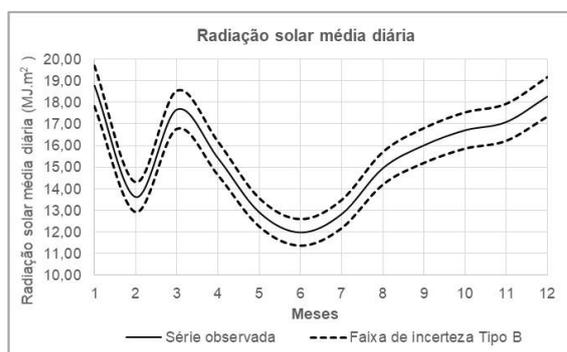


Figura 24 - Faixa de incertezas da radiação solar na estação Lençóis

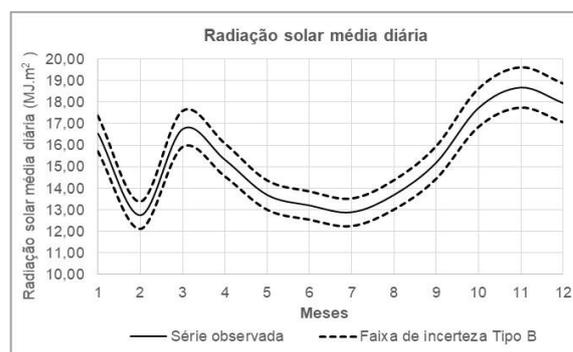


Figura 25 - Faixa de incertezas da radiação solar na estação Itaberaba

No caso da incerteza de medição dos dados de velocidade do vento verificou-se na série da estação Lençóis, a ocorrência de variações entre 33 a 43% em relação ao valor médio diário, enquanto na estação Itaberaba essa variação foi entre 18 a 32%. A Figura 26 e Figura 27 apresentam a faixa de incerteza da velocidade do vento diária, respectivamente da estação Lençóis e Itaberaba, para o período de 1973-1980.

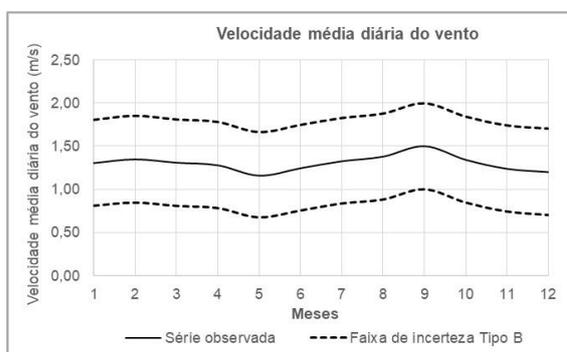


Figura 26 - Faixa de incertezas da velocidade do vento na estação Lençóis

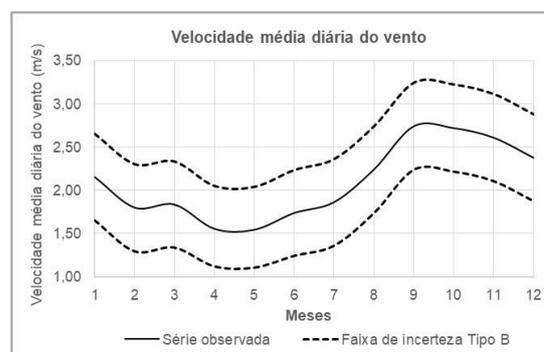


Figura 27 - Faixa de incertezas da velocidade do vento na estação Itaberaba

Os resultados obtidos para todos os parâmetros climáticos mostram que a faixa de variação das incertezas de medição do Tipo B são maiores para a variável velocidade do vento, com faixas de variação entre 18 a 43% em relação aos dados diários observados. Especificamente as variáveis temperatura, umidade do ar, radiação solar e velocidade do vento influenciam no cálculo da evaporação, sendo que dentre variáveis citadas, as incertezas de medição da velocidade do vento foram bastante expressivas em relação aos dos demais. Destaca-se que a velocidade do vento trata-

se de uma das componentes de entrada na equação de Penman-Monteith, utilizada para o cálculo da evapotranspiração e selecionada para o desenvolvimento desta pesquisa.

5.1 Simulação hidrológica chuva-vazão

5.1.1 Calibração

A calibração foi realizada para o período de 1960-1972, adotando-se o período de 1960 a 1962 para aquecimento do modelo e o período de 1963 a 1972 para os ajustes da calibração. O processo de calibração baseou-se inicialmente numa análise de sensibilidade executada por parâmetro no qual 15 parâmetros (Quadro 6) foram previamente selecionados realizando-se aproximadamente 80 processos iterativos pelo método tentativa e erro. Os resultados foram avaliados em função dos ajustes dos hidrogramas de vazões observadas e simuladas, valores da função objetivo PBIAS e ajuste das curvas de permanência. Dentre os 15 parâmetros selecionou-se 10 parâmetros considerados como os mais sensíveis: CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, SOL_AWC, ESCO, LAT_TIME e SOL_Z. Dentre os parâmetros sensíveis destacam-se o CN2, que refere-se ao padrão de ocupação do solo e que influencia o escoamento superficial; o ALPHA_BF, que refere-se ao fator alfa do escoamento de base; o GW_DELAY, que refere-se ao intervalo de dias para a ocorrência da contribuição das águas subterrâneas para o rio; o GWQMN, que refere-se a capacidade de armazenamento do aquífero profundo; o GW_REVAP, que é o coeficiente “revap” que controla a transferência de água do aquífero para a zona de raiz das plantas e o REVAPMN, que corresponde a capacidade do aquífero raso. Os parâmetros ALPHA_BF_GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP e REVAPMN controlam o escoamento subterrâneo. Outros parâmetros SOL_AWC, que refere-se a quantidade de água disponível na primeira camada de solo e SOL_Z, que refere-se a profundidade da camada de solo, estão relacionados às características físicas da bacia. O parâmetro ESCO permite a modificação da profundidade usada para atender a demanda evaporativa do solo, ou seja, influencia o escoamento subterrâneo, e o parâmetro LAT_TTIME, corresponde ao tempo de escoamento lateral das águas que contribuem para o leito do rio, e que depende de propriedades hidráulicas do solo.

A vazão média observada, de longa duração, no período calibrado foi de 15,68 m³/s, e a vazão média simulada de 15,77 m³/s, que representa a diferença de 1%. No que se refere à função objetivo, obteve-se o valor PBIAS = -0,55%, que indicou um resultado muito bom de acordo com a classificação de Moriasi *et al* (2007). Apesar do resultado satisfatório indicado pela função PBIAS o ajuste gráfico entre as vazões, observadas e estimadas pelo modelo não representaram adequadamente os trechos de ascensão e recessão do hidrograma diário, assim como os picos de vazões.

Com a pré-calibração manual a vazão Q_{95%} obtida pela curva de permanência foi a que apresentou maior subestimativa, com uma diferença de 62% em relação à vazão observada, enquanto que a vazão Q_{50%} foi a que apresentou menor subestimativa, entorno de 43%, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparativo das vazões observadas e calibradas (1963-1972) – Calibração manual

Vazão de referência	Vazões observadas (m ³ /s)	Vazões calibradas (m ³ /s)	Diferença relativa
Q _{50%}	7,97	4,57	-43%
Q _{90%}	3,18	1,42	-55%
Q _{95%}	2,61	0,99	-62%

Logo, as vazões estimadas na pré-calibração manual mostraram-se muito discrepantes em relação às observadas, sendo que desta etapa somente foram consideradas as faixas iniciais dos valores dos parâmetros para a calibração automática.

A calibração automática ou autocalibração executada posteriormente à calibração manual, foi efetuada a partir do algoritmo SUFFI-2 do SWAT CUP, que utiliza o método de iteração hipercubo latino, onde foram realizados 4 processos iterativos com 300 simulações cada, totalizando 1200 ajustes, para a obtenção de melhores ajustes gráficos a partir da avaliação da função objetivo PBIAS. De acordo com Abbaspour (2014) a realização de 4 a 5 iterações são suficientes para a obtenção de resultados satisfatórios, adotando-se neste caso, somente 4 iterações em virtude do tamanho área da bacia e duração de processamento. Os resultados das calibrações com melhores avaliações, denominadas Best Sim, a partir da otimização pela função PBIAS, para cada iteração são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores das melhores calibrações (BEST SIM) obtidos na autocalibração com o SUFFI-2

Parâmetro	Método de iteração	1º iteração	2ª iteração	3ª iteração	4ª iteração
CN2	r_	0,06	0,168	0,1477	0,102
ALPHA_BF	v_	0,07	0,289	0,033	0,263
GW_DELAY	v_	317,5	279,9	359,52	283,87
GWQMN	v_	3658,33	4274,67	5486,82	5198,36
SOL_AWC	v_	0,1216	0,044	-0,017	-0,137
ESCO	v_	0,771	1,115	0,768	0,57
GW_REVAP	v_	0,063	0,0955	0,111	0,09
REVAPMN	v_	445	371,86	272,98	247,811
LAT_TIME	v_	73,5	80,427	83,741	74,76
SOL_Z	r_	-0,184	-0,123	-0,08	-0,08
PBIAS (%)		0,65	-0,46	7,39	26,91
<i>p-factor</i>		0,95	0,97	0,87	0,68
<i>r-factor</i>		4,11	4,56	2,89	1,24

Nota:

r_ significa que um valor de parâmetro existente é multiplicado por (1+determinado valor);

v_ significa que o valor do parâmetro existente deve ser substituído por um determinado valor;

a_ significa que um determinado valor é adicionado ao valor do parâmetro existente.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 15 os valores obtidos com a função objetivo PBIAS indicaram que em todas as iterações o desempenho do modelo foi classificado como muito bom ($< \pm 10\%$), com exceção da iteração 4, no qual foi obtido um valor de PBIAS insatisfatório ($> \pm 25\%$).

O valor de *p-factor* significa a porcentagem de observações de vazões que são envolvidas pela faixa de 95PPU, sendo recomendáveis valores superiores a 70% (Abbaspour, 2014). Nas iterações realizadas os valores de *p-factor* variaram entre 68% a 97%, sendo o maior valor obtido na 2ª iteração e o valor mais ruim na 4ª iteração. O valor de *r-factor* corresponde à espessura do envelope de 95PPU, recomendando-se valores próximos a 1 (Abbaspour, 2014). Nas iterações realizadas os valores de *r-factor* variaram entre 1,24 a 4,56, sendo o menor valor registrado na 4ª iteração.

Constatou-se que a 2ª iteração, foi a que apresentou melhor avaliação pela função objetivo PBIAS e pela estatística *p-factor*. A 4ª iteração somente foi bem avaliada pela estatística *r-factor*. Os resultados indicaram que não ocorreram melhorias sequenciais

a cada iteração dos ajustes gráficos, das funções e das estatísticas mencionadas, ou seja, hipótese de melhorias dos ajustes pela função PBIAS a cada iteração não foi confirmada, conforme apresentado na Figura 28 e Figura 29.

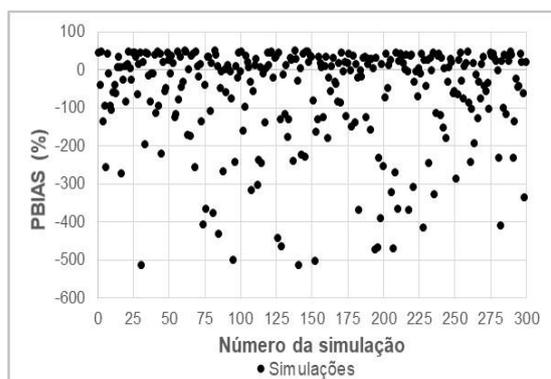


Figura 28 – Variação do PBIAS a cada autocalibração da 2ª iteração

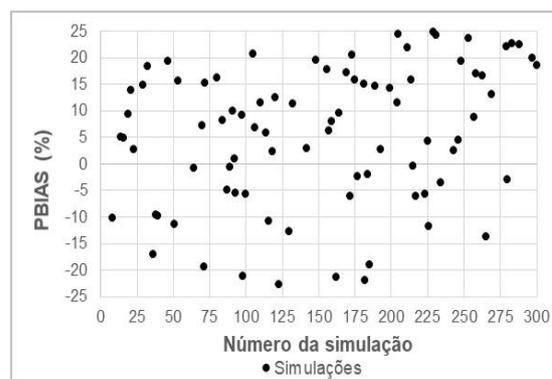


Figura 29 – Simulações da 2ª iteração dentro da faixa satisfatória do PBIAS

Na Figura 28 e Figura 29 verifica-se que não há correlação positiva entre simulações subsequentes e os valores da função PBIAS, destacando-se na Figura 29, que 84 simulações situaram-se dentro da faixa indicada como modelagem satisfatória ($\leq 25\%$) pela função PBIAS, ou seja, diferentes simulações produziram respostas consideráveis aceitáveis com base na função objetivo.

As Figura 30 a Figura 37 apresentam os ajustes das curvas de permanência obtidos em cada iteração em comparação com as curvas de vazões observadas do período de 1963-1972.

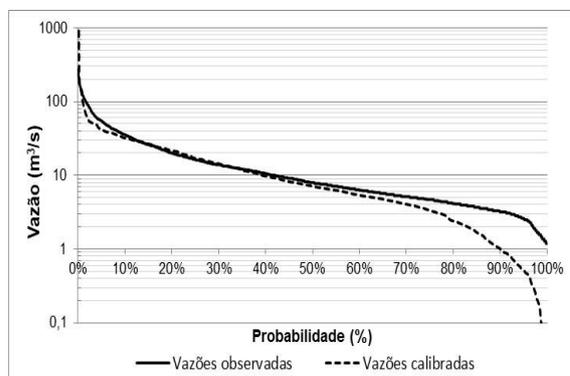


Figura 30 – Curvas de permanência da 1ª iteração

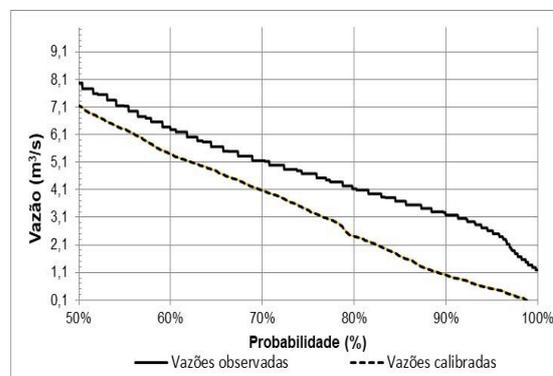


Figura 31 – Curva de permanência da 1ª iteração (ajuste das mínimas)

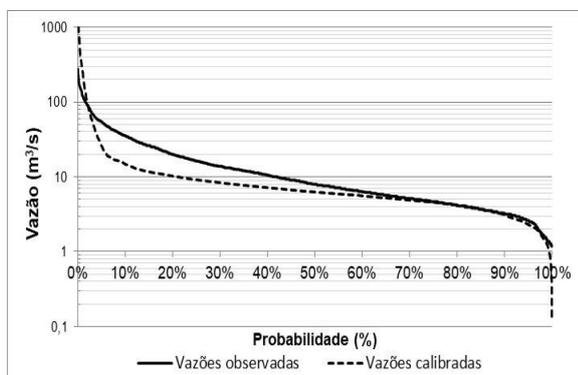


Figura 32 – Curvas de permanência da 2ª iteração

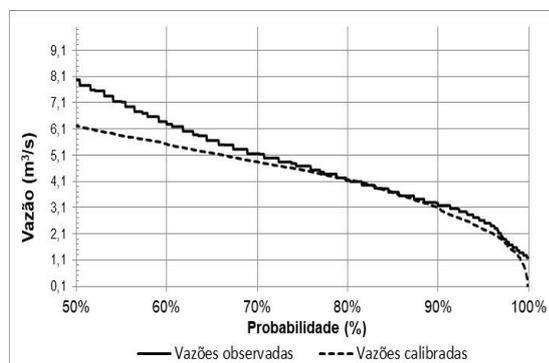


Figura 33 – Curvas de permanência da 2ª iteração (ajuste das mínimas)

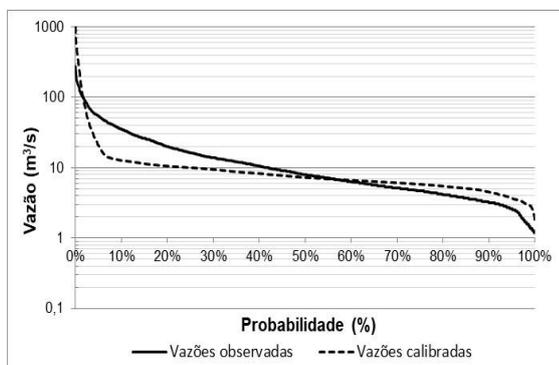


Figura 34 – Curvas de permanência da 3ª iteração

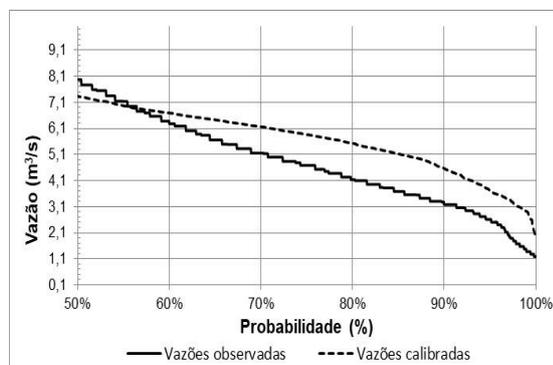


Figura 35 – Curvas de permanência da 3ª iteração (ajuste das mínimas)

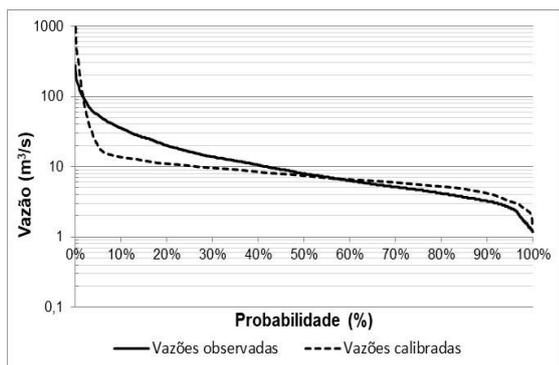


Figura 36 – Curva de permanência da 4ª iteração

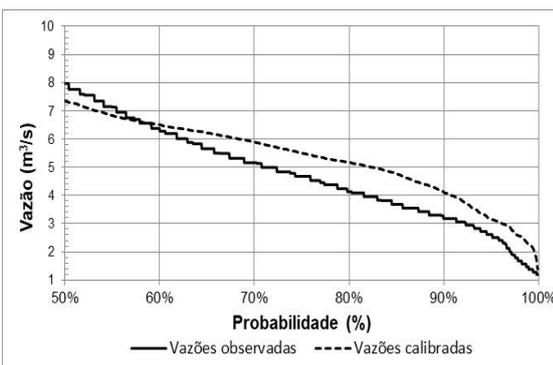


Figura 37 – Curva de permanência da 4ª iteração (ajuste das mínimas)

A partir da análise visual das curvas de permanência nota-se melhor ajuste das vazões mínimas com probabilidade entre 50 a 100% na 2ª iteração, como comentado anteriormente, quanto à função PBIAS e a estatística *p-factor*. Nos processos

iterativos subsequentes o ajuste visual tornou-se insatisfatório, principalmente no trecho das vazões mínimas.

Em virtude disso, optou-se em selecionar a iteração 2, com valor de PBIAS = -0,46% (classificação muito bom) e com *p-factor* superior a 0,7, apesar de possuir uma faixa de valores possíveis para os parâmetros maior (*r-factor* > 1), contudo, corresponde ao resultado para melhor representação das vazões mínimas. O hidrograma de vazões observadas e simuladas da 2ª iteração, após a autocalibração apresenta-se para o período completo (1963-1972) na Figura 38.

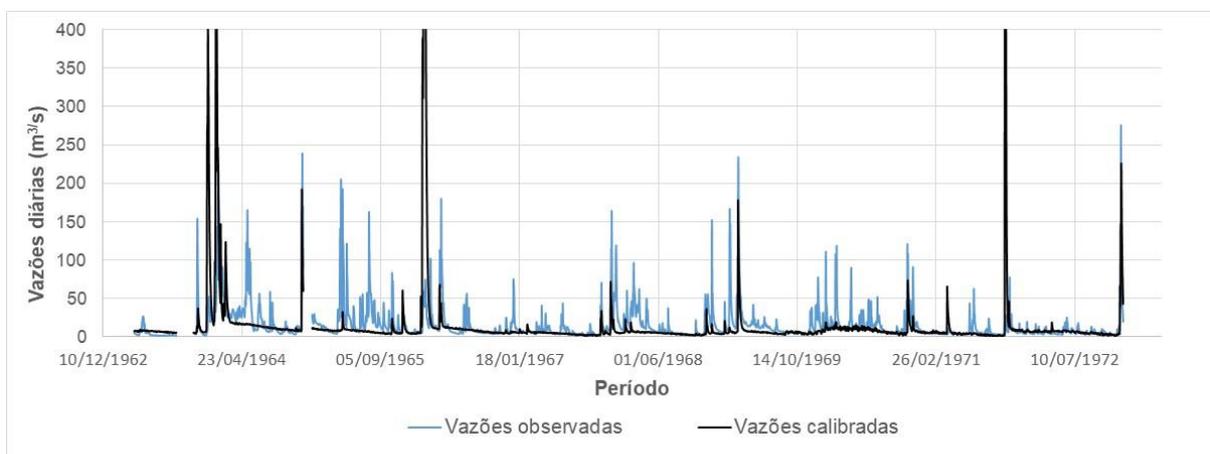


Figura 38 – Hidrograma de vazões observadas e calibradas da 2ª iteração (1963-1972)

Apesar do ajuste razoável das vazões mínimas com probabilidade entre 50 e 100% na curva de permanência da Figura 33, ao analisar o hidrograma da Figura 38 verificou-se que a representação dos trechos de ascensão e recessão das vazões diárias também não foi bem representado na autocalibração. Destaca-se nesse caso que os ajustes foram realizados com base na série de vazões gerada pelas curvas-chave da estação Porto (8 equações), e que foi demonstrando anteriormente que a seção de medição dessa estação é instável, resultando em extrapolações na estimativa das vazões mínimas. Ressalta-se que os ajustes dos dados observados às curvas-chave possuem incertezas que não são consideradas nessa pesquisa, como erros de medição de vazões, precisão de equipamentos e o método de ajuste dos parâmetros das equações.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados comparativos das vazões observadas e calibradas obtidas com a 2ª iteração para o período 1963-1972.

Tabela 16 – Comparativo das vazões observadas e calibradas (1963-1972) – calibração automática da 2ª iteração

Vazão de referência	Vazões observadas (m ³ /s)	Vazões calibradas (m ³ /s)	Diferença relativa
Q _{50%}	7,97	6,75	-15%
Q _{90%}	3,18	3,24	2%
Q _{95%}	2,61	2,44	-7%

A partir dos resultados da Tabela 16 verifica-se que as diferenças entre as vazões de referências observadas e calibradas, variaram entre -15% a 2%, sendo a menor diferença registrada entre a vazão Q_{50%} simulada. A vazão Q_{90%} calibrada, apresentou diferença de 2% em relação à vazão observada, o que pode ser considerado como um bom resultado. A vazão média de longa duração da série observada foi de 15,68 m³/s e a vazão média simulada na iteração citada foi de 15,76 m³/s, o que representa uma diferença de 0,5%.

Em virtude da representação diária das vazões não ter sido satisfatória avaliou-se os resultados da autocalibração quanto à representação do comportamento médio mensal das vazões observadas e calibradas para o período 1963-1972. A Figura 39 apresenta o comparativo das vazões médias mensais do período, no qual constata-se visualmente que o modelo reproduziu a variação sazonal mensal.

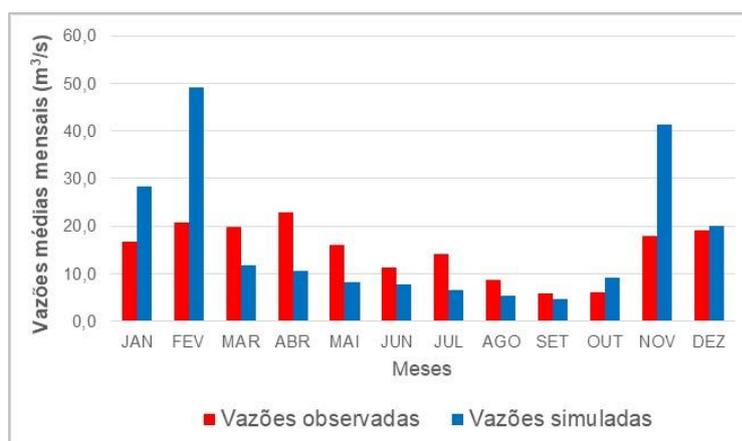


Figura 39 - Vazões médias mensais observadas e calibradas (1963-1972)

Os valores das vazões médias observadas e calibradas são apresentadas na Tabela 17, onde as subestimativas variaram entre 19% a 54%, e as superestimativas variaram entre 5% a 135%.

Tabela 17 - Vazões médias mensais observadas e calibradas (1963-1972)

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Vazões médias observadas	16,7	20,8	19,8	22,8	16,1	11,4	14,2	8,8	5,8	6,2	17,9	19,1	15,0
Vazões médias calibradas	28,4	49,1	11,8	10,6	8,3	7,6	6,6	5,3	4,7	9,2	41,3	20,0	16,9
Diferença relativa (%)	70	135	-40	-53	-48	-33	-54	-40	-19	49	131	5	9

Nota: A cor azul representa o período úmido e a cor rosa o período seco.

Constatou-se que na análise mensal o modelo subestimou as vazões médias do período seco, compreendido entre maio a setembro, no caso 19 a 54%, quando comparadas com as vazões médias observadas. No período úmido, os meses de março e abril foram subestimados entre 40 a 53%, e os meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro foram superestimados entre 5 a 135%. Quando verifica-se a média anual a diferença percentual entre a vazão observada e calibrada é de 9%, o que indica que na escala média anual o resultado bem menos discrepante em relação à escala mensal.

Os resultados obtidos na calibração e autocalibração permitiram constatar que o modelo não representou de forma satisfatória o comportamento das vazões diárias, apesar do valor da função PBIAS e do comparativo entre as vazões $Q_{90\%}$, observada e calibrada, indicarem bons resultados. Quanto ao comportamento médio mensal, o modelo representou visualmente a sazonalidade (seco e úmido) quando comparado com o observado, mas em valores absolutos tende a subestimar as vazões médias, principalmente no período seco, no qual registram-se as vazões mínimas.

5.1.2 Validação

A validação realizada para o período posterior ao da calibração, compreendeu o período de 1973 a 1977 (5 anos) adotando-se os valores dos parâmetros (BEST SIM) obtidos na calibração automática. Constatou-se que no período de validação as vazões de referência ($Q_{50\%}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$) obtidas foram superiores às vazões observadas, contudo, o resultado obtido pela função objetivo PBIAS = 20,26% indicou desempenho satisfatório. A vazão média observada no período foi de 13,11 m³/s, e a vazão simulada correspondeu a 10,45 m³/s, logo, verifica-se uma subestimativa de 25% em relação à vazão observada. A Tabela 18 apresenta o comparativo entre as vazões observadas e da fase de validação, onde constatou-se que a vazão $Q_{90\%}$ foi superestimada em 18% em relação à observada.

Tabela 18 – Comparativo das vazões observadas e validadas (1973-1977)

Vazão de referência	Vazões observadas (m ³ /s)	Vazões validadas (m ³ /s)	Diferença relativa
$Q_{50\%}$	7,51	8,49	13%
$Q_{90\%}$	3,62	4,27	18%
$Q_{95\%}$	3,18	3,26	3%

A Figura 39 apresenta o comparativo das vazões médias mensais do período de validação, no qual constata-se visualmente que o modelo reproduziu a variação sazonal mensal, assim como na fase de calibração.

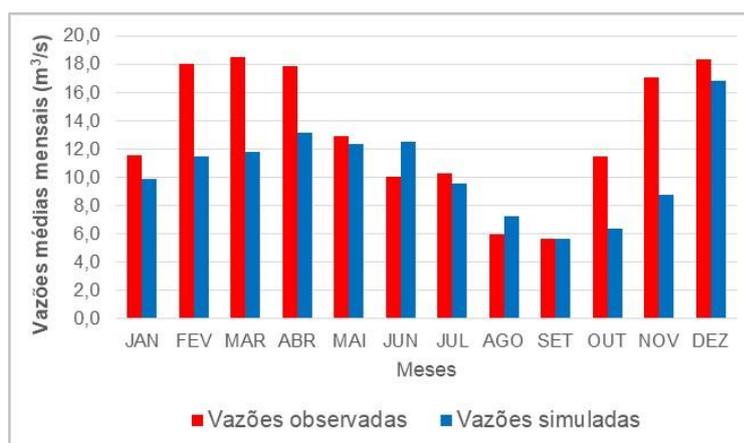


Figura 40- Vazões médias mensais observadas e validadas (1973-1977)

Os valores das vazões médias observadas e validadas são apresentadas na Tabela 19, onde as subestimativas variaram entre 7% a 49%, e as superestimativas variaram entre 1% a 21%.

Tabela 19 - Vazões médias mensais observadas e validadas (1973-1977)

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Vazões médias observadas	11,5	18,0	18,5	17,9	12,9	10,1	10,3	6,0	5,6	11,5	17,1	18,3	13,1
Vazões médias validadas	9,9	11,5	11,8	13,1	12,3	12,5	9,6	7,2	5,7	6,3	8,8	16,8	10,5
Diferença relativa (%)	-15	-36	-36	-27	-4	24	-7	21	1	-45	-49	-8	-15

Nota: A cor azul representa o período úmido e a cor rosa o período seco.

Constatou-se que na análise mensal o modelo subestimou as vazões médias de alguns meses do período seco, no caso dos meses de maio e julho, entre 4 a 7%, e superestimou as médias dos meses de junho, agosto e setembro, entre 1 a 24%, quando comparadas com as vazões médias observadas. No período úmido, todos os meses tiveram as vazões médias subestimadas entre 8 a 49%. Quando verifica-se a média anual a diferença percentual entre a vazão observada e validada foi de 15%, o que indica que na escala anual o resultado foi bem menos discrepante em relação à escala mensal, sendo esta mesma observação registrada na fase de calibração.

Quanto ao comportamento médio mensal, o modelo validado representou visualmente a sazonalidade, como o ocorrido na etapa de calibração, quando comparado com o observado, mas em valores absolutos também tende a subestimar as vazões médias.

Por fim, constatou-se a partir dos resultados da validação que limitar-se à avaliação dos resultados da modelagem a partir da função PBIAS não mostra-se adequado, apesar de o valor PBIAS indicar resultado satisfatório, pois ao analisar a vazão de referência $Q_{90\%}$ nota-se uma discrepância considerável entre vazões observadas e vazões validadas. Ressalta-se que não existe critério definido que possa confirmar a aceitabilidade da diferença de +18% (Tabela 18), mas que diante da limitação do modelo na simulação de vazões diárias na bacia em estudo, não recomenda-se para fins práticos esses resultados para aplicação da outorga, desde que uma faixa de risco

seja conhecida. Contudo, para fins de avaliação quantitativa dos efeitos das incertezas de medição da precipitação, dos dados climáticos e dos valores dos parâmetros do modelo os resultados da validação foram considerados válidos para a realização das simulações.

5.1.3 *Análise de sensibilidade global dos parâmetros*

Na fase de autocalibração o SWAT CUP realizou a análise de sensibilidade global através de um sistema de regressão múltipla e a utilização do Teste t-Student com nível de significância $\alpha=5\%$ (ABBASPOUR, 2015). Logo, os cinco parâmetros identificados como mais sensíveis, tendo como base o resultado da 2ª iteração da autocalibração foram: CN2, que está relacionado à cobertura do solo; ESCO, que influencia na profundidade do solo definida para atender a demanda evaporativa do solo; SOL_Z, que se refere à camada de profundidade do solo; ALPHA, que se refere à constante de recessão do escoamento de base; e SOL_AWC, que corresponde à quantidade de água disponível na primeira camada de solo.

5.1.4 *Simulação para extensão da série hidrológica de vazões diárias*

A extensão da série de vazões do período de 1963 a 1989 (28 anos) foi realizada posteriormente à validação dos valores dos parâmetros apresentada anteriormente. Ressalta-se que em virtude da limitação da extensão das séries pluviométricas até o início da década de 1990, não foi possível estender a simulação até os anos mais recentes, especificamente até o ano de 2017. A Figura 41 e Figura 42 apresentam as curvas de permanência de vazões estendidas para o período citado anteriormente.

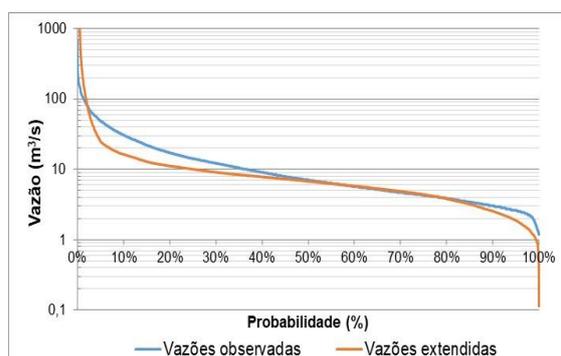


Figura 41 – Comparativo de curvas de permanência (1963-1989)

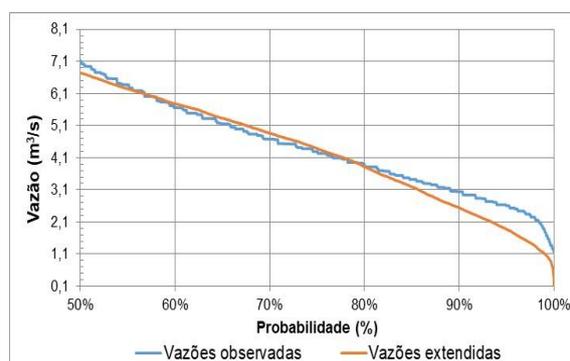


Figura 42 – Comparativo de curvas de permanência de vazões (vazões mínimas) (1963-1989)

Na etapa de simulação verificou-se que o modelo hidrológico apresentou limitação na continuidade da simulação das vazões diárias para período superior a 10 anos superestimando as vazões, especificamente nos trechos de recessão. A ocorrência desse fenômeno pode estar condicionada ao parâmetro que controla o escoamento de água subterrânea QWQMN, que está relacionado à profundidade do aquífero para ocorrência do escoamento de base, ou seja, a profundidade natural pode ser superior àquela obtida na calibração. Ressalta-se ainda que o parâmetro QWMN possui faixa de variação de 0 a 5 m no modelo hidrológico. Em virtude disso, foram realizadas simulações com intervalos menores, adotando-se períodos de aquecimento de 3 anos antecedentes aos períodos simulados. A Tabela 20 apresenta as vazões de referência estendidas obtidas a partir da curva de permanência observada e simulada.

Tabela 20 – Vazões de referência estendidas da estação Porto (1963-1989)

Vazão de referência	Vazões observadas (m ³ /s)	Vazões simuladas (m ³ /s)	Diferença relativa entre observado e simulado
Q _{50%}	7,13	6,75	-5%
Q _{90%}	3,04	2,54	-17%
Q _{95%}	2,61	1,87	-28%

Logo, pelos resultados obtidos estima-se que a vazão de referência simulada Q_{90%} da série estendida correspondeu a 2,54 m³/s, valor 17% inferior em relação à vazão observada. Gráficamente observou-se na Figura 42 que as vazões com probabilidade entre 50 a 85% apresentaram bom ajuste em relação à curva de permanência observada, enquanto que para probabilidades superiores a 85% as vazões foram subestimadas. A série estendida foi simulada com base em valores dos parâmetros

que estavam relacionados a um cenário da bacia com clima, uso e ocupação do solo correspondente ao período da calibração (1963-1972), ou seja, menos antropizado. A obtenção do valor de $Q_{90\%}$ simulado inferior ao $Q_{90\%}$ observado não resultou numa resposta esperada, pois esperava-se $Q_{90\%}$ simulado $>$ $Q_{90\%}$ observado. Assim, o procedimento adotado como forma de minimizar os efeitos das retiradas de água no período posterior ao período de 1973-1989 não mostrou-se adequado, o que pode também ter sido influenciado pelas limitações do modelo nas simulações das vazões mínimas conforme citado anteriormente.

Em virtude disso, para fins comparativos com os resultados das simulações que consideram as incertezas de medição da precipitação, das variáveis climáticas e dos valores dos parâmetros foram utilizadas somente as vazões de referência observadas da estação Porto (1963-1989).

5.1.5 Simulação com influência da incerteza de medição dos dados de precipitação

A partir das simulações com as séries sintéticas de precipitação, nas quais foram incluídas a incerteza de medição do Tipo B foram obtidas as curvas de permanência apresentadas na Figura 43 e Figura 44. As vazões (limite superior) são resultantes da série simulada com precipitações diárias + valor da incerteza, e as vazões (limite inferior) são resultantes da série simulada com precipitações diárias – valor da incerteza. Verificou-se visualmente a obtenção de envoltórias de curvas de permanência entorno da curva de vazões observadas, especificamente no trecho das vazões mínimas (probabilidade 50 a 95%). No trecho com vazões com probabilidade inferior a 50%, onde situam-se as vazões máximas, que não são objeto de análise dessa pesquisa, não foram registradas envoltórias de curvas. A partir das vazões com probabilidade superior a 95%, constatou-se que a curva de permanência (limite superior) apresentou mudança de comportamento registrando valores inferiores aos observados.

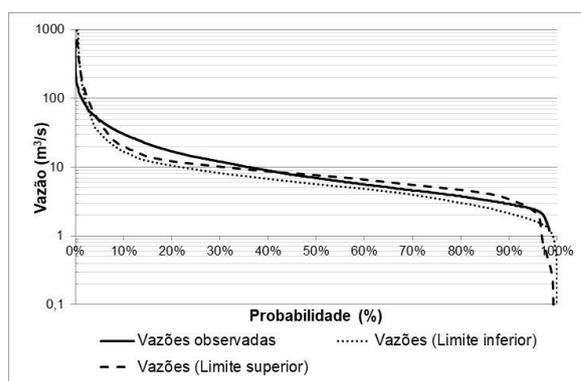


Figura 43 – Curvas de permanência com incertezas de medição dos dados de precipitação

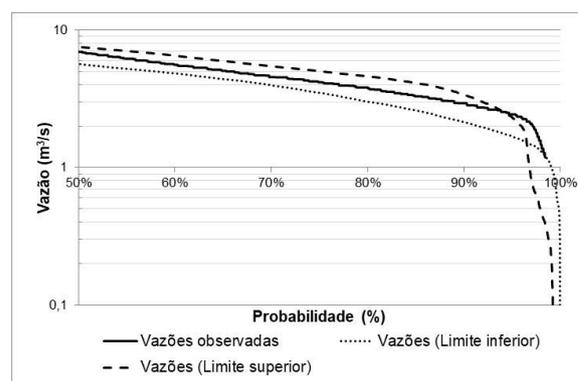


Figura 44 – Curvas de permanência com incertezas de medição dos dados de precipitação (vazões mínimas)

Na Tabela 21 apresentam-se as vazões de referência obtidas a partir das curvas de permanência. Verifica-se ao considerar a incerteza citada a vazão $Q_{90\%}$ situou-se numa faixa de vazões entre 2,15 a 3,38 m^3/s , o que indica uma variação de 1,2 m^3/s . Ao considerar a faixa superior da incerteza a vazão $Q_{90\%}$ foi superestimada em 11% em relação à vazão observada ($Q_{90\%} = 3,04 m^3/s$) e quando considerada a faixa inferior a vazão foi subestimada em 29%.

Tabela 21 - Vazões de referência com incertezas de medição dos dados de precipitação (1963-1989)

Vazão de referência	Série observada ¹ (m^3/s)	Vazões – Limite superior (m^3/s)	Diferença relativa ²	Vazões – Limite inferior (m^3/s)	Diferença relativa ³
$Q_{50\%}$	7,13	7,53	6%	5,69	-20%
$Q_{90\%}$	3,04	3,38	11%	2,15	-29%
$Q_{95\%}$	2,61	2,29	-12%	1,70	-35%
$Q_{100\%}$	1,19	0,0	-100%	0,07	-94%

Nota:

¹A série observada refere-se a série de dados disponibilizados pela ANA

²Diferença relativa entre vazão observada e vazão (limite superior)

³Diferença relativa entre vazão observada e vazão (limite inferior)

5.1.6 Simulação com influência da incerteza de medição dos dados climáticos

A partir das simulações com a consideração das incertezas de medição do Tipo B das 6 variáveis climáticas (precipitação diária, temperatura máxima/mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa) na geração dos 14 parâmetros climáticos do modelo (TMPMX, TMPMN, TMPSTDMX, TMPSTDMN, PCPMM,

PCPSTD, PCPSKW, PR_W(1), PR_W(2), PCPD, RAINHHNX, SOLARAV, DEWPT e WNDV) foram obtidas curvas de permanência resultantes da consideração da incerteza de medição. A Figura 45 e Figura 46 apresenta os resultados gráficos comparativos das curvas de permanência a partir das vazões simuladas com incertezas em relação às vazões observadas.

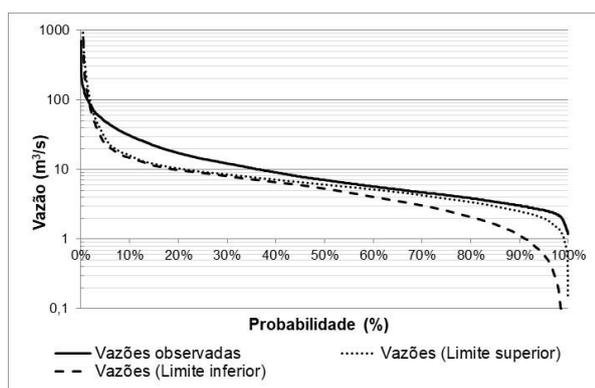


Figura 45 – Curvas de permanência com incertezas de medição das variáveis climáticas

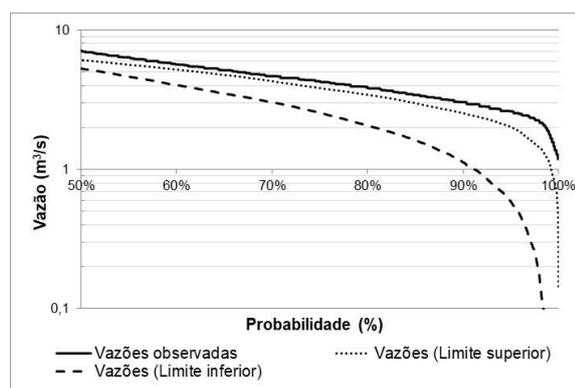


Figura 46 – Curvas de permanência com incertezas de medição das variáveis climáticas (vazões mínimas)

A curva de permanência de vazões (limite superior-LS) foi resultante da simulação com os valores dos parâmetros climáticos obtidos a partir de séries de dados diários das variáveis climáticas, no qual é subtraído do valor diário, o valor da incerteza $-u$. A curva de permanência de vazões (limite inferior-LI) foi resultante da simulação no qual é adicionado ao valor diário, o valor da incerteza $+u$.

A curva de vazões (LS) resultante da redução dos valores diários das variáveis climáticas está associado a um cenário com menores valores de precipitação, temperaturas, umidade, radiação solar e velocidade do vento. A curva de vazões (LI) resultante do aumento dos valores diários das variáveis climáticas está associado a um cenário contrário ao descrito anteriormente.

Observou-se que as curvas de permanência obtidas na simulação não resultaram em envoltórias de curvas entorno da curva de vazões observadas, situação contrária ao que foi constatado ao considerar as incertezas de medição das precipitações diárias. No caso, ao considerar a parcela da incerteza ($\pm u$) foram geradas curvas com valores de vazões inferiores aos da curva de vazões observadas.

Ao comparar as curvas de vazões, LS e LI, é válido registrar as observações quanto à variável precipitação diária. Constatou-se que apesar do aumento dos valores de

precipitação diária na simulação da curva LI não registrou-se uma relação direta de aumento de vazões, o que indica que possivelmente as outras variáveis climáticas possuem maior influência na geração do escoamento, e que processos como evapotranspiração tenham sido intensificados. Ressalta-se que a curva LS foi resultante da redução dos valores diários de todas as variáveis, dentre elas a precipitação.

A Tabela 22 apresentada as vazões de referência obtidas a partir das curvas de permanência ao considerar as incertezas de medição das variáveis climáticas. Constata-se na análise da vazão $Q_{90\%}$ que as vazões são variáveis entre 1,13 a 2,53 m^3/s , o que indica uma variação de 1,40 m^3/s . Os resultados indicaram uma redução da vazão de no máximo de até 63% quando comparada com a vazão observada ($Q_{90\%}=3,04 m^3/s$).

Tabela 22 - Vazões de referência com faixas de incertezas de medição das variáveis climáticas (1963-1989)

Vazão de referência	Vazão observada	Vazões simuladas			
		Vazão inferior	Diferença relativa ¹	Limite superior	Diferença relativa ²
$Q_{50\%}$	7,13	5,30	-26%	6,08	-15%
$Q_{90\%}$	3,04	1,13	-63%	2,53	-17%
$Q_{95\%}$	2,61	0,59	-77%	2,01	-23%
$Q_{100\%}$	1,19	0,0	-100%	0,14	-89%

Nota:

¹Diferença relativa entre vazão observada e vazão (limite inferior)

²Diferença relativa entre vazão observada e vazão (limite superior)

5.1.7 Simulação com influência da incerteza dos valores dos parâmetros

Nessa avaliação são apresentados os resultados obtidos na autocalibração com a utilização do *software* SWAT CUP e com o método SUFFI-2 (hipercubo latino) a partir do qual foram obtidas faixas de incertezas dos valores dos parâmetros das 4 iterações realizadas (Tabela 22). Os métodos de variação dos valores dos parâmetros adotados foram v_{-} , no qual o valor do parâmetro é substituído por um determinado valor e r_{-} , no qual o valor do parâmetro é variado em função de uma faixa percentual definida, conforme indicação de Abbaspour (2015).

Tabela 23 - Incertezas dos valores dos parâmetros obtidos na autocalibração

Parâmetro	Método	Iteração 1		Iteração 2		Iteração 3		Iteração 4	
		VMIN	VMAX	VMIN	VMAX	VMIN	VMAX	VMIN	VMAX
CN2	r_	-0,2	0,2	-0,06	0,2	0,051	0,286	0,078	0,2169
ALPHA_BF	v_	0	1	-0,39	0,53	-0,05	0,631	-0,265	0,33
GW_DELAY	v_	0	500	158,64	476,35	181,6	378,2	270,522	448,52
GWQMN	v_	0	5000	1.827,62	5.489,03	3.050	5.499	4.267,98	6.705,65
SOL_AWC	v_	0	1	-0,317	0,561	-0,21	0,302	-0,177	0,142
ESCO	v_	0	1	0,385	1,157	0,75	1,48	0,4124	11,254
GW_REVAP	v_	0,02	0,2	-0,004	0,131	0,045	0,145	0,078	0,144
REVAPMN	v_	0	1000	167,286	722,71	196,3	547,4	135,69	410,269
LAT_TIME	v_	0	180	20,21	126,78	50,3	110,6	67,006	100,477
SOL_Z	r_	-0,2	0,2	-0,377	0,007	-0,25	0,003	-0,165	0,0049
<i>p-factor</i>		0,95		0,97		0,87		0,68	
<i>r-factor</i>		4,11		4,56		2,89		1,24	
PBIAS (%)		0,65		-0,46		7,39		26,91	

Nota:

VMIN – valor mínimo do parâmetro

VMAX – valor máximo do parâmetro

As faixas de valores VMIN e VMAX apresentadas na Tabela 23 resultantes da aplicação do método hipercubo latino, são denominadas por Abbaspour (2015) como envelope de boas soluções expresso como distribuição de probabilidade de 95% (95PPU). Ressalta-se que diferentes combinações dos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 23 dentro das faixas indicadas em cada iteração resultarão em ajustes considerados aceitáveis para posteriores simulações. Neste caso, as faixas de valores de incertezas dos parâmetros na iteração 2, foram consideradas como as representativas nessa pesquisa para a simulação de vazões na estação de Porto. Em cada iteração foi obtido o Best Sim, que refere-se à simulação com melhor do PBIAS, o L95PPU, que refere-se à curva limite inferior e o U95PPU, que refere-se à curva limite superior. O L95PPU e o U95PPU referem-se à envoltória de incertezas entorno do ajuste obtido pelo Best Sim. A Figura 47 a Figura 50 apresenta as curvas de permanência obtidas na etapa de autocalibração no período de 1960-1972, com as respectivas faixas de incertezas (L95PPU-Limite Inferior e U95PPU-Limite Superior) em cada iteração.

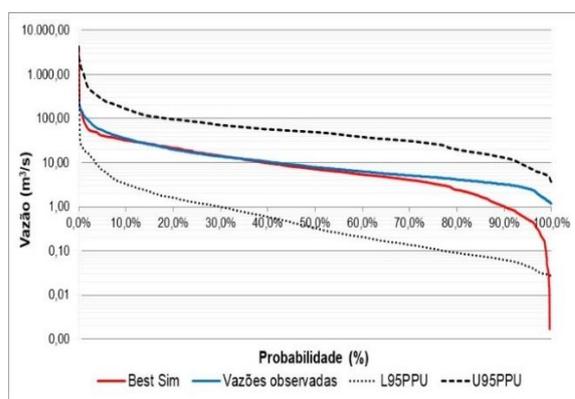


Figura 47 – Curvas de permanência com incertezas (Iteração 1)

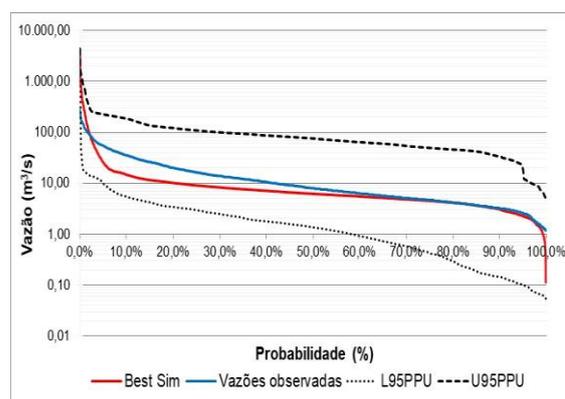


Figura 48 – Curvas de permanência com incertezas (Iteração 2)

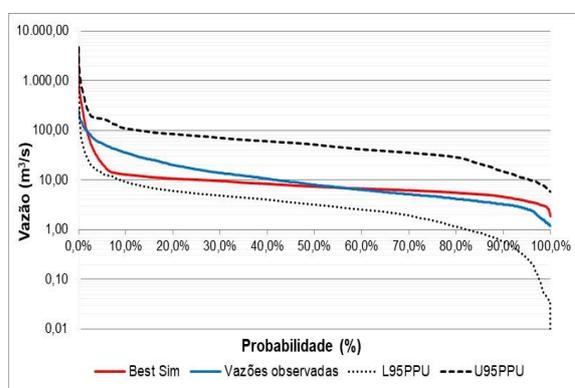


Figura 49 - Curvas de permanência com incertezas (Iteração 3)

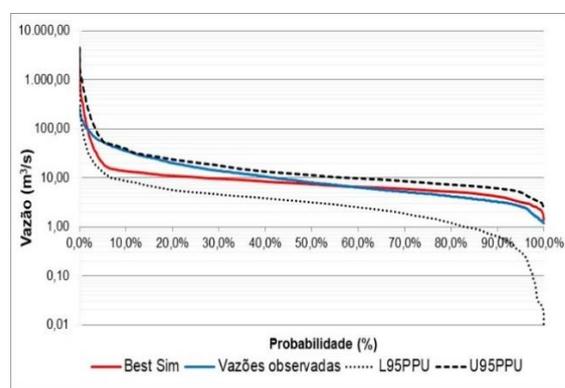


Figura 50 - Curvas de permanência com incertezas (Iteração 4)

Os resultados apresentados na Figura 47 a Figura 50 mostram que as faixas de incertezas devido aos valores dos parâmetros se reduzem a cada iteração. Em cada iteração são utilizadas as faixas dos valores dos parâmetros resultantes da iteração anterior e que corresponde à envoltória da curva de permanência melhor avaliada, ocorrendo uma redução sucessiva da faixa de incerteza, conforme citado por Abbaspour (2015). Contudo, as reduções das faixas de incertezas em cada iteração pelo SWAT CUP não implica em melhorias nos valores da função PBIAS, como o que ocorre nas estatísticas *p-factor* e *r-factor* que são melhoradas a cada iteração, sendo estas estatísticas relacionadas à faixa de incerteza dos valores dos parâmetros. A iteração 4 apesar de apresentar as melhores avaliações com relação ao *p-factor* e *r-factor*, ou seja, com menor faixa de incerteza, não apresentou melhoria no valor da função PBIAS, conforme mencionado anteriormente, indicando como insatisfatório (Tabela 23). Dentre as iterações realizadas, a que apresentou melhor ajuste visual

das vazões mínimas, especificamente quanto às vazões com 50 a 100% de ocorrência, refere-se à iteração 2 citada anteriormente. Logo, adotou-se como as incertezas dos valores dos parâmetros do modelo nessa pesquisa as faixas obtidas na iteração citada. A Figura 51 apresenta-se o hidrograma de vazões observadas e ajustadas na autocalibração no período (1963-1972) resultante da 2ª iteração onde destaca-se o Best Sim com a faixa de incertezas (95PPU).

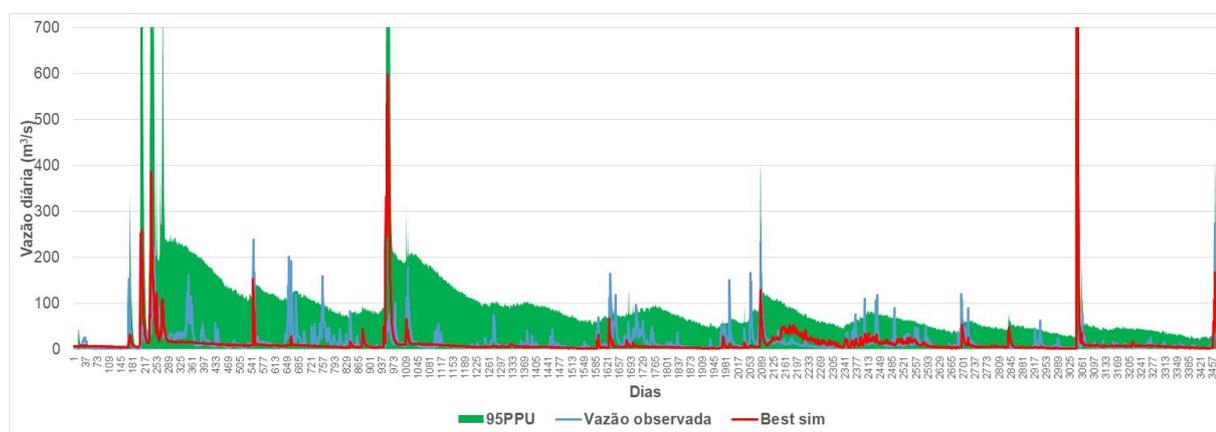


Figura 51 – Hidrograma de vazões observadas e simuladas obtidas na 2ª iteração com envoltória de incertezas (1963-1972)

Na Figura 52 destaca-se a curva de permanência com destaque para o trecho das vazões mínimas, resultante da 2ª iteração, com as curvas envoltórias L95PPU e U95PPU. Observa-se que visualmente o ajuste das vazões mínimas observadas e calibradas pode ser considerado satisfatório, contudo, a faixa de incerteza dos valores dos parâmetros delimitado pelo L95PPU e U95PPU são bem maiores, quando comparado com os das iterações 3 e 4. Logo, infere-se que a afirmativa de quanto maior o número de iterações ocorre melhoria do resultado do ajuste entre vazões observadas e calibradas não é válida, contudo, há a ocorrência da redução sucessiva da faixa de incerteza dos valores dos parâmetros. Para fins práticos condicionar a escolha de qual iteração terá os resultados considerados, não deve se limitar em somente à avaliação das estatísticas *p-factor* e *r-factor*.

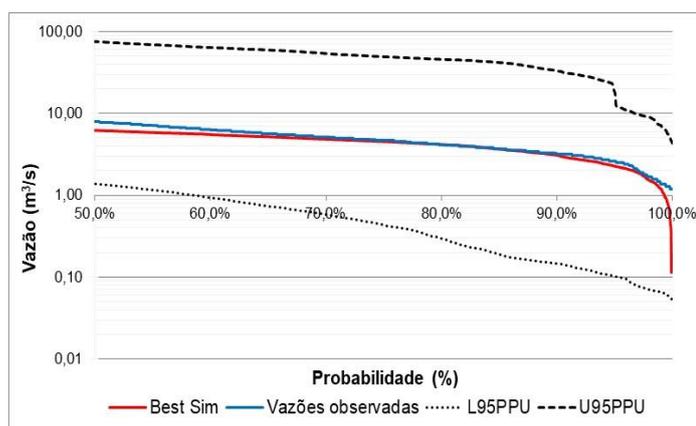


Figura 52 – Curva de permanência das vazões mínimas com incertezas (1963-1972)

A Tabela 24 apresenta as vazões de referência obtidas pelas curvas de permanência da 2ª iteração, conforme apresentado na Figura 52. Constatou-se que devido às incertezas dos valores dos parâmetros a vazão $Q_{90\%}$ na etapa de autocalibração foi variável entre 0,15 a 33,12 m^3/s , o que representou uma diferença percentual de até 942% em relação à vazão observada no período de 1963-1972.

Tabela 24 – Vazões de referência com faixas de incertezas obtidas na 2ª iteração da autocalibração (1963-1972)

Vazão de referência	Série observada (m^3/s)	Vazões simuladas - L95PPU (m^3/s)	Diferença percentual ¹	Vazões simuladas - U95PPU (m^3/s)	Diferença percentual ²
$Q_{50\%}$	7,97	1,38	-83%	75,57	848%
$Q_{90\%}$	3,18	0,15	-95%	33,12	942%
$Q_{95\%}$	2,61	0,10	-96%	18,37	604%

Nota:

¹Diferença relativa entre vazão observada e a vazão L95PPU

²Diferença relativa entre vazão observada e vazão U95PPU

Os dados apresentados na Tabela 26, relacionado às vazões do período da autocalibração mostram que a incerteza dos valores dos parâmetros resultou em diferenças percentuais bastante superiores em relação àquelas obtidas com a consideração das incertezas de medição da precipitação e das variáveis climáticas.

Para o período de simulação de 1963-1989, que é objeto de análise, as simulações com a consideração das incertezas dos valores dos parâmetros foram realizadas com os valores máximos, mínimos, médios e com o BEST SIM, conforme apresentados na

Tabela 25. Ressalta-se que o BEST SIM corresponde ao conjunto de valores dos parâmetros que resultaram na simulação melhor avaliada pelo PBIAS na 2ª iteração. Os resultados gráficos referentes às curvas de permanência são apresentados na Figura 53 e Figura 54.

Tabela 25 – Valores dos parâmetros do modelo utilizados nas simulações do período de 1963-1989

Parâmetro	Iteração 2			BEST SIM
	VMÍN	VMÁX	VMÉDIO	
CN2	-0,06	0,2	0,07	0,168
ALPHA_BF	-0,39	0,53	0,07	0,289
GW_DELAY	158,64	476,35	317,495	279,9
GWQMN	1.827,62	5.489,03	3.658,33	4274,67
SOL_AWC	-0,317	0,561	0,122	0,044
ESCO	0,385	1,157	0,771	1,115
GW_REVAP	-0,004	0,131	0,0635	0,0955
REVAPMN	167,286	722,71	444,998	371,86
LAT_TIME	20,21	126,78	73,495	80,427
SOL_Z	-0,377	0,007	-0,185	-0,123

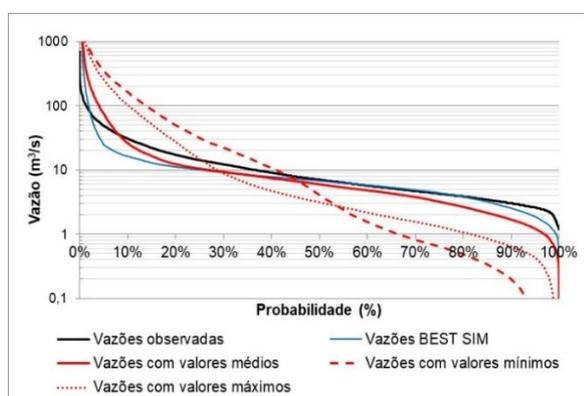


Figura 53 – Curva de permanência com faixas de incertezas dos valores dos parâmetros

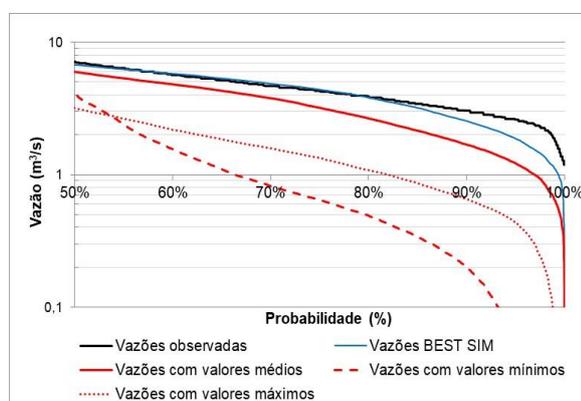


Figura 54 – Curva de permanência das vazões mínimas com as faixas de incertezas dos valores dos parâmetros

A simulação com os valores do BEST SIM para o período de 1963-1989 resultou numa curva de permanência com bom ajuste gráfico em relação à curva de permanência de vazões observadas, verificando-se subestimativa das vazões com probabilidade superior a 85%. Quanto às simulações realizadas com os valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros do modelo para o período de 1963-1989 verificou-se que no trecho das vazões mínimas, com probabilidade entre 50 a 100% as curvas de

permanência resultaram em vazões subestimadas em relação à série observada. A Tabela 26 apresenta as vazões de referência obtidas a partir das curvas de permanência das Figura 53 e Figura 54.

Tabela 26 – Vazões de referência obtidas devido as incertezas dos valores dos parâmetros (1963-1989)

Vazão de referência	Vazão observada	Vazões simuladas					
		Valores máximos	DP ¹	Valores mínimos	DP ²	Valores médios	DP ³
Q _{50%}	7,13	3,18	-55%	4,10	-43%	5,98	-16%
Q _{90%}	3,04	0,65	-79%	0,20	-93%	1,69	-45%
Q _{95%}	2,61	0,44	-83%	0,03	-99%	1,22	-53%
Q _{100%}	1,19	0,0	-100%	0,0	-100%	0,01	-99%

Nota:

DP = diferença percentual

¹Diferença relativa entre a vazão obtida com valores máximos dos parâmetros em relação à vazão observada

²Diferença relativa entre a vazão obtida com valores mínimos dos parâmetros em relação à vazão observada

³Diferença relativa entre a vazão obtida com valores médios dos parâmetros em relação à vazão observada

A simulação realizada com os valores médios da Tabela 25 resultou numa curva de permanência com comportamento gráfico semelhante ao da curva com série de vazões observadas, contudo, as vazões com probabilidade superior a 10% foram subestimadas. A vazão Q_{90%} resultante da simulação com os valores médios foi subestimada apresentando diferença de 45% em relação ao valor observado. Com os valores máximos dos parâmetros obteve-se a Q_{90%} igual a 0,65 m³/s, que corresponde a um subestimativa de 79% em relação à vazão observada; e com os valores mínimos dos parâmetros obteve-se a Q_{90%} igual a 0,20 m³/s, que corresponde a um subestimativa de 93%.

Quanto as simulações com os valores máximos e mínimos dos parâmetros do modelo, constatou-se que os mesmos não resultaram em envoltórias de curvas de permanência entorno da curva de permanência obtida com valores médios. As curvas de permanência com valores máximos e mínimos dos parâmetros resultaram na simulação de vazões mínimas inferiores ao da curva de permanência com valores médios dos parâmetros. Logo, infere-se que outro conjunto de valores de parâmetros devem produzir essas possíveis envoltórias de curvas e não necessariamente os valores máximos e mínimos das incertezas dos parâmetros, contudo, a utilização de

valores médios da faixa de incerteza dos parâmetros resultou num ajuste visual semelhante ao da curva de permanência de vazões observadas.

5.2 Efeito das incertezas na aplicação da outorga de uso de recursos hídricos

5.2.1 Disponibilidade hídrica adotada pelo gestor de outorgas

No estado da Bahia o INEMA é o órgão gestor responsável pelo gerenciamento de outorgas. Para os trechos do rio Paraguaçu o órgão adota 6 estações fluviométricas de referência, sendo que na região de estudo, onde situa-se o rio Antônio, adota-se como referência para fins de outorga os dados da estação fluviométrica Fértem (Código: 51190000), de acordo com Silva (2016). Os dados da estação Fértem, localizada na latitude -12,76 e longitude -41,33, e a jusante da estação Porto, estão apresentadas na Tabela 27. Ressalta-se que 64% da área de drenagem da estação fluviométrica Fértem corresponde à área de drenagem da estação Porto, sendo que essas estações estão equidistantes em 35 km. Para fins de análise comparativa considerou-se a disponibilidade hídrica outorgável do período de 1963-1989 da estação Fértem, que corresponde a 5 m³/s, com o objetivo de coincidir com o mesmo período adotado na pesquisa.

Tabela 27 – Dados da estação fluviométrica Fértem adotada pelo INEMA para outorga

Descrição	Período histórico	1963-1989
	Área de drenagem (km ²)	
Série anual	Vazão Q _{90%} (m ³ /s)	6,24
	Q _{específica} (L/s/km ²)	0,65
	Parcela outorgável em rios sem barramento (m ³ /s)	5,0

Para estimar a disponibilidade hídrica o INEMA adota o método de proporcionalidade de áreas de drenagem, que no caso para a seção da estação Porto, obtém-se a vazão Q_{90%} a partir do produto entre a vazão específica Q_{90%} = 0,65 L/s/km² da estação Fértem e a área de drenagem da estação Porto (6.180 km²) resultando numa vazão Q_{90%} igual a 4,0 m³/s. A parcela outorgável neste caso corresponde a 80% da Q_{90%}, no caso, a vazão 3,21 m³/s.

Caso o INEMA adotasse a série observada da estação Porto como referência, a disponibilidade hídrica $Q_{90\%}$ corresponderia a 3,04 m³/s e a parcela outorgável igual a 2,43 m³/s. Verifica-se que a disponibilidade hídrica adotada pelo gestor está 32% superestimada em relação ao valor obtido com base na série histórica da estação Porto, para o período de 1963-1989. Nesse caso, o gestor pode estar outorgando as retiradas de água e lançamentos de efluentes para diluição, com valores superiores aos que realmente são registrados na região, ocasionando uma situação de estresse hídrico.

Além disso, destaca-se que o método de proporcionalidade de áreas adotado pelo gestor não mostra-se adequado para a estimativa de vazões na área de estudo, quando comparara-se com as recomendações mínimas da WMO (2018b) para a aplicação do método. No caso, há uma deficiência no número de estações fluviométricas na região, sendo que de acordo com a WMO (2018b) para regiões montanhosas, como a área de estudo, a área máxima de abrangência de uma estação deve ser de 1.875 km². Considerando a seção da estação Fértem deveriam existir no mínimo cerca de 5 estações (9.670/1.875 km²) fluviométricas à montante, e considerando a seção da estação Porto, deveriam ser cerca de 3 estações (6.180/1.875 km²), indicando neste caso deficiências de 61% e 69% no número de estações, respectivamente, para a representação do espaço das bacias. Apesar de as duas estações fluviométricas estarem situadas em região com comportamento pluviométrico semelhante, conforme constatado pela forte correlação dos dados apresentada na Tabela 9, as estações abrangem regiões com hidrogeologia heterogênea e são bastante antropizadas, o que não é recomendável para aplicação do método. A presença do aquífero cárstico nas bacias dos rio São José, do rio Água da Régua e do rio Utinga, e do aquífero fraturado na área de estudo, se constituem em características físicas desfavoráveis para aplicação do método na região.

5.2.2 Efeito da incerteza de medição dos dados de precipitação

Ao considerar a incerteza de medição da precipitação, a disponibilidade hídrica $Q_{90\%}$ pode variar entre 2,15 m³/s a 3,38 m³/s, de acordo com dados da Tabela 28.

Tabela 28 – Comparativo das vazões $Q_{90\%}$ com a consideração das incertezas de medição da precipitação

Vazões	Vazão adotada pelo INEMA	Vazão observada (Estação Porto)	Vazão simulada (limite inferior)	Diferença relativa	Vazão simulada (limite superior)	Diferença relativa
$Q_{90\%}$ (m^3/s)	4,02	3,04	2,15	-46%	3,38	-16%
$Q_{90\%}$ outorgável (m^3/s)	3,21	2,43	1,72	-46%	2,70	-16%
$Q_{90\%}$ específica outorgável ($L/s/km^2$)	0,33	0,39	0,28	-16%	0,44	32%

Nota:

¹Diferença relativa entre a vazão limite inferior e a vazão adotada pelo INEMA

²Diferença relativa entre a vazão limite superior e a vazão adotada pelo INEMA

Devido às incertezas, a faixa de variação das vazões outorgáveis $Q_{90\%}$ correspondeu de 1,72 a 2,70 m^3/s , que no caso estão subestimadas entre 16 a 46% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA. No caso a utilização do valor outorgável do gestor (3,21 m^3/s) resulta na liberação de outorgas para derivação e captação de água, e lançamento de efluentes, bem superiores à capacidade natural do corpo hídrico (2,43 m^3/s), o que pode prejudicar a gestão das águas na região.

Ao analisar as faixas de valores de vazões $Q_{90\%}$ (2,15 – 3,38 m^3/s) obtidas nas simulações constata-se que são valores com ocorrência possível, pois o menor valor da série observada da estação Porto com $Q_{100\%}$ de permanência corresponde a 1,19 m^3/s . A faixa de disponibilidades hídricas citada possui probabilidade de ocorrência a nível diário de 98% (2,15 m^3/s) e 85% (3,38 m^3/s).

Quanto aos usos da água outorgáveis e prioritários em situação de escassez, como o abastecimento humano e dessedentação animal, conforme previsto na legislação estadual, no qual permite-se a captação de até 95% da $Q_{90\%}$ se estima que a vazão outorgável pelo gestor corresponderia a 3,81 m^3/s . Ressalta-se que esse valor não inclui-se na faixa de vazões outorgáveis devido a incerteza de medição da precipitação (1,72 – 2,70 m^3/s), podendo ser um risco o planejamento de medidas emergenciais para atendimento dos usos mencionados com base nesse valor.

Apesar de o indicador vazão específica outorgável ($L/s/km^2$), não ser recomendável para a região em estudo para fins de outorga, constata-se que o valor outorgável adotado pelo gestor (0,33 $L/s/km^2$) situa-se dentro da faixa outorgável devido a incerteza da medição da precipitação (0,28-0,44 $L/s/km^2$). Logo, a análise a partir

deste indicador permite inferir que o efeito da incerteza de medição da precipitação está dentro da faixa permissível de resultados, contudo, para fins práticos e devido a heterogeneidade da área de estudo, a utilização desse indicador não deve ser incentivada.

5.2.3 Efeito da incerteza de medição dos dados climáticos

Ao considerar a incerteza dos valores das variáveis climáticas, a disponibilidade hídrica $Q_{90\%}$ pode variar entre 1,13 m³/s a 2,53 m³/s, de acordo com dados da Tabela 29.

Tabela 29 – Comparativo das vazões $Q_{90\%}$ com a consideração das incertezas de medição dos parâmetros climáticos

Vazões	Vazão adotada pelo INEMA	Vazão observada (Estação Porto)	Vazão simulada (limite inferior)	Diferença relativa	Vazão simulada (limite superior)	Diferença relativa
$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	4,02	3,04	1,13	-72%	2,53	-37%
$Q_{90\%}$ outorgável (m ³ /s)	3,21	2,43	0,90	-72%	2,02	-37%
$Q_{90\%}$ específica outorgável (L/s/km ²)	0,33	0,39	0,15	-56%	0,33	-1%

Nota:

¹Diferença relativa entre a vazão limite inferior e a vazão adotada pelo INEMA

²Diferença relativa entre a vazão limite superior e a vazão adotada pelo INEMA

Devido às incertezas, a faixa de variação das vazões outorgáveis $Q_{90\%}$ correspondeu de 0,90 a 2,02 m³/s, que no caso estão subestimadas entre 37 a 72% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA. A variação percentual entre as vazões simuladas devido à incerteza das variáveis climáticas e a vazão adotada pelo gestor foi superior em relação à consideração das incertezas de medição da precipitação.

Ao analisar as faixas de valores de vazões $Q_{90\%}$ (1,13 – 2,53 m³/s) obtidas nas simulações constata-se que são valores com ocorrência parcialmente possível, pois o menor valor da série observada da estação Porto com $Q_{100\%}$ de permanência corresponde a 1,19 m³/s. Ressalta-se que vazões inferiores a 1,19 m³/s foram registradas na simulação, sendo este o valor mínimo com garantia de 100% de ocorrência identificado na série observada, indicando neste caso, uma subestimativa do modelo. A faixa de disponibilidades hídricas citada possui probabilidade de

ocorrência a nível diário 100% (1,19 m³/s) e 95% (2,53 m³/s), que são probabilidades superiores à adotada pelo gestor, mas que estatisticamente podem ocorrer.

Quanto aos usos da água outorgáveis e prioritários em situação de escassez se estima que a vazão outorgável pelo gestor corresponderia a 3,81 m³/s, sendo que este valor não inclui-se na faixa de vazões outorgáveis assim como constatado na análise dos efeitos da incerteza dos dados de precipitação.

Apesar de o indicador vazão específica outorgável (L/s/km²), não ser recomendável para a região em estudo para fins de outorga, constata-se que o valor outorgável adotado pelo gestor (0,33 L/s/km²) situa-se no limite da faixa outorgável devido a incerteza da medição das variáveis climáticas (0,15-0,33 L/s/km²). Logo, a análise a partir deste indicador permite inferir que o efeito da incerteza de medição das variáveis climáticas está dentro da faixa permissível de resultados, como também constatado na análise dos efeitos da incerteza dos dados de precipitação.

5.2.4 Efeito da incerteza dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico

Ao considerar a incerteza dos valores dos parâmetros, a disponibilidade hídrica Q_{90%} pode variar entre 0,20 m³/s a 1,69 m³/s, de acordo com dados da Tabela 30.

Tabela 30 – Comparativo das vazões Q_{90%} com a consideração das incertezas dos valores dos parâmetros

Vazões	Vazão adotada pelo INEMA	Vazão observada (Estação Porto)	Vazão simulada (valor mínimo)	Diferença relativa ¹	Vazão simulada (valor máximo)	Diferença relativa ²	Vazão simulada (valor médio)	Diferença relativa ³
Q _{90%} (m ³ /s)	4,02	3,04	0,20	-95%	0,65	-84%	1,69	-58%
Q _{90%} outorgável (m ³ /s)	3,21	2,43	0,16	-95%	0,52	-84%	1,35	-58%
Q _{90%} específica outorgável (L/s/km ²)	0,33	0,39	0,03	-92%	0,08	-75%	0,22	-34%

Nota:

¹Diferença relativa entre a vazão simulada (valor mínimo) e a vazão adotada pelo INEMA

²Diferença relativa entre a vazão simulada (valor máximo) e a vazão adotada pelo INEMA

³Diferença relativa entre a vazão simulada (valor médio) e a vazão adotada pelo INEMA

Devido às incertezas, a faixa de variação das vazões outorgáveis $Q_{90\%}$ correspondeu de 0,16 a 1,35 m^3/s , que no caso estão subestimadas entre 58 a 95% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA.

Ao analisar as faixas de valores de vazões $Q_{90\%}$ (0,20 – 1,69 m^3/s) obtidas nas simulações constata-se que são valores com ocorrência possível, contudo, o menor valor com probabilidade de ocorrência de 100% corresponde a $Q_{100\%} = 1,19 m^3/s$. A faixa de disponibilidades hídricas citada possui probabilidade de ocorrência a nível diário de 100% (1,19 m^3/s) e 99% (1,69 m^3/s). Por ser uma faixa de vazões menores, a probabilidade de ocorrência tende a ser maior e mais restritiva, quando comparada com as faixas de vazões resultantes das incertezas de medição dos dados de precipitação e das variáveis climáticas.

Quanto aos usos da água outorgáveis e prioritários em situação de escassez, como o abastecimento humano e dessedentação animal, conforme previsto na legislação estadual, no qual permite-se a captação de até 95% da $Q_{90\%}$ se estima que a vazão outorgável pelo gestor corresponderia a 3,81 m^3/s . Ressalta-se que esse não inclui-se na faixa de vazões outorgáveis devido à incerteza dos valores dos parâmetros.

Apesar de o indicador vazão específica outorgável ($L/s/km^2$), não ser recomendável para a região em estudo para fins de outorga, constata-se que o valor outorgável adotado pelo gestor (0,33 $L/s/km^2$) situa-se fora da faixa outorgável devido à incerteza dos valores dos parâmetros (0,03-0,22 $L/s/km^2$).

5.2.5 Síntese dos efeitos das incertezas na aplicação da outorga

Os principais efeitos constatados com a consideração das incertezas de medição dos dados de precipitação, das variáveis climáticas e dos valores dos parâmetros na aplicação da outorga foram:

- Os dados hidrológicos da estação Fértem adotados pelo gestor de outorgas como referência para aplicação da outorga na bacia delimitada pela estação Porto tende a superestimar em 32% a disponibilidade hídrica a partir do método de estimativa de vazões por proporcionalidade de áreas de drenagem. Esse resultado indica que o gestor pode estar outorgando retiradas de água e

lançamento de efluentes para diluição considerando capacidade superior dos cursos d'água em relação ao real, podendo gerar conflitos de usos;

- Devido aos efeitos da incerteza de medição da precipitação as disponibilidades hídricas estão subestimadas entre 16 a 46% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA. A faixa de vazões com incertezas possui probabilidade de ocorrência a nível diário de 85 a 98%;
- Devido aos efeitos da incerteza de medição das variáveis climáticas as disponibilidades hídricas estão subestimadas entre 37 a 72% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA. A faixa de vazões com incertezas possui probabilidade de ocorrência a nível diário de 95 a 100%;
- Devido aos efeitos da incerteza dos valores dos parâmetros as disponibilidades hídricas estão subestimadas entre 58 a 95% em relação à vazão adotada para outorga pelo INEMA. A faixa de vazões com incertezas possui probabilidade de ocorrência a nível diário de 99 a 100%;
- Quanto aos usos da água outorgáveis e prioritários em situação de escassez, como o abastecimento humano e dessedentação animal, conforme previsto na legislação estadual, no qual permite-se a captação de até 95% da $Q_{90\%}$ se estima que a vazão outorgável pelo gestor corresponderia a 3,81 m³/s. Ressalta-se que esse não inclui-se na faixa de vazões outorgáveis com incertezas mencionadas podendo prejudicar o planejamento de ações emergenciais;
- Apesar de o indicador vazão específica outorgável (L/s/km²), não ser recomendável para a região em estudo para fins de outorga, constatou-se que o valor outorgável adotado pelo gestor (0,33 L/s/km²) situa-se dentro da faixa outorgável devido à incerteza da medição da precipitação e das variáveis climáticas.

Na Tabela 31 apresenta-se um resumo das disponibilidades hídricas com as parcelas outorgáveis, devido às incertezas analisadas.

Tabela 31 – Resumo das disponibilidades hídricas estimadas e outorgáveis com incertezas

Descrição	Disponibilidade hídrica estimada (m ³ /s)	Parcela outorgável (m ³ /s)
Vazão (Estação Porto)	3,04	2,43
Vazão adotada pelo gestor de outorgas	4,02	3,21

Descrição	Disponibilidade hídrica estimada (m³/s)	Parcela outorgável (m³/s)
Incertezas de medição dos dados pluviométricos diários	2,15 - 3,38	2,43 - 2,70
Incertezas de medição das variáveis climáticas diárias (precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento)	1,13 - 2,53	0,90 – 2,02
Incertezas dos valores dos parâmetros do modelo hidrológico	0,20 -1,69	0,16 – 1,35

6 CONCLUSÕES

A pesquisa apresentada avaliou os efeitos da inserção da análise de incertezas na modelagem hidrológica, no que se refere aos dados de precipitação diária, das variáveis climáticas (precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, insolação e velocidade do vento) e dos valores dos parâmetros físicos do modelo hidrológico SWAT, para a estimativa da disponibilidade hídrica aplicável na outorga.

A partir da avaliação da incerteza de medição Tipo B, constatou-se que as incertezas dos dados de precipitação diária resultaram em faixas de variação dos totais mensais médios do período de 1960-1989 entre 2 a 181% nas estações pluviométricas selecionadas. Ao considerar as médias mensais das variações percentuais de todas as estações a faixa situou-se entre 2 a 64%. Essa análise evidenciou que as incertezas de medição dos dados pluviométricos diários não são desprezíveis, quando avalia-se o efeito a nível mensal, ou seja, nos totais mensais. Quanto à qualidade dos dados de precipitação a análise de consistência e de estacionariedade permitiram afirmar que as estações pertencem à mesma região e que não ocorreram alterações climáticas no período de 1960-1989 que alterassem as estatísticas médias dos dados.

Na quantificação das incertezas de medição das variáveis climáticas, ao nível mensal constatou-se que a velocidade média diária do vento foi a que apresentou maior faixa de variação em relação aos valores médios mensais registrados, quando comparado com as outras variáveis. A faixa de variação da incerteza da velocidade do vento situou-se entre 18 a 43%, nas estações de Lençóis e Itaberaba, em relação aos dados observados, enquanto que nas outras variáveis a faixa percentual de variação situou-se entre 0,3% a 14,3%. A velocidade do vento corresponde a uma das variáveis de entrada na equação de Penman-Monteith, utilizada para o cálculo da evapotranspiração que influencia no balanço hidrológico, o que demonstra maior necessidade de melhorar a precisão de medição dessa variável. Dentre as variáveis climáticas, a que apresentou menor faixa de variação devido à incerteza de medição correspondeu às temperaturas máxima e mínima diária, com discrepância entre 0,5% a 0,6% em relação aos dados observados.

Apesar de não ter sido realizada a análise de incertezas da curva chave da estação Porto utilizada na modelagem hidrológica constatou-se que existem grandes

extrapolações na parte inferior da curva, onde registram-se as vazões mínimas, o que impossibilita o ajuste de uma única curva na seção. A extrapolação da curva-chave influencia na estimativa das vazões diárias, devendo-se em estudos futuros avaliar as incertezas do ajuste das curvas chave aos dados observados, pois os dados são relevantes na fase de calibração do modelo hidrológico, e que possivelmente prejudicaram os ajustes das vazões mínimas nesta pesquisa. Contudo, nessa pesquisa essas incertezas foram desprezadas.

Na fase de modelagem hidrológica com o modelo SWAT constatou-se que a calibração manual, método necessário quando não há parâmetros medidos em campo, se faz necessária para a obtenção de bons ajustes de hidrogramas observados e calibrados, e conseqüentemente menos iterações na autocalibração dos valores dos parâmetros com o algoritmo SUFI-2 (hipercubo latino). Nos processos iterativos com o SUFI-2 constatou-se que não existe correlação positiva entre o número de simulações e os valores da função objetivo PBIAS, que permitem classificar a qualidade dos resultados da modelagem. Contudo, constatou-se que a cada iteração na autocalibração ocorre a redução da faixa de incerteza dos valores dos parâmetros, mas não se garante melhoria subseqüentes dos valores da função PBIAS e dos ajustes das vazões. Na calibração realizada com o SWAT a nível diário constatou-se que a seleção dos melhores ajustes não pode estar condicionado exclusivamente a avaliação da função objetivo PBIAS, pois não garante-se que a representação dos hidrogramas a nível diário, assim como ajustes entre as curvas de permanência observadas e calibradas sejam considerados satisfatórios graficamente.

A aplicação do modelo hidrológico na bacia de estudo apresentou limitação na continuidade da simulação das vazões diárias para períodos superiores a 10 anos, registrando-se problemas possivelmente relacionados à capacidade de armazenamento de água subterrânea, que está associada ao parâmetro QWQMN (capacidade de armazenamento do aquífero). Em função dos resultados obtidos e visando a minimização dos erros de propagação de vazões no modelo, sugere-se a utilização do mesmo a nível diário para intervalos inferiores a 5 anos. Dentre os parâmetros mais sensíveis constatado na análise de sensibilidade global se destaca o CN2 e ESCO, relacionados aos padrão de uso e ocupação do solo, o ALPHA,

relacionado ao escoamento subterrâneo, e SOL_AWC e SOL_Z, relacionados a características físicas do solo.

Para a bacia em estudo, a utilização do modelo SWAT para a simulação de vazões diárias, com o objetivo de estender série de vazões em períodos sem dados, e a serem utilizadas na estimativa da disponibilidade hídrica para fins de outorga não mostrou-se recomendável. Contudo, ao analisar os balanços mensais médios constatou-se que a sazonalidade das vazões, no que se refere a períodos de maior e menor produção de escoamento superficial foram representadas pelo modelo.

Na simulação com o SWAT para o período de 1963-1989 com a consideração da incerteza de medição ($\pm u$) da precipitação foram obtidas disponibilidades hídricas expressas pela vazão $Q_{90\%}$ variáveis entre 2,15 a 3,38 m³/s, que no caso, correspondem a subestimativa de 29% e superestimativa de 11% em relação à vazão $Q_{90\%}$ observada na estação Porto. Quanto à simulação com a incerteza de medição das variáveis climáticas as vazões $Q_{90\%}$ foram variáveis entre 1,13 a 2,53 m³/s, que no caso, correspondem a subestimativas de até 63% em relação à vazão $Q_{90\%}$ da estação Porto. A simulação com a consideração das incertezas dos valores máximos, mínimos e médios dos parâmetros do modelo hidrológico (CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, SOL_AWC, ESCO, GW_REVAP_REVAPMN, LAT_TTIME e SOL_Z) resultaram em vazões variáveis entre 0,20 a 1,69 m³/s, que correspondem a subestimativas entre 45 a 93% em relação à vazão $Q_{90\%}$ da estação Porto. Dentre as simulações realizadas constatou-se que a menor faixa de variação percentual constatada entre as vazões observadas e vazões com incertezas foi a decorrente da incerteza de medição da precipitação, mas que não são desprezíveis, e a que apresentou maiores faixas de variação foi a decorrente das incertezas dos valores dos parâmetros do modelo SWAT.

Na avaliação dos efeitos quantitativos da disponibilidade hídrica com incertezas verificou-se previamente a disponibilidade hídrica adotada para fins de outorga, sendo esta última adotada como base comparativa. Ao considerar os critérios adotados na aplicação da outorga verificou-se que o gestor adota a estação Fértem, localizada a jusante da estação Porto para a estimativa da disponibilidade hídrica na área de estudo. A estimativa da vazão $Q_{90\%}$ na seção da estação Porto pelo método de proporcionalidade de áreas, adotado para outorga pelo gestor, resultou numa vazão

$Q_{90\%}$ que é 32% superior à vazão $Q_{90\%}$ da série da estação Porto, ou seja, o método superestima a vazão.

Quando realizada a comparação entre a vazão $Q_{90\%}$ adotada na outorga em relação às faixas de vazões resultantes da simulação com a consideração da incerteza de medição da precipitação foram constatadas subestimativas variáveis entre 16 a 46% em relação à vazão adotada pelo órgão, e com probabilidade de ocorrência a nível diário de 85 a 98%. Na comparação entre a vazão $Q_{90\%}$ adotada na outorga em relação às faixas de vazões resultantes da simulação com a consideração da incerteza de medição das variáveis climáticas foram constatadas subestimativas variáveis entre 37 a 72% em relação à vazão adotada pelo órgão, e com probabilidade de ocorrência a nível diário de 95% a 100%. E por fim, na comparação entre a $Q_{90\%}$ adotada na outorga em relação às faixas resultantes da simulação com a consideração da incerteza dos valores dos parâmetros foram constatadas subestimativas entre 58 a 95%, e probabilidade de ocorrência a nível diário de 99 a 100%.

Todas as comparações efetuadas em relação à vazão $Q_{90\%}$ adotada na aplicação da outorga na bacia indicaram subestimativas bastante expressivas das vazões nas simulações devido às incertezas mencionadas, inclusive com valores de vazões inferiores à vazão $Q_{100\%}$ observada na estação Porto, que representa a menor vazão registrada no curso d'água. A utilização dessas faixas de vazões resultantes das incertezas para o gerenciamento de risco na gestão da outorga não é recomendável, pois pode resultar em medidas conservadoras que prejudicariam o atendimento de diversos usos, principalmente a irrigação, e os prioritários em situação de escassez (abastecimento humano e dessedentação animal), por abranger vazões inferiores a $Q_{100\%}$ observada na estação Porto. As incertezas dessas vazões podem intensificar os conflitos pelo uso da água e inclusive influenciar nas arrecadações financeiras com a aplicação do instrumento de cobrança pelo uso de recursos hídricos numa bacia. Ressalta-se que as vazões obtidas nas simulações devido as incertezas citadas apresentaram variações de probabilidade de ocorrência entre 85% a 100%, podendo este intervalo ser sugerido para o gerenciamento de risco da outorga devido as incertezas, especificamente de medição dos dados de precipitação e de variáveis

climáticas, na área de estudo, tendo-se como base a série de dados observados da estação Porto.

Apesar de a modelagem chuva-vazão não ser comumente utilizada por órgãos gestores para fins de estimar disponibilidades hídricas para concessão de outorgas recomenda-se a não utilização do modelo SWAT para a simulação de vazões diárias em bacias com características semelhantes à da área de estudo. Caso opte-se pela modelagem com o SWAT, especificamente para a extensão de séries hidrológicas se deve priorizar a obtenção de dados físicos de qualidade da bacia; selecionar períodos históricos de vazões contínuos, secos e curtos (2 a 3 anos); utilizar a calibração manual e autocalibração de forma concomitante e se atentar com a discretização da bacia em HRUs, o que pode influenciar no tempo de processamento do modelo.

Diante das incertezas analisadas se constata nessa pesquisa que para a aplicação da outorga há a necessidade da consideração das incertezas de medição das precipitações e das variáveis climáticas, assim, como das incertezas das curvas chave nas análises, o que indica que esse instrumento de gestão deve ser aplicado com maior flexibilização.

Para estudos futuros sugere-se avaliar os efeitos das incertezas devido ao Modelo Digital de Elevação, com distintas resoluções espaciais e acurácias verticais na simulação chuva-vazão, e que não foram avaliados nessa pesquisa. Além disso, sugere-se priorizar a análise dos efeitos das incertezas dos parâmetros hidráulicos e hidrológicos, associados aos parâmetros físicos da bacia, nas simulações chuva-vazão, com fins de estimar vazões para aplicação na outorga.

▮

7 REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual. Eawag, 2015, 100 p.

ABBASPOUR, K.C.; JOHNSON, C.A.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3 (4), 2004, 1340–1352.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. v. 524, mai. 2015, p. 733-752.

ANA. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas. Brasília, DF, 2013. 252 p.

_____. Relatório Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2017. Brasília, DF, 2017, 37 p.

_____. Portal de Metadados Geoespaciais. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acessado: dez.2017.

_____. Sistema Hidroweb. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/HidroWeb.asp?Tocltem=1070&TipoReg=7&MostraCon=false&CriaArq=false&TipoArq=1&SerieHist=false>. Acessado: dez. 2017.

_____. Capacitação em Gestão de Recursos Hídricos – Volume 7, Cobrança pelo uso de recursos hídricos, Brasília: ANA, 2014. 80 p.

ANGLIERI, D.;PIANOSI, F.; SESSA, R.S. Trend detection in seasonal data: from hydrology to water resources. *Journal of Hydrology*, 511, 2014, p. 171-179.

ANGSTROM, A. (1924) Solar and Terrestrial Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-126. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49705021008>

BAHIA. Superintendência de Recursos Hídricos. Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do Alto Paraguaçu. 1993.

ARNOLD, J.G. *et al.* Soil & Water Assessment Tool – Input/Output Documentation, Version 2012. Texas Water Resources Institute (TR-439), 2012, 650 p.

BAHIA. Instrução Normativa Nº 01, de 27 de fevereiro de 2007. Dispõe sobre a emissão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos de domínio do Estado da Bahia, assim como a sua renovação, ampliação, alteração, transferência, revisão, suspensão e extinção, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado da Bahia, 2007.

_____. Decreto Nº 6.296, de 21 de março de 1997. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos, infração e penalidades e dá outras providências. Diário Oficial do Estado da Bahia, 1997.

_____. Instrução Normativa Nº 03, de 08 de novembro de 2007. Disponível em: <http://www.oads.org.br/leis/2777.pdf>.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT. Dissertação. Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente. Universidade Federal de Mato Grosso. 148 p. 2005

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação, 2ª ed. Porto Alegre.ABRH, 2001.

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. Diário Oficial da União, Brasília, 9 jan. 1997.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J.G.; GARBOSSA, L.H.P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N.B.; MEDIONDO, E.M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. Rev. Int. J. Agric & Biol. Eng, 2015; 8(3): 9-35

BROOKS, S. P. Bayesian computation: a statistical revolution. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, v. 361, n. 1813, p. 2681-2697, 2003.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. 1º Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

CRUZ, J.C.; TUCCI, C.E.M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. Rev. Bras. de Recursos Hídricos, v. 13, n. 1, p. 111-124, jan/mar, 2008.

DETZEL, D.H.M.; FERNANDES, C.V.S.; MINE, M.R.M. Nonstationary in determining flow-duration curves aiming water resources permits. Rev. Bras. de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, jan/mar, 2016.

DUAN, Q.Y., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall–runoff models. *Water Resources Research* 28 (4), 1015–1031.

EMBRAPA. SiBCS. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/correlacao-com-wrb-fao-e-soil-taxonomy>. Acesso em: 6 nov. 18.

ESRI. 1999. Arc View Gis 3.2 Software Program.

FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. Disponível em: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>. Acesso em: mar. 2019.

FAN, F.M.; RAMOS, M.H.; COLLISCHONN, W. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. *Rev.Bra. de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, out-dez, 2015, p.914-926.

FEITOSA, F.; FILHO, J.M. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2 ed. CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FONTES, A. S.; OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. 2010. Calibração do modelo SWAT em bacia do semiárido com auxílio da hidrologia isotópica. In: Anais. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE. 2010.

FRANZBLAU, Abraham N. A primer of statistics for non-statisticians. Nova York: Harcourt, Brace and World, 1958.

GARCÍA, D.E.G. Modelo empírico linear para previsão da disponibilidade hídrica integrada em função da média móvel da precipitação. 2016. 128 p. Dissertação Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

GENZ, F. Avaliação dos efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do rio Paraguaçu e Baía de Iguape. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia. 2006.

GUILLAUME, J.H.A.; HELGESON, C.; ELSAWAH, S.; JAKEMAN, A.; KUMMU, M. Toward best practice framing of uncertainty in scientific publications: a review of water resources research abstracts. *Rev. Water Resources Research*, 53, 6744-6762, ago, 2017.

GUMBEL, E.J. Statistical forecasting of Droughts *Bulletin of Association of Hydrological Research*, v. 8, n.1, 1963, p. 5-23.

GOHARIAN, E.G.; ZAHMATKESH, Z.; SANDOVAL-SOLIS, S. Uncertainty Propagation of Hydrologic Modeling in Water Supply System Performance: Application of Markov Chain Monte Carlo Method. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 23, issue 5, mai. 18.

IBGE. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SD.24 Salvador – Potencial dos Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, 1999. 235 p.

_____. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SD.24 Salvador – Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra. Rio de Janeiro, 1981. 624 p.

_____. Manual técnico da vegetação brasileira. 2ª ed. Revista e ampliada. Rio de Janeiro, 2012, 271 p.

INMET. Estações convencionais. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>. Acessado em: out. 17.

JCGM 100:2008 GUM 1995. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008. 134 p.

JOSEPH, E. Probability distribution of annual droughts. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, v. 96, n.4, 1970, p. 461-474.

KHALID, K.; ALI, M.F.; RAHMAN, N. F. A.; MISBAN, M. R.; HARON, S.H.; OTHMAN, Z.; BACHOK, M. F. Sensitivity Analysis in Watershed Model Using SUFI-2 Algorithm. Procedia Engineering, v.162, 2016. P. 441-447.

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; FALAHI, M. Hydrology and Hydroclimatology – Principles and Applications. CRC Press, 2013. p. 731.

KHOI, D.N.; THOM, V.T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. Global Ecology and Conservation 4 (2015), 538-548.

LANNA, A. E. L. MODHAC - Modelo Hidrológico Auto Calibrável. (Versão DOS 1997). IPH – UFRGS. Porto Alegre. 55p.

LOPES, J.E.G. et al.. Manual modelo SMAP, 1999, 19 p. Disponível em: pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596. Acesso em: 13 fev. 2018.

MANZIONE, R.L. Incorporação de incertezas associadas à predições de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em recursos hídricos. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n. 36, volume especial, 2014, p. 215-227.

MC MILLAN, H.; SEIBERT, J.; OVERLEIR-PETERSEN, A.; LANG, M.; WHITE, P.; SNELDER, T.; RUTHERFORD, K.; KRUEGER, T.; MASON, R.; KIANG, J. How uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications. Ver. Water Resources Research, v. 53, p. 5220-5228, jul, 2017.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 28 Ago. 2018

MONTANARI, A. et al. "Panta Rhei-Everything Flows": Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013-2022. *Revista Hydrological Sciences Journal*, 58 (6), 1256-1275, 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900. 2007

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. *Hidrologia Estatística*. 1^o.ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007, v.1, 552 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. Documentação teórica - Ferramentas de avaliação de solo e água (SWAT). Versão 2009. Texas A&M University System. Set, 2011. 634 p.

NETO, A. M.; OLIVEIRA, P.T.; RODRIGUES, D. B.B.; WENDLAND, E. Improving Streamflow Prediction Using Uncertainty Analysis and Bayesian Model Averaging. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, issue 5, fev, 2018.

NOVAES, L.F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. 2005. 115 p.. Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Viçosa.

OLIVEIRA, J.R.; PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, p. 157-172, out/dez, 2013.

OLIVEIRA, F. A. ; MELO, E. L. M.; FIGUEIREDO, J. C.; PRUSKI, F.F.; RODRIGUEZ, R. G. Impacto do uso de vazões naturais em estudos hidrológicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n. 3, jul/set, 2008, 191-197.

PAULINO, C.; TURKMAN, M. & MURTEIRA, B. *Estatística Bayesiana*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2003.

PEREIRA, S. S. et al. Análise comparativa do escoamento em terraços de áreas granitóides e metassedimentares. 2006. 11 p. Disponível em: <http://web.letras.up.pt/dynat/PDF/An%C3%A1lise%20comparativa%20do%20escoamento%20em%20terra%C3%A7os%20de%20%C3%A1reas%20granit%C3%B3ides%20e%20metassedimentares.pdf>. Acessado em: nov. 2017.

PAPPENBERGER, F.; CLOKE, H. L.; PARKER, D. J.; WETTERHALL, F.; RICHARDSON D. S.; THIELEN J. The monetary benefit of early flood warnings in Europe. *Environ. Sci. Policy*, v 51, p. 278-291, Aug. 2015.

RAMPINELLI, C G. Modelagem hidrológica sob uma abordagem bayesiana: comparação de algoritmos MSCM e análise da influência da função verossimilhança na estimativa dos parâmetros e descrição das incertezas. 2016. 207 p. Dissertação –

Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília.

RAZAVI, T.; COULIBALY, P. C. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958-975, ago, 2013.

WMO. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. Volume I – Hydrology – From measurement to hydrological information. N° 168, 2008a.

_____. Manual on Low-Flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report N° 50, 2008b.

_____. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. N° 8. 2008. 681 p.

SAXTON, K.E., RAWLS, W.J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of Agronomy Journal* 70(5):1569-1578

SEARCY, J.K.; HARDISON, C.H. Double-Mass Curves. *Manual of Hidrology: Part 1. General Surface-Water Techniques*. Geological Survey Water-Supplu Paper. 1541-B. 1960.

SHRESTHA, D.L. Uncertainty analysis in rainfall-runoff modelling: Application of machine learning techniques. 2009. Tese (Doutorado em Hidroinformática) – UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft University of Techonoloy, Netherlands.

SOUZA, R. et al. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do córrego Samambaia. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 5, n. 2, p. 1-11, 2012.

SILVA, B.M.B.; SILVA, D.D.; MOREIRA, M.C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 3, p. 623-634, jul/set, 2015.

SILVA, G. O. M.; MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A.S.; MONTENEGRO, S. M.G.L. Integração de outorgas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Bahia). *Rev. Bra. de Recursos Hídricos*, v. 22, e.38, 2017.

SILVA. G. O. M. Integração das outorgas de captação superficial e lançamento de efluentes: um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. 2016. 147 p. Dissertação. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, T. R. Análises hidrodinâmicas no trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu, em consequência da operação da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo. 2014. 104 p.

Dissertação. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, F.E.; NAGHETTINI, M.; FERNANDES, W. Avaliação bayesiana das incertezas nas estimativas dos parâmetros de um modelo chuva-vazão conceitual. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, out/dez, 2014.

SILVA, S.F. Análise da disponibilidade e demanda para o sistema de abastecimento de água de Salvador frente a cenário de mudanças climáticas. 2012. 148 p. Dissertação. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n.3, p. 15-29, 2006.

TAYLOR, J. R. An Introduction on error analysis: The study of uncertainties in physical measurements. 2^o edição. University Science Books, 1997.

TUCCI, C.E.M. Regionalização de vazões. 1^o ed. Porto Alegre: ABRH, 2017. 256 p.

_____. Modelos Hidrológicos. 1^a. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 678 p.

UEHARA, K.; MORIBE, C.R.; ZAHHEL, R.F.; SILVEIRA, L.N.; EIGER, S. Estudo de vazões mínimas em pequenas bacias hidrográficas, USP/FTDE, 1979.

UNESCO. Communicating Uncertainty. Disponível em: <https://en.unesco.org/themes/water-security/hydrology/water-related-disasters/communicating-uncertainty>. Acessado em: mar. 18.

VALÉRIO, E.L.S.; JÚNIOR, C.R.F. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA. Rev. Bra.de Recursos Hídricos, v. 20, p. 872-887, 2015.

VALÉRIO, E. L. S. Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA. 2014. 62 p. Dissertação. Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento – Universidade Federal da Alagoas, Alagoas.

VELZ, C.J.; GANNON, J.J.; Low flow characteristics of stream. Ohio State University Studies Eng. Series XXII 4, 1953, p. 138-154.

XIN, L. (2014). Numerical Methods for Engineering Design and Optimization: Latin Hypercube Sampling (LHS) Retrieved January 1, 2018 from: https://users.ece.cmu.edu/~xinli/classes/cmu_18660/Lec25.pdf.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.C.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. Journal of Hydrology, 2008, 358, 1-3.