



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDREW DE ALBUQUERQUE DA ROSA TEIXEIRA

**APRIMORAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO CHUVA-VAZÃO PARA
REGIÕES DE RIOS PERENES: BACIA DO RIO DAS VELHAS E PARNAÍBA**

Recife

2022

ANDREW DE ALBUQUERQUE DA ROSA TEIXEIRA

**APRIMORAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO CHUVA-VAZÃO PARA
REGIÕES DE RIOS PERENES: BACIA DO RIO DAS VELHAS E PARNAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

T266a Teixeira, Andrew de Albuquerque da Rosa.
 Aprimoramento e aplicação de modelo chuva-vazão para regiões de rios perenes:
 bacia do Rio das Velhas e Parnaíba. / Andrew de Albuquerque da Rosa Teixeira. –
 2022.
 131 f. : il.

 Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.
 Inclui referências e apêndices.

 1. Engenharia Civil. 2. CAWM V. 3. MGB-IPH. 4. GR4J. 5. Modelagem
 hidrológica. 6. Modelo hidrológico concentrado. 7. Bacia do Rio das Velhas.
 8. Bacia do Rio Parnaíba. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-20

ANDREW DE ALBUQUERQUE DA ROSA TEIXEIRA

APRIMORAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO CHUVA-VAZÃO PARA REGIÕES DE RIOS PERENES: BACIA DO RIO DAS VELHAS E PARNAÍBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 25/07/2022

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão (examinador externo)
Universidade Federal de Campina Grande

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Suzana Maria Gico Lima Montenegro (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que me deu forças e guiou meus caminhos para conclusão desta pós-graduação em engenharia civil, que é fruto de muito trabalho e esforço.

À Camila, minha querida esposa, e toda a sua família por me apoiar e estar sempre ao meu lado nos bons e nos maus momentos.

À minha família, meu pai, minha mãe e meu irmão que sempre acreditaram em mim.

À minha querida e amada avó por ser minha fonte de força e ser meu maior exemplo.

Ao meu avô, que mesmo não estando presente há algum tempo, sempre será lembrado porque contribuiu bastante para minha formação.

Ao meu orientador, Prof. José Almir Cirilo, por toda a paciência, ajuda, compreensão e, principalmente, por acreditar em mim e ser essa fonte de inesgotável conhecimento.

Aos amigos que, ainda que distantes, sempre se fizeram presente em minha vida.

Aos estudantes, amigos, técnicos, companheiros de sala e professores do Laboratório de Hidráulica, pelo conhecimento e ajuda de sempre.

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa, que possibilitou a realização deste estudo.

RESUMO

A modelagem hidrológica constitui-se numa importante ferramenta de apoio e gestão dos recursos hídricos, uma vez que facilita o entendimento dos processos físicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. Mesmo com os avanços obtidos nos últimos anos, a modelagem ainda é uma tarefa complexa. O modelo hidrológico chuva-vazão desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco denominado de CAWM (Campus Agreste Watershed Model) tem como uma de suas premissas a simplicidade e os poucos parâmetros a calibrar. Neste trabalho foi aplicada a versão CAWM V, desenvolvida para ser aplicada às bacias hidrográficas de climas subsúmidos e úmidos, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem. Outro foco foi a aplicação a grandes bacias. Duas grandes bacias hidrográficas brasileiras foram simuladas, sendo a primeira delas a do Rio das Velhas, cujo rio principal é o maior afluente em extensão do Rio São Francisco, com 782 km de extensão e que abrange uma área de 27862 km², e a segunda a bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, cuja área é de 331.441,00 km² com o rio principal apresentando extensão de 1.467 km. Quando o tempo de concentração da bacia é maior que o passo de tempo de simulação, no caso um dia, fato que ocorre nas duas bacias em estudo, é preciso considerar no CAWM o retardo entre a ocorrência da chuva e seu efeito no escoamento até o exutório. Uma das formas é redistribuir previamente a chuva no tempo antes de realizar as simulações. Dois procedimentos podem ser utilizados no modelo adotado: o primeiro distribui as chuvas a partir do traçado de linhas isócronas (linhas que contêm pontos cujo tempo de viagem até a seção de controle é igual) e o segundo utiliza a formulação do histograma tempo x área sintético de Clark para redistribuir a vazão média da bacia no tempo. Com o objetivo de melhorar o modelo chuva-vazão CAWM e para fins de comparação de desempenho, foram aplicados à bacia do Rio das Velhas o modelo francês GR4J e o modelo de grandes bacias MGB-IPH. Os resultados obtidos mostram que o CAWM V apresentou resultados gerais entre bons a muito bons de acordo com as análises gráficas e os indicadores de eficiência utilizados.

Palavras-chave: CAWM V; MGB-IPH; GR4J; modelagem hidrológica; modelo hidrológico concentrado; bacia do rio das velhas; bacia do rio parnaíba.

ABSTRACT

Hydrological modeling is an important tool for supporting and managing water resources, as it facilitates the understanding of the physical processes that occur within a watershed. Even with the advances made in recent years, modeling is still a complex task. The rainfall-runoff hydrological model developed at the Federal University of Pernambuco called CAWM (Campus Agreste Watershed Model) has as one of its premises the simplicity and the few parameters to calibrate. In this work, the CAWM V version was applied, developed to be applied to hydrographic basins in sub-humid and humid climates, in regions with deeper soils that allow the maintenance of base flows during dry periods. Another focus was the application to large basins. Two large Brazilian hydrographic watersheds were simulated, the first being the Velhas river basin, whose main river is the largest tributary in extension of the São Francisco River, with 782 km in length and covering an area of 27862 km², and the second one being the Parnaíba River basin, whose area is 331,441.00 km² with the main river extending 1,467 km. When the watershed concentration time is longer than the simulation time step, in the case of one day, which occurs in the two watersheds under study, it is necessary to consider in the CAWM the delay between the occurrence of rain and its effect on the runoff until the outlet. One of the ways is to pre-distribute the rain in time before performing the simulations. Two procedures can be used in the adopted model: the first distributes the rainfall from the tracing of isochronous lines (lines that contain points whose travel time to the control section is equal) and the second uses the formulation of the synthetic time x area histogram Clark method to redistribute the mean flow of the basin over time. In order to improve the CAWM rainfall-runoff model and for performance comparison purposes, the French model GR4J and the large basin model MGB-IPH were applied to the Velhas river basin. The results obtained show that the CAWM V presented general results between good and very good according to the graphical analysis and the efficiency indicators used.

Keywords: CAWM V; MGB-IPH; GR4J; hydrological modeling; lumped hydrological model; velhas river basin; parnaíba river basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do modelo CAWM IV	24
Figura 2 - Esquema do modelo CAWM V	30
Figura 3 - Esquema de funcionamento do modelo GR4J.....	36
Figura 4 - Esquema do funcionamento do MGB	42
Figura 5 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas	46
Figura 6 - Rede de rios e macrorregiões do Rio das Velhas	48
Figura 7 - Mapa de altitudes da Bacia do Rio das Velhas	49
Figura 8 - Mapa de Localização da Bacia do Parnaíba.....	51
Figura 9 - Hidrografia da Bacia do Rio Parnaíba.....	52
Figura 10 - Mapa de altitudes da Bacia do Rio Parnaíba	53
Figura 11 - Estações pluviométricas para estudo da bacia do Rio das Velhas	55
Figura 12 - Estações pluviométricas para estudo da bacia do Rio Parnaíba	56
Figura 13 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio das Velhas	57
Figura 14 - Estação fluviométrica escolhida para o estudo da bacia do Parnaíba ...	58
Figura 15 - Polígonos de Thiessen para a bacia do Rio das Velhas	64
Figura 16 - Polígonos de Thiessen para a bacia do Rio Parnaíba	65
Figura 17 - Tempos de Viagem e Linhas Isócronas	68
Figura 18 - Tempos de Viagem e Linhas Isócronas	69
Figura 19 - Fluxograma de aplicação do modelo MGB	73
Figura 20 - Influência do parâmetro B_e nas vazões do CAWM	76
Figura 21 - Minibacias e rede de drenagem para a bacia do rio das Velhas.....	103
Figura 22 - Classes de resposta hidrológica para o Rio das Velhas	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ²	79
Gráfico 2 - Diagrama de caixa do Pbias	79
Gráfico 3 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ² (Clark) ..	80
Gráfico 4 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias) pelo método de Clark ...	81
Gráfico 5 - Gráfico de dispersão entre vazões do CAWM V (chuvas distribuídas)..	82
Gráfico 6 - Gráfico de dispersão entre vazões do CAWM V (Clark).....	83
Gráfico 7 - Curvas de permanência para a bacia do Rio das Velhas	84
Gráfico 8 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas.....	85
Gráfico 9 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ²	88
Gráfico 10 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias)	88
Gráfico 11 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ² (Clark) ..	89
Gráfico 12 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias) pelo método de Clark ...	90
Gráfico 13 - Gráfico de dispersão pelo método de distribuição de chuvas.....	91
Gráfico 14 - Gráfico de dispersão de vazões pelo método de Clark	92
Gráfico 15 - Curvas de permanência para a bacia do Rio Parnaíba	93
Gráfico 16 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio Parnaíba.....	94
Gráfico 17 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ²	98
Gráfico 18 - Diagrama de caixa do indicador Pbias	98
Gráfico 19 - Curvas de permanência obtidas pelo GR4J e CAWM V.....	99
Gráfico 20 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas.....	100
Gráfico 21 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R ²	111
Gráfico 22 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias)	111
Gráfico 23 - Curvas de permanência dos modelos GR4J e o CAWM V.....	112
Gráfico 24 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação conforme indicadores NSE, Pbias e RSR.....	34
Tabela 2 - Altitudes da Bacia e do Rio das Velhas.....	49
Tabela 3 - Altitudes da Bacia e do Rio Parnaíba.....	53
Tabela 4 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio das Velhas	57
Tabela 5 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio Parnaíba.....	58
Tabela 6 - Normais climatológicas para estudo da Rio das Velhas.....	59
Tabela 7 - Valores médios diários das normais climatológicas	60
Tabela 8 - Normais climatológicas para a bacia do Rio Parnaíba	61
Tabela 9 - Valores médios diários das normais climatológicas	62
Tabela 10 - Tempo de concentração de acordo com Bransby-Williams e Passini. ...	66
Tabela 11 - Parâmetros físicos para determinação do coeficiente K	76
Tabela 12 - Demais parâmetros do modelo CAWM V.....	77
Tabela 13 - Valores finais dos parâmetros calibráveis.....	78
Tabela 14 - Períodos de calibração (bacia do Rio das Velhas).....	78
Tabela 15 - Coeficientes de eficiência obtidos com o modelo CAWM V	86
Tabela 16 - Períodos de calibração (Bacia do Rio Parnaíba)	87
Tabela 17 - Indicadores de eficiência obtidos com CAWM e GR4J	95
Tabela 18 - Valores iniciais dos dados de entrada do modelo GR4J.....	96
Tabela 19 - Parâmetros iniciais adotados para otimização do modelo GR4J	96
Tabela 20 - Parâmetros calibrados do modelo GR4J.....	97
Tabela 21 - Indicadores de eficiência obtidos com CAWM e GR4J	101
Tabela 22 - Classes de Resposta Hidrológica para a bacia do Rio das Velhas.....	104
Tabela 23 - Parâmetros de albedo.....	108
Tabela 24 - Parâmetros de Índice de Área Foliar (IAF).....	108
Tabela 25 - Parâmetros de altura da vegetação (metros)	109
Tabela 26 - Parâmetros de resistência superficial ($s.m - 1$)	109
Tabela 27 - Valores calibrados dos parâmetros do solo por URH	110
Tabela 28 - Indicadores de eficiência do MGB.....	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	17
2.1.1	Classificação dos modelos hidrológicos	18
2.1.2	Modelos hidrológicos de referência	19
2.2	MODELOS HIDROLOGICOS X GEOPROCESSAMENTO.....	21
2.3	CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM).....	23
2.3.1	Versão CAWM V	29
2.3.2	Parâmetros do modelo	31
2.3.3	Indicadores de eficiência do modelo e calibração dos parâmetros	32
2.4	MODELO GR4J.....	36
2.4.1	Descrição do modelo.....	37
2.4.2	Parâmetros do modelo GR4J	40
2.5	MODELO DE GRANDES BACIAS - MGB-IPH.....	41
2.6	PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	42
2.6.1	Método de Clark	43
2.6.2	Inserção da variabilidade espacial das precipitações.....	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.1.1	Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas	45
3.1.1.1	<i>Localização e generalidades</i>	<i>45</i>
3.1.1.2	<i>Hidrografia</i>	<i>47</i>
3.1.1.3	<i>Altimetria e Declividades</i>	<i>48</i>

3.1.2	Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba	50
3.1.2.1	<i>Localização e generalidades</i>	50
3.1.2.2	<i>Hidrografia</i>	51
3.1.2.3	<i>Altimetria e Declividades</i>	52
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO	54
3.2.1	Aquisição de dados	54
3.2.1.1	<i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i>	54
3.2.1.2	<i>Séries Pluviométricas</i>	54
3.2.1.3	<i>Séries Fluviométricas</i>	56
3.2.1.4	<i>Evapotranspiração Potencial</i>	59
3.2.2	Delimitação da bacia e definição da rede de drenagem.....	62
3.2.3	Cálculo da precipitação Média	63
3.2.4	Cálculo do tempo de concentração e do “lagtime”	65
3.2.5	Redistribuição espaço temporal das precipitações	66
3.2.5.1	<i>Redistribuição das precipitações por posto fluviométrico</i>	67
3.2.5.2	<i>Redistribuição pelo Método de Clark</i>	70
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA CAWM V	70
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM OS MODELOS GR4J E MGB-IPH.71	
3.4.1	GR4J (Génie Rural à 4 Paramètres Journalier)	71
3.4.2	Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH.....	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CAWM V	74
4.1.1	Dados de entrada	74
4.1.2	Calibração dos parâmetros	77
4.1.3	Resultados CAWM V – Rio das Velhas	78
4.1.3.1	<i>Método 1 - Chuvas distribuídas</i>	78
4.1.3.2	<i>Método 2 – Chuvas distribuídas por Clark</i>	80

4.1.3.3	<i>Análises estatísticas – Bacia do Rio das Velhas</i>	81
4.1.4	Resultados CAWM V – Bacia do Rio Parnaíba.....	86
4.1.4.1	<i>Método 1 – Chuvas distribuídas</i>	87
4.1.4.2	<i>Método 2 - Chuvas distribuídas por Clark</i>	88
4.1.4.3	<i>Análises estatísticas – Bacia do Rio Parnaíba</i>	90
4.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O GR4J.....	95
4.2.1	Calibração GR4J.....	96
4.2.2	Resultados GR4J – Bacia do Rio das Velhas.....	97
4.2.3	Comparações entre o GR4J e o CAWM V.....	99
4.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MGB-IPH.....	101
4.3.1	Pré-Processamento utilizando o IPH-Hydro Tools.....	101
4.3.2	Simulação hidrológica com o plugin MGB.....	106
4.3.3	Calibração do modelo.....	107
4.3.4	Resultados MGB - Rio das Velhas.....	110
4.3.5	Comparações entre o MGB-IPH e o CAWM V.....	111
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	115
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – RELAÇÃO DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS	124
	APÊNDICE B – HIDROGRAMAS OBTIDOS COM O CAWM	128

1 INTRODUÇÃO

O adequado gerenciamento dos recursos hídricos depende do entendimento do funcionamento dos processos hidrológicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. Nesse sentido, a modelagem hidrológica se apresenta como uma ferramenta essencial para o processo de planejamento, uma vez que permite avaliar a operação de reservatórios e a ocorrência de cheias e secas, analisar o impacto de obras hidráulicas e ações antrópicas e prever a resposta do sistema a mudanças (Hartnett, Berry, & Irvine, 2007).

A modelagem hidrológica continua sendo uma tarefa complexa e desafiadora, especialmente em áreas com escassez de dados monitorados. Os altos custos de implementação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica e a sua baixa cobertura são algumas das causas da carência de informações hidrológicas em diversas bacias hidrográficas no Brasil. Como o intuito de superar essa dificuldade, uma técnica que tem sido utilizada bastante é a regionalização de parâmetros hidrológicos, a qual consiste em transferir parâmetros um modelo chuva-vazão ajustados para uma bacia monitorada, denominada “doadora”, para uma bacia não monitorada, mas hidrológicamente semelhante (SIVAPALAN, et al., 2003).

Podem ser citadas como técnicas de regionalização: regressão, proximidade espacial e similaridade física. Diversos estudos têm avaliado essas diferentes abordagens de transferência de parâmetros de modelos hidrológicos de bacias monitoradas para bacias não monitoradas (OUDIN et al., 2008; ZHANG; CHIEW, 2009; PATIL; STIEGLITZ, 2012; HRACHOWITZ et al., 2013). Contudo, devido a fatores como a não linearidade das respostas das bacias, alterações no clima e no solo e a grande heterogeneidade espacial e temporal do clima e das propriedades do solo, essa extrapolação de informação permanece repleta de dificuldades e incertezas (Lima et al., 2007), sendo necessários ainda mais estudos. Além disso, conforme demonstrado por Kay et al. (2006), a performance de cada método de regionalização depende da estrutura e parametrização utilizadas no modelo chuva-vazão aplicado.

Neste contexto, o presente trabalho aplica um modelo chuva-vazão conceitual, o CAWM V, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco que vem apresentando resultados promissores (Ferraz, 2019), cujo objetivo busca regionalizar

os valores dos seus parâmetros para um conjunto de bacias hidrográficas com escassez de dados hidrológicos. Embora o modelo tenha desenvolvimento recente, muitas aplicações a bacias hidrográficas de áreas entre 300 e 2000Km² do litoral do Nordeste têm sido feitas no Campus Agreste da UFPE (VASCONCELOS et al, 2019; SOUZA et al, 2019). Nesta pesquisa se busca avaliar a aplicabilidade do modelo CAWM V para bacias hidrográficas de grande porte. As áreas analisadas nesse estudo compreendem a bacia hidrográfica do Rio das Velhas, localizada integralmente no estado de Minas Gerais, e a bacia do Rio Parnaíba, inserida predominantemente no estado Piauí, com o intuito de avaliar o desempenho do modelo face a outros mais testados e em etapas futuras para outros estudos trazer insumos para regionalização de parâmetros e aprimoramento do modelo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A água é recurso natural de grande importância para a vida e possui papel central para o desenvolvimento de diversas atividades, tais como: agricultura, irrigação, navegação, geração de energia e lazer. Nesse sentido tal recurso é importante tanto sobre o ponto de vista ambiental, quando sob ótica econômica e social. O Brasil, em especial, apresenta uma significativa disponibilidade hídrica, contudo, sua distribuição é bastante irregular, apresentando escassez em algumas regiões e/ou estações do ano. Muitos desses problemas também são decorrentes da intensa, diversificada e inadequada exploração de recursos hídricos, que agravam o problema da escassez e causa prejuízo para a sua qualidade. Esses fatores demonstram cada vez mais a necessidade do seu adequado planejamento e gerenciamento desse importante recurso e justificam o a busca pelo entendimento dos processos hidrológicos.

Dessa forma, o estudo do balanço hídrico e dos processos que controlam o movimento da água é de fundamental importância para a correta análise dos efeitos das ações antrópicas, da disponibilidade hídrica e da sustentabilidade do ambiente, podendo ser realizado por meio de levantamentos pontuais ou por meio de modelos matemáticos. Sendo que este último pode fornecer uma visão mais abrangente a depender da escala adotada.

Devido as suas características estarem ligadas à produção de água, a bacia hidrográfica deve ser tomada como a unidade de estudo hidrológico e de planejamento, encontrando, inclusive, amparo legal na lei nº 9433, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Tal lei define a Bacia Hidrográfica como a unidade territorial de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos.

Com isso, a modelagem pode ser entendida como uma importante ferramenta de apoio a gestão e a tomada de decisões, pois os modelos hidrológicos que são gerados são capazes de representar os processos físicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica, gerando informações que normalmente não são disponíveis. Algumas de suas vantagens dizem respeito ao baixo custo para análise dos processos e a capacidade de realização de previsões do comportamento desses mesmos processos diante de modificações no meio ambiente.

Particularmente no que se refere a este trabalho, a modelagem aqui desenvolvida com o CAWM V trará como diferencial aplicação de um novo modelo chuva-vazão concentrado, que apresenta como uma de suas premissas a simplicidade e os poucos parâmetros a calibrar. Essa pesquisa se junta a outras anteriores na busca de um modelo que seja eficiente tanto para aplicações em bacias de grande porte como para bacias de pequeno porte.

A escolha das áreas de estudo deste trabalho guarda relação com o porte das bacias, que são até o presente as maiores em que o modelo CAWM V já foi aplicado. Além disso, vale ressaltar que a Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, que está totalmente inserida no estado de Minas Gerais, tem grande importância econômica, social e ambiental para a região onde se localiza, sendo o Rio das Velhas o maior afluente em extensão do Rio São Francisco (Almeida, 2019).

Por sua vez, a Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, de acordo com o Plano Nascente do Parnaíba, é a segunda mais importante do Nordeste brasileiro e representa a mais densa rede hidrográfica dessa região, possuindo um sistema de aquíferos de grande importância ambiental e socioeconômica. Com uma área superficial que equivale a aproximadamente 4% do território nacional, o rio Parnaíba e seus tributários têm

contribuído decisivamente para o desenvolvimento econômico e dos estados onde estão inseridos, a partir do uso de seus recursos naturais.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de um novo modelo chuva-vazão que seja eficiente tanto para bacias de grande porte quanto para bacias de pequeno porte.

Objetivos específicos

Este trabalho visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a estrutura matemática e analisar os seus parâmetros na calibração e validação do modelo hidrológico CAWM V no caso das grandes bacias estudadas;
- Aplicar outros modelos hidrológicos de referência e comparar os resultados obtidos com os do CAWM V, no caso do Rio das Velhas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo é dedicado a apresentação de alguns dos principais conceitos e classificações relativos à modelagem hidrológica, assim como são destacados alguns dos principais modelos hidrológicos atuais. Aqui também é demonstrada toda a fundamentação matemática do CAWM V, o modelo hidrológico proposto, bem como os principais pontos a respeito dos modelos GR4J e MGB-IPH, utilizados neste trabalho. Ao final é abordado o tema da propagação do escoamento superficial.

2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos surgiram como uma importante ferramenta de apoio ao gerenciamento de recursos hídricos devido a sua capacidade de facilitar o entendimento dos processos físicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. Além disso, os modelos hidrológicos são capazes de preencher eventuais falhas nos monitoramentos de dados, prever respostas a mudanças e avaliar alternativas (Hartnett, Berry, & Irvine, 2007).

Nessa busca por representar o ciclo hidrológico, se estuda a precipitação que cai sobre a bacia através de diversos processos físicos e é analisado o escoamento numa seção do rio. Com a precipitação, vários processos podem ocorrer e eles podem ser integrados para obter variáveis intermediárias e de saída da bacia, como a vazão. Alguns processos que podemos citar são: interceptação vegetal e nas cavidades do terreno, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço das águas nas camadas superior e inferior do solo e o escoamento superficial, subsuperficial, subterrâneo e em rios, canais e lagos (TUCCI, 2010).

Na maioria dos casos são utilizados modelos conceituais e baseado em processos físicos Modelos baseados em processos físicos são geralmente considerados mais eficientes devido a consideração dos parâmetros físicos (Bergström, Principles and confidence in hydrological, 1991), mas também são geralmente mais complexos, necessitando de mais parâmetros e conseqüentemente melhor calibração de equipamentos (Cornelissen, Diekkrüger, & Giertz, 2013). Devido a isto, a necessidade

de disponibilidade de dados pode ser uma limitação para esse tipo de modelo ser utilizado. Podem ser citados alguns exemplos como SWB (Schaake et al., 1996), GR4J (Perrin et al., 2003), HBV (Bergström & Lindström, 2015), HEC- HMS (Feldman, 2000), MGB-IPH (Collischonn et al., 2007), SWAT (Arnold et al., 1998) e SHE (Abbott et al., 1986a, 1986b). Já nos modelos conceituais, o processo hidrológico é representado por relações matemáticas simplificadas e devido a menor necessidade de dados, alguns afirmam que esse modelo é melhor para simulação do fluxo (Perrin et al., 2001; Hansen et al., 2007; de Vos et al., 2010; Li et al., 2013; Mendez; Calvo-Valverde, 2016).

Sendo o principal objetivo dos modelos hidrológicos representar com o máximo de precisão o processo de chuva-vazão e em busca dessa acuracidade, vários modelos foram e continuam sendo desenvolvidos, variando bastante de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, podendo ser modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos com objetivo de antecipar alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas e dos padrões de uso e ocupação dos solos. Pode-se dizer que os modelos hidrológicos são de extrema importância para prever eventos futuros que podem ser trágicos e então, com esse conhecimento, podem ser decisivos na tomada de decisões dentro da política pública.

2.1.1 Classificação dos modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos são classificados por quatro critérios, de acordo com Gomes (2019), Lucas et al. (2009) e Tucci (2005): contínuos ou discretos (que diz respeito a forma como os dados são representados); concentrados ou distribuídos (quanto a existência ou não de relações espaciais); estocásticos ou determinísticos (em relação aos tipos de variáveis utilizadas); conceituais ou empíricos (de acordo com o tipo de relação entre as variáveis); estacionários ou dinâmicos (quando existe dependência temporal).

Entre modelos discreto e contínuo, o discreto representa eventos isolados, como de cheia ou recessão. Já os modelos contínuos procuram representar um período mais longo, trabalhando com um conjunto de dados de épocas e comportamentos

hidrológicos distintos, o que permite uma simulação de todas as fases do ciclo hidrológico com maior precisão.

No que diz respeito a modelos estocásticos e determinísticos, são classificados como estocásticos aquelas que apresentam pelo menos uma das variáveis tem comportamento aleatório. Por outro lado, são determinísticos quando os conceitos de probabilidade forem negligenciados durante a elaboração do um modelo.

São considerados conceituais os modelos embasados na representação dos processos físicos que compõem o fenômeno estudado, ele relaciona as características físicas do processo mantendo razoável empirismo na seleção dos parâmetros. Já os modelos empíricos utilizam funções com base em análises estatísticas, chamados modelos “caixa-preta”, não havendo relação com processos físicos (FAYAL, 2008).

Os modelos hidrológicos ainda podem ser classificados como estacionários ou dinâmicos. Essa classificação guarda relação com os parâmetros, ou seja, no modelo estacionário seus parâmetros não variam com o tempo ao descrever um fenômeno, enquanto nos modelos dinâmicos esses parâmetros variam.

Por fim, os modelos hidrológicos podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. São considerados concentrados os modelos em que todas as variáveis são avaliadas em termos de média de uma bacia hidrográfica, não considerando a heterogeneidade das variáveis. Sendo assim, a média de chuva, evaporação e infiltração são consideradas como representativas de toda a área estudada, por exemplo (FAYAL, 2008). Já os modelos distribuídos são capazes de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia, aplicando a lei de conservação de massa em escala local e utilizando várias informações como parâmetros de entrada (CUNHA, 2004).

2.1.2 Modelos hidrológicos de referência

O principal desafio e objetivo dos hidrologistas é representar da forma mais precisa possível os processos que acontecem na bacia em função da precipitação,

evaporação, entre outros, utilizando modelos hidrológicos que sejam coerentes com os dados e recursos.

Inicialmente, os modelos apresentavam muitos parâmetros a serem determinados de acordo com as características das bacias hidrográficas, mas isso limita muito devido a necessidade de mais recursos e dados. Tentando simplificar o processo, alguns modelos foram desenvolvidos utilizando somente os parâmetros mais importantes para caracterização da bacia, assim surgiu os modelos concentrados. Com estes modelos, percebeu-se que era possível ter resultados equivalentes aos modelos mais complexos, com menos esforço.

Podem ser citados alguns modelos que segue essa ideia de redução de parâmetros, como é o caso do Simple Water Balance Model (SWB), que é um modelo conceitual e foi desenvolvido pelo US National Weather Service (NWS). Este modelo possui cinco parâmetros e duas variáveis de estado e simula a formação do escoamento fluvial em uma bacia hidrográfica utilizando dados de precipitação atmosférica e evapotranspiração potencial. No modelo existe um reservatório superior, que é uma camada fina projetada para a interceptação da precipitação e somente a evaporação é descontada deste reservatório, e um reservatório inferior, com uma camada mais espessa que a água pode evaporar ou formar escoamento abaixo da superfície. Quando a taxa de precipitação excede a taxa de infiltração de água no solo, o escoamento superficial no modelo começa a se formar, então o hidrograma de fluxo contínuo é calculado com base no método do hidrológico unitário (NASONOVA, 2011).

Um segundo modelo que devemos pontuar é o GR4J, que é a modificação do GR3J, modelo original. É um modelo conceitual, originário da França, que possui 4 parâmetros: capacidades máximas de dois reservatórios, coeficiente de troca de água subterrânea e o tempo base da unidade hidrográfica. Precipitação diária e evapotranspiração potencial são os dados de entrada e existem 2 reservatórios de interação nesse modelo: um reservatório de recepção, reservatório de água do solo, e outro da calha fluvial, que dá origem ao escoamento dos rios. As funções de transferência de água incluem a percolação do reservatório do solo, dividindo a precipitação efetiva em dois componentes, com um hidrograma unitário individual usado para cada componente (NASONOVA, 2011; PERRIN, 2004). Por ser objeto de

estudo deste trabalho, esse modelo será discutido com mais detalhes nas próximas seções deste trabalho.

Também pode ser citados alguns modelos desenvolvidos no Brasil, como é o caso do modelo SMAP, modelo conceitual com 4 parâmetros calibráveis e 2 parâmetros de inicialização fixos. Ele foi introduzido por Lopes, Braga Júnior e Conejo (1981) e mostrou resultados satisfatórios em estudos realizados até então e utiliza apenas dados mensais de precipitação e evaporação (SARAIVA; FERNANDES; NAGHETTINI, 2011). Mais adiante também será discutido com mais detalhes o MGB-IPH, elaborado pela UFRGS, uma vez que também é objeto de estudo deste presente trabalho.

O modelo utilizado nessa dissertação foi o Campus Agreste Watershed Model versão 5 (CAWM V). É um modelo concentrado chuva-vazão que também busca a simplicidade na quantidade de parâmetros e será melhor explicado mais à frente.

2.2 MODELOS HIDROLOGICOS X GEOPROCESSAMENTO

A qualidade dos dados envolvidos em um processo de simulação impacta diretamente na confiabilidade do resultado e isso é uma das grandes dificuldades encontrada nos modelos hidrológicos (GOMES, 2019). Nesse quesito que entram ferramentas como o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto para capturar os dados físicos que farão parte da estrutura de entrada de alguns modelos (TUCCI, 2005).

De acordo com Gomes (2019), os sistemas SIG (tais como QGIS, ArcGIS e SPRING) tem ferramentas capazes de auxiliar de diversas formas, como, por exemplo, no processamento de muito dados armazenados, na análise e calibração de modelos, nas previsões e estimativas e auxilia ativamente no pós-processamento dos resultados através da tabulação e mapeamento de dados. Pensando mais além, os sistemas de informações geográficas permitem a aquisição, ajustes e integração de dados, o que facilita a obtenção dos dados de entrada e saída dos modelos hidrológicos (GROSSI, 2003; MENDES; CIRILO, 2013).

Essa interface entre os sistemas de informações auxiliando os modelos hidrológicos vem sendo um caminho cada vez mais importante justamente pelo fato de os SIG atenderem melhor as necessidades demandadas pelos modelos hidrológicos. O SIG facilita a compilação, calibração do modelo e visualização dos parâmetros e resultados do modelo, uma vez que tem uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e mostrar diferentes dados. É justamente com essa união de valiosas informações que se torna possível a tomada de decisões de forma embasada (TSOU; WHITTEMORE, 2001).

Como exemplo dessa integração entre sistemas SIG para estudos hidrológicos, pode ser citada a integração do modelo MGB-IPH ao QGIS, que é objeto de estudo deste trabalho. Dessa forma, as etapas de pré-processamento, incluindo a delimitação da bacia hidrográfica e definição de classes de resposta hidrológica, processamento e pós-processamento do modelo, com possibilidade de análise de resultados por meio de gráficos por exemplo, possuem interface dentro do próprio Quantum GIS.

Apesar de qualquer tipo de modelo necessitar de parâmetros físicos, que são determinados por modelos digitais do terreno, para Mendes e Cirilo (2013), os modelos distribuídos contêm uma quantidade maior de dados no seu processamento muito superior do que modelos concentrados. Devido a isso, a obtenção de parâmetros e validação destes modelos são mais trabalhosos e aumentam de acordo com a área de modelagem.

É possível encontrar diversas bases de dados espaciais em resoluções diferentes que representam o terreno pelos Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE). Destacam-se os produtos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), uma missão liderada pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) e pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) desde o ano de 2000 e que atualmente é uma das bases de dados globais mais utilizadas que incorpora a técnica InStar (Interferometric Synthetic Aperture Radar). A técnica InStar disponibiliza globalmente informações sobre variação de altitude da superfície terrestre através do United States Geological Survey (USGS). Estes dados possuem resolução espacial de 30m e elipsoide de referência WGS84 (ALVES SOBRINHO et al., 2010). Como durante muito tempo os pontos cotados eram a cada 90m para locais fora dos Estados Unidos, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) realizou uma interpolação dos dados gerando um produto com resolução de 30 metros (VALERIANO, 2008).

Trazendo para o Brasil, mais especificamente Pernambuco, pode ser citado o programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). O projeto começou em 2013 com o levantamento de dados das regiões atingidas pelas enchentes de 2010 e 2011 (bacias do Rio Una, Mundaú e Sirinhaém) e depois a varredura a laser foi levada para toda a área continental de Pernambuco (CIRILO et al, 2014). Como resultado, orto-imagens de alta resolução de toda a região pernambucana através da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging), conseguiu-se gerar os modelos digitais do terreno e sua elevação, que foram obtidos com escala de 1:5000 (erro vertical inferior a 25 cm) e 1:1000 (erro vertical inferior a 10 cm), enquanto as orto-imagens foram obtidas com escala de 1:5000 (pixel da imagem de 50cm) e 1:1000 (pixel da imagem de 12cm). Todos os dados estão disponíveis no <http://www.pe3d.pe.gov.br>.

2.3 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)

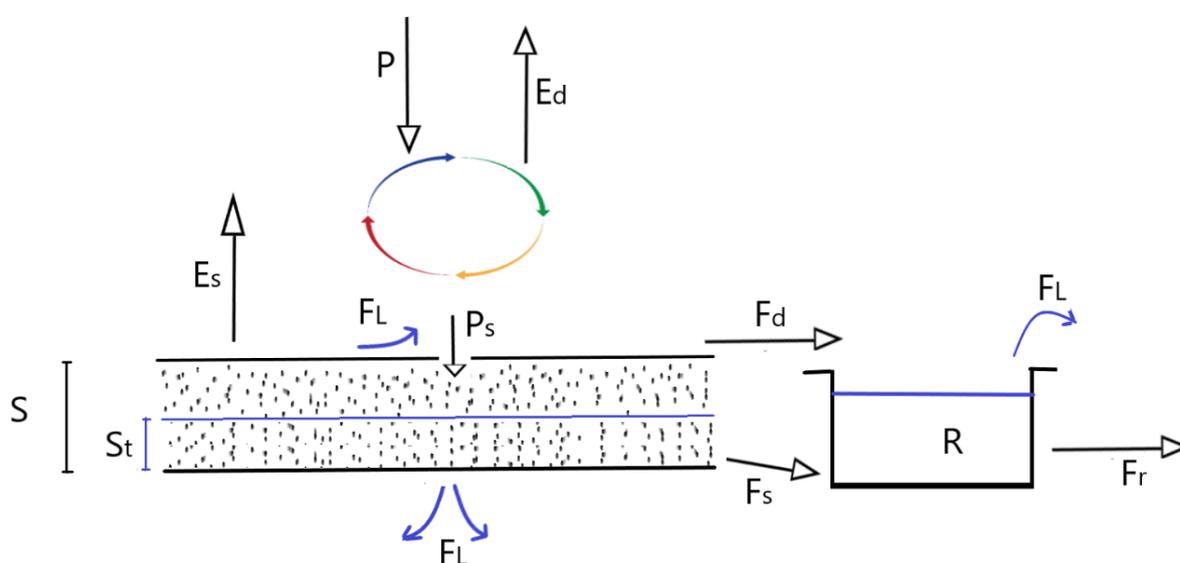
O CAWM (Campus Agreste Watershed Model) é um modelo hidrológico concentrado desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco em seu Campus Agreste. Seu objetivo é simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas, aproveitando o potencial de procedimentos modernos de entrada e saída de dados, bem como as informações geradas por técnicas de geoprocessamento sobre bases de dados espaciais, tais como: o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e o Pernambuco Tridimensional (PE3D), descrito adiante. Uma das aplicações relevantes do modelo foi feita no esforço de regionalização de parâmetros, ou seja, a transferência de valores de parâmetros entre bacias hidrográficas distintas, mas que possuam características semelhantes (CIRILO et al, 2020). Tal processo é realizado quando, eventualmente, existam locais com dados inexistentes ou não disponíveis, sendo assim transferidas informações de um local para outro.

Desde a sua idealização, o CAWM teve como premissas a busca pela simplicidade e os poucos parâmetros para calibrar, sempre que possível o significado físico. Como entrada, o modelo tem dois conjuntos de informações: o primeiro é o das características físicas de bacia, obtidas através de técnicas de geoprocessamento, e o segundo consiste nas características hidrológicas da bacia hidrográfica, representadas pelas series diárias de precipitação, evapotranspiração e vazões

observadas. No que diz respeito à determinação dos parâmetros de calibração, o CAWM considera as características físicas da bacia para determinar tais parâmetros.

O desenvolvimento do CAWM teve a princípio o objetivo principal de simular o escoamento em bacias hidrográficas de regiões semiáridas, tendo em vista a necessidade de suprir a lacuna sobre esse tipo de modelo. Nesse sentido, a versão denominada de CAWM IV foi concebida para aplicação a esses tipos de região. Sua conceituação consiste na presença de dois reservatórios: o do solo (S) e o da calha fluvial (R), conforme pode ser observado na Figura 1:

Figura 1 - Representação esquemática do modelo CAWM IV



Fonte: (GOMES, 2019)

A metodologia adotada consiste em, inicialmente, realizar o balanço chuva- evapotranspiração potencial. Dessa forma, caso a precipitação seja maior do que a evapotranspiração, considera-se que toda a evapotranspiração é atendida, sendo seu valor computado na variável evapotranspiração potencial direta (E_d). Caso contrário, se a precipitação é menor, toda a precipitação é computada como evapotranspiração direta (E_d). Neste caso, também é registrada uma parcela denominada de a evapotranspiração não atendida, que pode ser total ou parcialmente extraída do reservatório do solo se houver água suficiente para isso.

Sempre que o valor da precipitação for maior do que a evapotranspiração, o valor excedente é chamado de precipitação efetiva, aqui denominado de P_n . Ou seja, matematicamente esse excedente corresponde ao valor da precipitação descontada

a evapotranspiração. O balanço descrito acima é expresso pelas equações pelo sistema de equações a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n &= P - E \text{ e } E_d = E \\ \text{Se } P \leq E, \text{ então } E_d &= P \text{ e } E_n = E - E_d \end{aligned} \quad (1)$$

Quando o valor de P_n é maior do que zero, seu valor é subdividido em três parcelas. A primeira delas é denominada recarga do solo (P_s), que se baseia no conceito de Edijatno e Michel (1989), conforme pode ser observado na equação (1):

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (1)$$

Onde S_t é a capacidade de água acumulada no solo a cada tempo e S a capacidade máxima de retenção, ou seja, S é o valor máximo que S_t pode atingir. O conceito de P_s também é utilizado na formulação do modelo hidrológico concentrado GR4J, utilizado na simulação de bacias hidrográficas de vários países (PERRIN et al, 2003; NASONOVA, 2011; TRAORE et al., 2014).

A segunda parcela é a chamada de evapotranspiração suplementar (E_s), que se limita ao valor de evapotranspiração não atendida, aqui denominada de (E_n). E_s é extraída das camadas mais superficiais do solo, desde que haja água suficiente. Tal parâmetro foi introduzido devido às incertezas presentes na estimativa da evapotranspiração, inclusive pelo fato de que as condições do solo, de cobertura vegetal e as climáticas variam de acordo com o território da bacia. Sua magnitude é controlada pelo valor atribuído ao parâmetro α , conforme indicado na equação (2):

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (2)$$

Finalmente, a parcela restante representa o escoamento superficial direto do terreno (F_d), desde que positiva. Seu valor é calculado através da equação (3):

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (3)$$

A partir do reservatório de água do solo (S) ocorre o fluxo sub-superficial (F_s), que percola em direção ao reservatório da calha dos rios (R), contribuindo para crescer o seu volume, segundo a equação de reservatório linear (4):

$$F_s = K_s \cdot S_t \quad (4)$$

Onde K_s é um parâmetro a ser calibrado no modelo, representando a permeabilidade do solo, S_t é o armazenamento de água no solo (limitado à capacidade de acumulação S) ao longo do tempo e F_s é a percolação em direção ao reservatório da calha fluvial.

O volume de água retido no reservatório R é incrementado pelo fluxo F_s , calculado na equação (4). Tal reservatório não é limitado para levar em conta possíveis extravasamentos por ocasiões de cheias. Dele sai o chamado escoamento da calha fluvial F_r , que é admitido como uma função não-linear do volume armazenado R, de acordo com a equação (5):

$$F_r = K \cdot R^b \quad (5)$$

Onde K é um parâmetro que depende das características físicas da bacia e b é uma constante de valor igual a 5/3, a ser determinada na sequência.

Levando-se em conta que o volume do reservatório da calha fluvial V_{sup} pode ser representado pela soma das capacidades do conjunto de rios que compõem a bacia hidrográfica com extensão total L_t e área da seção transversal equivalente A_e , tem-se que:

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (6)$$

Nos modelos hidrológicos os volumes são representados em mm por unidade de área de área da bacia hidrográfica, que é computada em km². Nesse sentido a lâmina acumulada R, em mm, no reservatório da calha fluvial é expressa de acordo com a equação (7):

$$R = \frac{V_{sup}}{c \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{c \cdot A_b} \quad (7)$$

Onde a constante $c = 1000$ é utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas e A_b representa a área da bacia em km^2 .

Equacionando o escoamento na calha fluvial por meio da fórmula de Manning e considerando uma seção transversal retangular constante de valor B_e , pode-se admitir o raio hidráulico como aproximadamente igual à lâmina escoada. Nesse sentido, tem-se que:

$$A_e = B_e \cdot y \quad (8)$$

$$R_h \cong y = \frac{A_e}{B_e} \quad (9)$$

Considerando um trecho de extensão L_t e declividade S_0 , resulta na equação (10):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (10)$$

Baseado em tais considerações, o volume de água na calha fluvial pode ser definido como sendo igual a: $V = A_e \cdot L_t$. Isolando A_e e substituindo na equação (10), obtêm-se:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n \cdot L_t^{5/3} \cdot B_e^{2/3}} V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (11)$$

Da análise da equação (11), sugere-se por similaridade que o valor do expoente b na equação (5) pode ser estimado como $5/3$.

A relação entre a vazão Q (m^3/s) e a lâmina de água escoada é dada pela equação (12):

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (12)$$

Em que Δt é o passo de tempo de simulação, em segundos, que no modelo é de um dia, ou seja, 86400s.

Combinando-se a equação (12) com o lado direito da equação (10), tem-se que:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (13)$$

Explicitando a área equivalente na equação (7) e substituindo seu valor na equação (13), obtêm-se:

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (14)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \frac{S_0^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (15)$$

Mas como $F_r = K \cdot R^b$, sendo $b = 5/3$:

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} S_0^{1/2} \quad (16)$$

A equação (16) demonstra que o parâmetro K do CAWM é dependente das características físicas da bacia, que por sua vez podem ser obtidas através de técnicas de geoprocessamento utilizando o modelo digital do terreno (MDT), ou em sua ausência o MDE da área em estudo.

A relação não linear $F_r = K \cdot R^b$ indicada pela equação (5) é utilizada para determinar o escoamento na calha fluvial. Nesse sentido, representa uma concepção diferenciada em relação ao conceito usual de reservatório linear presente de modo geral nos modelos hidrológicos. A dedução que foi desenvolvida sinaliza para a expressão que pode permitir o cálculo do parâmetro K, conforme a equação (16), e considerar o expoente b igual a 5/3, embora muitas simplificações tenham sido consideradas no desenvolvimento do modelo matemático. O valor $b = 5/3$ tem sido testado em dezenas de bacias hidrográficas e tem se ajustado bem às simulações. Por sua vez, os resultados do cálculo do parâmetro K também tem sido avaliado para diferentes bacias hidrográficas, com simulações em passo de tempo diário, inclusive inserindo-o como um dos parâmetros calibráveis. Têm-se observado, das aplicações tanto do CAWM IV como do CAWM V, que sua avaliação a partir da eq. 18 traz contribuição importante quanto à ordem de grandeza do mesmo.

As perdas de água do sistema podem ser devidas a causas diversas, tais como: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, sendo também igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino.

Essa perda é extraída do escoamento superficial direto, sendo utilizada para o seu cálculo a seguinte expressão não linear:

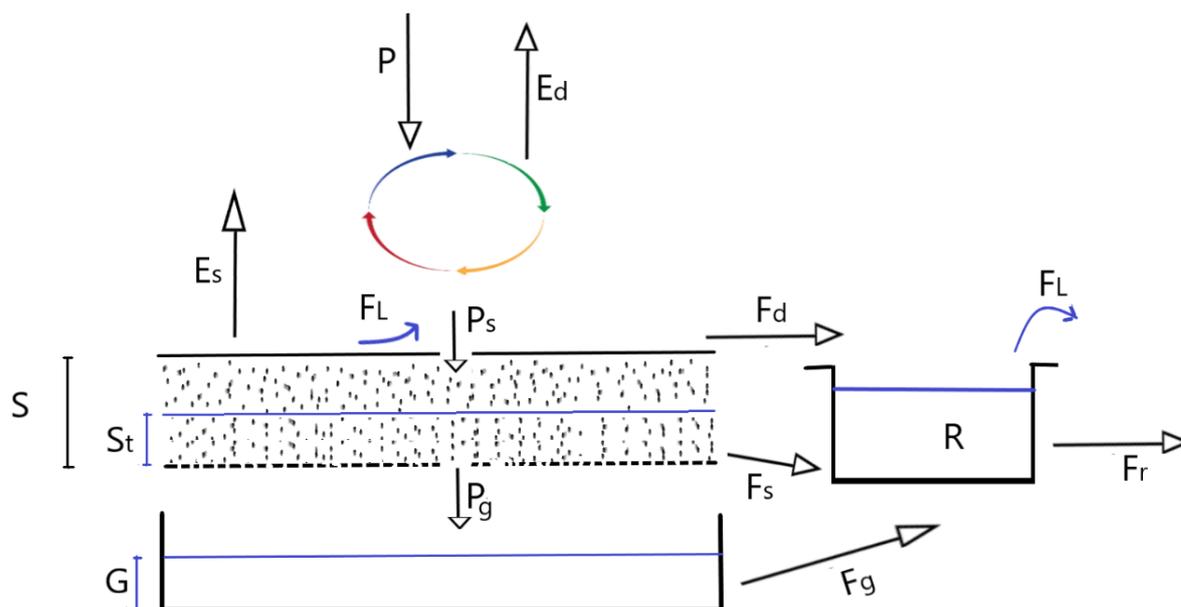
$$F_L = K_L \cdot R^p \quad (17)$$

Em que, K_L é um parâmetro a calibrar no modelo e p é o expoente de perdas, que tem sido testado nas diversas simulações já realizadas, normalmente variando entre 0.9 e 1.2. Na maior parte dos casos testados o valor 1 tem se mostrado mais adequado, sendo o valor “*default*” para o modelo. Apenas nas áreas de grandes extravasamentos valores maiores do que 1 tem se ajustado mais adequadamente.

2.3.1 Versão CAWM V

Diferentemente da versão IV, que foi desenvolvida para as regiões semiáridas, o CAWM V foi concebido para contemplar os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem. Nesse sentido, a principal mudança em relação ao CAWM IV é a inserção de um reservatório subterrâneo, conforme pode ser observado na Figura 2:

Figura 2 - Esquema do modelo CAWM V



Fonte: (FERRAZ, 2019)

Esse reservatório subterrâneo passa a ser alimentado quando o reservatório do solo atinge a sua saturação. Dessa forma, sempre que S_t atinge o valor de S , o excedente de água dá início a um fluxo de percolação profunda P_g em direção ao reservatório das águas subterrâneas, incrementando a lâmina acumulada G . Dele sai o fluxo F_g , calculado a seguir através da equação (18), que alimenta o rio (reservatório da calha fluvial R), complementando as parcelas F_d e F_s :

$$F_g = K_g \cdot G \quad (18)$$

Onde K_g é um parâmetro de transferência de água no solo a ser calibrado pelo modelo, de forma análoga ao parâmetro K_s , e G é a lâmina acumulada no reservatório subterrâneo.

Outra mudança em relação à versão anterior diz respeito ao cálculo da recarga do solo. No CAWM IV seu valor é determinado através da equação (1), contudo no CAWM V, tendo em vista a necessidade de alimentação do reservatório subterrâneo, tal parcela é determinada pela equação (19):

$$P_s = P_n \cdot \left(1 - \frac{S_t}{\beta \cdot S}\right) \quad (19)$$

Onde β é um parâmetro a ser calibrado no CAWM V, representando o processo de recarga do aquífero profundo.

2.3.2 Parâmetros do Modelo

No modelo CAWM V, quatro são os parâmetros a serem calibrados, potencialmente por processo de otimização:

- K_s – parâmetro relacionado a permeabilidade do solo
- K_L – coeficiente de perdas do modelo
- K_g – parâmetro de transferência de água subterrânea
- β – parâmetro relacionado a infiltração.

Outros parâmetros devem ser estimados:

- o parâmetro α da evapotranspiração complementar, que pode variar de 0 até um valor alto como 10, o que significa nenhuma ou máxima evapotranspiração suplementar, respectivamente.

-o parâmetro G, definido como a capacidade do reservatório profundo; seu limite define situação de completa saturação do aquífero e uma estimativa para rios de maior vazão aqui estudados foi em 10000mm.

O parâmetro S é estimado como sendo igual à capacidade de retenção de água no solo, calculada por meio do Curve Number médio (CN) da bacia hidrográfica, proposto pelo U.S. Soil Conservation Service:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (20)$$

Para o cálculo do CN estão sendo utilizados mapeamentos de solos da EMBRAPA e imagens de satélite classificadas do uso e ocupação do solo nas bacias. Um plugin foi desenvolvido para isso, tendo sido incorporado ao software QGIS. Nesse sentido, os

referidos mapas são utilizados no modelo apenas para quantificar o valor de S, que é uma variável do modelo utilizada no balanço hídrico.

O parâmetro K tem se mostrado adequado quando assume valores compreendidos entre 0,01 e 0,06, tomando-se como referência 0,025. No caso de rios que apresentem declividades médias acentuadas, o valor deste parâmetro calculado pela equação (16) é geralmente mais elevado. Nesses casos, recomenda-se excluir os trechos mais abruptos do curso d'água no cálculo da declividade. Por outro lado, em bacias muito grandes o comprimento total da rede de rios L_t leva a valores de K mais baixos, o que é referendado quando se põe o parâmetro a calibrar. Para bacias menores a experiência no uso do modelo tem apontado para um valor médio da ordem de 0,025.

De forma geral, os parâmetros K e S podem ser calibrados no modelo. Contudo, isso tem sido evitado a fim de se incorporar mais informações mensuráveis das características das áreas de estudo.

2.3.3 Indicadores de Eficiência do Modelo e Calibração dos Parâmetros

Os indicadores de eficiência utilizados pelo modelo são:

- NSE: Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e suas derivações $NSE_{\log Q}$ e $NSE_{\sqrt{Q}}$;
- R^2 : Coeficiente de determinação;
- Pbias: Erro percentual médio;
- RMSE: Raiz do erro médio quadrático;
- RSR: razão entre RMSE e desvio padrão.

O R^2 , que também é conhecido como coeficiente de determinação, mede o quanto da variabilidade da variável dependente é considerado pela regressão. Seus valores variam entre 0 e 1, sendo que quando igual a 1 a regressão foi perfeita e ocorrendo o inverso quando assume o valor de 0. Tipicamente valores acima de 0,5 são considerados aceitáveis para este parâmetro (Moriassi, et al., 2007). Este coeficiente é calculado pela equação (21):

$$R^2 = \frac{\frac{n \sum_{i=1}^n Q_{i,cal}^2 - (\sum_{i=1}^n Q_{i,obs})^2}{n(n-1)}}{\frac{n \sum_{i=1}^n Q_{i,obs}^2 - (\sum_{i=1}^n Q_{i,obs})^2}{n(n-1)}} \quad (21)$$

O índice RMSE expressa a acurácia dos resultados numéricos na mesma unidade a variável analisadas resultados numéricos. Quando este indicador assume o valor de 0 significa que houve um ajuste perfeito. É calculado através da equação (22):

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

O RSR incorpora os benefícios dos índices de erros estatísticos e inclui um fator de normalização. Varia do valor ótimo igual a 0, indicando que o RMSE também é igual a 0 e, portanto, uma simulação perfeita, até valores altos. Nesse sentido, quanto menor o RSR, menor é o RMSE e então melhor é a performance do modelo (Moriasi, et al., 2007). É calculado através da equação (23):

$$RSR = \left| \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{1/2}} \right| \quad (23)$$

O percentual bias mensura a tendência média de fluxos simulados serem maiores ou menores do que os observados homólogos a eles (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). O valor ótimo do Pbias é 0, com valores de baixa magnitude indicando que a simulação do modelo está acurada (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). Valores positivos deste coeficiente indicam que as vazões calculadas estão maiores que as respectivas observadas, ou seja, o modelo está superestimado. Por outro lado, os valores negativos mostram o oposto indicando que o modelo está subestimando as vazões. O Pbias é calculado conforme a equação (25):

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal}(i) - Q_{obs}(i)) 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i))} \right] \quad (24)$$

O NSE indica o quão bem as séries de valores observados versus simulados se ajustam. Seu valor varia de $-\infty$ até 1, com NSE = 1 sendo o valor ótimo (Moriasi, et al., 2007). É calculado através da equação (25):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (25)$$

Diversos outros autores, como Pushpalatha et al. (2012) e Traore et al. (2014), usam outras variações do NSE como iniciadores de eficiência do modelo. Dentre as equações modificadas deste indicador incluem-se: a da raiz quadrada das vazões (NSE_{sqrtQ}) e a do logaritmo decimal das vazões (NSE_{logQ}), que são determinadas, respectivamente, pelas equações (26) e (27):

$$NSE_{sqrtQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,cal}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad (26)$$

$$NSE_{logQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log \overline{Q_{obs}})^2} \quad (27)$$

Gotschalk e Motovilov (2000, apud Van Liew et al., 2007) avaliaram como muito bons valores para o NSE acima de 0,75 e como satisfatórios valores compreendidos entre 0,36 e 0,75, tanto para vazões diárias como para vazões mensais. Contudo, outros autores somente consideram aceitáveis esse indicador a partir de 0,50. Tais considerações aplicam-se também as variações do NSE.

Moriasi et al. (2007) recomendaram faixas de valores para o NSE, Pbias e RSR, conforme pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1 - Avaliação conforme indicadores NSE, Pbias e RSR

Avaliação de Desempenho	NSE	PBIAS (%)	RSR
Muito Bom	0,75 - 1,00	PBIAS < ±10	0 - 0,5
Bom	0,65 - 0,75	±10 < PBIAS ≤ ±15	0,5 - 0,6
Satisfatório	0,50 - 0,65	±15 < PBIAS ≤ ±25	0,6 - 0,7
Não Satisfatório	<0,5	PBIAS >±25	>0,7

Fonte: (Moriasi, et al., 2007)

Segundo Traore et al. (2014), valores mais altos de NSE indicam melhores ajustes para as vazões mais elevadas, NSE_{sqrtQ} representa de forma mais adequada as vazões intermediárias e NSE_{logQ} as vazões baixas. Pushpalatha et al. (2012) concluíram que o indicador mais apropriado para toda a série é NSE_{sqrtQ} . Concordando

com essa afirmação, Patil et al. (2014) propuseram esse indicador como função-objetivo a ser maximizada no processo de calibração dos parâmetros de modelos chuva-vazão.

Após diversos testes considerou-se que a função-objetivo mais apropriada aos modelos CAWM IV e CAWM V é aquela que maximize o NSE e ao mesmo tempo minimize o somatório dos erros absolutos entre as vazões observadas e calculadas, conforme indicado equação (28):

$$F = \frac{NSE \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (28)$$

Outras expressões para a função-objetivo fazem parte do programa elaborado em macros do MS Excel. Embora neste trabalho tenha sido utilizada essa versão, os modelos (CAWM IV e CAWMV) tem outra programada em linguagem Python. Na versão desenvolvida em planilhas com macros do MS Excel a calibração é feita com o algoritmo de Programação Não-Linear Solver GRG (Generalized Reduced Gradient), que faz parte do suplemento Solver, conforme indicado na seção 3.3. Na versão programada em linguagem Python são utilizadas rotinas do “scipy.optimize.minimize”. Esse processo está sendo aprimorado para reduzir o tempo de processamento. provavelmente utilizando o método PSO – Particle Swarm Optimization, que tem se mostrado mais eficiente em outras aplicações.

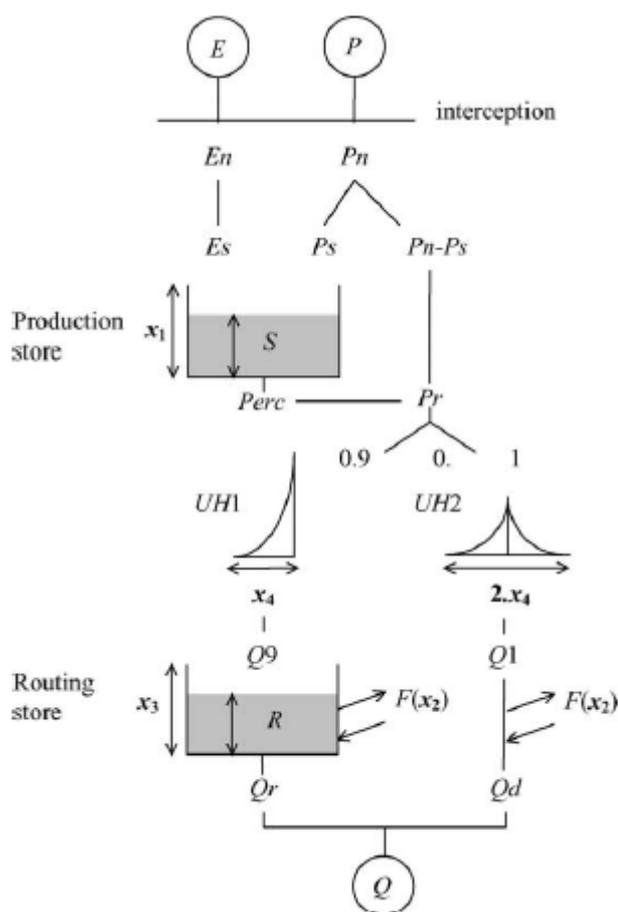
O algoritmo de calibração deve então otimizar os valores dos parâmetros calibráveis do modelo. No caso da modelo CAWM V, as restrições impostas na calibração foram a não negatividade dos parâmetros K_s , K_L , K_g , além de ter sido definido o valor 1 como limite superior deles. Os valores desses parâmetros são baixos, à semelhança dos coeficientes de permeabilidade. No caso do parâmetro β , exclusivo da versão V, é definida como restrição única a exigência por valores maiores do que 0, não sendo definido um limite superior. Em média, as avaliações desse parâmetro variam entre 1,5 e 10, com predominância entre 2 e 4.

O download da versão integrada CAWM IV-CAWM V na versão programada em macros do MS Excel pode ser feito no site www.ufpe.br/web/GRH.

2.4 MODELO GR4J

O GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003) é um modelo chuva-vazão concentrado originário da França de passo de tempo diário que, tal qual o CAWM, tem uma estrutura simplificada com quatro parâmetros a calibrar. Tal modelo é uma versão aprimorada do GR3J proposto por Edjatno e Michel (1989) e sucessivamente melhorado por Nascimento (1995) e Edjatno et al. (1999). O esquema do modelo encontra-se representado na Figura 3:

Figura 3 - Esquema de funcionamento do modelo GR4J



Fonte: (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003)

Cabe destacar que, da análise da Figura 3, que os valores máximos de S (nível do reservatório de produção) e R (nível do reservatório de roteamento) são, respectivamente, x_1 e x_3 . Todo o esquema apresentado é descrito na próxima seção.

2.4.1 Descrição do modelo

O GR4J - Génie Rural a 4 paramètres Journalier possui dois reservatórios de interação: o primeiro representa a retenção de água no solo, sendo denominado de reservatório de produção e o segundo é o reservatório da calha fluvial que dá origem ao escoamento dos rios, sendo chamado de reservatório de roteamento. Vale ressaltar que o modelo também leva em consideração as áreas de subsuperfície, além das áreas de drenagem. As funções de transferência de água incluem a percolação do reservatório do solo, que divide a precipitação efetiva em dois componentes com um hidrograma unitário individual para cada componente. O modelo é estruturado em uma planilha do MS Excel.

O modelo denota por P (mm/dia) a precipitação e por E (mm/dia) a evapotranspiração potencial. P pode ser computado através de algum método de interpolação a partir dos dados de postos de precipitação disponíveis. Já a E pode ser a média de longo termo, o que significa que os valores de evapotranspiração potencial são repetidos a cada ano.

A primeira operação do modelo é realizada com o objetivo de determinar a precipitação líquida (P_n) e a evapotranspiração líquida, através das equações (29) e (30):

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \text{ e } E_n = 0 \quad (29)$$

$$\text{Se } P < E, \text{ então } P_n = 0 \text{ e } E_n = E - P \quad (30)$$

Se P_n é diferente de zero, ou seja, se a equação (29) é verdadeira, então uma parte de P_n preenche o reservatório de produção. P_s é determinado pela equação (31) e, como pode ser observado, é função de S , que representa o nível do reservatório de produção, cujo valor máximo é o parâmetro calibrável X_1 (mm).

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (31)$$

Por outro lado, caso a equação (30) seja verdadeira, ou seja, se E_n não é igual a zero, então calcula-se então a parcela E_s , que representa a quantidade de água que evaporará a partir do reservatório de produção. Essa quantidade é obtida através da equação (32):

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (32)$$

O nível do reservatório de produção é atualizado através da equação (35):

$$S = S - E_s + P_n \quad (33)$$

A percolação, denominada de P_{erc} , vem do reservatório de produção e é calculada por:

$$P_{erc} = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (34)$$

Com isso, o nível S do reservatório de produção é atualizado novamente através da seguinte equação:

$$S = S - P_{erc} \quad (35)$$

A quantidade total de água P_r que atinge a parte roteamento do modelo é:

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \quad (36)$$

P_r é dividido em dois componentes de fluxo, 90% sendo roteado por um hidrograma unitário UH1 e reservatório de roteamento e 10% por um único hidrograma unitário UH2. Ambos os hidrograma dependem do mesmo parâmetro X_4 , já definido anteriormente como o tempo de base do UH1 expresso em dias. As ordenadas de H1 e UH2 são determinadas a partir das curvas S , chamadas respectivamente de SH1 e SH2.

SH1 é definida em função do tempo por:

$$SH1(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0 < t < X_4 \\ 1, & t > X_4 \end{cases} \quad (37)$$

SH2 é definida em função do tempo por:

$$SH2(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}, & 0 < t < X_4 \\ 1, & t > 2X_4 \end{cases} \quad (38)$$

As ordenadas de UH1 e UH2 são então obtidos a partir das equações (39) e (40) e :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (39)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (40)$$

Onde j é um número inteiro.

Para cada passo de tempo i, as vazões Q_9 e Q_1 dos dois hidrograma são calculadas pelas equações (41) e (42):

$$Q_9(i) = 0,9 \sum_{k=1}^l UH1(k).P_r(i - k + 1) \quad (41)$$

$$Q_1(i) = 0,1 \sum_{k=1}^m UH2(k).P_r(i - k + 1) \quad (42)$$

Em que, $l = X_4 + 1$ e $m = 2X_4 + 1$. Deve-se tomar a parte inteira do parâmetro X_4 .

Um termo de troca de água subterrânea (ganho ou perda) é calculado por:

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (43)$$

Onde R é o nível do reservatório de roteamento, X_3 é a capacidade máxima deste reservatório e X_2 é o coeficiente de troca. Vale destacar que este último parâmetro pode ser positivo em caso de importação de água, negativo que significa exportação de água ou nulo indicando nenhuma troca de água.

Assim, o nível R do reservatório de roteamento é atualizado adicionando-se a vazão de saída Q_9 do hidrograma unitário UH1 ao termo F , conforme indicado na equação (44):

$$R = \text{Máx} (0; R + Q_9 + F) \quad (44)$$

O fluxo de saída do reservatório de roteamento é determinado como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (45)$$

Com isso o nível do reservatório de roteamento R é atualizado através da seguinte equação:

$$R = R - Q_r \quad (46)$$

Bem como o conteúdo do reservatório de roteamento, a vazão de saída Q_1 do hidrograma UH2 está sujeita a mesma troca de água F , descrita na equação (43), para dar a componente Q_d da seguinte forma:

$$Q_d = \text{Máx} (0; Q_1 + F) \quad (47)$$

A vazão final é finalmente obtida por:

$$Q = Q_r + Q_d \quad (48)$$

2.4.2 Parâmetros do Modelo GR4J

O GR4J possui quatro parâmetros para otimizar durante a calibração, que são definidos a seguir:

- X_1 : capacidade máxima de retenção do reservatório de produção, em milímetros;
- X_2 : coeficiente de transferência subterrânea também, em milímetros;
- X_3 : capacidade máxima do reservatório de distribuição, em milímetros;
- X_4 : tempo base do hidrograma unitário, em dias.

Esses parâmetros são números reais, sendo que X_1 e X_3 , por se tratar das capacidades dos reservatórios, devem ser sempre positivos, X_4 deve assumir valores maiores do que 0,5 e X_2 , por sua vez, pode ser positivo, negativo ou mesmo igual a zero.

2.5 MODELO DE GRANDES BACIAS - MGB-IPH

O modelo MGB foi desenvolvido ao longo dos últimos 10 anos para aplicação em grandes bacias hidrográficas. Podem ser caracterizadas como grandes bacias àquelas que atendem aos seguintes critérios (não definitivos):

- Regiões com áreas superiores a 1000km²;
- Regiões onde os processos de propagação fluvial não podem ser negligenciados, ou seja, que o tempo de viagem da água na rede de drenagem seja grande (alto tempo de concentração) e que os processos de translação e atenuação de ondas de cheias sejam relevantes na compreensão das dinâmicas da bacia;
- Regiões onde a diferença entre os divisores de água superficial e subterrânea pode ser desprezada;
- Regiões onde a chuva e outras características como tipo de solo não podem ser consideradas homogêneas em toda a área;
- Regiões onde a caracterização do terreno é difícil de ser realizada com medições in-situ, sendo necessário o apoio de técnicas de SIG e sensoriamento remoto.

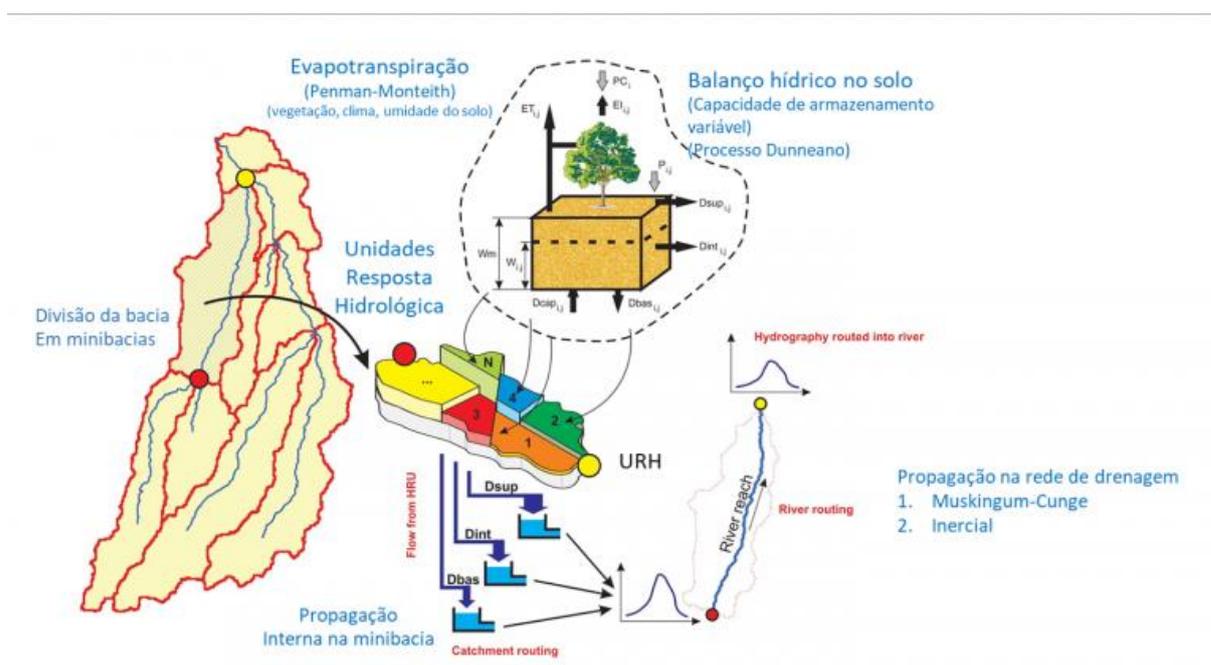
Originalmente o MGB utilizada uma forma de divisão da bacia hidrográfica em unidades regulares, chamadas de células. A versão atual, utilizada neste trabalho, difere neste ponto dividindo a bacia em pequenas sub-bacias, denominadas de minibacias.

Atualmente, o MGB encontra-se com interface integrada aos softwares SIG de distribuição livre Quantum GIS (QGIS) e MapWindow. Isso facilita a geração de dados de entrada para o modelo, contando ainda com ferramenta de análise de dados e de pós-processamento e permitindo a integração do modelo com o potencial do SIG. Para a aplicação à bacia do Rio das Velhas foi utilizada a versão desenvolvida para o

Quantum GIS, sendo necessário adicionar dois plugins ao referido software SIG: o IPH-Hydro Tools e o MGB. O download dos referidos plugins, bem como de manuais e material de apoio estão disponíveis através do site: <https://www.ufrgs.br/hge/>.

O funcionamento modelo MGB-IPH é apresentado na Figura 4:

Figura 4 - Esquema do funcionamento do MGB



Fonte: (UFRGS, 2022)

2.6 PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Dependendo do passo de tempo usado para a modelagem, torna-se necessário processar os dados de precipitação para considerar o “lagtime” entre a ocorrência das precipitações e a formação das vazões no exutório da bacia. Por exemplo, se as simulações são diárias e as dimensões das bacias apontam para tempo de viagem em torno de 4 dias, essa defasagem precisa ser considerada. O modelo GR4J incorpora o cálculo desse “lagtime” entre os parâmetros a calibrar. Já no caso do CAWM deve ser feito um pré-processamento para redistribuir temporalmente as precipitações médias considerando os conceitos do histograma sintético tempo-área (HTA) de Clark, descritos a seguir.

2.6.1 Método de Clark

O método de Clark utiliza como parâmetros os tempo de concentração (T_c), um histograma tempo-área (HTA) e um reservatório linear simples (RLS) para representar o amortecimento do volume de água gerado na bacia devido ao armazenamento. O HTA pode ser determinado por meio de equações sendo chamado de sintético (ou automático), ou ainda pode ser extraído a partir de um mapa de tempos de translação da água pixel a pixel determinado através de técnicas de geoprocessamento, quando então é denominado de HTA geoprocessado.

O modelo CAWM calcula, por escolha do usuário, as precipitações médias temporalmente redistribuídas por meio das ordenadas do HTA, a partir do “lagtime” definido pelo usuário (estimado em função do tempo de concentração da bacia ou da observação entre a ocorrência dos tempos de pico das precipitações e das vazões). No caso do método de Clark chega-se ao cálculo das vazões. O CAWM, porém, utiliza apenas as ordenadas do HTA sintético na sua formulação.

Dessa forma, calcula-se a chuva média e então se constrói o HTA automático. Ele é dividido em k intervalos onde as ordenadas são:

$$f_i = (A_{ci} - A_{ci-1}) \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (49)$$

A área de contribuição se relaciona com o tempo pelas equações (50) e (51):

$$A_c = aT^m \text{ para } 0 < T < T_c/2 \quad (50)$$

$$A_c = 1 - a(T_c - T)^m \text{ para } T_c/2 < T < T_c \quad (51)$$

Onde A_c corresponde a área contribuinte entre as isócronas, T é o tempo, T_c indica o tempo de concentração da bacia hidrográfica e m é um coeficiente que depende da forma da bacia. Deve-se adotar $m = 1$ para bacias de formato retangular, $m = 2$ quando apresentam a forma de um losango, sendo $m = 1,5$ quando para uma geometria intermediária entre retangular e losangular. O valor de “a” presente em (50) e (51) é calculado através da equação (52):

$$a = \frac{0,5}{\left(\frac{T_c}{2}\right)^2} \quad (52)$$

No HTA automático escalona-se os volumes produzidos na bacia nos intervalos de tempo Δt , de maneira a se construir um histograma simétrico. Para isto, o T_c é dividido em duas partes iguais, em que os valores das áreas contribuintes no intervalo $0 < T < T_c/2$ são para subida e os compreendidos em $T_c/2 < T < T_c$ são para descida formando um histograma que representa a translação dos volumes superficiais. Vale ressaltar forma do HTA sintético varia de acordo com o intervalo de tempo de definição das isócronas. Nesse sentido, quanto menores os intervalos de tempo mais suavizado o histograma e quando maiores os intervalos de tempo mais acentuado.

2.6.2 Inserção da variabilidade espacial das precipitações

CIRILO et al (2020), descrevendo aplicações do CAWM IV, propuseram forma de se considerar no modelo concentrado também a distribuição espacial das precipitações. Isso é feito aqui criando isócronas, identificando por técnicas de geoprocessamento os postos no entorno delas, aplicando o “lagtime” a cada série de dados e só então calculando a chuva média na bacia. Esse procedimento foi também adotado nesta pesquisa para as duas bacias em estudo, com a série temporal de chuvas médias calculada em seguida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo é dedicado, inicialmente, a caracterização das áreas de estudo desse trabalho. Na sequência são apresentados os materiais e métodos utilizados para realização da modelagem hidrológica das bacias hidrológicas.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, como antecipado, abrange duas importantes bacias hidrográficas brasileiras: a do Rio das Velhas, que faz parte da Bacia do Rio São Francisco, e a do Parnaíba. Ambas serão caracterizadas na sequência.

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas

A primeira área de estudo deste trabalho consiste na bacia hidrográfica dos Rio das Velhas, um dos mais importantes afluentes do Rio São Francisco. Sua caracterização é apresentada na sequência.

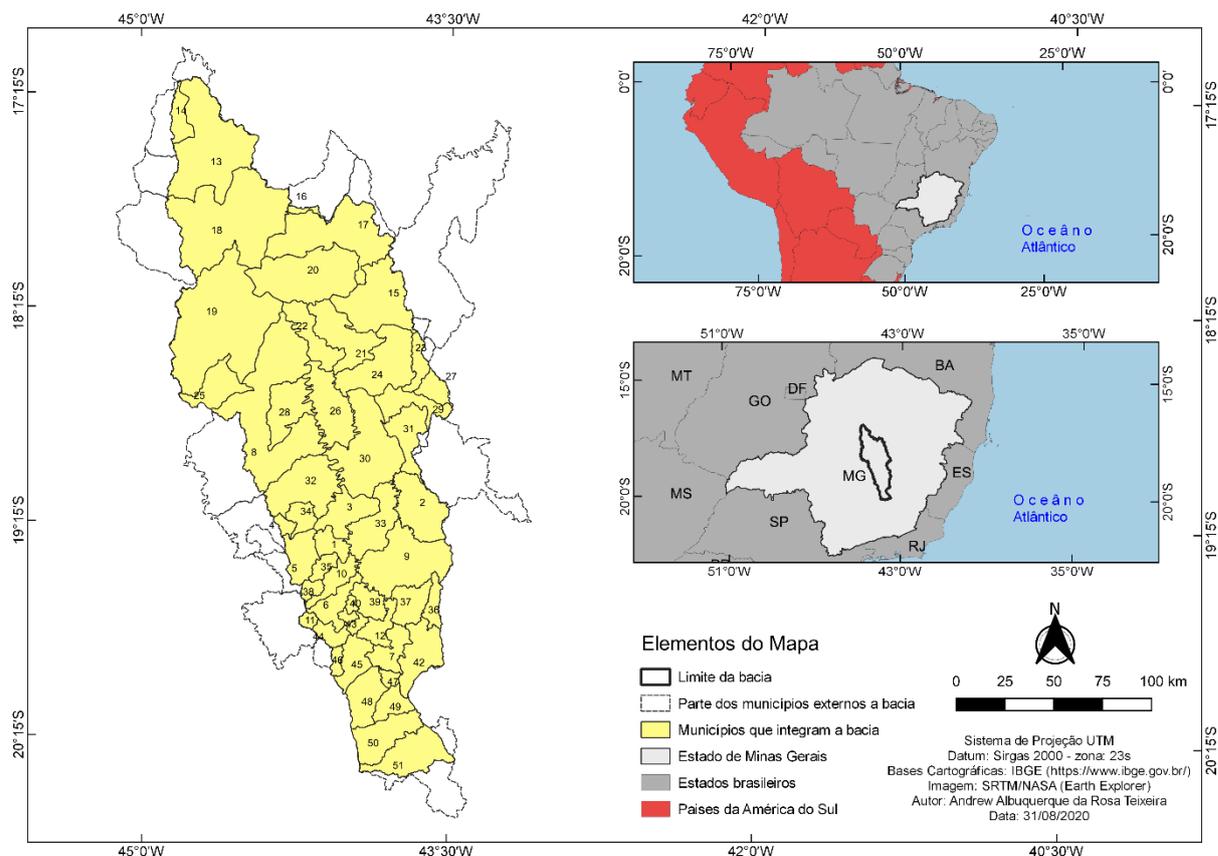
3.1.1.1 *Localização e generalidades*

A Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (Figura 5) apresenta área de drenagem calculada em 27.862 km².

Com uma forma alongada e inclinada predominantemente na direção norte-sul, a bacia do Rio das Velhas está totalmente inserida na porção central do estado de Minas Gérias (MG), entre as latitudes 17° 05' S e 20° 30' S e as longitudes 43° 25' W e 44° 55' W.

A Figura 5 a seguir apresenta o mapa de localização da bacia do rio das Velhas:

Figura 5 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

Integram a bacia hidrográfica 51 municípios do estado de MG, dos quais 44 apresentam suas sedes urbanas dentro da bacia e 15 fazem parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Segundo o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), tais municípios abrigam uma população superior a 4,8 milhões de habitantes, dos quais 4,4 milhões vivem efetivamente dentro dos limites da bacia. Tal contingente populacional é significativo já que representa 24,7% da população do estado de MG, principalmente no que se refere a população urbana onde o percentual chega a 28,1%. O destaque vai para o município de Belo Horizonte que concentra 53,9% do total de residentes da bacia com uma população superior a 2 milhões de pessoas e que representa 53,3% da população que vive em ambientes urbano.

De acordo com o Plano Diretor, a bacia é subdividida em macrorregiões, quais sejam: Alto, Médio Alto, Médio Baixo, e Baixo Rio das velhas. Vale destacar que tal subdivisão difere da divisão histórica da bacia, que a dividia em Alto, Médio e Baixo, já que a porção intermediária foi dividida em duas devido a sua grande extensão e diversidade.

Nesse sentido, a seguir são apresentadas as principais características de cada macrorregião, conforme o (CBH Rio das Velhas, 2015).

Alto Rio das Velhas: Compreende toda a região denominada Quadrilátero Ferrífero, apresentando o município de Ouro Preto como limite sul e os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Sabará como limite norte. Ao todo, dez municípios compõem o Alto Rio das Velhas, o que representa um percentual de 9,8% do total da bacia, ou aproximadamente 2.740,82 km². É a região que apresenta o maior contingente populacional, com expressiva atividade econômica concentrada na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Médio Alto Rio das Velhas: Possui características diferentes no que se refere ao uso e ocupação do solo em relação a região anterior, apresentando uma menor concentração populacional, com predomínio de atividades agrícolas e pecuárias. Tal macrorregião compreende vinte municípios do estado de MG, o que é equivalente a uma área de 4.277,94 km² ou 15,4% do total da bacia.

Médio Baixo Rio das Velhas: É a maior macrorregião da Bacia do Rio das Velhas, a qual é composta por 23 municípios e representa uma área de 12.210,50 km², ou 43,8% do total da bacia.

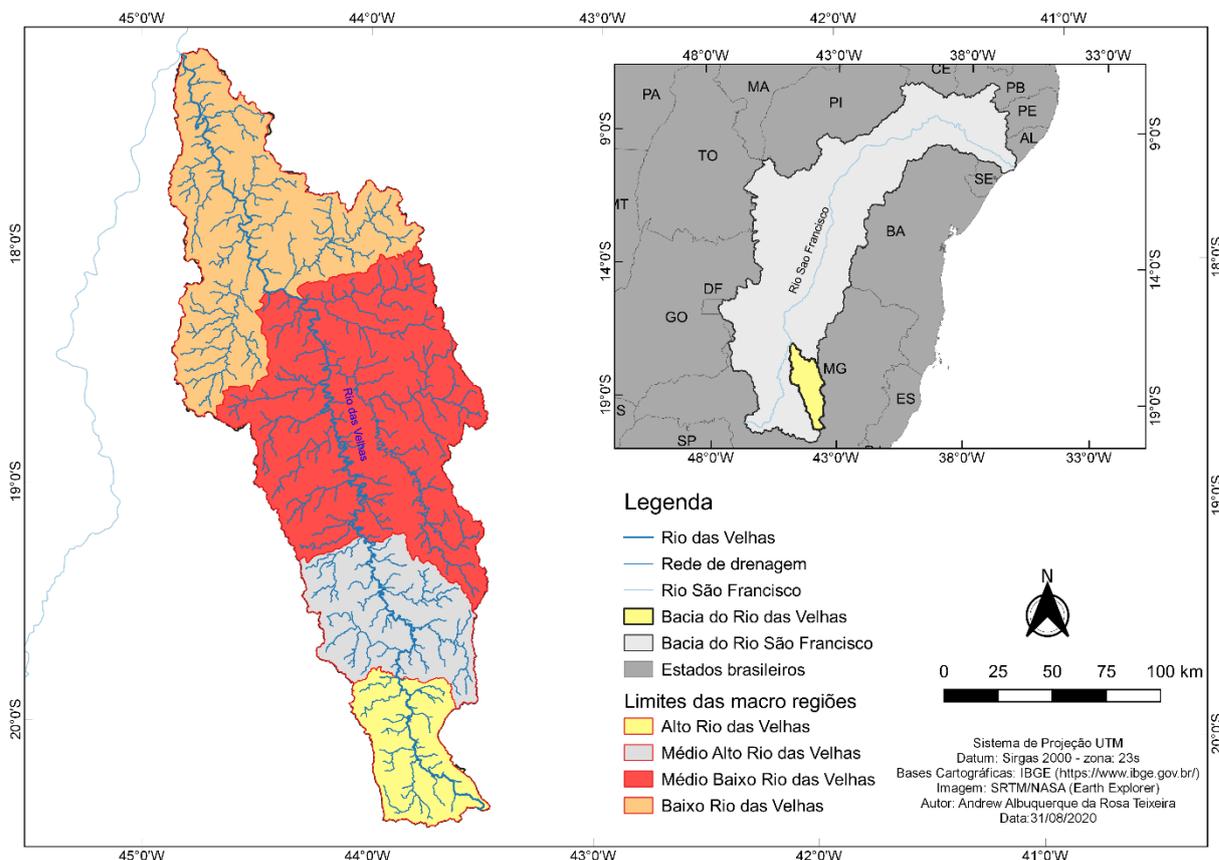
Baixo Rio das Velhas: é composta por oito municípios e, em termos territoriais, representa a segunda maior macrorregião da bacia com uma área de 8.636,26 km² ou 31,0% do total da bacia. Se caracteriza pela baixa concentração populacional, com predominância de atividades agrícolas e pecuárias.

3.1.1.2 *Hidrografia*

Maior afluente em extensão do Rio São Francisco, o Rio das Velhas apresenta em seu curso principal tem uma extensão de cerca de 782 km entre a sua nascente principal na cachoeira das Andorinhas, no município de Ouro Preto e o encontro com o Velho Chico, no município de Várzea da Palma. Ele é alimentado por uma rica rede de rios durante todo o seu percurso. Seus principais afluentes pela margem esquerda são: os rios Bicudo, Ribeirão Jequitibá, Ribeirão da Mata, Ribeirão Arrudas, Ribeirão

do Onça e Itabirito. Pela direita destacam-se os rios: Curimataí, Pardo, Paraúna/Cipó, Taqueraçu e Ribeirão Caeté/Sabará. (CBH Rio das Velhas, 2015)

Figura 6 - Rede de rios e macrorregiões do Rio das Velhas

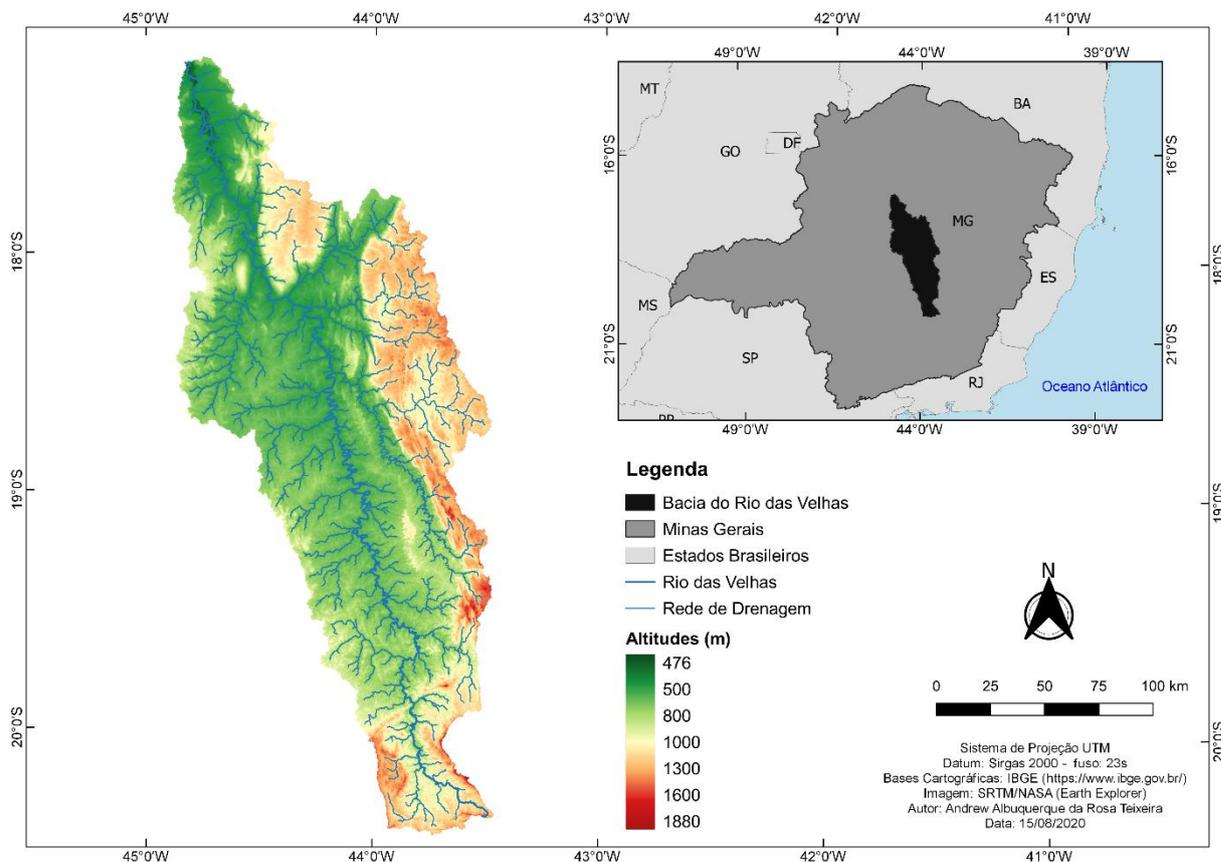


Fonte: O autor, 2020

3.1.1.3 Altimetria e Declividades

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) é possível observar como variam as altitudes na região compreendida pela bacia. Observam-se elevadas altitudes próximo a cabeceira do Rio das Velhas e na sua faixa leste, que atinge valores aproximados de até 1880m. Por outro lado, nas localidades próximas ao exutório da bacia encontram-se as menores cotas da região, que apresentam o valor mínimo de 476m de altitude, aproximadamente. Além disso, a Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas apresenta uma elevação média de 833m. A seguir é apresentado o mapa de altitudes da bacia na Figura 7.

Figura 7 - Mapa de altitudes da Bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

O Rio das Velhas, por sua vez, atinge uma cota máxima, ao longo do seu percurso de 1558m, no município de Ouro Preto, e deságua no Rio São Francisco a uma altitude de aproximadamente 479m. Tais valores são descritos de forma sintética na Tabela 2.

Tabela 2 - Altitudes da Bacia e do Rio das Velhas

Cotas	Altitude (m)
Cota _{máx} Rio das Velhas	1558
Cota _{min} Rio das Velhas	479
Cota _{máx} da Bacia	1880
Cota _{min} da Bacia	476
Elevação Média da Bacia	833

Fonte: O autor, 2020

3.1.2 Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba

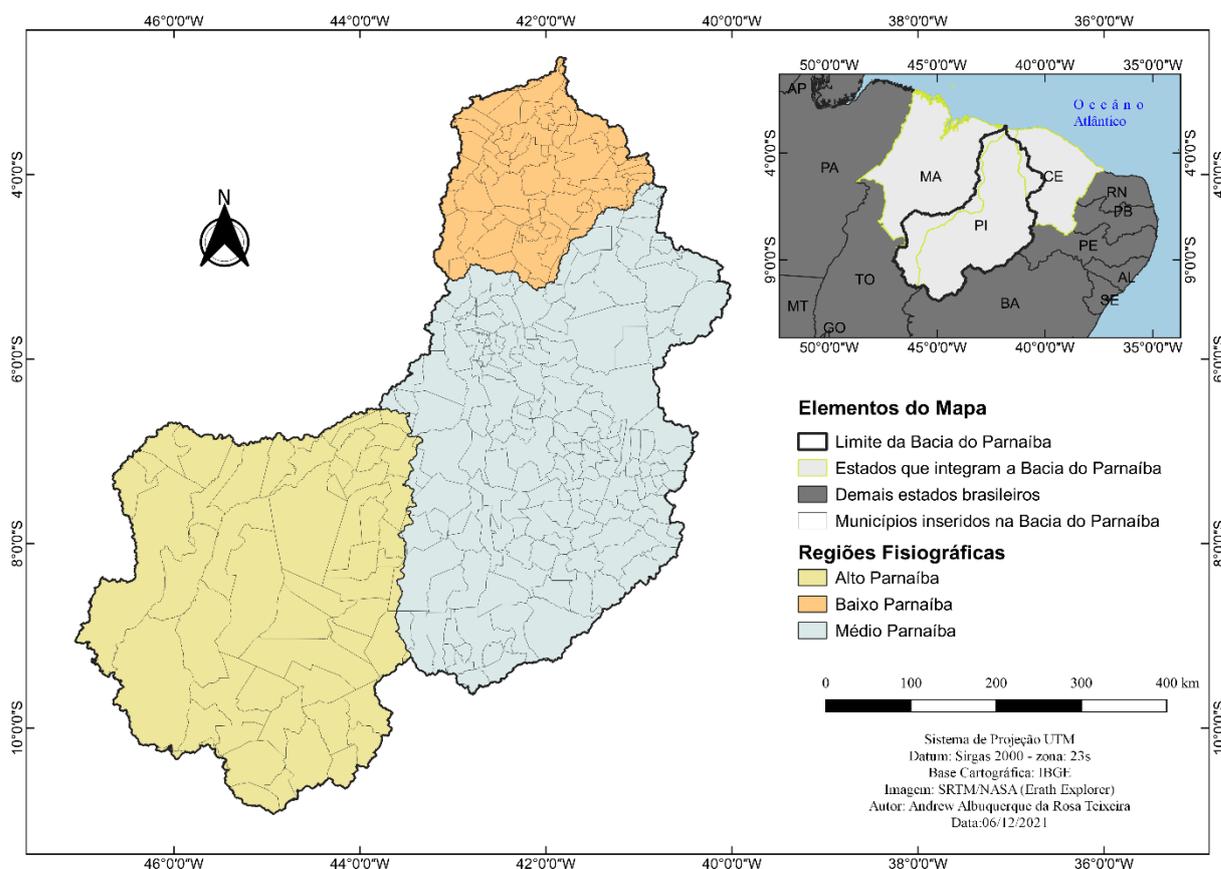
A segunda área de estudo utilizada neste trabalho é a bacia hidrográfica do Rio Parnaíba. Sua caracterização é apresentada na sequência.

3.1.2.1 *Localização e generalidades*

A bacia hidrográfica do Rio Parnaíba encontra-se totalmente inserida na região nordeste do Brasil, entre as latitudes 02°11'S e 11°06'S e longitudes 36°44'W e 47°21'W. Ela apresenta uma área de drenagem de 330.903 km², sendo que 75% situam-se no estado do Piauí, 20% no Maranhão e 5% no Ceará, correspondendo a aproximadamente 4% do território nacional. A bacia abrange 282 municípios com uma população estimada de 5.108.444 pessoas (Codevasf/IBGE, 2021).

A bacia do Parnaíba é uma das 12 regiões hidrográficas brasileiras definida pela Resolução nº 32/2003 e é considerada a segunda mais importante da região Nordeste do ponto de vista hidrológico. Fisiograficamente, ela é dividida em três regiões denominadas de Alto (onde se localiza a hidrelétrica de Boa Esperança), Médio e Baixo Parnaíba (MMA,2006). Ao longo de seu curso, suas águas atravessam diferentes biomas tais como o Cerrado no Alto Parnaíba, a Caatinga no Médio e Baixo Parnaíba e o bioma Costeiro no Baixo (ANA, 2015).

Figura 8 - Mapa de Localização da Bacia do Parnaíba

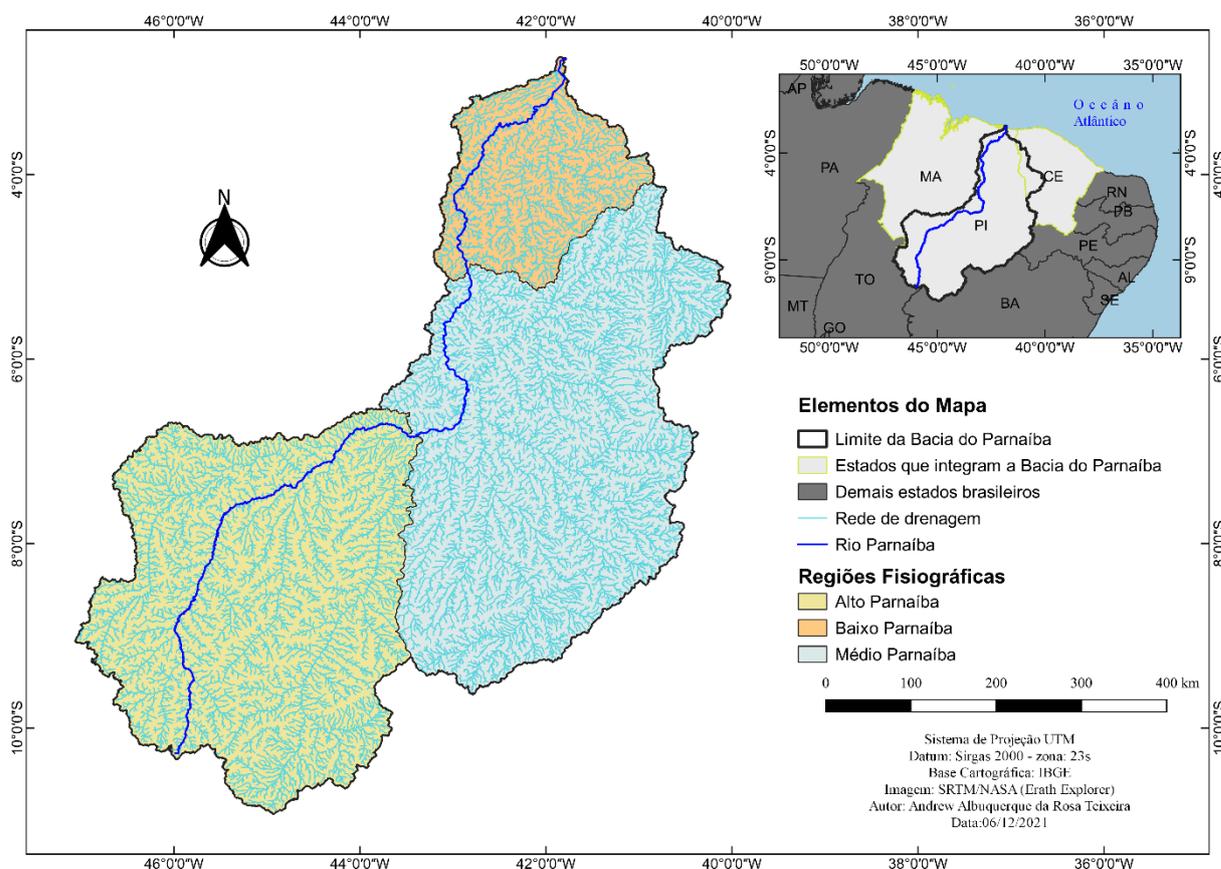


Fonte: O autor, 2021

3.1.2.2 Hidrografia

O Rio Parnaíba, desde sua nascente na localizada nos contrafortes da chapada das Mangabeiras, no sul do estado do Piauí e sudeste do Maranhão, até sua foz no oceano Atlântico, percorre uma distância de aproximadamente 1467km. Ele é alimentado por águas superficiais e subterrâneas destacando-se os seguintes rios: O Balsas que se situa no estado do Maranhão; os rios Uruçui-Preto, Gurgueia, Itaueiras, Canindé/Piauí e Longá, pertencentes ao estado do Piauí e o rio Poti que nasce no Ceará, mas se estende pelo Piauí.

Figura 9 - Hidrografia da Bacia do Rio Parnaíba



Fonte: O autor, 2021

3.1.2.3 Altimetria e Declividades

O Rio Parnaíba nasce nos contrafortes da chapada das Mangabeiras a uma altitude de aproximadamente 791m e, após percorrer seus 1.466,90km, desemboca no Oceano Atlântico. No gráfico a seguir é apresentado seu perfil longitudinal da nascente até o exutório:

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) é possível observar como variam as altitudes na região compreendida pela Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba. Observam-se elevadas altitudes próximo a cabeceira do Rio das Velhas e na sua faixa leste, atingindo o valor máximo de 1.008m de altitude. Por outro lado, na parte central e nas localidades próximas ao exutório da bacia encontram-se as menores cotas da região. Além disso, a Bacia do Parnaíba apresenta uma elevação média de 355m. De forma sintética pode-se observar os principais índices relativos à altitude na tabela a seguir:

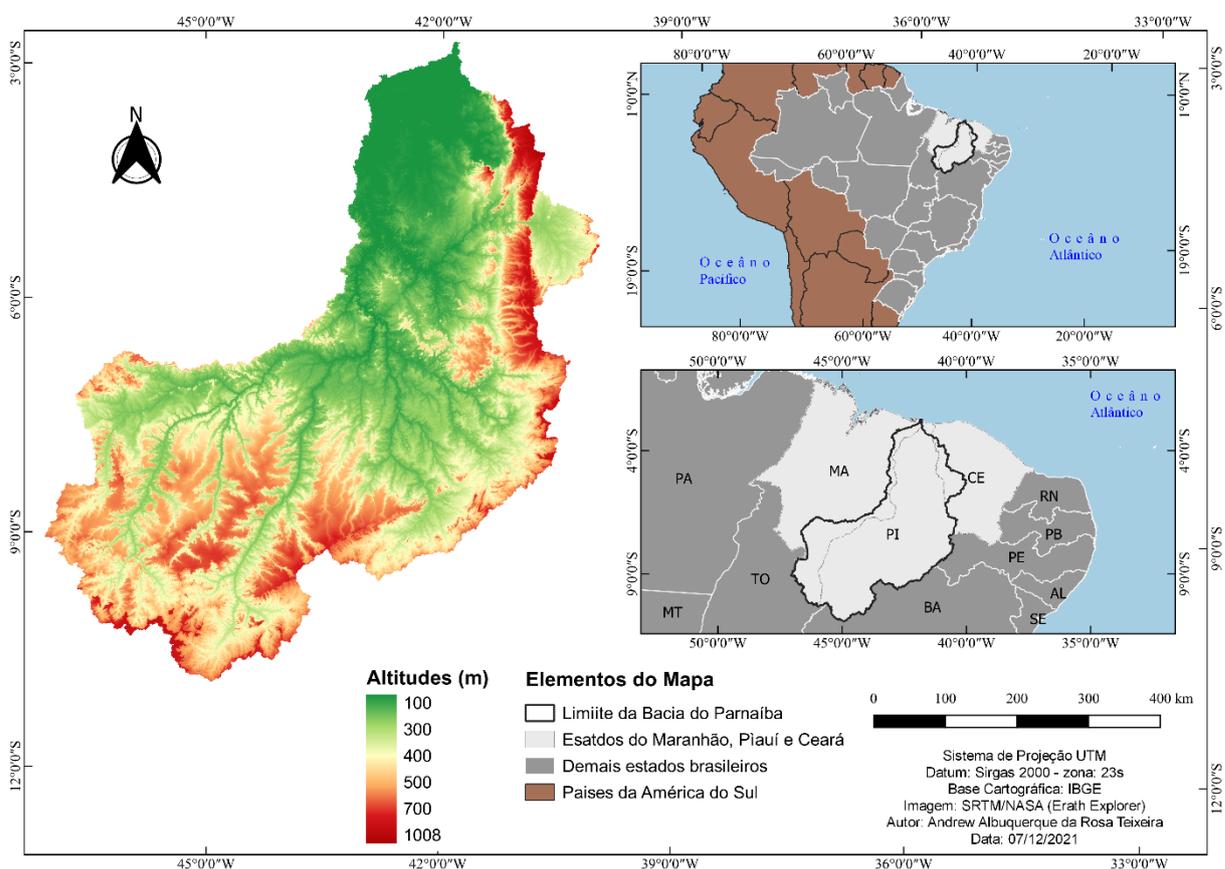
Tabela 3 - Altitudes da Bacia e do Rio Parnaíba

Cotas	Altitude (m)
Cota _{máx} Rio Parnaíba	791
Cota _{mín} Rio Parnaíba	0
Cota _{máx} da Bacia do Parnaíba	1008
Cota _{mín} da Bacia do Parnaíba	0
Elevação Média da Bacia do Parnaíba	355

Fonte: O autor, 2021

A Figura 10 apresenta mapa de altitudes da bacia do Rio Parnaíba:

Figura 10 - Mapa de altitudes da Bacia do Rio Parnaíba



Fonte: O autor, 2021

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO

Nessa seção são apresentados os dados utilizados no modelo hidrológico e como eles foram adquiridos. Além disso, a seção se dedica a explicação de como foi realizado o pré-processamentos desses dados obtidos.

3.2.1 Aquisição de dados

Os dados iniciais necessários para a construção do modelo são: o MDE das regiões de estudo, as series pluviométricas e fluviométricas, além de informações relativas a evapotranspiração potencial. A aquisição desses dados iniciais do modelo é apresentada a seguir.

3.2.1.1 *Modelo Digital de Elevação (MDE)*

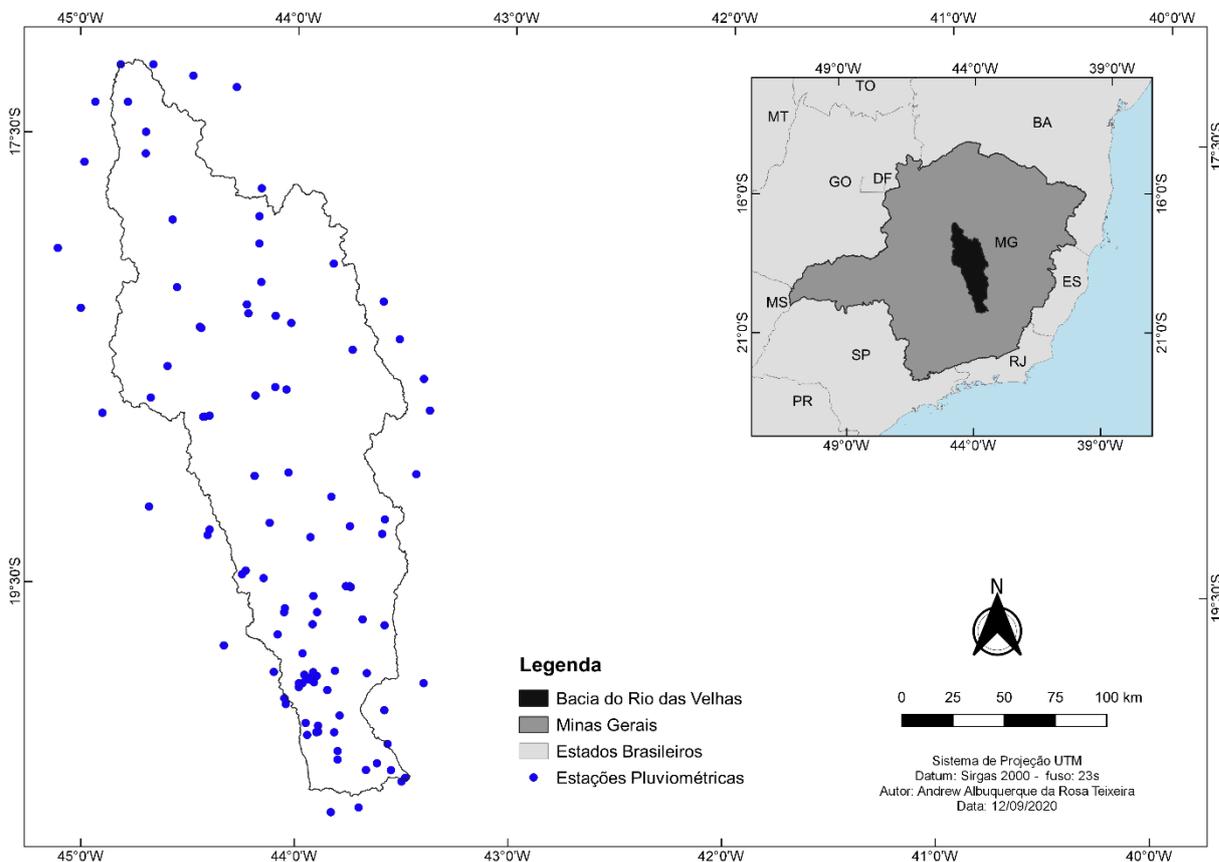
As informações acerca das características do terreno foram obtidas através do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo. O MDE utilizado neste trabalho provém da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Tal produto, possui resolução espacial de 30m e foi obtido no site do United States Geological Survey (USGS), disponível no endereço: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

3.2.1.2 *Séries Pluviométricas*

As séries históricas de precipitação foram obtidas a partir da base de dados do Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA), que oferece acesso a um banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Para a bacia do Rio das Velhas foram selecionadas um total de 102 estações pluviométricas com dados diários no período compreendido entre 01/06/1941 e 07/03/2019, sendo este último definido a partir de análise das séries históricas buscando-se um intervalo temporal com uma menor quantidade de falhas.

Os postos distribuem-se dentro dos limites da bacia, bem como de áreas nas proximidades conforme pode ser observado na Figura 11:

Figura 11 - Estações pluviométricas para estudo da bacia do Rio das Velhas

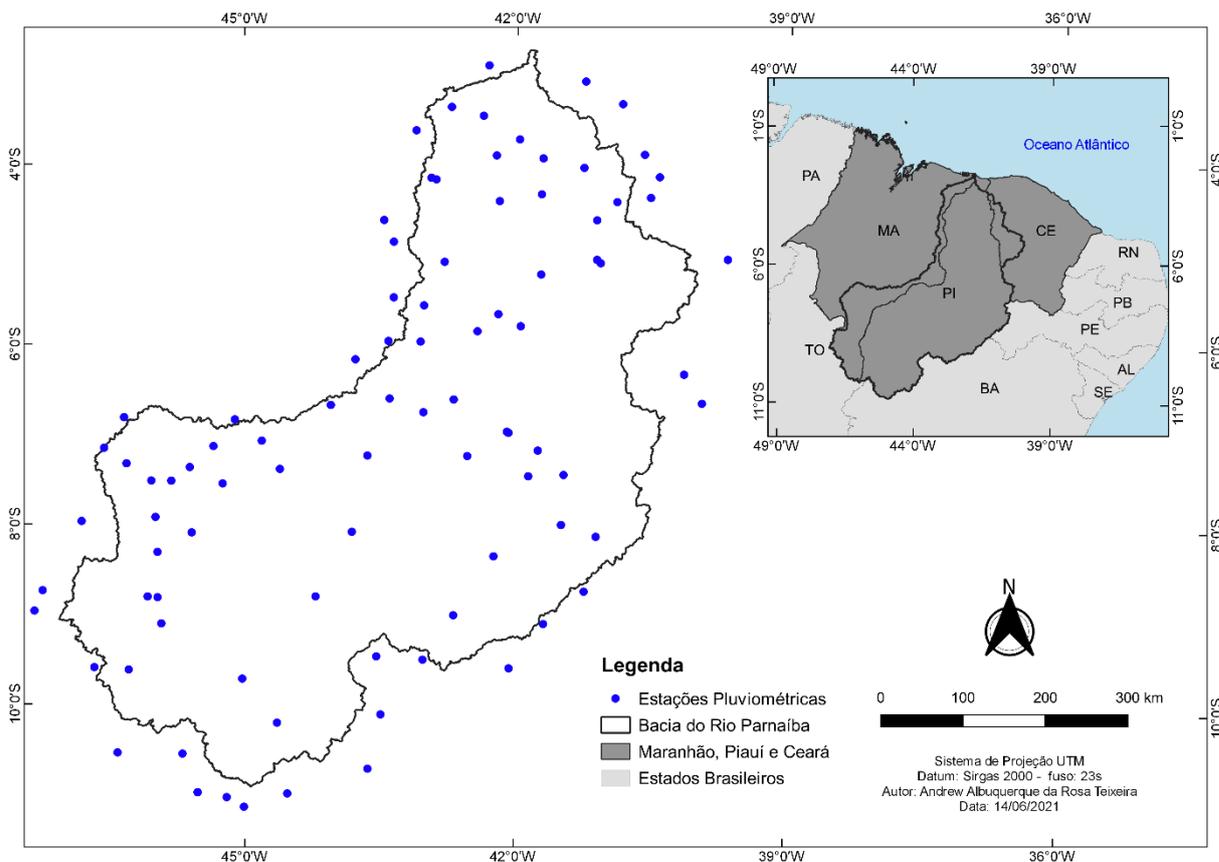


Fonte: O autor, 2020

A lista das estações pluviométricas utilizadas para o estudo da bacia do Rio das Velhas pode ser encontrada no anexo A deste trabalho.

Fazendo as mesmas considerações, para a bacia do Rio Parnaíba foram definidas 90 estações pluviométricas com dados diários entre 01/01/1982 e 31/08/2019.

Figura 12 - Estações pluviométricas para estudo da bacia do Rio Parnaíba



Fonte: O autor, 2020

A lista das estações pluviométricas utilizadas para o estudo da bacia do Rio das Velhas pode ser encontrada no anexo A deste trabalho.

Devido à grande quantidade de estações pluviométricas a serem utilizadas no estudo, em decorrência da área da bacia ser relativamente grande, foi utilizada uma rotina em linguagem Python para fazer o download das estações de forma automatizada no portal Hidroweb. Tal algoritmo realiza o procedimento a partir do reconhecimento dos códigos das estações pluviométricas que devem estar inseridas em um arquivo do tipo .txt. O código e seu tutorial de utilização encontram-se disponíveis no repositório: <https://github.com/mayaraarrudaeng/Hidroweb.git> (GOMES, 2019).

3.2.1.3 Séries Fluviométricas

Foi selecionado um posto de vazão, tanto para a bacia hidrográfica do Rio das Velhas, quando para a do Parnaíba, ambos disponíveis no portal Hidroweb (ANA). Tais

estações fluviométricas foram utilizadas para analisar e comparar a vazão simulada nos modelos hidrológicos com a observada e partir daí realizar a calibração e validação dos resultados dos modelos hidrológicos. A escolha pelas referidas estações fluviométricas baseou-se em dois princípios: a presença de dados no intervalo temporal do estudo e que apresentasse o menor número de falhas. Dessa forma, para a bacia do Rio das Velhas, os dados diários de vazão do posto referem-se também ao período de 01/06/1941 a 07/03/2019. A Tabela 4 apresenta as principais informações relativas ao posto de vazão escolhido:

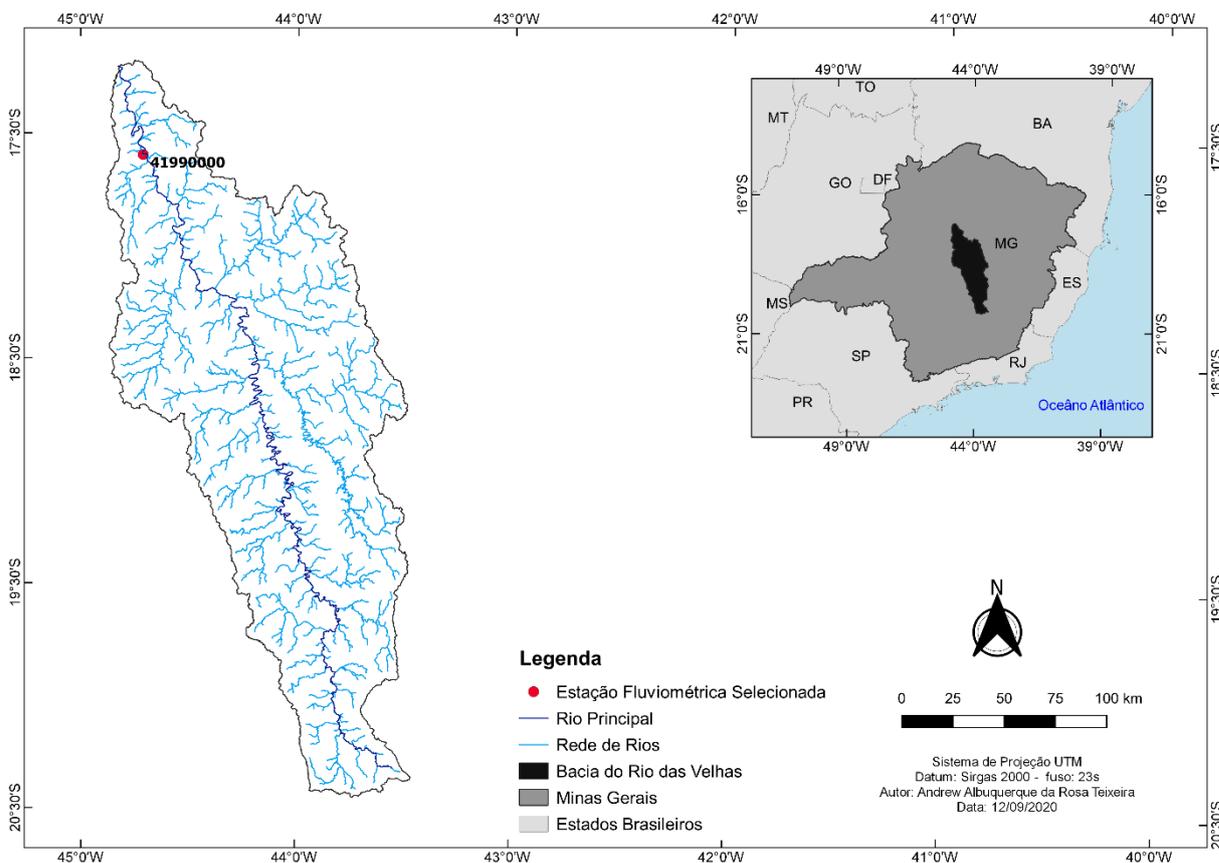
Tabela 4 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio das Velhas

Código	Nome	Área de Drenagem (km ²)	Coordenadas Geográficas	
			Latitude	Longitude
41990000	Várzea da Palma	26500,00	-17,5961	-44,7132

Fonte: O autor, 2020

A figura a seguir apresenta a localização de tal posto em relação a bacia do Rio das Velhas:

Figura 13 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

De forma análoga, para a bacia hidrográfica do Parnaíba foi selecionada a estação fluviométrica 34879500, cujas principais informações são apresentadas na Tabela 5. Os dados diários de vazão referem-se ao período de 01/01/1982 e 31/08/2019:

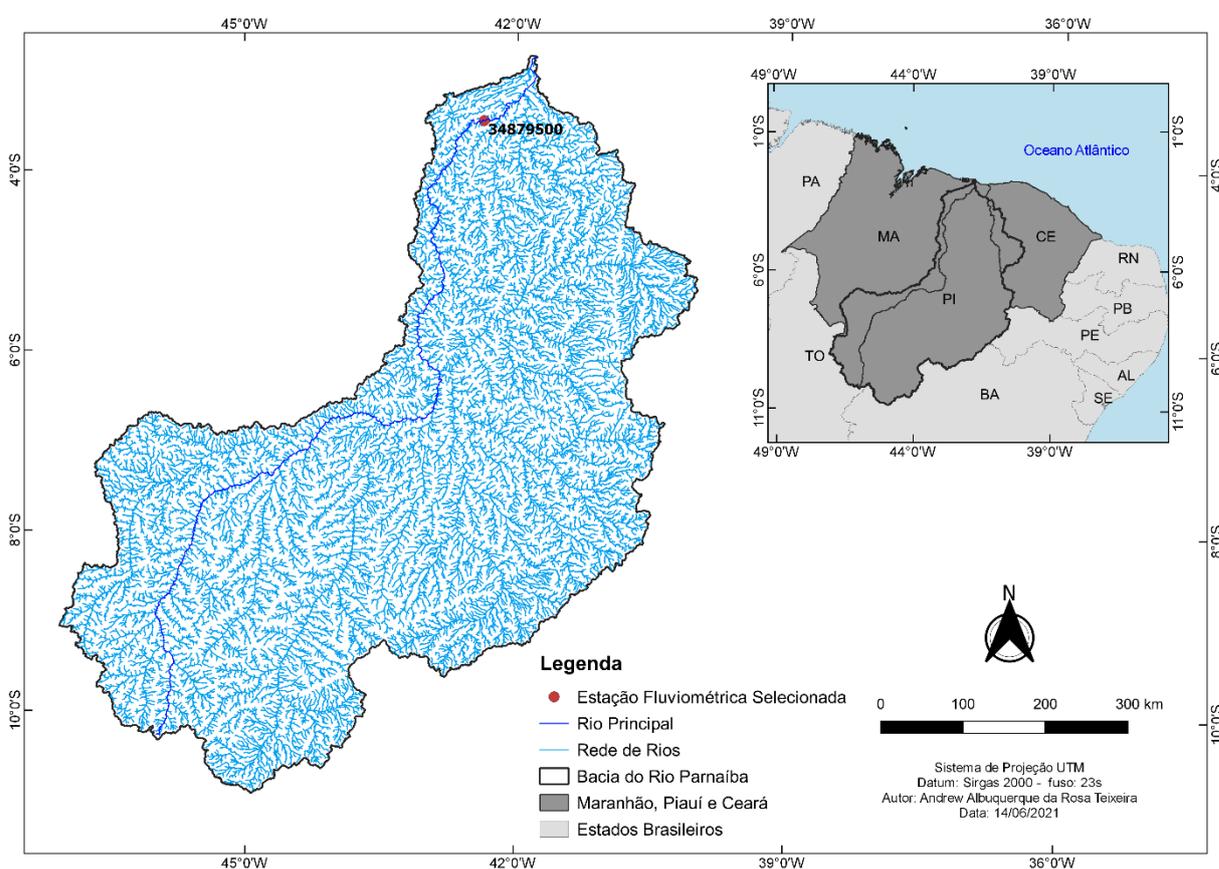
Tabela 5 - Estação fluviométrica para a bacia do Rio Parnaíba

Código	Nome	Área de Drenagem (km ²)	Coordenadas Geográficas	
			Latitude	Longitude
34879500	Luzilândia	298000,00	-3,4539	-42,3700

Fonte: O autor, 2020

Na Figura 14 é possível observar a localização do posto considerado no estudo:

Figura 14 - Estação fluviométrica escolhida para o estudo da bacia do Parnaíba



Fonte: O autor, 2020

Os dados fluviométricos foram tratados antes de serem utilizados no modelo hidrológico. Foi utilizado um código em linguagem Python denominado de “matriz_vazão”, que cria uma planilha com os valores de vazão ordenados em dias corridos definidos anteriormente. Tal rotina facilita a entrada de dados no CAWM e encontra-se disponível em: <https://github.com/mayaraarrudaeng/matrizvazao.git> (GOMES, 2019).

3.2.1.4 Evapotranspiração Potencial

As informações referentes à evapotranspiração potencial foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Como as áreas de estudos são relativamente grandes utilizaram-se as normais climatológicas referentes ao período de 1981 a 2010 de quatro estações, para o caso da bacia do Rio das Velhas, e de treze estações, no caso da bacia do Parnaíba. Com o objetivo de melhor representar as regiões de estudo, calculou-se as médias diárias de tais valores. A Tabela 6 apresenta os valores das normais dos postos utilizados para a bacia do Rio das Velhas e a Tabela 7 fornece os valores médios diários para cada mês calculados a partir dos dados da Tabela 6.

Tabela 6 - Normais climatológicas para estudo da Rio das Velhas

Normal	Belo Horizonte	Divinópolis	C. do Mato Dentro	Diamantina
Mês	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)
1	154,3	157,5	140,7	116,6
2	131,8	133,6	124,7	102,6
3	133,0	132,9	125,4	100,7
4	112,0	108,9	101,5	4,0
5	94,8	83,0	85,0	79,2
6	75,7	62,6	63,5	64,2
7	81,3	70,1	66,5	67,8
8	105,8	95,0	81,0	82,3
9	125,4	118,8	106,1	101,1
10	146,9	146,2	134,3	116,9
11	141,1	138,9	132,3	110,5
12	149,9	147,5	143,4	113,0

Fonte: (INMET, 2010)

Tabela 7 - Valores médios diários das normais climatológicas

Normal	Média
Mês	Dia (mm)
1	4,6
2	4,4
3	4,0
4	2,7
5	2,8
6	2,2
7	2,3
8	2,9
9	3,8
10	4,4
11	4,4
12	4,5

Fonte: O autor, 2020

Analogamente, são apresentadas as normais climatológicas das estações consideradas no estudo da bacia hidrográfica do Rio Parnaíba na Tabela 8 e na Tabela 9 mostra os valores diários calculados a partir das normais climatológicas.

Tabela 8 - Normais climatológicas para a bacia do Rio Parnaíba

Normal	Bom Jesus do Piauí	Caldeirão	Caracol	Esperantina	Floriano	Luzilândia	Morro dos Cavalos
Mês	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)
1	228,9	212,0	156,5	198,2	216,2	230,2	220,2
2	201,3	164,3	130,5	161,5	168,4	174,0	163,2
3	206,7	160,1	133,9	161,9	172,5	186,3	161,5
4	184,7	152,2	123,0	151,4	162,2	174,0	155,1
5	190,9	162,9	126,2	155,1	178,1	182,3	169,6
6	172,3	147,7	109,6	149,7	172,6	168,5	163,0
7	185,6	167,5	115,8	159,8	210,2	185,0	180,1
8	224,7	195,7	141,7	178,3	261,1	215,4	215,3
9	268,9	220,3	174,2	192,8	312,2	242,0	259,9
10	292,9	230,4	203,5	210,2	340,2	258,6	314,3
11	267,1	239,7	192,8	212,4	305,3	251,2	287,6
12	256,7	241,9	170,8	217,5	252,6	260,8	251,2
Normal	Paulistana	Picos	Piripiri	João do Piauí	Teresina	Vale do Gurgueia	
Mês	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	Mensal (mm)	
1	227,7	251,9	211,2	226,2	201,2	192,5	
2	172,5	180,7	163,7	175,6	158,4	153,2	
3	176,5	179,1	166,4	172,2	166,3	160,9	
4	154,8	159,0	148,8	165,9	152,5	158,1	
5	175,9	174,3	157,3	177,0	159,6	171,5	
6	150,1	166,1	154,1	164,8	147,2	148,8	
7	159,7	179,5	175,9	177,4	169,0	168,5	
8	189,3	223,4	194,0	212,6	191,3	217,4	
9	238,1	274,4	210,8	269,6	222,1	255,0	
10	286,1	325,7	233,9	306,9	260,3	284,9	
11	279,0	321,3	242,3	295,6	252,5	262,5	
12	268,2	313,3	247,8	255,6	249,6	203,1	

Fonte: (INMET, 2010)

Tabela 9 - Valores médios diários das normais climatológicas

Normal	Média
Mês	Dia (mm)
1	4,6
2	4,4
3	4,0
4	2,7
5	2,8
6	2,2
7	2,3
8	2,9
9	3,8
10	4,4
11	4,4
12	4,5

Fonte: O autor, 2020

3.2.2 Delimitação da bacia e definição da rede de drenagem

A delimitação das bacias do Rio das Velhas e do Parnaíba e a definição de suas respectivas redes de drenagem foram realizadas a partir do MDE de 30m do SRTM. Foi utilizado o software de geoprocessamento QGIS na sua versão 2.18.7 e o pacote de ferramentas para construção de análises hidrológicas TauDem (Terrain Analysis Using Digital Elevation Model). Dessa forma, foram realizados a sequência dos seguintes processos:

- a) Pit Remove
- b) Flow Direction
- c) Contributing Area
- d) Stream Definition by Threshold
- e) Stream Reach and Watershed

Após a definição da drenagem e da delimitação das bacias hidrográficas, foi possível a determinação dos parâmetros fisiográficos necessários para o cálculo do parâmetro K, definido pela equação (16), e que é fundamental a aplicação do modelo hidrológico proposto. Dessa forma foram definidos: o somatório dos comprimentos dos cursos de

água da rede de drenagem em metros (L_i), a área da bacia hidrográfica em km^2 e a declividade média do rio principal em m/m .

3.2.3 Cálculo da Precipitação Média

Antes do cálculo da precipitação média propriamente dita, os dados pluviométricos obtidos previamente foram tratados através de uma rotina em linguagem Python desenvolvida por Gomes (2019). Tal algoritmo denominado de “matriz_chuva” consiste em compilar os dados de todas as estações durante um intervalo de tempo definido pelo usuário em uma única planilha do MS Excel em formato .csv (arquivo de valores definido por vírgulas).

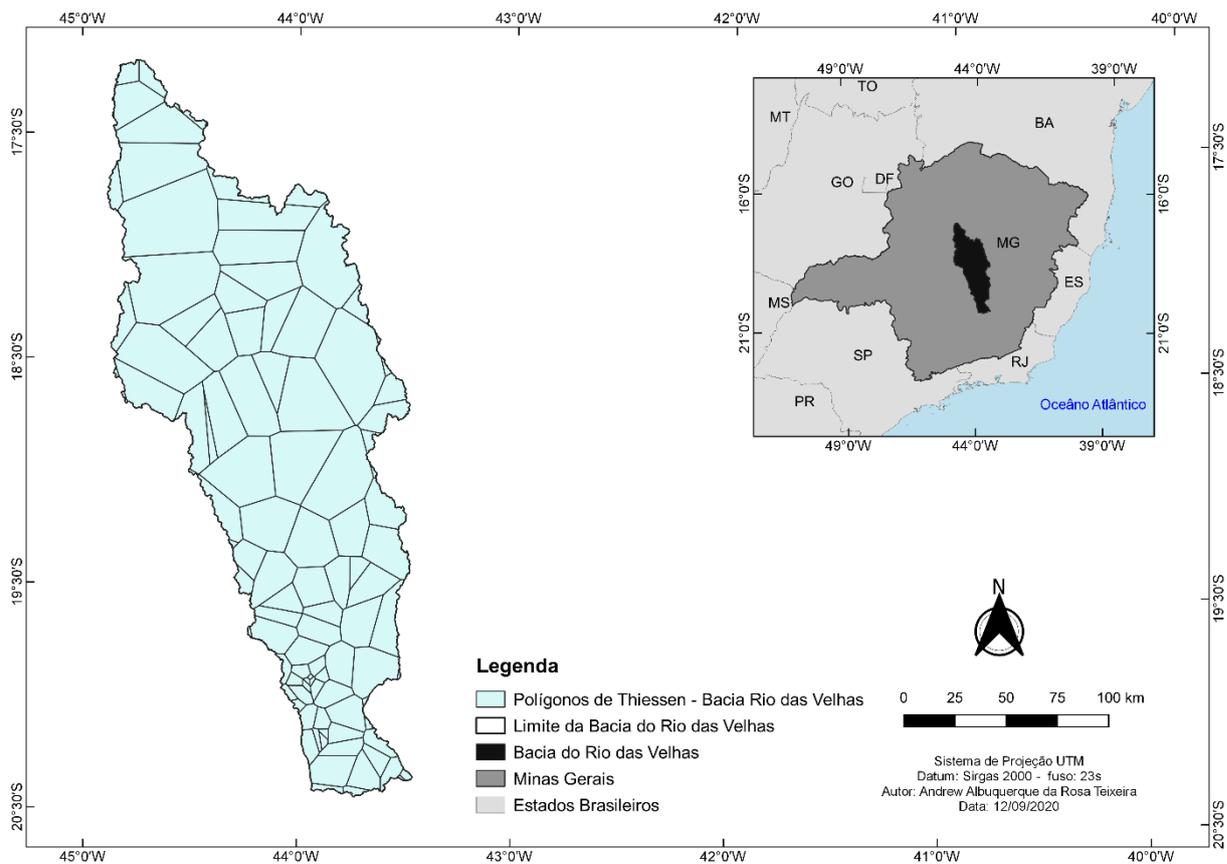
Após esse procedimento inicial, a chuva média foi então calculada por meio do método dos polígonos de Thiessen. Esse método considera a não uniformidade espacial dos postos e calcula a área de influência que cada posto exerce sobre a bacia, de acordo com sua localização geográfica. Em seguida realiza-se uma média ponderada entre as precipitações registradas nas estações pluviométricas na qual os pesos correspondem justamente a área de influência de cada estação sobre a bacia hidrográfica, conforme pode ser observado na equação (53) a seguir:

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A_b} \quad (53)$$

Em que A_i corresponde a área de influência do posto i , P_i é a precipitação registrada no posto i e A_b é a área total da bacia.

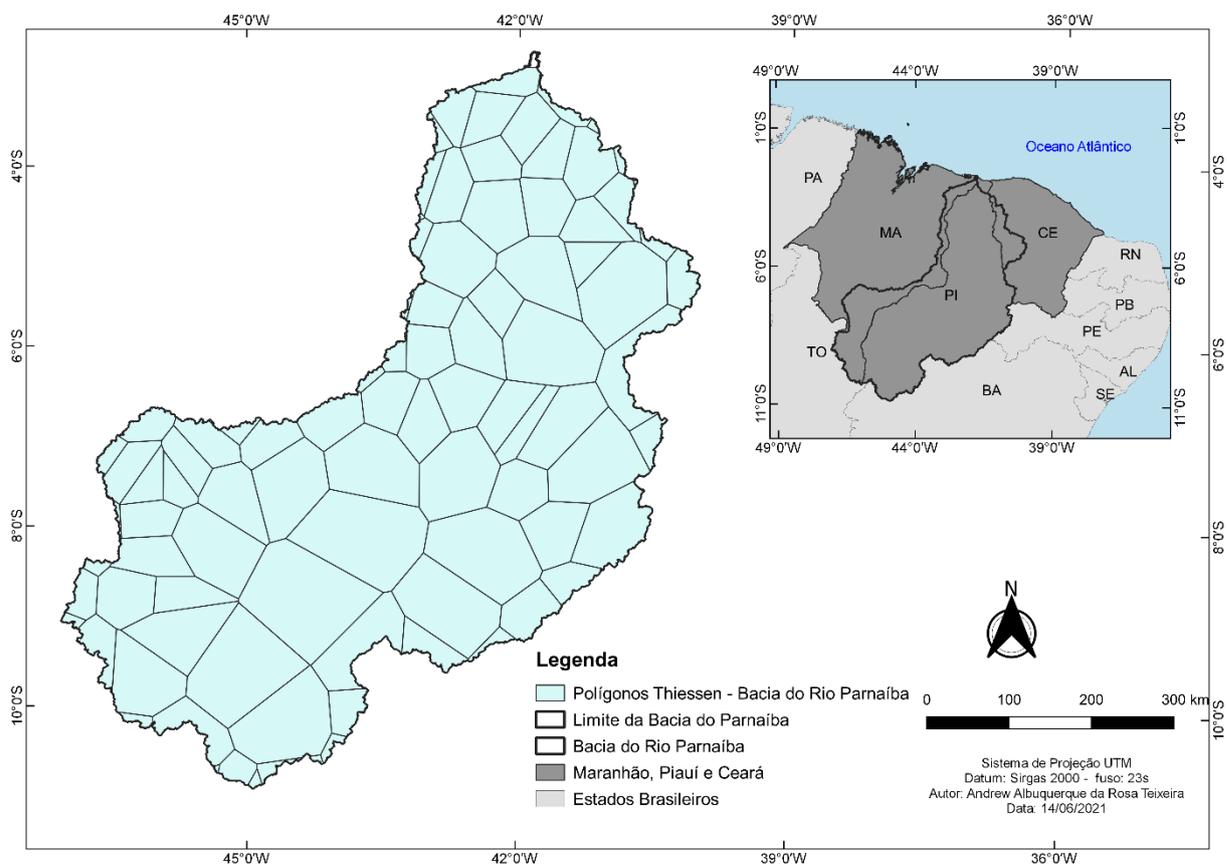
A determinação dos polígonos de Thiessen foi realizada através do software QGIS através da ferramenta Polígonos de Voronoi. Posteriormente foram calculadas as áreas de influência de cada estação sobre a bacia hidrográfica. Os polígonos de Thiessen para as bacias do Rio das Velhas e do Rio Parnaíba são apresentados na Figura 15 e Figura 16, respectivamente:

Figura 15 - Polígonos de Thiessen para a bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

Figura 16 - Polígonos de Thiessen para a bacia do Rio Parnaíba



Fonte: O autor, 2020

3.2.4 Cálculo do tempo de concentração e do “lagtime”

O “lagtime” é normalmente calculado como uma fração entre 40 e 60% do tempo de concentração. As fórmulas disponíveis na literatura sobre o cálculo do tempo de concentração se restringem a bacias com áreas de até 10.000 km². Salimi et al (2016) apresentam duas fórmulas, atribuídas a Bransby-Williams e Passini (equações 56 e 57, respectivamente), atribuídas como apropriadas para grandes bacias.

Por Bransby-Williams tem-se que:

$$T_c = 58.8LA^{-0,1}S^{0,2} \quad (55)$$

Onde L é o comprimento do rio principal em km, A corresponde a área da bacia hidrográfica em km² e S é a declividade da em m/km.

Por Passini tem-se que:

$$T_c = 58.8(AL)^{-0,333}S^{0,0,5} \quad (56)$$

Onde L é o comprimento do rio principal em km, A corresponde a área da bacia hidrográfica em km² e S é a declividade da em m/m.

Os resultados obtidos são identificados na tabela a seguir. Dos valores, apresentados em dias, percebe-se mais adequação para a fórmula de Bransby-Williams.

Tabela 10 - Tempo de concentração de acordo com Bransby-Williams e Passini.

Bacia	Williams (dias)	Passini (dias)
Parnaíba	7,57	60,52
Velhas	8,10	1,18

Fonte: Salimi et al (2016)

Por outro lado, o “lagtime” foi estimado ainda por meio da análise da diferença dos tempos de ocorrência entre os picos de chuva e vazão. Desse estudo buscou-se determinar um valor médio de dias. Ao final, por meio dos dois procedimentos, adotou-se para a bacia do Rio das Velhas o valor de 6 dias, enquanto para a do Parnaíba foi igual a 5 dias.

3.2.5 Redistribuição Espaço Temporal das Precipitações

No modelo hidrológico CAWM, quando o tempo de concentração da bacia é maior que o passo de tempo de simulação, que no caso é um dia (86400 segundos), é necessário considerar o retardo entre a ocorrência da chuva e seu efeito no escoamento até o exutório (lagtime). Para isso é preciso redistribuir a chuva no tempo antes de realizar as simulações. Na modelagem de ambas as bacias foram considerados os dois métodos diferentes para realizar esse processo: o primeiro retarda as séries históricas por posto, conforme as isócronas da região onde o posto pluviométrico se localiza. Assim é feito um ajuste espaço-temporal das precipitações antes do cálculo da chuva média na bacia. O segundo método aplica as vazões médias da bacia as ordenadas do histograma tempo-área sintético calculadas segundo o método de Clark.

3.2.5.1 Redistribuição das precipitações por posto fluviométrico

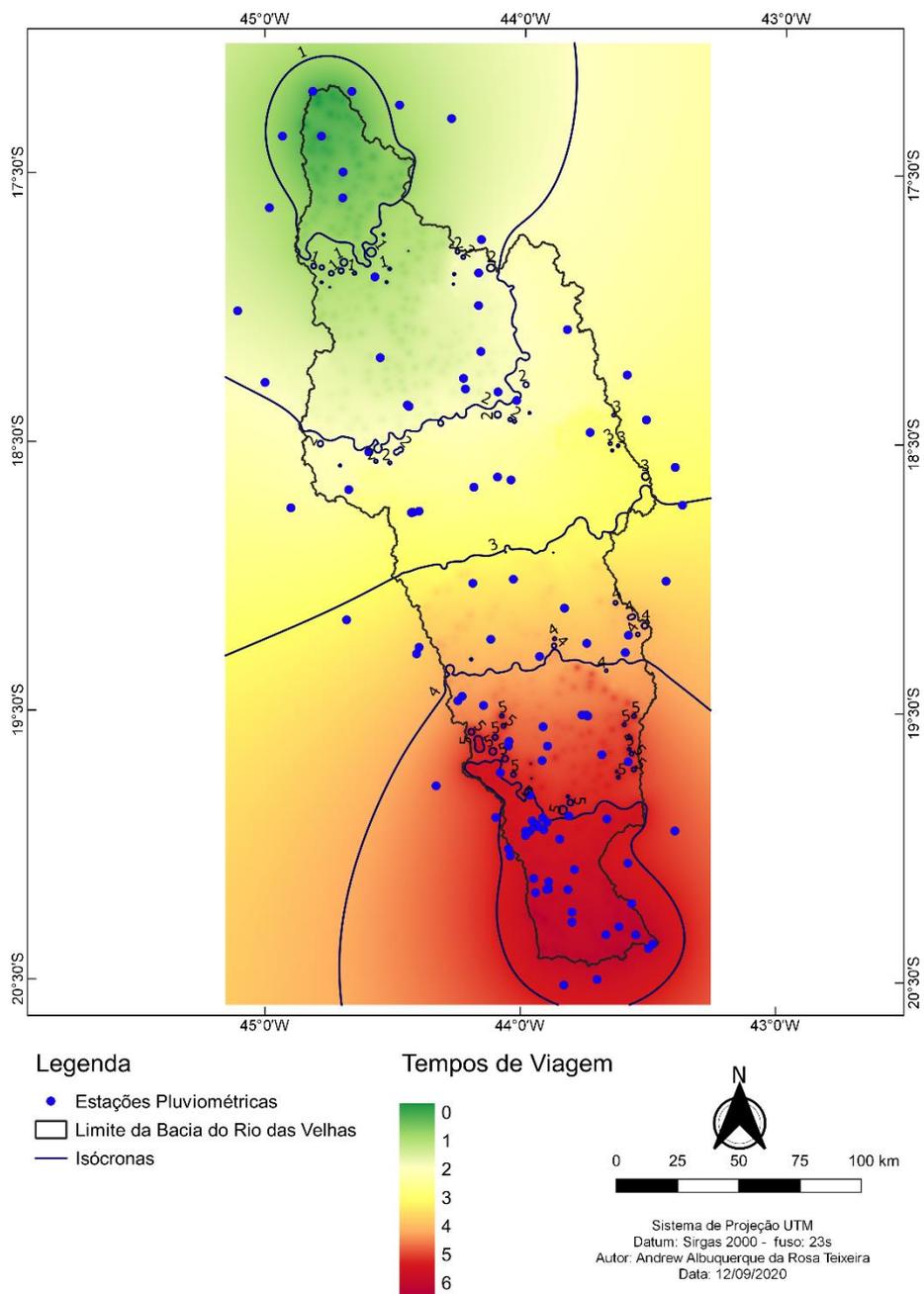
Nesse processo deve-se conhecer previamente o tempo de concentração da bacia e o comprimento do rio mais longo da bacia a ser estudada, para que se possa determinar a velocidade média de escoamento, que foi considerada constante. Na sequência, a partir da rede de drenagem, deve-se calcular a distância de cada rio ao exutório, seguindo o “caminho” natural das águas na bacia hidrográfica. Esses comprimentos são atribuídos a pontos discretos que representam as nascentes de cada rio. Com essas informações e com o valor da velocidade média de escoamento pode-se, portanto, estimar o “tempo de viagem” T_j do volume precipitado naquele local até o exutório, usando como ponderação a fração desta distância/comprimento do rio (limite = 1) e o tempo de concentração. O valor calculado T_j é usado para defasar os dados de precipitação de cada posto. Na sequência obtém-se a chuva média através dos polígonos de Thiessen, ou qualquer outro método de preferência.

De forma sintética, são realizados os seguintes processos:

- a) Calcular a velocidade média de escoamento a partir do tempo de concentração e do comprimento do rio mais longo.
- b) Criar um arquivo *shapefile* que representem as nascentes de cada um dos rios.
- c) Determinar as os comprimentos de cada rio da bacia. Esse processo é automatizado no QGIS através da ferramenta “Caminho mais curto”.
- d) Calcular o “tempo de viagem” T_j nas nascentes dos rios, a partir das distâncias, e atribuir ao arquivo *shapefile* das nascentes dos rios.
- e) Utilizar um método de interpolação, que no caso deste trabalho foi o IDW, utilizando como entrada o arquivo *shapefile* com os “tempos de viagem”. Com isso obtêm-se um arquivo do tipo *raster* em que cada pixel representa o valor estimado do tempo de viagem ao exutório da bacia hidrográfica.
- f) Gerar linhas isócronas, que apresentam igual tempo de viagem, a partir do arquivo *raster*.

Na Figura 17 é apresentado o *raster* final com os tempos de viagem, bem como o traçado das linhas isócronas para a bacia do Rio das Velhas:

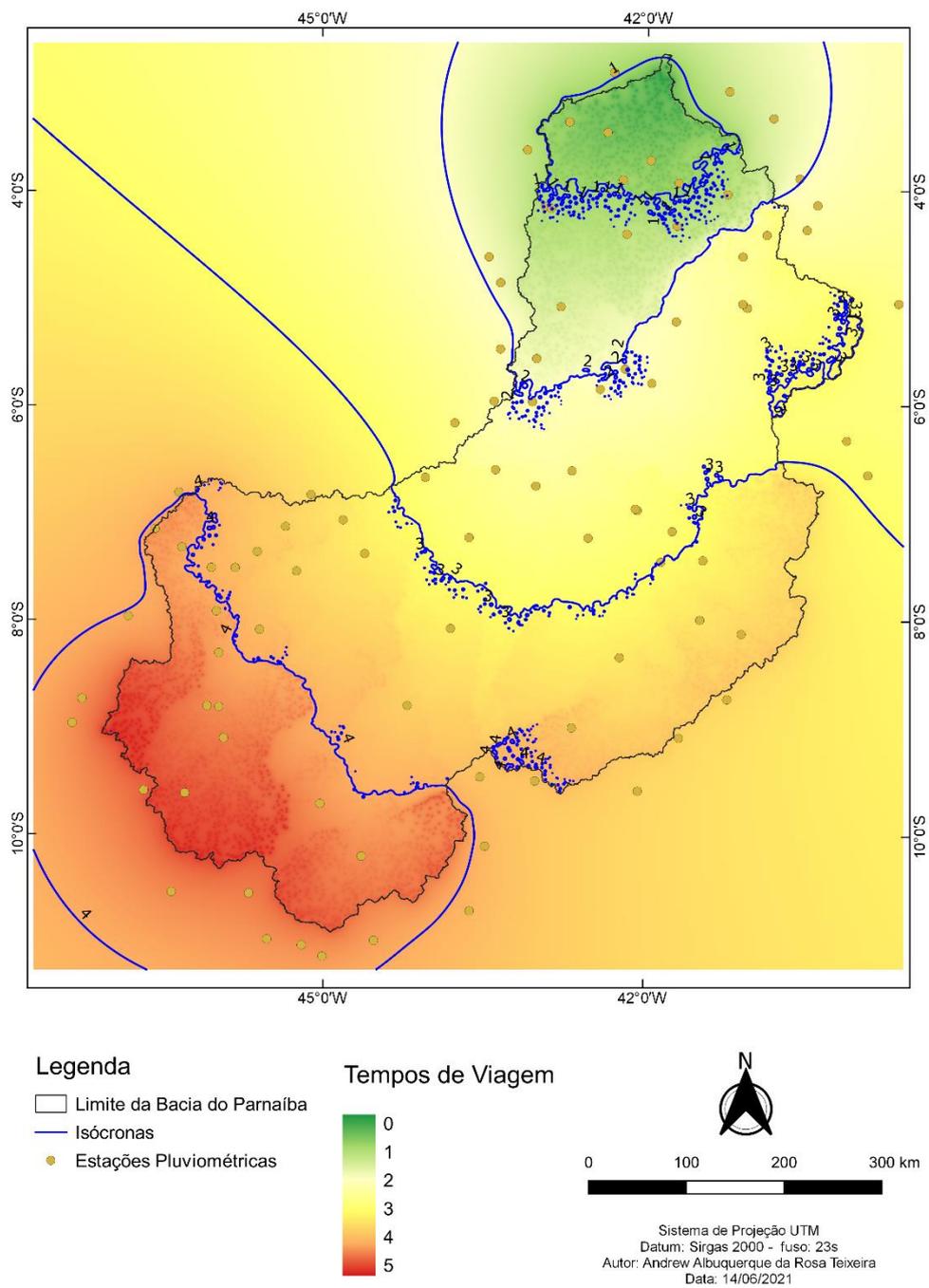
Figura 17 - Tempos de Viagem e Linhas Isócronas



Fonte: O autor, 2020

O mesmo processo foi aplicado à bacia do Parnaíba, cujo resultado é apresentado na Figura 18:

Figura 18 - Tempos de Viagem e Linhas Isócronas



Fonte: O autor, 2020

3.2.5.2 *Redistribuição pelo Método de Clark*

Calcula-se a chuva média e então se aplica a ela um histograma tempo-área com frações para cada dia definidas pelo método de Clark.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA CAWM V

Neste trabalho foi utilizada a versão 5 do Campus Agreste Watershed Model (CAWM V) para a modelagem hidrológica das duas bacias hidrográficas anteriormente apresentadas e que foi desenvolvida especificamente para áreas de clima úmido e subúmido. O modelo, que foi implementado em uma planilha digital em formato MS Excel, primeiramente realiza o balanço hídrico a partir dos dados de entrada requeridos, que são: dados de precipitação, vazão observada, evapotranspiração potencial e a determinação das informações que dizem respeito às características físicas da bacia hidrográfica, estes últimos necessários para o cálculo do parâmetro K presente no cálculo da vazão no ponto de controle da bacia hidrográfica.

Depois de alimentar o modelo com os dados necessários, o modelo realiza todo o cálculo matemático apresentado em detalhes na seção 2.3 e fornece as vazões calculadas. De forma automatizada, o CAWM V também realiza os cálculos dos indicadores estatísticos responsáveis pela avaliação de qualidade do modelo hidrológico, que são: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e suas derivações $NSE_{\log Q}$ e $NSE_{\sqrt{Q}}$, o coeficiente de determinação (R^2), o erro percentual médio (Pbias), a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e a razão entre o RMSE e o desvio padrão (RSR). Tais índices foram apresentados detalhadamente no item 2.3.3 deste trabalho.

Com o cálculo dos índices estatísticos deve ser avaliado qual será o intervalo da série de dados será escolhido para calibração do modelo hidrológico, utilizando como variáveis os parâmetros calibráveis definidos na seção 2.3.2 (K_s , K_L , K_G e β). A otimização é executada através do solver do MS Excel utilizando o método GRG não linear.

Após à calibração, todos os demais intervalos da série de dados são calibrados a partir dos parâmetros obtidos.

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM OS MODELOS GR4J E MGB-IPH

Com o objetivo de aprimorar o modelo chuva-vazão CAWM e comparar sua performance, foram aplicados exclusivamente à Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas dois modelos hidrológicos de referência: o GR4J (Génie Rural à 4 Paramètres Journalier) e o MGB-IPH. O primeiro é um modelo concentrado e o segundo é um modelo de grandes bacias distribuído desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ambos já discutidos no capítulo 2. O objetivo é comparar os resultados obtidos em cada um deles com os resultados obtidos com o CAWM.

3.4.1 GR4J (Génie Rural à 4 Paramètres Journalier)

A modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio das Velhas através do GR4J foi realizada através de uma planilha digital no MS Excel, tal qual o CAWM V.

O modelo é de simples aplicação e requer como dados de entrada informações hidrológicas, quais sejam: as séries diárias de precipitação (mm), de evapotranspiração (mm) e de vazão observada (m³/s). Além desses, também é necessário informar a área (km²) da bacia hidrológica, as taxas iniciais de enchimento dos reservatórios de produção (S_0/X_1) e roteamento (R_0/X_3), bem como os valores transformados dos parâmetros do modelo (X_1 , X_2 , X_3 e X_4).

Segundo orientações para aplicação do modelo, a utilização de valores transformados facilita o processo de otimização. Para facilitar o entendimento as relações entre os valores transformados e os reais são apresentadas nas equações () a ():

$$X_1 = e^a \quad (57)$$

$$X_2 = \sinh b \quad (58)$$

$$X_3 = e^c \quad (59)$$

$$X_4 = e^d + 0,5 \quad (60)$$

Inseridas todas as informações requeridas pelo GR4J, a planilha calcula para cada passo de tempo as suas variáveis internas e fornece a vazão calculada, conforme descrito no item 2.4. Vale destacar que o cálculo das ordenadas dos dois hidrogramas unitários, que são calculadas a partir do parâmetro X4, atingem valores apropriados quando tal parâmetro é inferior a 10 dias.

De forma automatizada, a planilha também calcula 4 critérios de eficiência, que são: Nash-Sutcliffe, Nash-Sutcliffe da raiz quadrada das vazões, Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões e o Bias. Por fim, para a otimização do modelo é realizada através da ferramenta Solver do MS Excel, busca maximizar o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe utilizando como variáveis os parâmetros calibráveis do modelo.

3.4.2 Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH

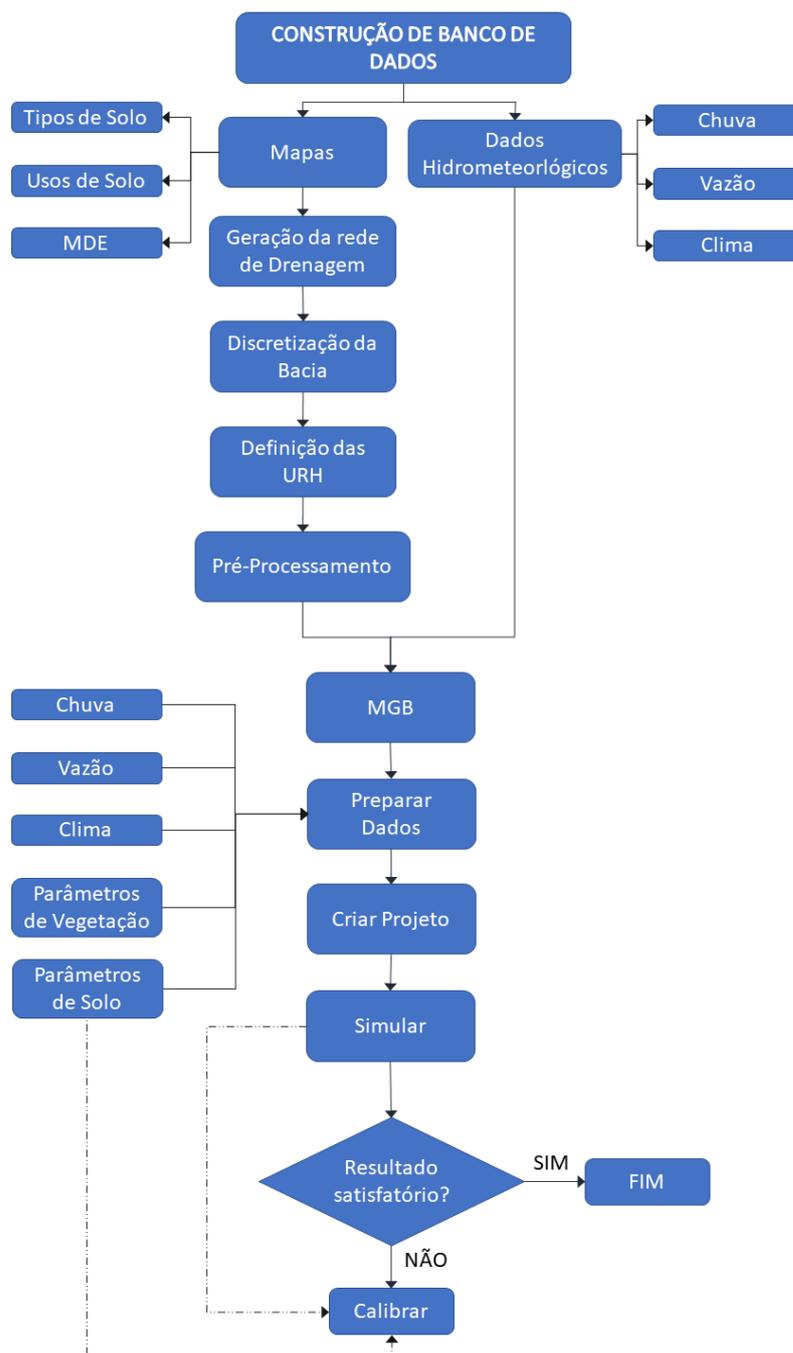
Para a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio das Velhas através do MGB-IPH foi utilizada a interface desenvolvida para o software QGIS.

O pré-processamento dos arquivos de entrada foi realizado através do pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools, enquanto o plugin MGB foi utilizado para realizar as simulações hidrológicas do modelo.

O plugin IPH-Hydro Tools gera os arquivos descritores do terreno como: rede de drenagem, delineamento da bacia hidrográfica, minibacias e definição das classes de resposta hidrológica.

Para entender melhor todo processo pode-se analisar a Figura 19 apresenta o fluxograma de aplicação do modelo MGB:

Figura 19 - Fluxograma de aplicação do modelo MGB



Fonte: (Medeiros, et al., 2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na modelagem hidrológica das bacias do Rio das Velhas e do Parnaíba com o modelo desenvolvido CAWM V. Além disso também são apresentadas as modelagens hidrológicas através dos modelos GR4J e MGB, além de ser feita uma comparação entre o que se obteve de resultado entre os três modelos utilizados.

4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO CAWM V

Antes de iniciar a modelagem, propriamente dita, cabe ressaltar que os tempos de concentração de ambas as bacias em estudo foram maiores do que 1 dia ou 86400s. Dessa forma, os procedimentos de redistribuição espaço-temporal, descritos no item 3.2.5, foram aplicados para redistribuir a precipitação registrada em cada estação.

Um aspecto importante e que cabe ser mencionado é que a simulação do modelo CAWM é contínua, porém, na sua estrutura antiga, seus resultados eram apresentados por eventos. Essa forma de apresentação é justificada pelo fato de que tal modelo foi concebido para atender a simulações de regiões semiáridas e nessas áreas existem anos que não apresentam dados.

Neste trabalho, foi utilizada a versão nova do modelo, em que foram mantidos os eventos anuais, mas foram incorporados ao modelo os resultados de longo termo, como poderá ser percebido nos resultados a serem apresentados.

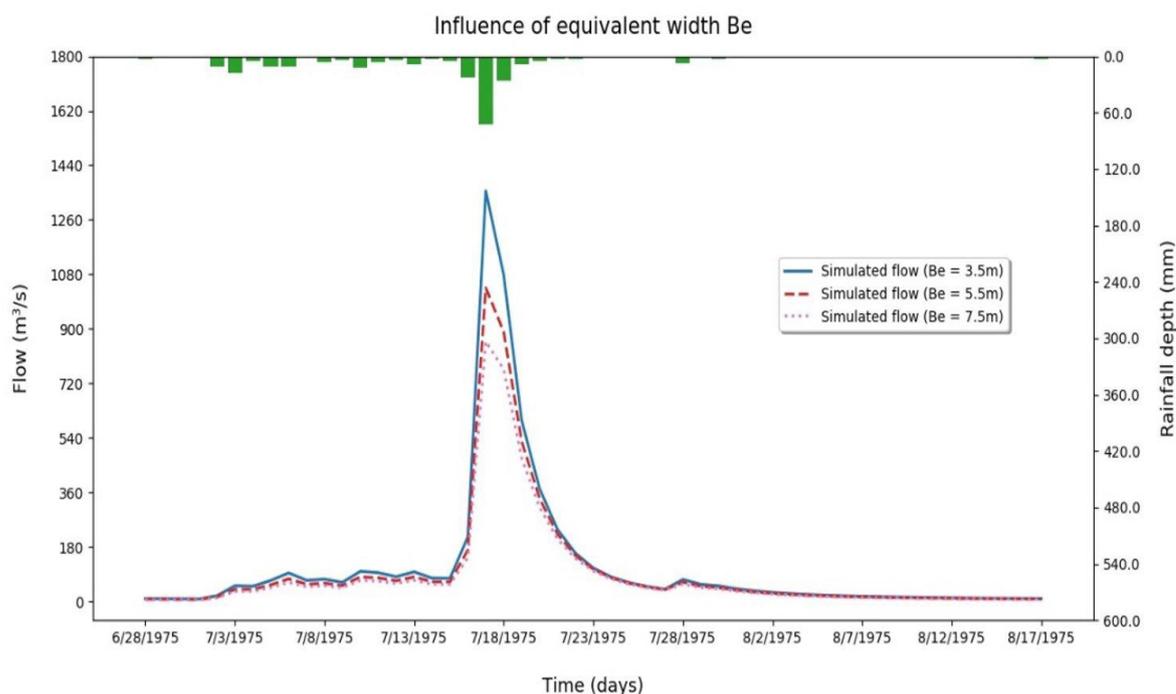
4.1.1 Dados de entrada

O modelo CAWM V foi aplicado às bacias hidrográficas do Rio das Velhas e do Parnaíba numa simulação contínua com passo de tempo diário. O intervalo de tempo escolhido para a modelagem cobriu uma ampla gama de condições hidrológicas e variou com de acordo com a disponibilidade de dados. Portanto, tais períodos foram diferentes para cada bacia. No caso do Rio das Velhas, a modelagem foi realizada

entre os anos de 1941 e 2019 e para a bacia do Parnaíba foi realizada a simulação no intervalo entre 1982 e 2019.

Conforme explanado no capítulo anterior, o CAWM V requer a introdução de alguns parâmetros para realizar o cálculo da vazão simulada. Primeiramente deve-se alimentar o modelo com os dados de precipitação, vazão observada no exutório evapotranspiração potencial. Além desses dados, deve-se determinar também algumas características físicas das bacias para o cálculo do parâmetro K (coeficiente utilizado na equação do escoamento da calha fluvial), conforme definido pela equação (16), sendo elas: declividade do rio principal (I , em m/m), área da bacia de contribuição (A_b , em km²), comprimento total da rede de rios da bacia (L_t , em metros), largura equivalente da seção transversal dos rios (B_e , em metros), coeficiente de Manning (n), intervalo de tempo (Δt , em segundos) e constante de conversão de unidades (c). Dessas características físicas apenas B_e e o coeficiente de manning n não são obtidos por geoprocessamento e foram estimados.

Em ambos os casos estudados, o coeficiente de Manning n , que fisicamente corresponde à rugosidade da calha dos rios, foi estimado em 0,03. Já a largura equivalente B_e , também estimada, pode ser definida em uma rodada inicial a partir da magnitude dos picos de cheia. Seu valor inversamente proporcional aos valores dos picos de vazão calculadas no hidrograma, ou seja, para valores maiores de B_e as vazões de pico diminuem (GOMES, 2019), conforme pode ser observado na Figura 20. Tanto para a bacia do Rio das Velhas, quanto para a do Parnaíba o B_e foi estimado como sendo igual a 2m.

Figura 20 - Influência do parâmetro B_e nas vazões do CAWM

Fonte: (GOMES, 2019)

Todos os valores obtidos para ambas as bacias em estudo podem ser observados na Tabela 11:

Tabela 11 - Parâmetros físicos para determinação do coeficiente K

Parâmetro	Descrição	Bacia do Rio das Velhas	Bacia do Parnaíba
I (m/m)	Declividade média	0,0007	0,0005
A_b (km ²)	Área da bacia	27862	330903
L_t (km)	Extensão total rede de rios	5802	83571
B_e (m)	Largura equivalente	2,00	2,00
n	Coefficiente de Manning	0,03	0,03
Δt (s)	Intervalo de tempo	86400	86400
c	Coefficiente de conversão	1000	1000
K	-	0,0235	0,0013

Fonte: O autor, 2020

Vale ressaltar que os demais parâmetros do modelo foram definidos conforme a seção 2.3.2 deste trabalho. Tais parâmetros para a bacia do Rio das Velhas e do Parnaíba são apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 - Demais parâmetros do modelo CAWM V

Parâmetro	Descrição	Bacia do Rio das Velhas	Bacia do Parnaíba
ρ	Expoente de perdas	1,00	1,20
α	Parâmetro evapotranspiração	1,40	1,40
b	Constante esc. fluvial	5/3	5/3
G	Capacidade res. profundo	5000	10000
S (mm)	Capacidade de retenção	128,40	111,00

Fonte: O autor, 2020

Determinados os parâmetros anteriores, apresentados na Tabela 11 e na Tabela 12, o que resta é calibrar apenas 4 parâmetros, que são: K_s (parâmetro relacionado a permeabilidade do solo), K_L (coeficiente linear de perdas), K_G (parâmetro relacionado a transferência de água subterrânea) e β (parâmetro relacionado a infiltração). Este último parâmetro foi introduzido recentemente na fórmula da infiltração, apresentada na equação (19), do modelo CAWM V. Em simulações anteriores ele não era um parâmetro calibrável do modelo e era considerado igual a 2. O valor de G deve ser relacionado com a magnitude das vazões, de modo a permitir o escoamento de base.

4.1.2 Calibração dos parâmetros

A calibração do modelo se fez através da escolha de alguns dentre os maiores entre os maiores eventos hidrológicos ocorridos nas bacias. Deste modo, foram escolhidos um total de 79 eventos anuais no caso da bacia do Rio das Velhas e de 39 eventos anuais no caso da bacia do Parnaíba, a serem avaliados para calibração e validação, com base nos indicadores de desempenho do modelo. Quando se fala em evento anual, neste trabalho, considera-se um fluviograma de 365 dias, a partir do qual são calculados os indicadores de desempenho do modelo descritos no item 2.3.3.

A otimização foi feita a partir da maximização da função objetivo apresentada na equação (28), a qual maximiza o NSE e ao mesmo tempo minimiza o somatório dos erros absolutos entre as vazões observadas e calculadas. Os valores finais obtidos são apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 - Valores finais dos parâmetros calibráveis.

Parâmetro	Bacia do Rio das Velhas	Bacia do Parnaíba
K _G	0,0030	0,0002
K _S	0,0031	0,0011
K _L	0,0912	0,3206
β	2,8842	4,8580

Fonte: O autor, 2020

4.1.3 Resultados CAWM V – Rio das Velhas

O resultado das simulações é apresentado em termos dos valores obtidos para as funções objetivo, hidrogramas de vazões diárias (ver apêndice), hidrograma anual médio e curvas de permanência de vazões diárias. São apresentados os resultados obtidos através do método de distribuição e na sequência aqueles referentes ao de Clark.

Os períodos de calibração utilizado para a modelagem da bacia do Rio das Velhas é apresentado na tabela a seguir:

Tabela 14 - Períodos de calibração (bacia do Rio das Velhas)

Método	Data Inicial	Data Final
Chuvras Distribuídas	22/08/1982	21/08/1983
Clark	22/08/1982	21/08/1983

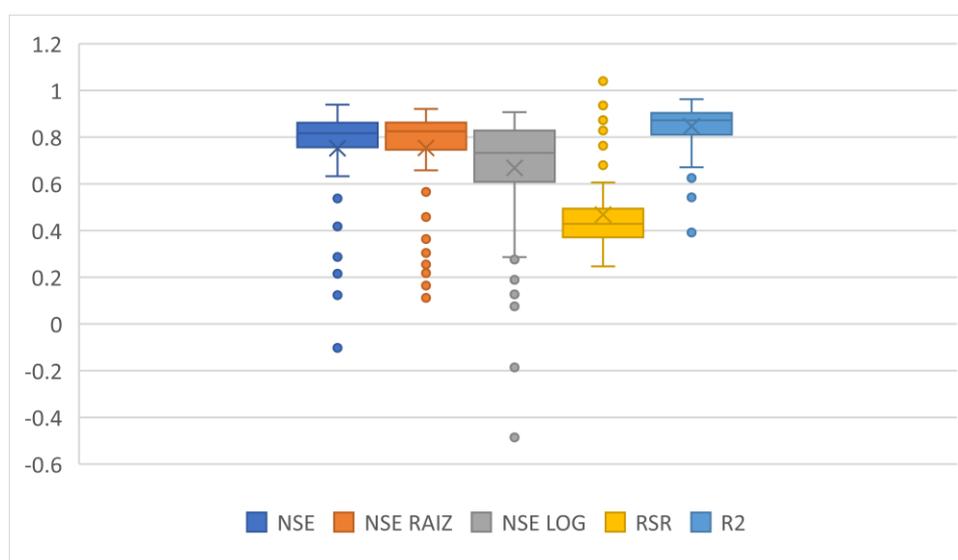
Fonte: O autor, 2020

4.1.3.1 Método 1 - Chuvras distribuídas

Considerando o primeiro método de distribuição das chuvas proposto na seção 3.2.5, o índice de eficiência NSE foi maior do que 0,5 em 89,9% dos eventos. Fazendo a mesma consideração, resultados similares foram obtidos para NSE_{sqrt} e NSE_{log}, obtendo-se 88,6% em ambos os casos. Além disso, o percentual bias variou entre -25% e 25%, em 73,4% dos eventos analisados e o RSR foi menor do que 0,7 em 89,9%. No que se refere ao coeficiente R², este atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 98,7% dos casos analisados pelo modelo.

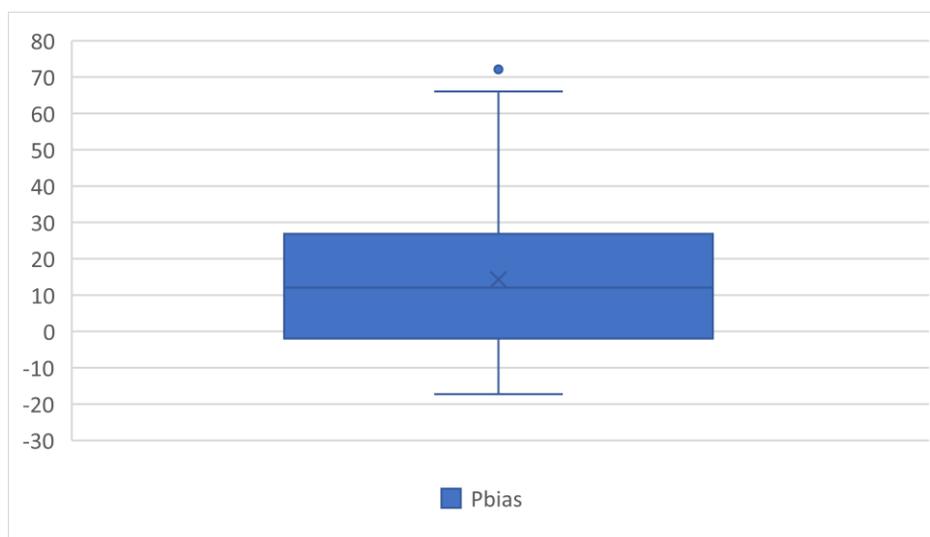
Devido à grande quantidade de eventos estudados, já que para cada ano foram calculados os indicadores de eficiência do modelo, preferiu-se agregar os valores obtidos dos indicadores em forma de diagrama de caixas. No caso do Rio das Velhas são 79 eventos anuais em que os resultados foram agregados nos gráficos seguir.

Gráfico 1 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R²



Fonte: O autor, 2020

Gráfico 2 - Diagrama de caixa do Pbias



Fonte: O autor, 2020

4.1.3.2 Método 2 – Chuvas distribuídas por Clark

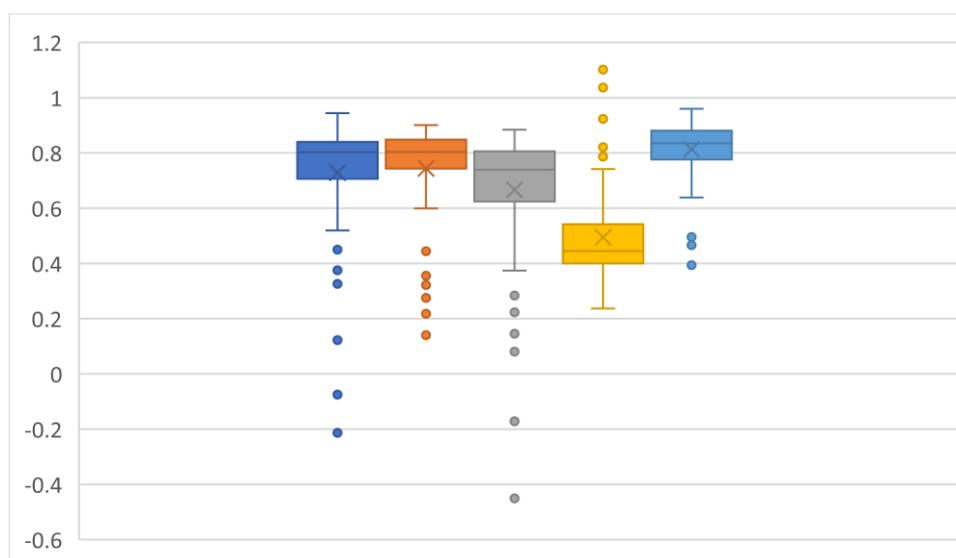
Considerando a aplicação do histograma tempo x área de Clark para fazer a redistribuição das chuvas, obteve-se os coeficientes NSE, NSE_{sqrt} e NSE_{log} , maiores do que 0,5 em 88,6% dos eventos. Considerando os critérios estabelecidos por MORIASI, ARNOLD, *et al.* (2007), os resultados de NSE, NSE_{sqrt} e NSE_{log} foram considerados muito bons, ou seja, maiores do que 0,75, respectivamente, em: 70,9%, 74,7% e 43,0% dos eventos analisados.

O percentual bias variou entre -25% e 25%, em 83,5% dos eventos analisados e o RSR foi menor do que 0,7 em 88,6%. Considerando os critérios da Tabela 1 deste trabalho, o Pbias e o RSR foram considerados muito bons em 40,5% e 70,9% dos casos, respectivamente.

O coeficiente R^2 atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 96,2% dos eventos analisados.

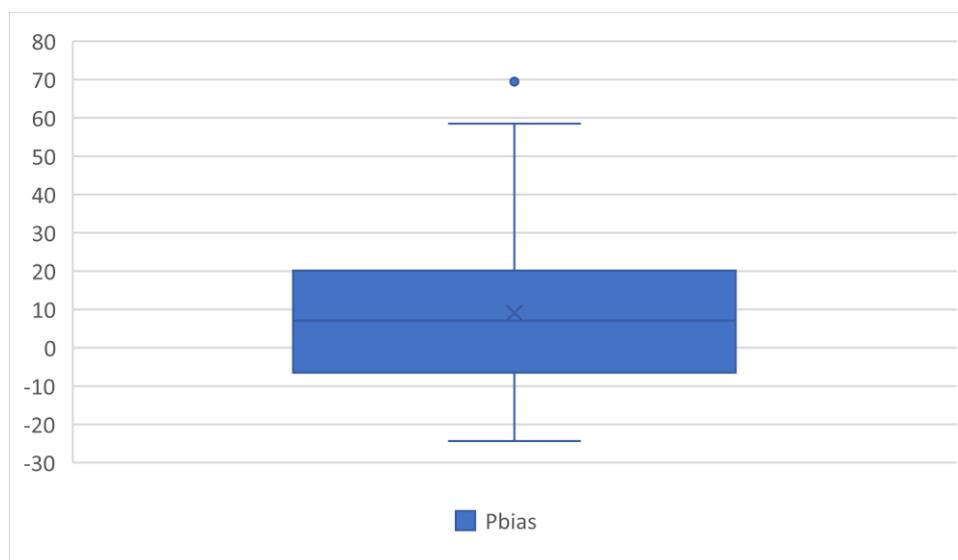
Assim como feito na seção anterior, devido a grande quantidade de eventos, preferiu-se agregar os valores obtidos dos indicadores em forma de diagrama de caixas, conforme apresentado nos gráficos seguir:

Gráfico 3 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R^2 (Clark)



Fonte: O autor, 2020

Gráfico 4 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias) pelo método de Clark

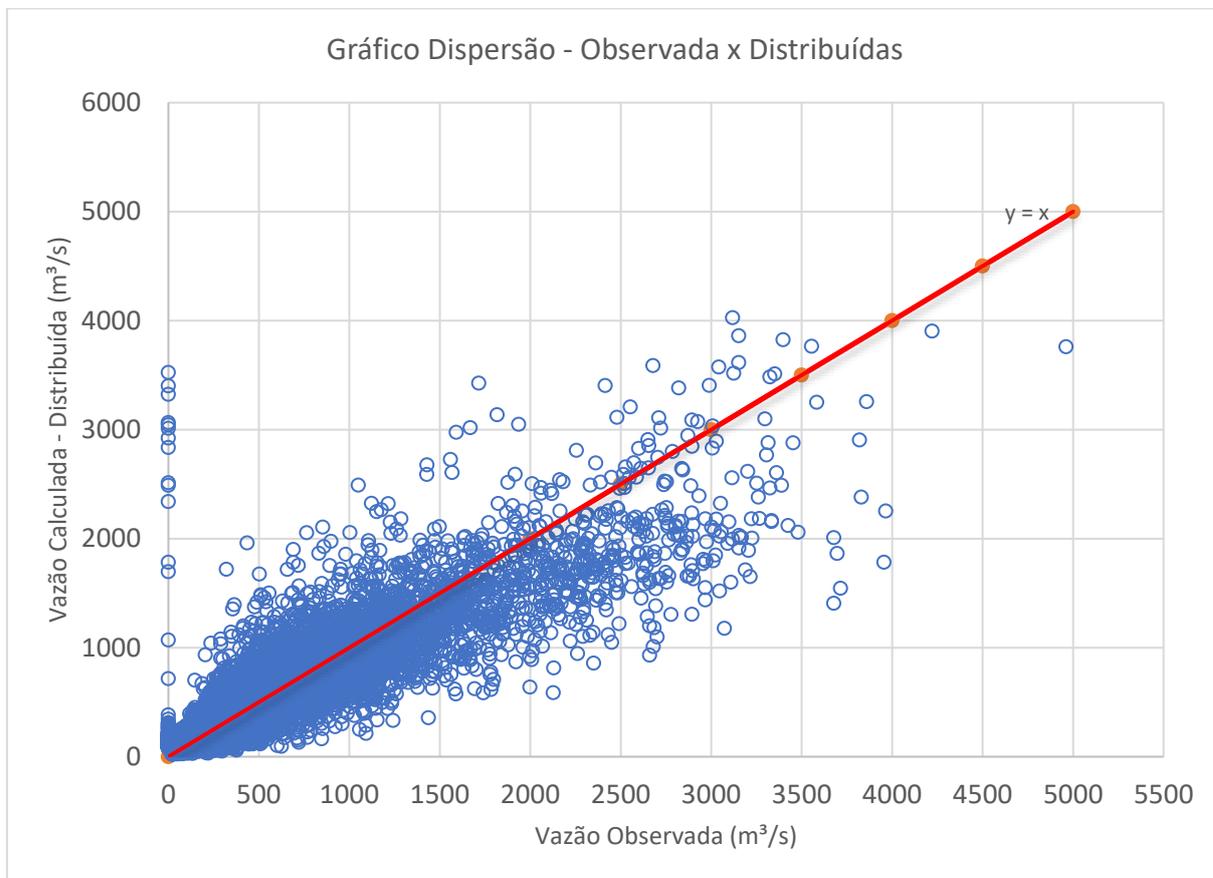


Fonte: O autor, 2020

4.1.3.3 Análises estatísticas – Bacia do Rio das Velhas

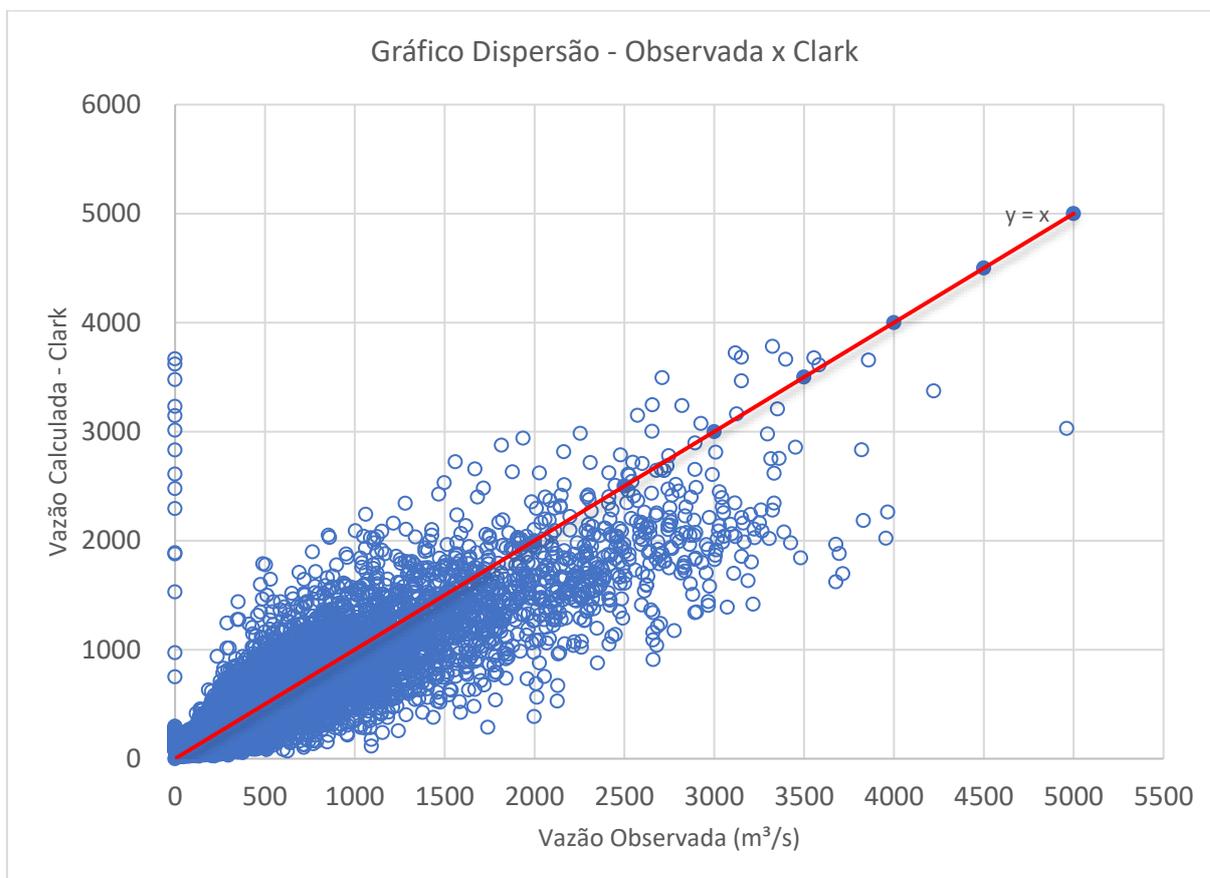
Para correlacionar os resultados obtidos pelos dois métodos de distribuição espaço-temporal das precipitações, foram elaboradas algumas análises estatísticas comprando as vazões observadas com as calculadas. Primeiramente foram elaborados gráficos de dispersão entre as vazões observadas em postos pluviométricos próximos ao exutório da bacia e as vazões calculadas, conforme pode ser observado no Gráfico 5 e no Gráfico 6.

Gráfico 5 - Gráfico de dispersão entre vazões do CAWM V (chuvas distribuídas)



Fonte: O autor, 2020

Gráfico 6 - Gráfico de dispersão entre vazões do CAWM V (Clark)

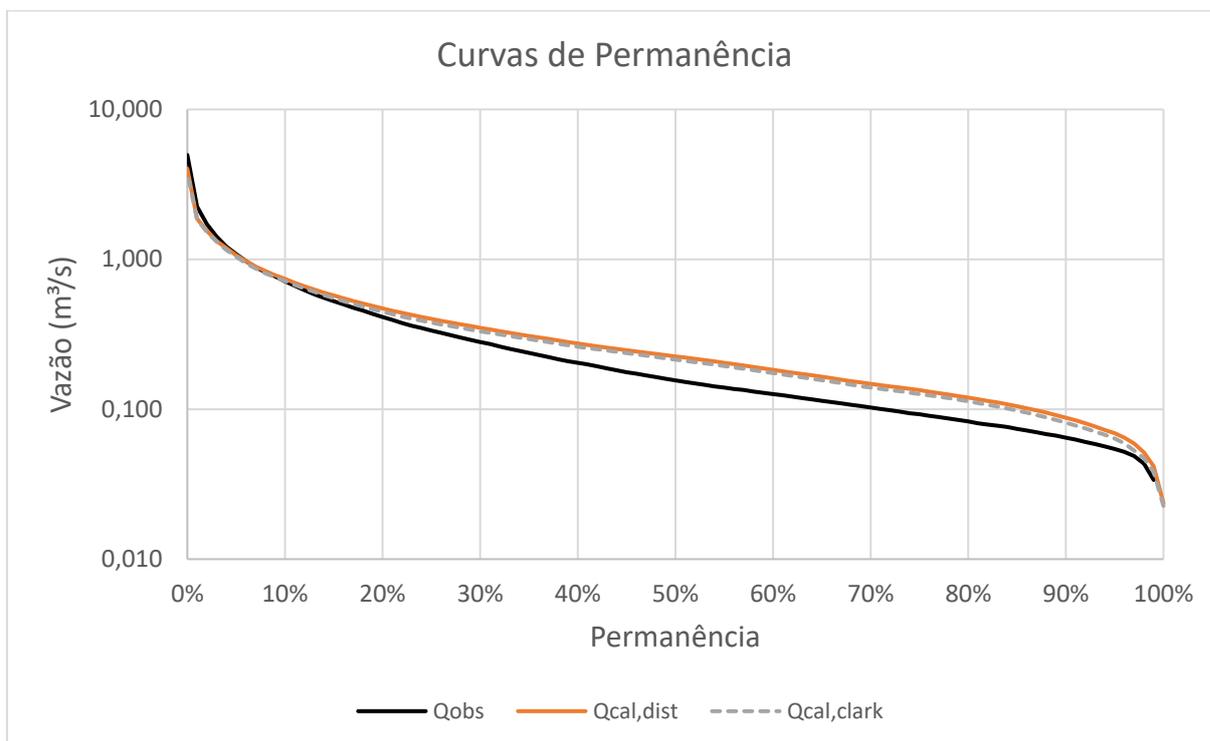


Fonte: O autor, 2020

Também foram geradas as curvas de permanência, que nada mais são do que histogramas de frequências acumuladas, entre a vazão observada e as vazões simuladas. Essas curvas são fundamentais para se compreender o regime hidrológico de uma bacia e, portanto, ajudarão a entender se a modelagem hidrológica causou alguma variação no seu regime.

As curvas de permanência para o Rio das Velhas são apresentadas no gráfico a seguir. Vale ressaltar que o eixo vertical está apresentado em escala logarítmica para detalhar as vazões mais baixas e facilitar o entendimento da variabilidade de vazões da bacia.

Gráfico 7 - Curvas de permanência para a bacia do Rio das Velhas

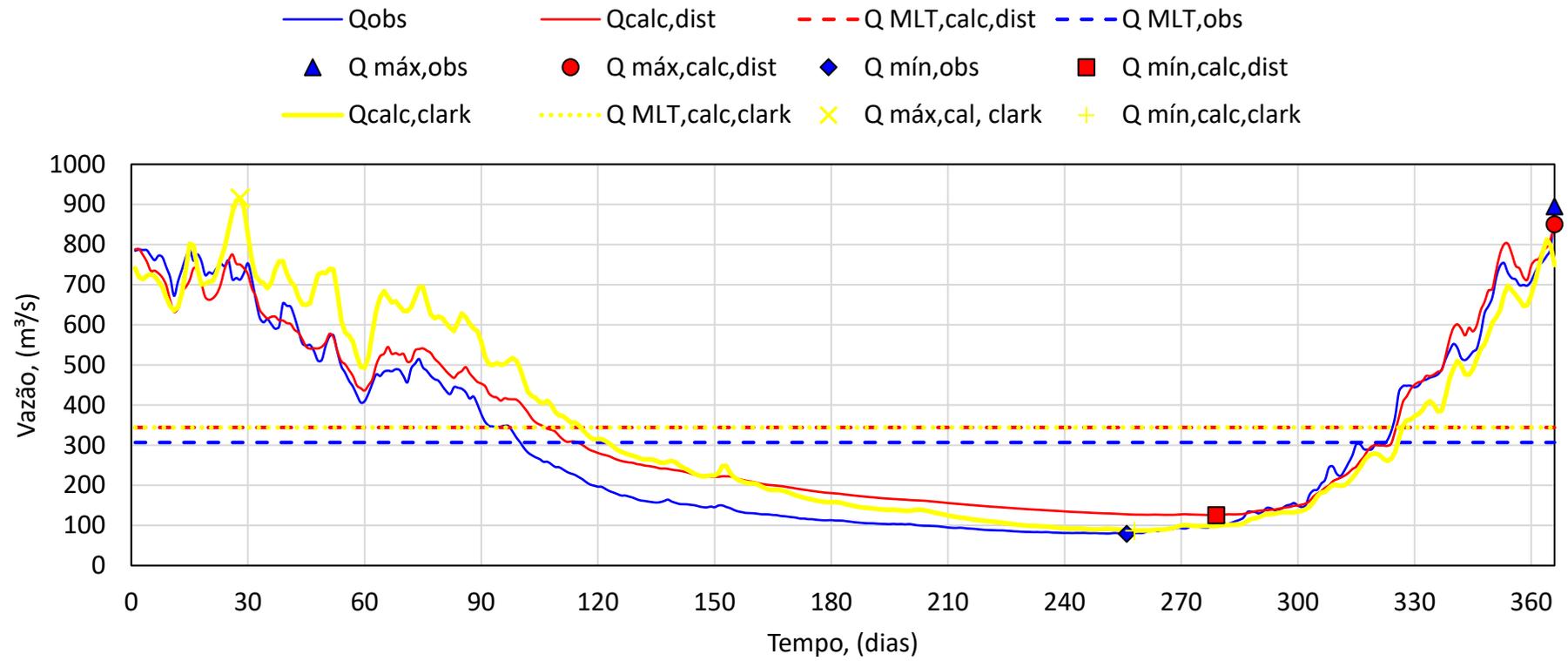


Fonte: O autor, 2020

Da análise do Gráfico 7 percebe-se que o modelo CAWM V representou bem o regime hidrológico da bacia do Rio das Velhas, uma que as curvas de permanência simuladas se aproximaram bastante observada. Outro ponto de destaque é a forma das curvas de vazões simuladas pelos dois métodos de distribuição, já que as curvas quase que coincidem uma com a outra. Isso demonstra que não houve ganhos significativos na escolha de um ou outro método para esse caso.

Para representar graficamente os resultados do CAWM V foi elaborado o Gráfico 8. Esse hidrograma juliano representa a média das vazões por dia e mês, considerando a média de todos os anos.

Gráfico 8 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

A forma de representação do hidrograma apresentado é diferenciada pois considera um ano médio. Isso significa que os dias do ano da série histórica de vazões são numerados de 1 a 365 (ou 366 no caso de ano bissexto), ou seja, o dia 1º de janeiro de cada corresponde ao número 1, enquanto o dia 31 de dezembro de cada ano recebe a numeração de 365 ou 366.

A partir daí são calculadas as médias de vazões do dia 1, depois do dia 2 e assim sucessivamente até o cálculo da média de vazões do dia 366. Esse processo foi realizado para as vazões observadas e as simuladas, tanto pelo método de distribuição de chuvas proposto quanto pelo de Clark. Outras informações são os dias em que em média ocorrem as vazões mínima e máxima e as vazões médias de longo período. Observe-se que, para o Rio das Velhas, a variação sazonal das vazões com o método das precipitações distribuídas por isócronas se aproximou mais das vazões medidas. Os demais identificadores foram equivalentes.

Para facilitar o entendimento e a comparação entre o desempenho do modelo utilizando dois métodos estudados, a tabela a seguir apresenta o compilado dos resultados de longo termo obtidos para a bacia do Rio das Velhas considerando a distribuição das chuvas por linhas isócronas e pelo HTA de Clark:

Tabela 15 - Coeficientes de eficiência obtidos com o modelo CAWM V

Método	Evento	Data 1	Data 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	R2
Isócronas	Total	01/06/1941	07/03/2019	0,806	0,801	0,663	12,2	0,44	0,814
	% atendido	-	-	89,9	88,6	88,6	73,4	89,9	98,7
Clark	Total	01/06/1941	07/03/2019	0,793	0,793	0,662	7,7	0,45	0,797
	% atendido	-	-	89,9	88,6	88,6	73,4	89,9	98,7

Fonte: O autor, 2020

4.1.4 Resultados CAWM V – Bacia do Rio Parnaíba

Assim como para a bacia do Rio das Velhas, o resultado das simulações para a bacia do Parnaíba será apresentado em termos dos valores obtidos para as funções objetivo, hidrogramas de vazões diárias (ver apêndice), hidrograma anual médio e curvas de permanência de vazões diárias. Serão apresentados os resultados obtidos através do método de distribuição e na sequência aqueles referentes ao de Clark.

Os períodos de calibração utilizado para a modelagem da bacia do Rio do Parnaíba são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 16 - Períodos de calibração (Bacia do Rio Parnaíba)

Método	Data Inicial	Data Final
Chuvvas Distribuídas	22/08/1999	21/08/2004
Clark	22/08/1999	21/08/2004

Fonte: O autor, 2020

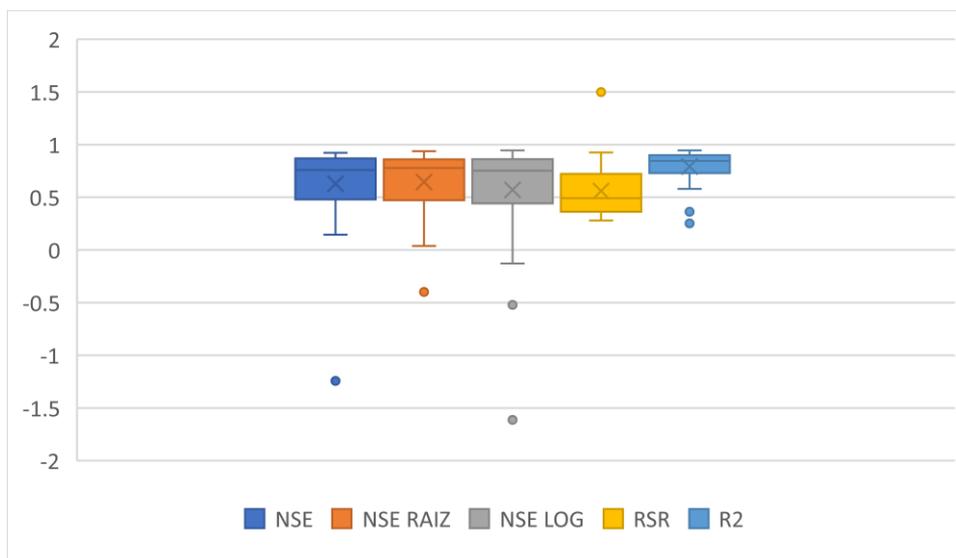
4.1.4.1 Método 1 – Chuvas distribuídas

Considerando a distribuição por linhas isócronas para a bacia do Rio Parnaíba, o NSE e o NSE_{sqrt} foram maiores do que 0,5 em 74,4% dos eventos analisados. Já para o coeficiente NSE_{log} , obteve-se um percentual atendido de 71,8% nos casos. Considerando os critérios de MORIASI, ARNOLD, *et al.* (2007), os resultados de NSE, NSE_{sqrt} e NSE_{log} foram considerados muito bons, respectivamente, em: 51,3%, 53,8% e 48,7% dos eventos analisados.

O percentual bias foi considerado satisfatório em 89,7% dos eventos analisados e o RSR foi menor do que 0,7 em 74,4% dos casos. Considerando os critérios da Tabela 1, o P_{bias} e o RSR foram considerados muito bons em 46,2% e 51,3% dos casos, respectivamente.

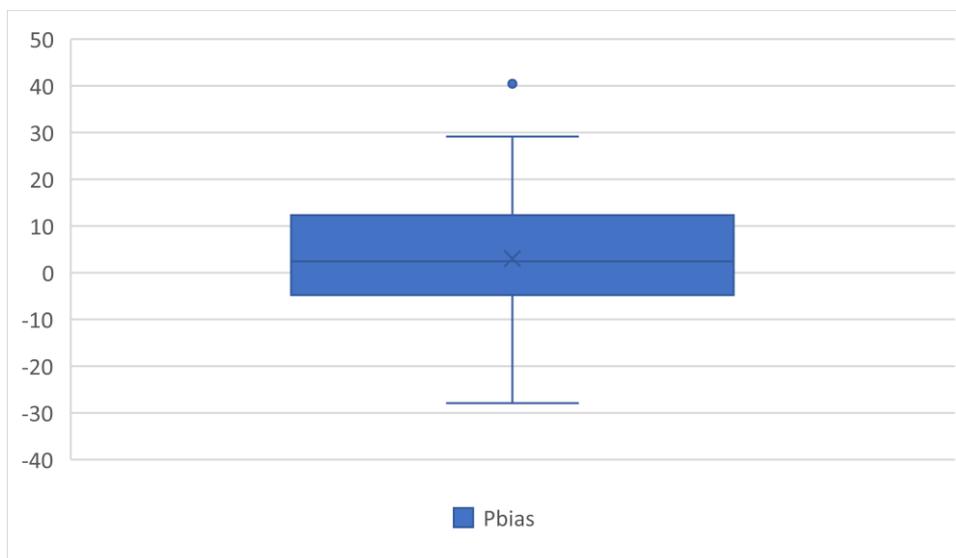
O coeficiente R^2 atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 98,7%.

Foram analisados 39 eventos, no caso da bacia do Rio Parnaíba, devido a isso preferiu-se agregar os valores obtidos dos indicadores em forma de diagrama de caixas, conforme feito para a bacia do Rio das Velhas. Tais diagramas são apresentados nos gráficos a seguir:

Gráfico 9 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R²

Fonte: O autor, 2020

Gráfico 10 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias)



Fonte: O autor, 2020

4.1.4.2 Método 2 - Chuvas distribuídas por Clark

Adorando como critério de distribuição o hidrograma tempo x área de Clark, os coeficientes NSE, NSE_{sqrt} e NSE_{log} foram atendidos em 76,9%, 74,4% e 71,8% dos

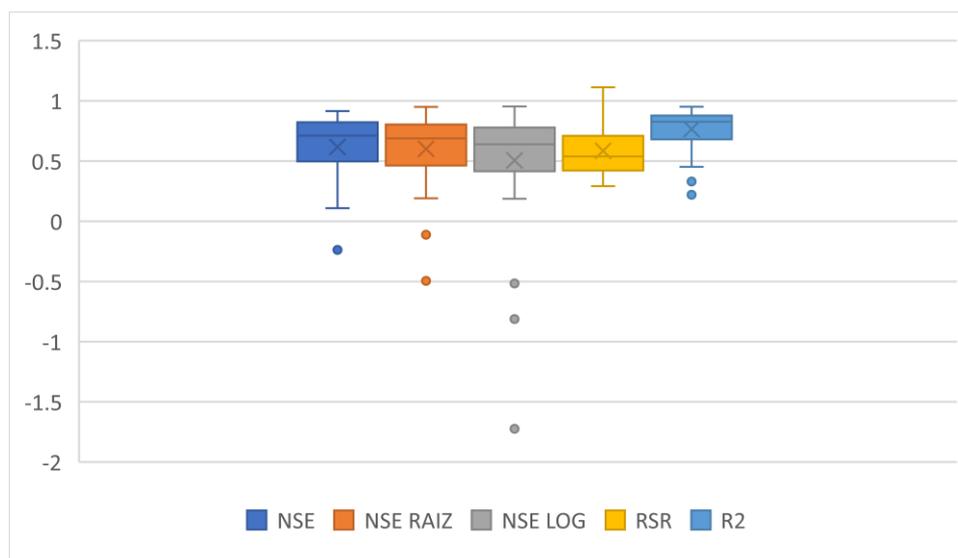
eventos analisados, respectivamente. Tais coeficientes foram considerados muito bons, respectivamente, em: 46,2%, 41,0% e 28,2% dos eventos analisados.

O percentual bias foi considerado satisfatório em 87,2% dos eventos analisados e o RSR foi menor do que 0,7 em 76,9% dos casos. Considerando os critérios da Tabela 1, o Pbias e o RSR foram considerados muito bons em 33,3% e 46,2% dos casos, respectivamente.

O coeficiente R^2 atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 92,3%.

Os diagramas de caixa dos indicadores de eficiência são apresentados nos gráficos a seguir:

Gráfico 11 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R^2 (Clark)



Fonte: O autor, 2020

Gráfico 12 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias) pelo método de Clark

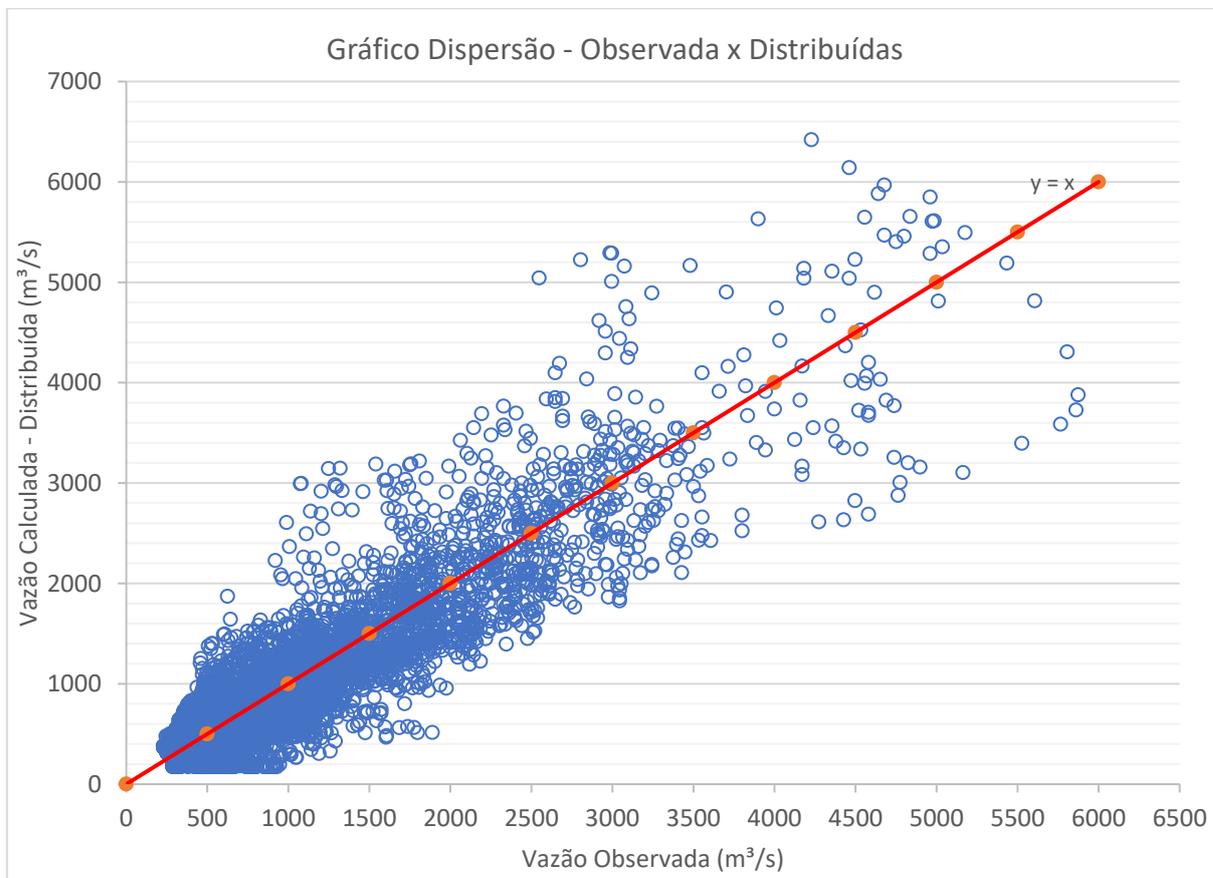


Fonte: O autor, 2020

4.1.4.3 Análises estatísticas – Bacia do Rio Parnaíba

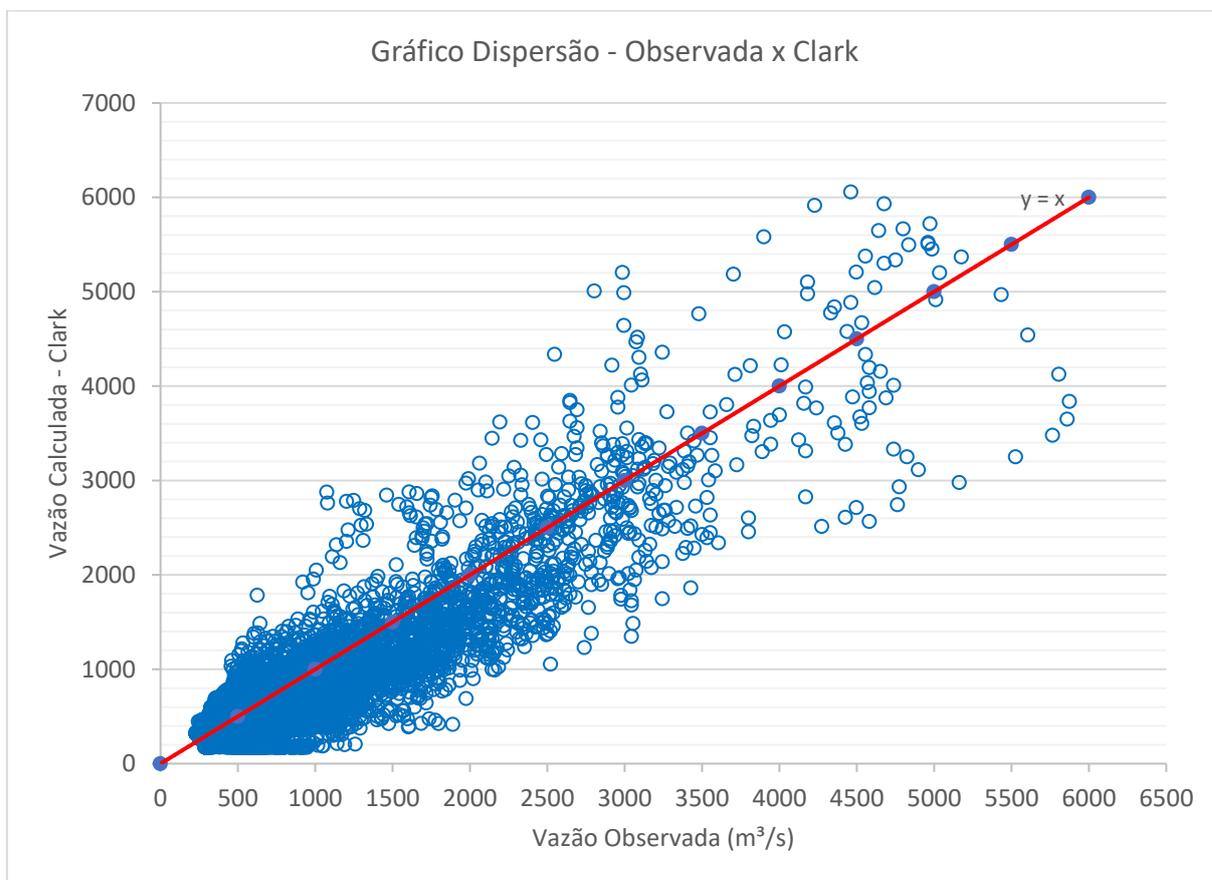
As mesmas análises estatísticas realizadas para o Rio das Velhas foram feitas para a bacia do Parnaíba. Dessa forma o Gráfico 13 e o Gráfico 14 apresentam as dispersões entre vazões observadas e simuladas:

Gráfico 13 - Gráfico de dispersão pelo método de distribuição de chuvas



Fonte: O autor, 2020

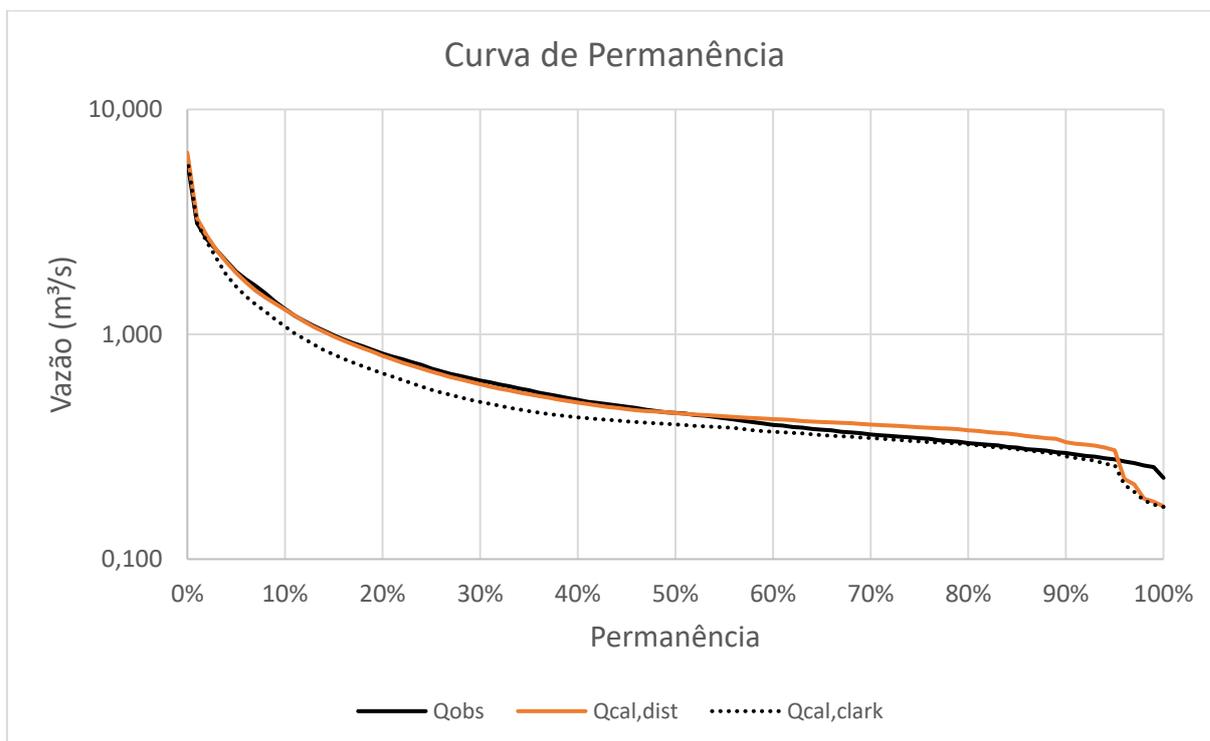
Gráfico 14 - Gráfico de dispersão de vazões pelo método de Clark



Fonte: O autor, 2020

Com a mesma finalidade de avaliar a influência dos métodos no regime hidrológico de vazões, foram geradas as curvas de permanência para a bacia do Parnaíba. Tais curvas são apresentadas no Gráfico 15:

Gráfico 15 - Curvas de permanência para a bacia do Rio Parnaíba

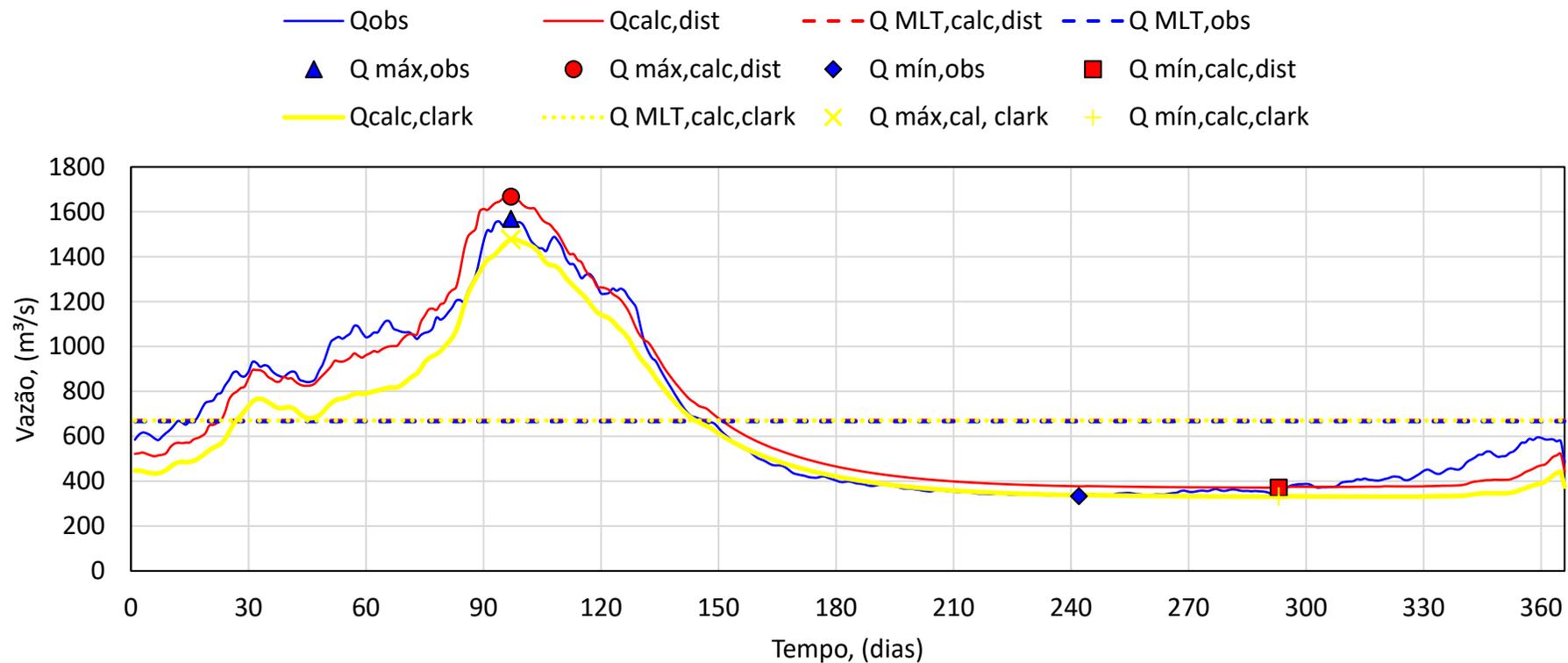


Fonte: O autor, 2020

De acordo com o Gráfico 15, nota-se que, diferentemente do que ocorreu para a bacia do Rio das Velhas, no Parnaíba registra-se uma diferença mais sensível entre as simulações pelos dois métodos. No Gráfico 7, as curvas simuladas quase que se sobrepunham, o que não ocorre neste caso. Até as vazões com permanência de 60% no tempo com o uso das isócronas se ajustaram melhor. Entre 60 e 95% as duas curvas praticamente coincidem. Nos 5% restantes ambas descolaram das vazões observadas, explicável pelo fato de que o indicador $NASH_{log}$ sempre foi um pouco inferior que os demais.

Assim que como feito para a bacia do Rio das Velhas, também foi elaborado o hidrograma de ano médio para a bacia do Rio Parnaíba, o qual é apresentado no Gráfico . As mesmas observações aqui se repetem: melhor ajuste das vazões com as vazões obtidas por meio das isócronas e aproximação dos demais indicadores.

Gráfico 16 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio Parnaíba



Fonte: O autor, 2020

A tabela a seguir apresenta o compilado dos resultados de longo termo obtidos para a bacia do Rio do Parnaíba considerando a distribuição das chuvas por linhas isócronas e pelo HTA de Clark:

Tabela 17 - Indicadores de eficiência obtidos com CAWM e GR4J

Método	Evento	Data 1	Data 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	R2
Isócronas	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,827	0,806	0,716	0,7	0,42	0,836
	% atendido	-	-	74,4	74,4	71,8	89,7	74,4	94,9
Clark	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,804	0,759	0,649	-12,2	0,44	0,823
	% atendido	-	-	76,9	74,4	71,8	87,2	76,9	92,3

Fonte: O autor, 2022

4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O GR4J

Para aprimorar o modelo chuva-vazão CAWM e comparar sua performance, foi aplicado exclusivamente à Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas o modelo hidrológico GR4J – Génie Rural à 4 paramètres Journalier (Perrin et al., 2003). Tal modelo é similar ao CAWM e apresenta uma estrutura com poucos parâmetros a calibrar.

O modelo requer como dados de entrada as séries históricas diárias de precipitação em milímetros (mm), de vazão observada em metros cúbicos por segundo (m^3/s), que é utilizada para calibração e validação do modelo, e de evapotranspiração potencial em milímetros (mm), podendo ser utilizada a média de longo termo, o que significa que seus valores são repetidos a cada ano. Como o objetivo é comparar os modelos, foram escolhidos os mesmos postos de precipitação, vazão e evapotranspiração que foram utilizados na aplicação do CAWM para a bacia do Rio das Velhas. Cabe destacar também que, para a aplicação do GR4J, não foi necessário utilizar nenhum dos métodos de distribuição espaço-temporal descritos no item 3.2.5 deste trabalho.

Além desses dados, também é necessário informar a área da bacia hidrográfica em quilômetros quadrados (km^2). Nesses casos valores taxas iniciais de preenchimento dos reservatórios de produção e de roteamento (que corresponde a nível dividido pela capacidade máxima, ou seja, S/X_1 e R/X_3) e informar o período de calibração do modelo bem como o de validação. Tais considerações são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 18 - Valores iniciais dos dados de entrada do modelo GR4J

Dados de Entrada	Valores Iniciais
A_b (Km ²)	27862,09
S/ X_1	0,60
R/ X_3	0,70
Período de Calibração	01/06/1941 a 21/08/1982
Período de Validação	22/08/1982 a 07/03/2019

Fonte: O autor, 2022

Também devem ser inseridos na planilha do modelo os valores transformados dos parâmetros do modelo (X_1 , X_2 , X_3 e X_4), aqui denominados de a, b, c e d. Ao inserir as transformadas, o modelo calcula automaticamente os valores reais iniciais dos parâmetros.

Conforme explicado no capítulo anterior, a utilização das transformadas é uma maneira de facilitar a otimização do modelo e atender as condições de contorno dos parâmetros. Nesse sentido, para qualquer valor de a ou de c, os valores de X_1 e X_3 será sempre positivo, para qualquer valor de d, X_4 será sempre maior do que 0,5 e o X_2 pode assumir qualquer valor real, conforme já definido anteriormente nesta seção. O modelo recomenda que sejam adotados os seguintes valores iniciais para facilitar a otimização:

Tabela 19 - Parâmetros iniciais adotados para otimização do modelo GR4J

Parâmetro	Transformado	Real
X_1 (mm)	5,90	365,04
X_2 (mm)	0,00	0,00
X_3 (mm)	4,50	90,02
X_4 (dias)	0,20	1,72

Fonte: O autor, 2022

4.2.1 Calibração GR4J

A calibração do GR4J é realizada na própria planilha do Excel utilizando a ferramenta solver, maximizando o valor do indicador Nash-Sutcliffe e utilizando como valores iniciais os apresentados na Tabela 19. Os parâmetros calibrados através do modelo são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 20 - Parâmetros calibrados do modelo GR4J

Parâmetro	Transformado	Real
X ₁ (mm)	7.25	1405.20
X ₂ (mm)	0.89	1.01
X ₃ (mm)	3.13	22.91
X ₄ (dias)	1.08	3.44

Fonte: O autor, 2022

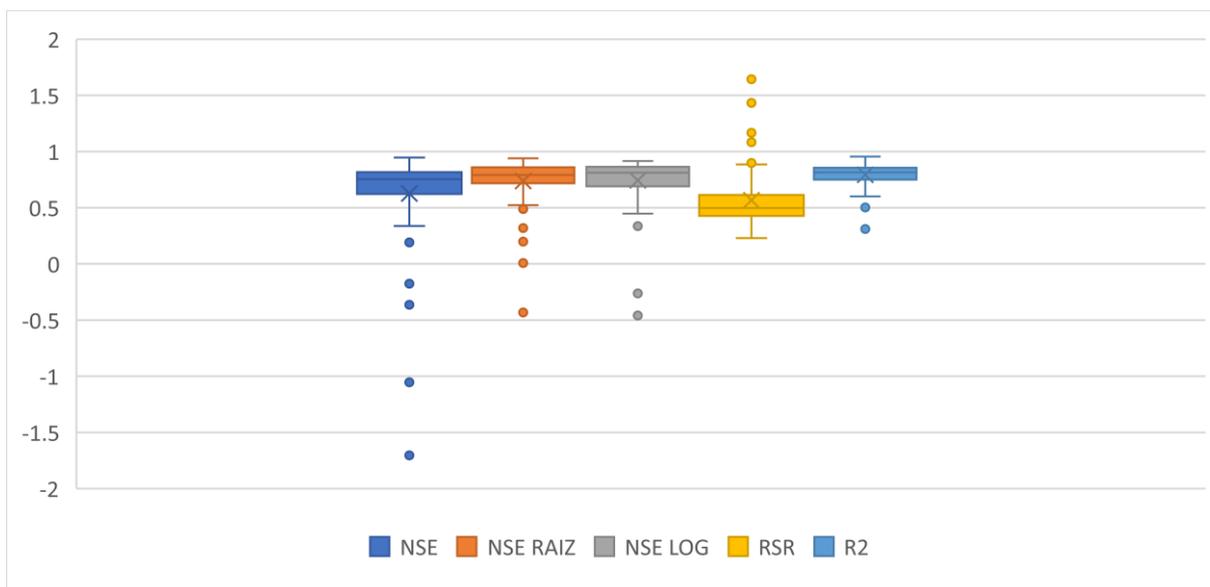
4.2.2 Resultados GR4J – Bacia do Rio das Velhas

Ao analisar os resultados obtidos com o modelo, percebe-se que os indicadores de eficiência foram bons, destacando-se o valor do NSE_{sqrt} que ficou acima de 0.75 sendo considerado um resultado muito bom. Assim como o modelo CAWM, no GR4J o período de estudo também foi dividido em 79 eventos anuais e calculados seus índices de eficiência. Conforme pode-se notar na tabela acima, o NSE foi maior do que 0,5 em 89,9% dos eventos, ou seja, foi satisfatório. Fazendo a mesma consideração, resultados similares foram obtidos para NSE_{sqrt} e NSE_{log} , obtendo-se 88,6% em ambos os casos.

O percentual bias com 14,4% também ficou dentro da margem considerada satisfatória, ou seja, entre -25% e 25%, em 73,4% dos eventos analisados e o RSR foi menor do que 0,7 em 89,9%.

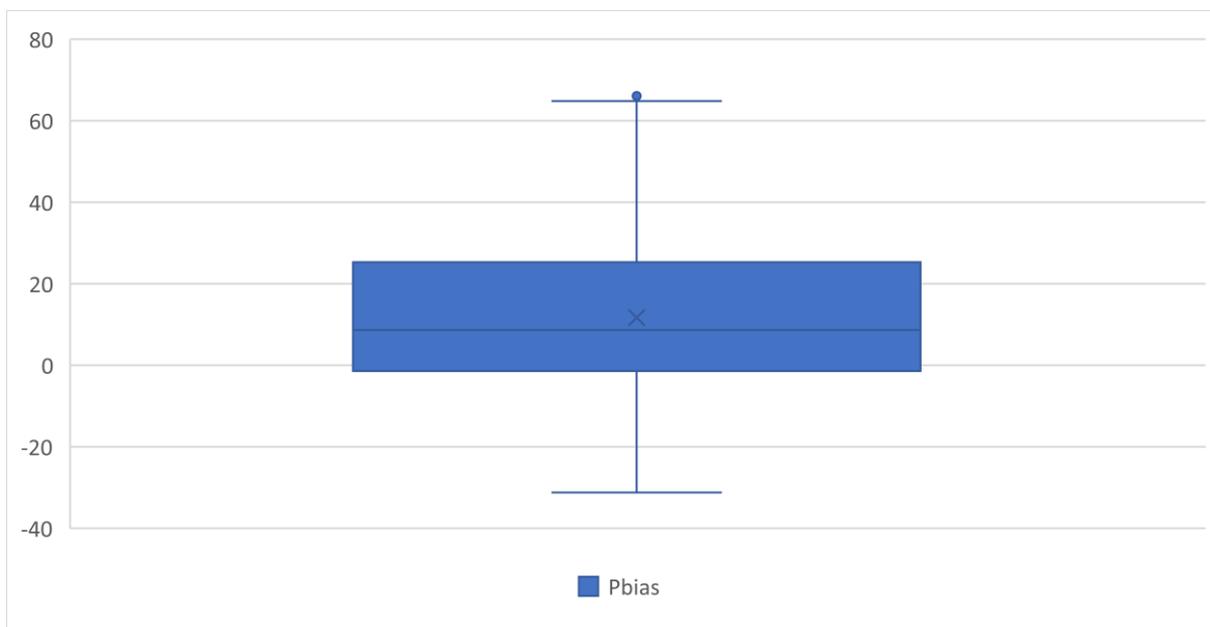
O coeficiente R^2 atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 98,7%.

Os resultados dos indicadores de eficiência do GR4J nos eventos anuais foram consolidados nos diagramas de caixa a seguir:

Gráfico 17 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R²

Fonte: O autor, 2022

Gráfico 18 - Diagrama de caixa do indicador Pbias



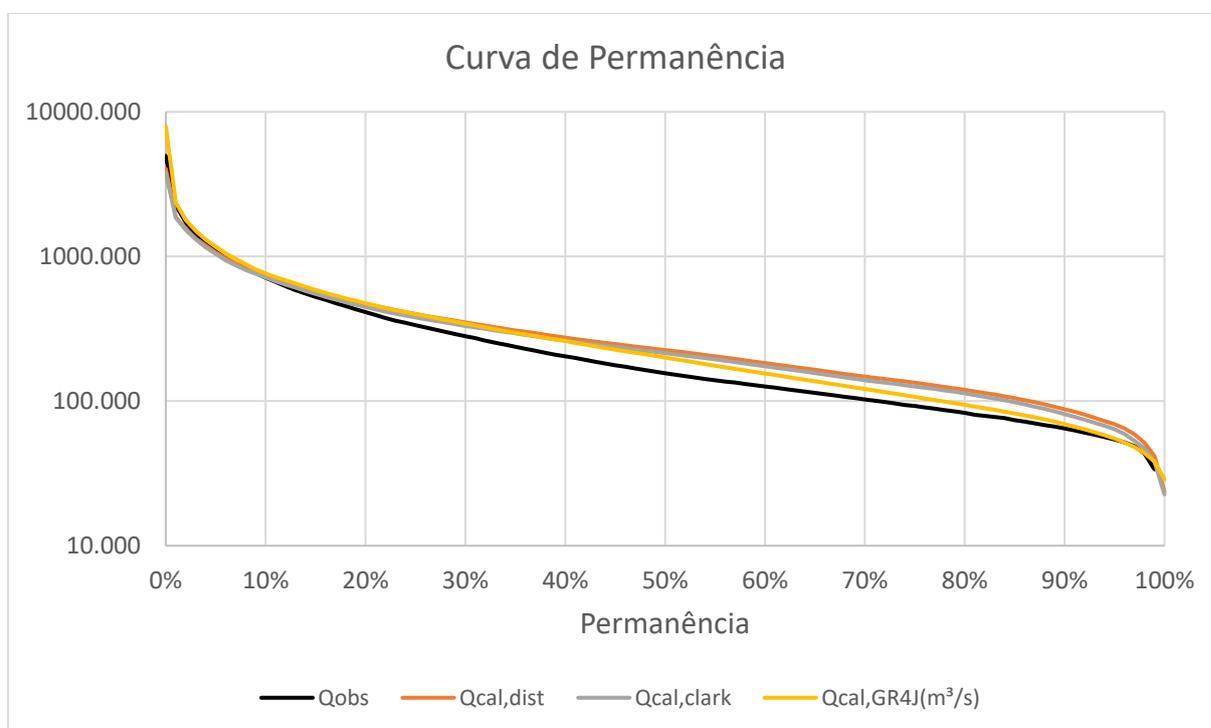
Fonte: O autor, 2022

4.2.3 Comparações entre o GR4J e o CAWM V

A análise dos modelos pode ser feita por comparações gráficas e de comparações entre os indicadores de performance obtidos.

O Gráfico 19 apresenta as curvas de permanência, em escala semi-logarítmica, das vazões observadas e as calculadas pelo GR4J e o CAWM V. Como pode-se perceber as curvas apresentam comportamentos semelhantes e próximos a permanência dos valores observados.

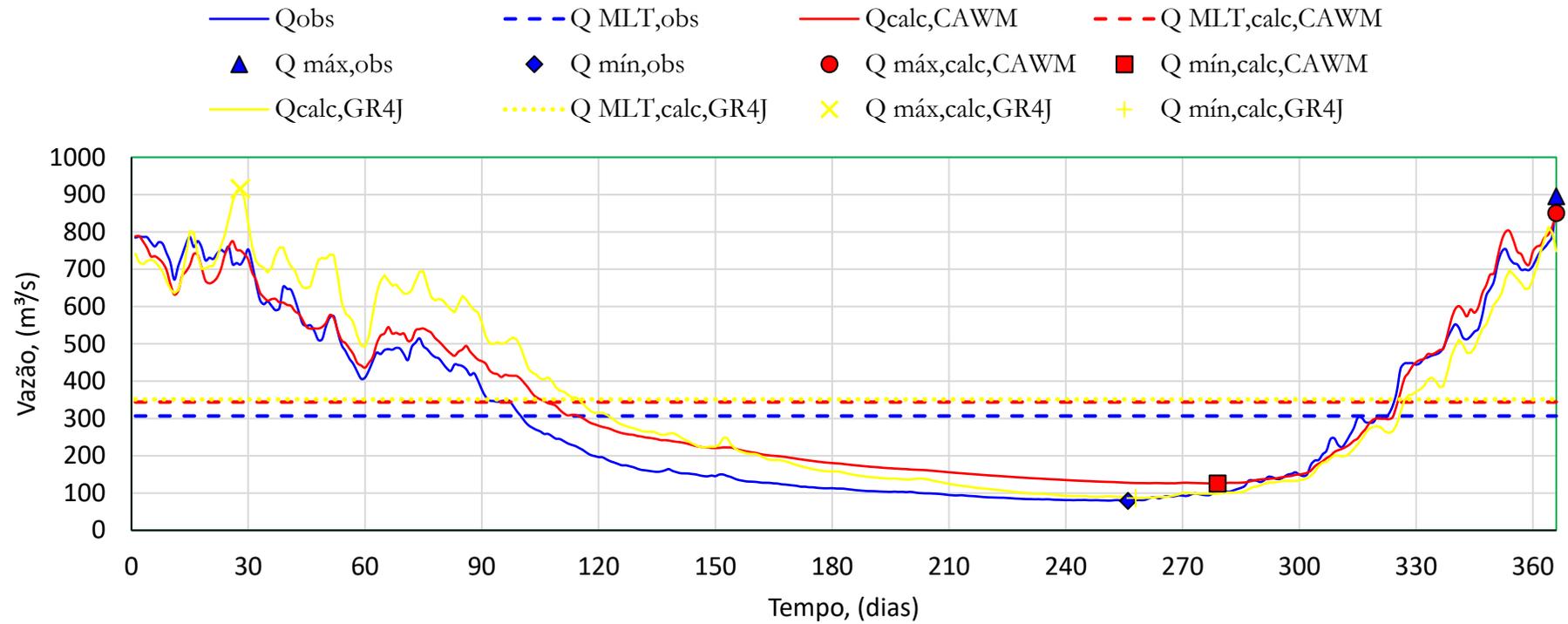
Gráfico 19 - Curvas de permanência obtidas pelo GR4J e CAWM V



Fonte: O autor, 2022

O hidrogramas anuais observado e calculados através do CAWM e do GR4J são apresentados no gráfico a seguir resumem desempenho comparativos dos modelos. Observa-se que nos primeiros 120 dias o GR4J apresenta um maior distanciamento em relação às curvas do CAWM e observada, quando a partir de então ocorre uma aproximação.

Gráfico 20 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

A tabela abaixo apresenta os resultados dos indicadores obtidos para o modelo GR4J e os correlaciona com àqueles obtidos com o CAWM V:

Tabela 21 - Indicadores de eficiência obtidos com CAWM e GR4J

Método	Evento	Data 1	Data 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	R2
GR4J	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,627	0,760	0,709	14,4	0,61	0,721
	% atendido	-	-	83,5	92,4	92,4	73,4	83,5	98,7
Isócronas	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,827	0,806	0,716	0,7	0,42	0,836
	% atendido	-	-	74,4	74,4	71,8	89,7	74,4	94,9
Clark	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,804	0,759	0,649	-12,2	0,44	0,823
	% atendido	-	-	76,9	74,4	71,8	87,2	76,9	92,3

Fonte: O autor, 2020

4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MGB-IPH

Conforme já explicado anteriormente, a modelagem hidrológica com o MGB compreende processos em dois plug-ins: o IPH-Hydro Tools e o MGB. Essas ferramentas são apresentadas na sequência.

4.3.1 Pré-Processamento utilizando o IPH-Hydro Tools

Com base no MDE da bacia do Rio das Velhas, obtido conforme indicado no item 3.2.1.1, foi realizado o pré-processamento através do IPH-Hydro Tools. Conforme explicado no capítulo anterior, é através desse pacote de ferramentas que serão gerados alguns dos arquivos essenciais para a simulação, tais como: a rede de drenagem, a delimitação da bacia hidrográfica, as minibacias e a definição das classes de respostas hidrológicas.

Primeiramente foi utilizada a ferramenta Sink and Destroy, que tem a função de preencher as depressões no modelo presentes no modelo numérico. Essa situação ocorre quando o valor de uma célula é menor do que o de suas vizinhas fazendo com que o software não encontre uma saída para a rede de drenagem. Com essa mesma ferramenta é possível processar o arquivo com as direções de fluxo, marcando a opção D8 Flow Direction. Logo, através do MDE da região de interesse são gerados,

inicialmente, dois arquivos de saída: o MDE corrigido, ou seja, sem as depressões e o arquivo com as direções de fluxo (D8 Flow Direction).

Com o arquivo de direções de fluxo (D8 Flow Direction), utilizou-se a ferramenta Flow Accumulation. Essa ferramenta gera um arquivo em que a cada célula é atribuído um valor que corresponde ao número de células que drenam a água até ela. Esse arquivo é fundamental para criar a rede de drenagem da bacia hidrográfica.

A rede de drenagem da bacia foi finalmente gerada através da ferramenta Stream Definition, sendo necessário como arquivos de entrada o D8 Flow Direction e o Flow Accumulation. Um ponto importante nesta etapa diz respeito a definição do limiar a partir do qual a drenagem passa a ser considerada. O IPH-Hydro Tools permite a definição desse valor através do número mínimo ou percentual de células que drenam para o ponto onde a rede começa a ser traçada, ou ainda uma área mínima de contribuição em que o para o limiar do traçado. Nesse sentido, um limiar baixo pode gerar uma rede muito ramificada enquanto um valor de limiar mais alto pode desconsiderar regiões de interesse. Para o Rio das Velhas, a rede foi determinada a partir da área de contribuição e foi escolhido um limiar de 5km².

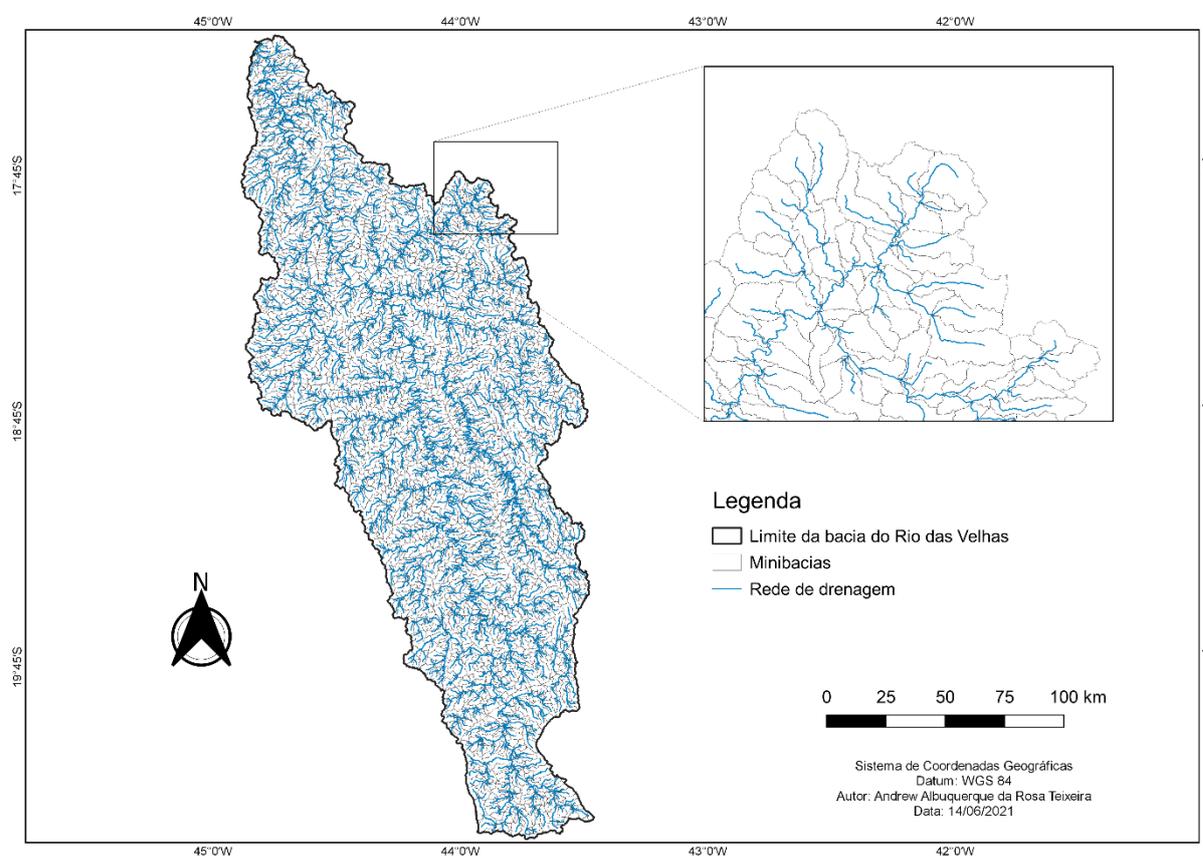
A delimitação da bacia hidrográfica é feita com a ferramenta Watershed Delineation. Para tanto é necessário inserir com entrada o arquivo de direções de fluxo e o raster da rede de drenagem. Além desses, é necessário um arquivo do tipo shapefile de pontos informando a localização do exutório da bacia. Essa mesma ferramenta permite ainda a criação e delimitação de sub bacias, desde que seja gerado um shapefile de pontos de interesse ao longo da drenagem. No caso do Rio das Velhas não foram geradas sub-bacias, tendo sido simulada a bacia por completo.

Conforme explicado no item 2.4, o MGB divide a bacia hidrográfica em minibacias. Para que elas possam ser geradas é preciso que a rede de drenagem seja seccionada. No IPH-Hydro Tools a ferramenta que realiza essa operação é a Segmentation Tools, que requer como entrada os arquivos com as direções de fluxo e a rede de drenagem. A segmentação se dá através da escolha de um dos dois métodos disponíveis: (1) ArcHydro Segmentation ou (2) Fixed Length Segmentation. A escolha por um ou por outro influencia diretamente a característica e o número de minibacias que serão criadas. No caso do Rio das Velhas, optou-se pela segmentação através do ArcHydro Segmentation que secciona a rede entre pontos de confluência

a montante e a jusante de um mesmo trecho de rio, ou, para aqueles trechos nos extremos a montante até a primeira confluência.

A bacia hidrográfica é efetivamente dividida no IPH-Hydro Tools através da ferramenta Unit-Catchment Delineation. São requeridos pelo programa os arquivos das direções de fluxo e o da rede de drenagem segmentada. Ao final desse processo na bacia do Rio das Velhas foram geradas um total de 4088 minibacias, conforme pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Minibacias e rede de drenagem para a bacia do rio das Velhas



Fonte: O autor, 2022

Finalmente devem ser geradas as Classes de Resposta Hidrológica da bacia, que são regiões que agregam as mesmas características quanto a atributos geológicos e de tipo de solo, ou seja, são hidrológicamente homogêneas. Esses tipos de mapas podem ser criados a partir da combinação dos mapas de tipo de solo e de uso e cobertura vegetal da região em estudo. Na modelagem do Rio das Velhas utilizou-se o mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para toda a América do Sul

desenvolvido por FAN *et al*, 2015, gerado a partir de diferentes fontes de dados e reespecializado para uma resolução de 400m, que apresenta resultados satisfatórios para o MGB.

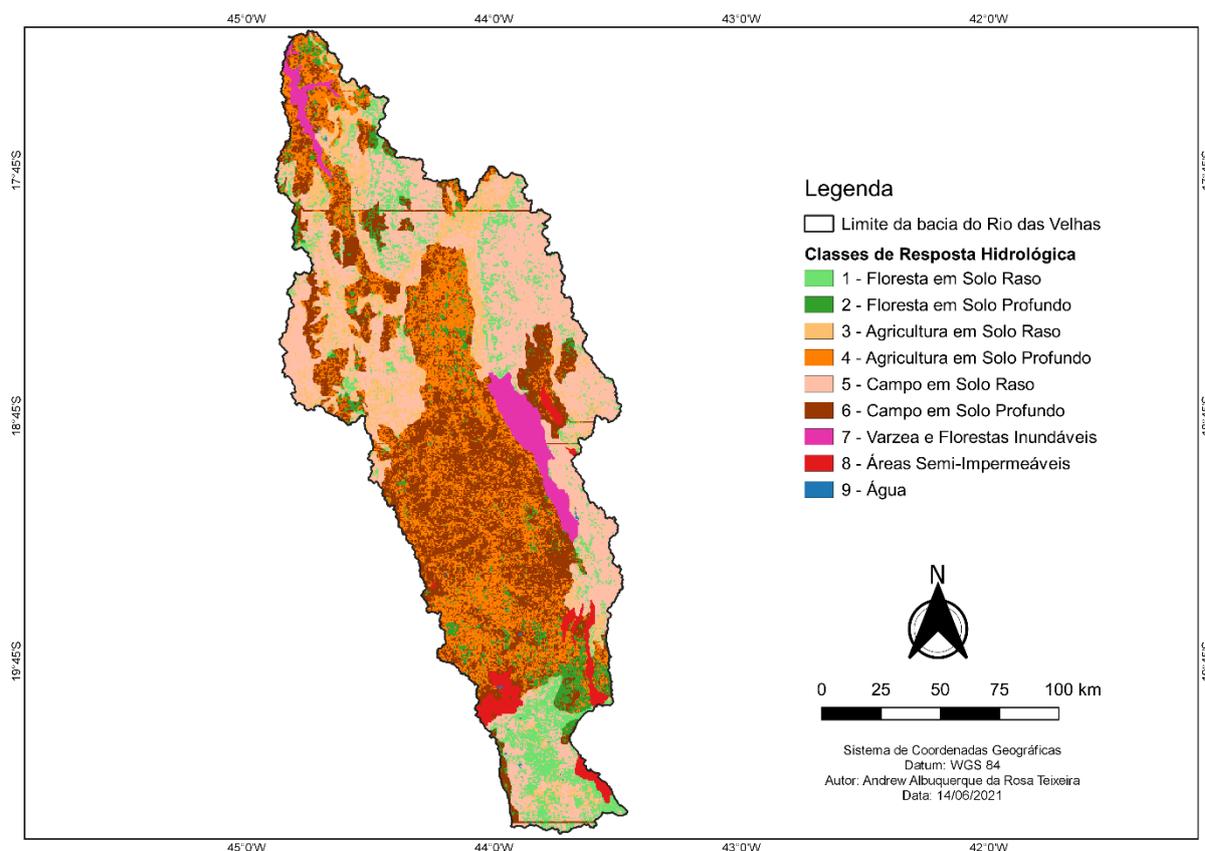
Com base nessa classificação foram encontradas 9 classes, conforme a e a Figura 22:

Tabela 22 - Classes de Resposta Hidrológica para a bacia do Rio das Velhas

Código	URH	Descrição	Área (%)
1	FlorRas	Floresta em solo raso	8.02%
2	FlorProf	Floresta em solo profundo	4.48%
3	AgriRas	Agricultura em solo raso	8.71%
4	AgriProf	Agricultura em solo profundo	20.63%
5	CampRas	Campo em solo raso	28.02%
6	CampProf	Campo em solo profundo	24.32%
7	Varzea	Várzeas e Florestas Inundáveis	3.43%
8	ASI	Áreas Semi-Impermeáveis	2.26%
9	Água	Água	0.13%
		Total	100.00%

Fonte: Adaptado de FAN *et al*, 2015

Figura 22 - Classes de resposta hidrológica para o Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2021

No que diz respeito a vegetação e ao uso de solo, a classificação realizada por Fan et al, 2015 considerou que a classe “Agricultura” compreende a agricultura intensiva e demais coberturas com características semelhantes, incluindo áreas de pastagens. Os blocos denominados de “Áreas Semi-Impermeáveis” incluem regiões artificiais que tem grande capacidade de gerar escoamento superficial, tais como áreas urbanas. Os “Campos” incluem regiões arbustivas, estepes e todos os tipos de cerrado e campo, bem como suas subclasses. A classe “Floresta” inclui todos os tipos de floresta com exceção das inundáveis. Essas últimas formam um grupo a parte denominado de “Florestas inundáveis ou Várzeas”.

Ainda segundo Fan et al, 2015, os solos denominados de “Rasos” são aqueles que tem grande capacidade de geração de escoamento superficial e menos capacidade de armazenamento de água, sendo os “Cambissolos” um exemplo de tipo de solo que compõe esse grupo. Os solos considerados “Profundos” são aqueles que apresentam baixa e média capacidade de gerar escoamento superficial e alta capacidade de

armazenar, tais como os “latossolos”. Os solos de várzea foram considerados aqueles que tem elevada saturação, como os “gleissolos”. Por fim, as “Áreas Semi-Impermeáveis”, englobam os afloramentos rochosos.

A finalização do pré-processamento se dá com a ferramenta MGB Tools/MGB-Processing, em que os arquivos gerados anteriormente são processados. Nesse sentido, os arquivos utilizados são: o MDE, o de direções de fluxo, o das minibacias, o da rede de drenagem, o da rede de drenagem segmentada, o das classes de resposta hidrológica e, caso tenha sido gerado, o das sub-bacias. Após carregar os arquivos, o programa pede que sejam definidos alguns parâmetros.

Por fim, se o pré-processamento correu bem, são gerados três arquivos, sendo o principal deles o “Mini.gtp”, que contém informações topológicas do modelo, fornecendo para cada minibacia informações como área de drenagem, comprimento e declividade do trecho, além do percentual da área da minibacia que existe em cada uma das unidades de resposta hidrológica.

4.3.2 Simulação hidrológica com o plugin MGB

Após o término das etapas do pré-processamento no IPH-Hydro Tools, passam a ser utilizadas as ferramentas disponíveis no plugin do MGB. Dessa forma, devem ser seguidas as seguintes etapas: (1) converter o arquivo das minibacias inicialmente gerado no formato raster para shapefile; (2) descrever o arquivo das minibacias de forma simplificada; (3) preparar os dados de chuva, vazão observada e clima; (4) definir valores para os parâmetros de vegetação do modelo, denominados de parâmetros fixos uma vez que não são modificados durante a calibração do modelo; (5) definir os parâmetros de solo do modelo, que são denominados de parâmetros calibráveis uma vez que são modificados no processo de calibração; (6) criar o projeto; (7) simulação; (8) calibração manual; (9) calibração automática.

Para a obtenção das informações precipitação e vazão observada foi utilizada uma ferramenta de download automático da base de dados da ANA contida no próprio MGB, que gera automaticamente os dados no formato requerido pelo programa.

Foram selecionados 101 postos pluviométricos e a mesma estação fluviométrica escolhida para a simulação da bacia com o CAWM V.

No modelo MGB a evapotranspiração é calculada a partir de dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação (horas de sol por dia). O programa contém uma base de dados interna de normais climatológicas do INMET de 1960 a 1990. Dentre as estações climatológicas escolhidas, foram selecionadas três: Belo Horizonte - 83587, Conceição do Mato - 83589 e Diamantina - 83538. Na simulação do CAWM também foi utilizado a estação Divinópolis – 83635, contudo este não foi encontrado na base interna de dados.

4.3.3 Calibração do modelo

A calibração dos parâmetros no MGB deve ser realizada preliminarmente de forma manual e posteriormente de forma automática. Para que a calibração ocorra devem ser preparados um arquivo de parâmetros fixos e outro de parâmetros calibráveis. O ajuste manual é feito através da alteração dos valores dos parâmetros calibráveis, análise visual dos hidrogramas e verificação dos indicadores NSE, NSElog e Pbias. De uma maneira geral é verificado: a forma geral do hidrograma, a magnitude dos picos, o tempo de ocorrência dos picos, o volume geral do hidrograma e as vazões durante as estiagens.

Após o ajuste manual, pode ser iniciada a calibração automática. Nela, o algoritmo do MGB procura por valores ótimos próximos aos obtidos durante a calibração manual.

Os parâmetros fixos estão relacionados a vegetação existente em cada URH e não são modificados durante a calibração. Por outro lado, os calibráveis estão associados aos solos em cada URH e são alterados no processo de calibração.

Nesse sentido, os parâmetros de vegetação que precisam ser definidos são: albedo, altura da vegetação, índice de área foliar e resistência superficial. Todos eles são utilizados no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Os valores de vegetação adotados para a bacia do Rio das Velhas são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 23 - Parâmetros de albedo

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
FlorRas	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
FlorProf	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
AgriRas	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
AgriProf	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
CampRas	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
CampProf	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Varzea	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
ASI	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Água	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Fonte: O autor, 2021

Tabela 24 - Parâmetros de Índice de Área Foliar (IAF)

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
FlorRas	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
FlorProf	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
AgriRas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
AgriProf	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
CampRas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CampProf	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Varzea	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ASI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Água	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: O autor, 2021

Tabela 25 - Parâmetros de altura da vegetação (metros)

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
FlorRas	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
FlorProf	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
AgriRas	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
AgriProf	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
CampRas	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
CampProf	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Varzea	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ASI	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Água	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Fonte: O autor, 2021

Tabela 26 - Parâmetros de resistência superficial ($s.m^{-1}$)

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
FlorRas	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FlorProf	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
AgriRas	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
AgriProf	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
CampRas	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
CampProf	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Varzea	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ASI	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor, 2021

Por outro lado, os parâmetros calibráveis do modelo são: a capacidade de armazenamento do solo (W_m), o parâmetro b , o parâmetro de escoamento de base (K_{bas}), o parâmetro de escoamento sub-superficial (K_{int}), o índice de porosidade do solo (XL), a fração de W_m abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial (W_c), o fluxo máximo de água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo por ascensão capilar (CAP), os parâmetros de propagação dentro das minibacias C_s , C_i e C_b , além do parâmetro Q_b , que está associado à condição inicial do modelo.

Os valores dos parâmetros calibráveis, assim como os fixos, são definidos por URH e são apresentados na Tabela 27:

Tabela 27 - Valores calibrados dos parâmetros do solo por URH

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	1286,10	0,47	1,20	37,48	0,67	0,00	0,10
FlorProf	1927,20	0,19	2,06	111,34	0,67	0,00	0,10
AgriRas	153,60	1,30	0,26	53,31	0,67	0,00	0,10
AgriProf	1327,00	0,25	1,00	25,89	0,67	0,00	0,10
CampRas	313,00	1,30	0,26	53,31	0,67	0,00	0,10
CampProf	3065,80	0,25	1,00	25,89	0,67	0,00	0,10
Varzea	771,50	0,32	1,30	31,7	0,67	0,00	0,10
ASI	206,10	0,90	0,03	27,23	0,67	0,00	0,10
Água	0,00	0,10	0,80	30,00	0,67	0,50	0,10
CS	5						
CI	400						
CB	3400						
QB	0,01						

Fonte: O autor, 2021

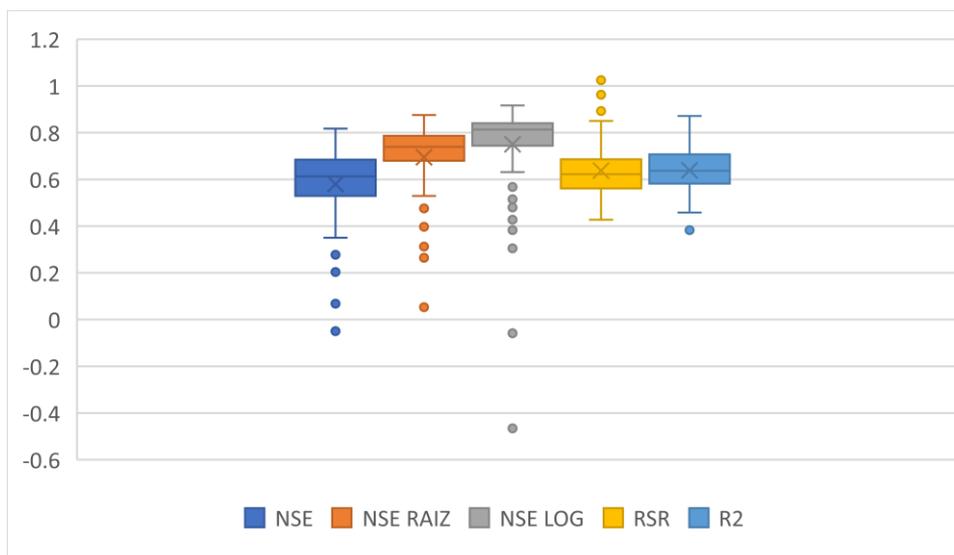
4.3.4 Resultados MGB - Rio das Velhas

Os resultados da modelagem com o MGB mostram que o NSE foi satisfatório em 77,2% dos eventos analisados, sendo este o menor percentual atendido para o indicador NSE dentre os três modelos analisados. Fazendo a mesma consideração, resultados similares foram obtidos para NSE_{sqrt} e NSE_{log} , obtendo-se 91,1% e 92,4%, respectivamente.

Ainda analisando a , percebe-se que o percentual bias atendeu aos valores mínimos em 91,1% dos casos e o RSR foi menor do que 0,7 em 75,9%.

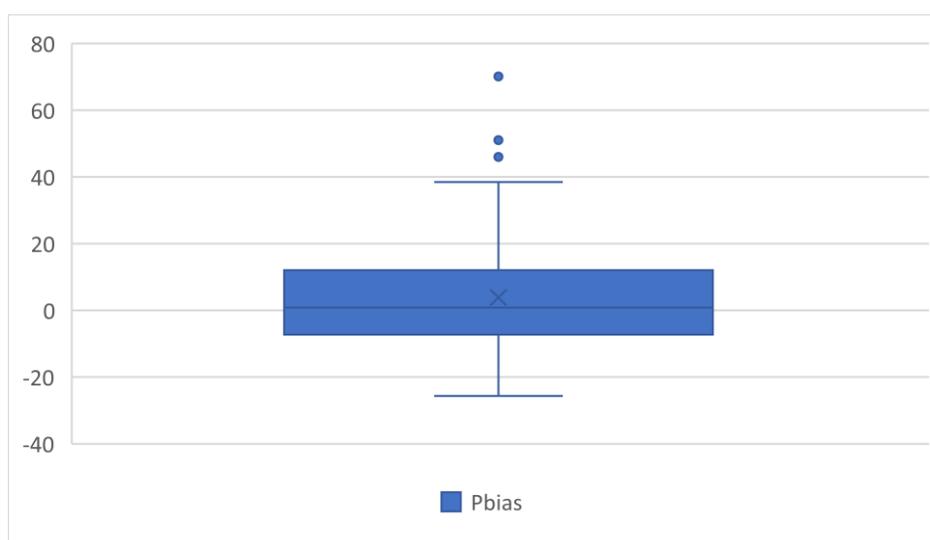
O coeficiente R^2 atingiu valores aceitáveis, ou seja, maiores do que 0,5, em 89,9% dos eventos em análise.

Os resultados dos indicadores de eficiência dos eventos analisados são apresentados em diagramas de caixa nos gráficos a seguir:

Gráfico 21 - Diagrama de caixa do NSE, NSESQRT, NSELOG, RSR e R²

Fonte: O autor, 2020

Gráfico 22 - Diagrama de caixa do percentual bias (Pbias)

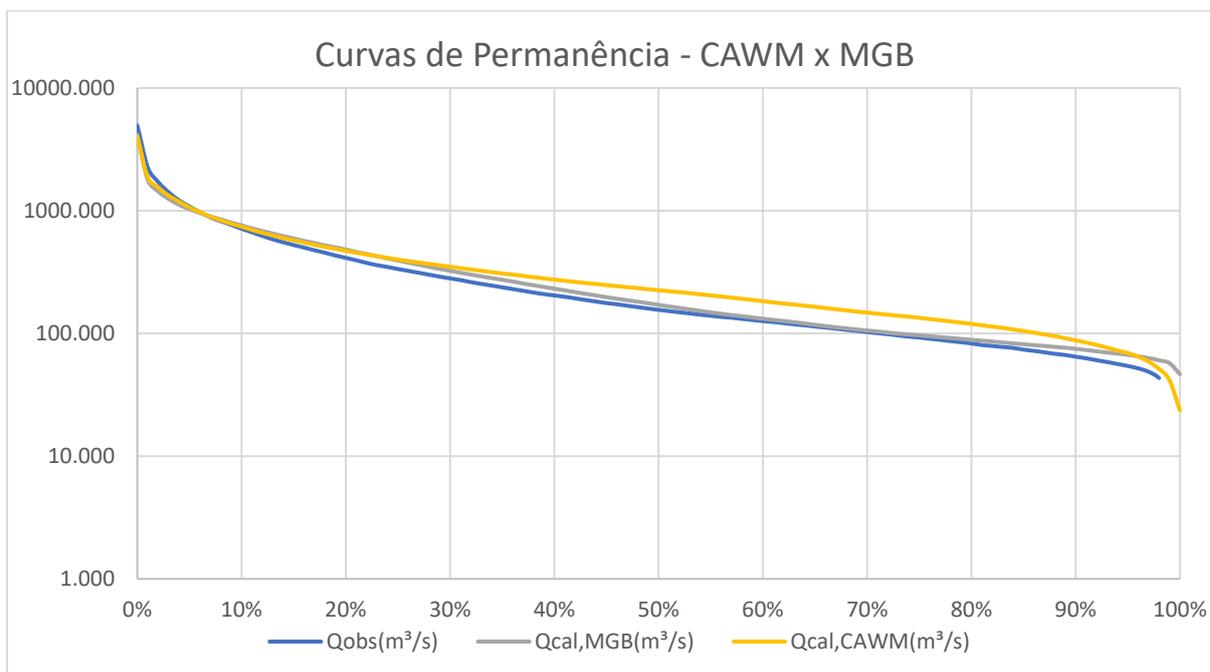


Fonte: O autor, 2020

4.3.5 Comparações entre o MGB-IPH e o CAWM V

O gráfico a seguir apresenta as curvas de permanência, em escala semi-logarítmica, das vazões observadas e as calculadas pelo MGB-IPH e o CAWM V.

Gráfico 23 - Curvas de permanência dos modelos GR4J e o CAWM V

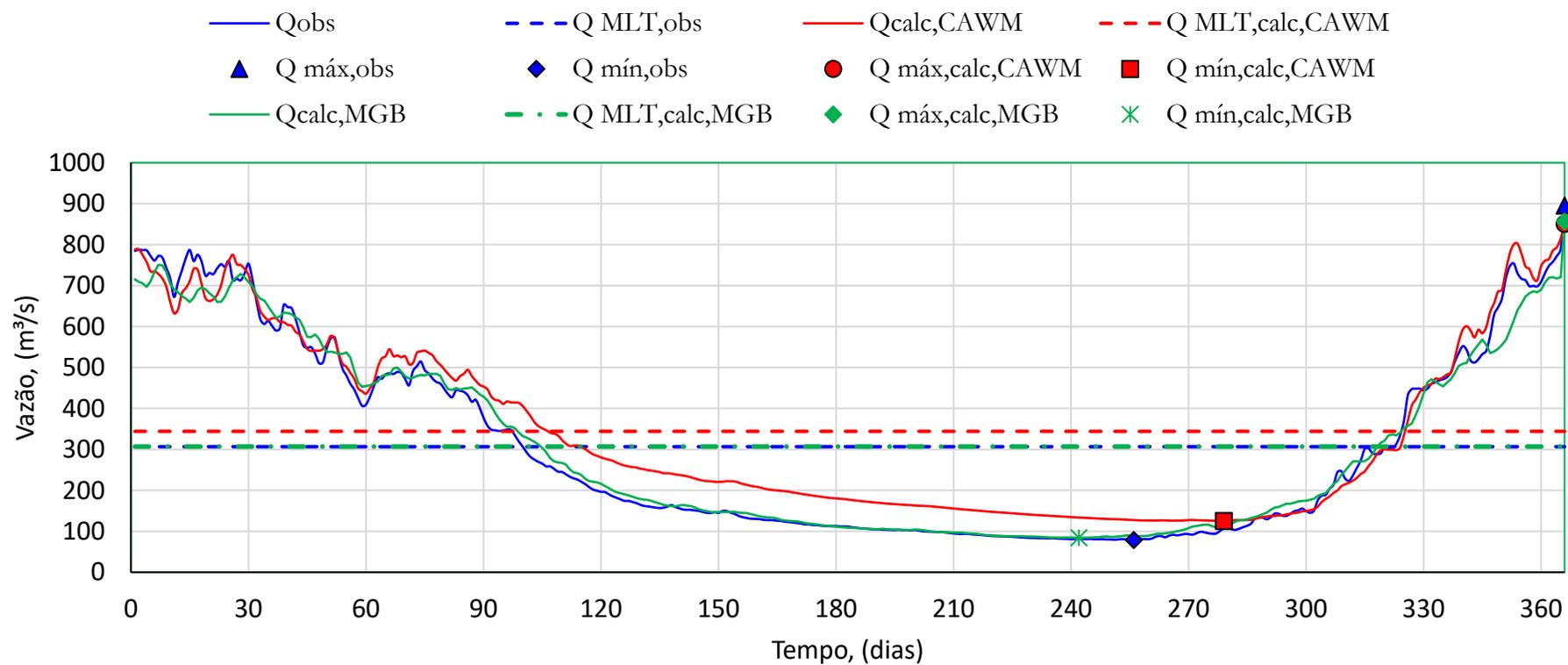


Fonte: O autor, 2020

Os hidrogramas anuais observado e calculados através do CAWM V e do MGB apresentados no gráfico a seguir resumem desempenho comparativos dos modelos.

Da análise comparativa, percebe-se que o MGB apresentou melhor ajuste para os indicadores $NASH_{log}$ e P_{bias} , o que explica melhor ajuste para as vazões mais baixas e para a média de longo período observados no hidrograma juliano. Os demais indicadores foram melhores no CAWM.

Gráfico 24 - Hidrograma de ano médio para a bacia do Rio das Velhas



Fonte: O autor, 2020

A tabela a seguir apresenta os resultados dos indicadores obtidos para o modelo MGB-IPH e os correlaciona com àqueles obtidos com o CAWM:

Tabela 28 - Indicadores de eficiência do MGB

Método	Evento	Data 1	Data 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	R2
MGB-IPH	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,806	0,801	0,663	12,2	0,44	0,814
	% atendido	-	-	83,9	88,6	88,6	73,4	89,9	98,7
Isócronas	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,827	0,806	0,716	0,7	0,42	0,836
	% atendido	-	-	74,4	74,4	71,8	89,7	74,4	94,9
Clark	Total	01/01/1982	31/08/2019	0,804	0,759	0,649	-12,2	0,44	0,823
	% atendido	-	-	76,9	74,4	71,8	87,2	76,9	92,3

Fonte: O autor, 2021

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo hidrológico CAWM V, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, quando aplicado às bacias hidrográficas do Rio das Velhas e do Parnaíba, consideradas como grandes bacias. De acordo com os resultados obtidos e através de análises das simulações realizadas, pode-se dizer, de uma forma geral, que o modelo apresentou bons resultados em ambos os casos estudados.

Uma das principais preocupações para a aplicação do modelo dizem respeito a distribuição espaço-temporal das precipitações. Assim, foram utilizados dois métodos de distribuição das precipitações, o primeiro considerando a defasagem das vazões precipitadas de acordo com o tempo de viagem das precipitações e o segundo utilizando o hidrograma tempo x área de Clark. Os resultados obtidos demonstram que o modelo se comportou muito bem, com destaque para o coeficiente NSE que sempre foi maior que 0,75 independentemente do tipo de distribuição das precipitações em ambas as bacias hidrográficas estudadas.

O CAWM V foi desenvolvido para contemplar processos de fluxo e representar características físicas e climáticas em bacias hidrográficas de rios perenes. Sua simplicidade devido aos poucos parâmetros a serem calibrados é considerada um de seus pontos fortes, uma vez que torna o processo de calibração do modelo bem menos exaustiva, além de incorporar menos incertezas a esse processo. Ressalta-se também que a aquisição das características físicas através de modelos digitais do terreno também confere mais segurança aos resultados obtidos.

Na comparação com os dois outros dois modelos hidrológicos utilizados como referência, o GR4J e o MGB-IPH, observou-se que os resultados obtidos com o CAWM V foram melhores que aqueles obtidos com o GR4J. Na comparação com o MGB, os dois modelos apresentaram performance muito boa, com o CAWM melhor para as vazões mais elevadas e o MGB-IPH para as mais baixas e para a média de longo período.

O uso das isócronas apresentou melhor ajuste que a aplicação do método das ordenadas do HTA, embora as diferenças não tenham sido muito significativas no caso da bacia do Rio das Velhas. No caso na bacia do Parnaíba, a resposta

apresentou uma maior diferença. Tal fato se explica pelo tamanho da bacia hidrográfica, uma vez que quanto maior mais significativa será o efeito da distribuição espacial.

A aplicação de modelos mais simples para a bacia do Rio das Velhas levou a bons resultados, levando a crer que tais modelos mais simples possam ser aplicados, considerando como vantagem o menor esforço requerido em comparação com um modelo mais aprimorado como o MGB-IPH. O bom resultado para a grande bacia hidrográfica do rio Parnaíba, obtido com o CAWM V, corrobora essa conclusão. Por outro lado, tendo sido estudadas apenas duas bacias hidrográficas, é preciso mais estudos para ratificar tal hipótese.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o melhoramento do CAWM V com a implementação do cálculo da evapotranspiração utilizando produtos de satélite ao invés da utilização das normais climatológicas que foram utilizadas nesse trabalho. Além disso, diante do tamanho da bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, é recomendado aumentar a quantidade de postos pluviométricos de forma a melhorar os resultados obtidos. Por fim, também é recomendado explorar a regionalização dos parâmetros obtidos com o CAWM e verificar a aderência das vazões em regiões em dados disponíveis.

REFERÊNCIAS

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), 61-77. Fonte: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90115-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90115-0)
- Almeida, A. L. (2019). GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO DAS VELHAS: COMO PODEM OS MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUÍDOS SUBSIDIAR O PLANEJAMENTO? Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (January de 2013). Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
- ALVES SOBRINHO, T. A., OLIVEIRA, P. T., RODRIGUES, D. B., & AYRES, F. M. (2010). Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *Revista de Engenharia Agrícola*, 46-57.
- Arnold, J. G. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. Fonte: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bergström, S. (1991). Principles and confidence in hydrological. *Nordic Hydrology*, 22(2), 123-136. Fonte: <http://dx.doi.org/10.2166/nh.1991.0009>.
- Bergström, S., & Lindström, G. (2015). Interpretation of runoff processes in hydrological modelling-experience from the HBV approach. *Hydrological Processes*, 3535-3545. Fonte: <https://doi.org/10.1002/hyp.10510>
- CBH Rio das Velhas. (2015). Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas 2015: Resumo Executivo. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, Belo Horizonte. Acesso em Março de 2020, disponível em cbhvelhas.org.br

CIRILO, J. A., Alves, F., SILVA, L. A., & Campos, J. H. (2014). Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7, 755-763.

Cirilo, J. A., Verçosa, L. F., Gomes, M. M., Feitoza, M. A., Ferraz, G. d., & Silva, B. d. (2020). Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25. Fonte: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>

Codevasf. (2016). PLANO NASCENTE PARNAÍBA. Brasília: IABS.

COLLISCHON, W. (2001). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS. Porto Alegre: Tese (Doutorado em engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Collischonn, W., Allasia, D., Da Silva, B. C., & Tucci, C. E. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall: runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878-895. Fonte: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

Cornelissen, T., Diekkrüger, B., & Giertz, S. (2013). A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a tropical catchment. *Journal of Hydrology*, 221-236. Fonte: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydrol.2013.06.016>

CUNHA, L. K. (2004). Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real. Curitiba : Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal Do Paraná .

de Vos, N. J., Rientjes, T. H., & Gupta, H. V. (2010). Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. *Hydrological Processes*, 24(20), 2840-2850. Fonte: <https://doi.org/10.1002/hyp.7698>

EDIJATNO, & MICHEL, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *Houille Blanche Revue Internationale De L'Eau*, 2, 113-121.

EDIJATNO, NASCIMENTO, N. D., YANG, X., MAKHLOUF, Z., & MICHEL, C. (Abril de 1999). GR3J: A daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44, 263-277.

EMBRAPA. (1979). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro.

EMBRAPA. (2015). Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília.

Fan, F. M., Buarque, D. C., Pontes, P. R., & Collischonn, W. (Novembro de 2015). UM MAPA DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA PARA A AMÉRICA DO SUL. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH.

FAYAL, M. A. (2008). Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet. Rio de Janeiro : Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro .

Feldman, A. D. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual. USA: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

FERRAZ, G. D. (2019). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO IMPACTO DE ENCHENTES NA BACIA DO RIO SIRINHAÉM E AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em recursos hídricos), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

GOMES, M. M. (2019). Abordagem Integrada de Modelagem Hidrológica e Operação de Barragens para Avaliação da Eficiência do Controle de Cheias na Bacia do Rio Capibaribe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

GROSSI, C. H. (2003). Sistema de informação geográfica - basins 3.0 na modelagem hidrológica da bacia experimental do rio Pardo, SP. Botucatu : Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). STATUS OF AUTOMATIC CALIBRATION FOR HYDROLOGIC MODELS: COMPARISON WITH MULTILEVEL EXPERT CALIBRATION. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

Hansen, J. R. (2007). Problems with heterogeneity in physically based agricultural catchment models. *Journal of Hydrology*, 342(1-2), 1-6. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.016>

Hartnett, M., Berry, A., & Irvine, K. (2007). The use of modelling to implement the Water Framework Directive. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 104, pp. 11-20. Fonte: <http://dx.doi.org/10.2495/RM070021>

IBGE. (2010). Censo Demográfico. Acesso em Agosto de 2020, disponível em Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: www.ibge.gov.br

IBGE. (2015). Manual Técnico de Pedologia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. Acesso em Agosto de 2020, disponível em <https://www.ibge.gov.br/>

IBGE. (2019). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso em Agosto de 2020, disponível em <https://www.ibge.gov.br/>

INMET. (2010). Evapotranspiração Potencial Mensal e Anual 1981-2010. Acesso em 06 de Dezembro de 2019, disponível em <https://portal.inmet.gov.br/>: <https://portal.inmet.gov.br/normais>

KAY, A. L., JONES, D. A., CROOKS, S. M., CALVER, A., & REYNARD, N. S. (2006). "A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models". *Hydrological Processes*, 20(18), 3953-3973.

Li, F., Zhang, Y., Xu, Z., Teng, J., Liu, C., Liu, W., & Mpelasoka, F. (2013). . The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology* , 505, 188-201. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.052>

LOPES, J. E., BRAGA JÚNIOR, B. P., & CONEJO, J. G. (1981). Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (pp. 42-62). Fortaleza : ABRH.

LUCAS, E. W., SOUZA, F. A., SILVA, F. D., & LUCIO, P. S. (2009). Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, pp. 308-322.

MapBiomass. (2020). Acesso em Agosto de 2020, disponível em Projeto MapBiomass – Coleção [4.1] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil: <https://mapbiomas.org/>

Medeiros, M. S., Fleischmann, A. S., Oliveira, A. M., Corati, B. K., Fan, F. M., Martinbiancho, G. K., . . . Collischonn, W. (2019). MANUAL DE EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO MGB 2018 UTILIZANDO O IPH-Hydro Tools.

MENDES, C. A., & CIRILO, J. A. (2013). Geoprocessamento de recursos hídricos: princípios, integração e aplicação (Vol. 1). Porto Alegre: ABRH.

Mendez, M., & Calvo-Valverde, L. (2016). Assessing the Performance of Several Rainfall Interpolation Methods as Evaluated by a Conceptual Hydrological Model. *Procedia Engineering*, 154, 1050-1057. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.595>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Nasonova, O. N. (2011). Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 1. Model calibration. *Water Resources*, 38(2), 155-168. Fonte: <http://dx.doi.org/10.1134/S0097807811020102>.

Nasonova, O. N. (2011). Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 2. Comparison with hydrological models. *Water Resources Research*, 274-283.

LOUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C., & MOINE, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 french catchments.: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research* 44(3), 1-15.

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* (, 242(3-4), 275-301. Fonte: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00393-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0)

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.

PUSHPALATHA, R., PERRIN, C., LE MOINE, N., & ANDRÉASSIAN, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420-421, 171-182. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.055

RENNÓ, C. D., & SOARES, J. V. (2010). Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. CT Brasil - Ministério da Ciência e Tecnologia .

Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., & Holisaz, A. (21 de Junho de 2016). Estimating time of concentration in large watersheds. Springer .

SARAIVA, I., FERNANDES, W., & NAGHETTINI, M. (2011). Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16, 115-125.

Sartori, A., Neto, F. L., & Genovez, A. M. (Agosto de 2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10, 5-18.

Schaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q., Mitchell, K., & Chen, F. (1996). Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research*, 101(3), 7461-7475. Fonte: <http://dx.doi.org/10.1029/95JD02892>

SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S., GUPTA, V., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., . . . ZEHE, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal* 48(6), 857-880.

Traore, V. B., Sambou, S., Tamba, S., Fall, S., Diaw, A. T., & Cisse, M. T. (2014). Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. *American Journal of Environmental Protection*, 36-44. Fonte: <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15>.

TSOU, M., & WHITTEMORE, D. O. (2001). User Interface for Ground-water Modeling: ArcView Extension. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6, 251-257.

Tucci, C. E. (2005). Modelos Hidrológicos. ABRH.

Tucci, C. E. (2010). RHAMA. Fonte: <http://www.rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>

UFRGS. (28 de 05 de 2022). Fonte: Hidrologia de Grande Escala: MGB 4.5: <https://www.ufrgs.br/lsh/mgb/downloads/mgb-4-5-new-documentation/>

Valeriano, M. d. (2008). TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOÓGICOS LOCAIS. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Ministério da Ciência e Tecnologia.

VAN LIEW, M. W., VEITH, T. L., BOSCH, D. D., & ARNOLD, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the conservation effects assesment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrology Engineering* , 12(2), 173-189.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS

A.1: Postos Pluviométricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas

Código	Nome	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
		Latitude	Longitude	
1744000	Guaicui	-17,2000	-44,8167	SUDENE
1744002	Jatobá	-17,2000	-44,6667	SUDENE
1744005	Pirapora	-17,3667	-44,9333	SUDENE
1744007	Fazenda Guaicui	-17,3667	-44,7833	ANA
1744008	Jequitáí	-17,2500	-44,4833	ANA
1744009	Várzea Da Palma	-17,5961	-44,7011	ANA
1744010	Lassance	-17,8900	-44,5767	ANA
1744012	Buenópolis	-17,8742	-44,1769	ANA
1744027	Fazenda Mãe D'Água	-17,5000	-44,7000	ANA
1744030	Estação De Curimatai	-17,9953	-44,1767	ANA
1744032	Fazenda Rompedia	-17,3000	-44,2831	ANA
1744044	Pedra De Santana	-17,6333	-44,9833	ANA
1744045	Joaquim Felício	-17,7500	-44,1667	ANA
1843002	Gouveia	-18,4656	-43,7431	ANA
1843006	Alvorada De Minas	-18,7333	-43,3833	ANA
1843011	Serro	-18,5928	-43,4125	ANA
1843014	Diamantina	-18,2506	-43,6011	CEMIG
1843015	Povoado De Vau	-18,4172	-43,5256	ANA
1843020	São João Da Chapada	-18,0833	-43,8333	ANA
1843028	Pch Serra Das Agulhas Jusante	-18,3481	-44,0275	SIGMA
1844000	Curvelo	-18,7661	-44,4261	ANA
1844001	Santo Hipólito	-18,3061	-44,2258	ANA
1844002	Corinto	-18,3667	-44,4500	ANA
1844003	Ponte Do Licínio	-18,6819	-44,6761	ANA
1844004	Granja Santa Branca	-18,7617	-44,4036	ANA
1844005	Rodeador	-18,3167	-44,1000	ANA
1844009	Presidente Juscelino - Jusante	-18,6439	-44,0481	ANA
1844010	Ponte Do Licínio - Jusante	-18,6714	-44,1914	ANA
1844011	Porto Do Pontal	-18,1667	-44,1667	CODEVASF
1844013	Santo Hipólito	-18,2667	-44,2333	CODEVASF
1844015	Curvelo	-18,7667	-44,4333	INMET
1844016	Ponte Da Mg-140	-18,6333	-44,1000	CODEVASF
1844017	Corinto	-18,3722	-44,4436	ANA
1844018	Ponte Do Bicudo	-18,1908	-44,5556	ANA
1844019	Morro Da Garça	-18,5417	-44,5989	ANA
1844024	Felixlândia	-18,7500	-44,9000	ANA
1845026	Fazenda Das Pedras	-18,0167	-45,1058	CEMIG
1845032	Andrequice - Três Marias	-18,2833	-45,0000	ANA
1943000	Mineração Morro Velho	-19,9792	-43,8500	ANA
1943002	Conceição Do Mato Dentro	-19,0167	-43,4442	ANA
1943004	Jaboticatubas	-19,5206	-43,7444	ANA
1943006	Sabará	-19,8931	-43,8150	ANA
1943007	Santa Bárbara	-19,9453	-43,4011	ANA
1943009	Vespasiano	-19,6872	-43,9208	ANA

1943010	Caeté	-19,9028	-43,6664	ANA
1943012	Lagoa Santa	-19,6333	-43,9000	ANA
1943013	Carlos Prates	-19,9119	-43,9578	ANA
1943014	Fabrica São Vicente	-19,5167	-43,7500	ANA
1943016	Mutuca	-19,9500	-43,9667	ANA
1943018	Venda Nova	-19,8167	-43,9667	ANA
1943019	Usina Pacífico Mascarenhas	-19,2833	-43,6000	ANA
1943022	Caixa De Areia	-19,9450	-43,9125	ANA
1943023	Taquaraçu	-19,6639	-43,6881	ANA
1943024	José De Melo	-19,6897	-43,5856	ANA
1943028	Instituto Agrônômico	-19,9333	-43,9500	ANA
1943034	Instituto Agrônômico	-19,9167	-43,9000	ANA
1943035	Vau Da Lagoa	-19,2189	-43,5881	ANA
1943036	São Vicente (Usina)	-19,3000	-43,9333	ANA
1943037	Fazenda Do Cipó	-19,2500	-43,7500	ANA
1943038	Usina Parauninha	-19,5167	-43,7667	ANA
1943039	Magnesita	-19,9667	-43,9833	ANA
1943041	Rua Sideral	-19,9500	-43,9833	ANA
1943042	Fazenda Caraibas	-19,1197	-43,8375	ANA
1943049	Ponte Raul Soares	-19,5614	-43,9178	ANA
1943055	Belo Horizonte (Horto)	-19,9000	-43,9167	INMET
1943064	Rua São Paulo	-19,9247	-43,9414	ANA
1943066	Mina De Águas Claras	-19,9333	-43,9333	INMET
1944000	Prudente De Moraes - A	-19,4833	-44,1500	ANA
1944009	Pedro Leopoldo	-19,6344	-44,0533	ANA
1944010	Horto Florestal	-19,2681	-44,4017	ANA
1944013	Porto Do Mesquita	-19,1667	-44,6833	ANA
1944017	Usina Santo André	-19,7333	-44,0833	ANA
1944018	Caetanópolis	-19,2925	-44,4111	ANA
1944020	Pirapama	-19,0131	-44,0367	ANA
1944023	Companhia Ind. Belo Horizonte	-19,6167	-44,0500	ANA
1944024	Fazenda Vargem Bonita	-19,2372	-44,1231	ANA
1944029	Sete Lagoas	-19,4500	-44,2333	ANA
1944052	Sete Lagoas	-19,4667	-44,2500	INMET
1944053	Contagem	-19,9000	-44,100	INMET
1944057	Cana Do Reino	-19,7833	-44,3333	ANA
1944068	Fazenda Capão Do Gado	-19,0289	-44,1939	ANA
2043002	Lagoa Grande (Mmv)	-20,1792	-43,9428	ANA
2043004	Rio Do Peixe (Mmv)	-20,1378	-43,8925	ANA
2043007	Vargem Do Tejucal	-20,3333	-43,5500	ANA
2043013	Congonhas - Linigrafo	-20,5219	-43,8300	ANA
2043015	Aguiar Moreira	-20,1667	-43,8167	ANA
2043016	Rio Acima	-20,0919	-43,7919	ANA
2043019	Cachoeira Do Campo	-20,3333	-43,6667	ANA
2043020	Itabirito	-20,2500	-43,8000	ANA
2043022	Colégio Caraça	-20,2167	-43,5667	ANA
2043023	Conceição Do Rio Acima	-20,0667	-43,5833	ANA
2043042	Represa Das Codornas (Mmv)	-20,1647	-43,8919	ANA
2043043	Represa Do Miguelão (Mmv)	-20,1261	-43,9503	ANA
2043044	Pico De Itabirito	-20,3667	-43,4833	MORRO VELHO
2043049	Ouro Preto	-20,3833	-43,5000	INMET
2043052	Ouro Branco (Acominas)	-20,5000	-43,7000	INMET
2043056	Fazenda Água Limpa Jusante	-20,3031	-43,6158	ANA
2043057	Pch Codorna Barramento	-20,1656	-43,8928	ANGLO GOLD

2043058	Miguelão	-20,1667	-43,9000	ANGLO GOLD
2043060	Itabirito Linigrafo	-20,2878	-43,8000	ANA
2044012	Ibirité	-20,0428	-44,0433	ANA
2044039	Ibirité	-20,0167	-44,0500	INMET

A.2: Postos Pluviométricos da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba

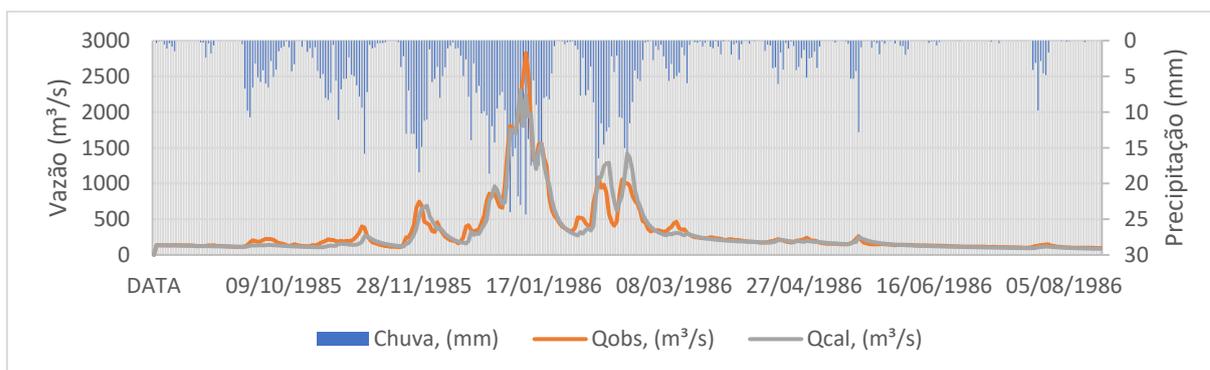
Código	Nome	Coordenadas Geográficas	
		Latitude	Longitude
943014	Campo Alegre De Lourdes	-9,5131	-43,0253
943013	Baluarte	-9,4781	-43,5383
1043012	Buritirama	-10,7286	-43,6308
1244011	Barreiras	-11,1544	-45,0092
841019	Luís Viana	-8,7439	-41,2436
1043013	Nova Holanda	-10,1239	-43,4892
941017	Lagoa Do Alegre	-9,1069	-41,6897
1145001	Formosa Do Rio Preto	-11,0478	-45,2019
1145004	Fazenda Bom Jardim	-10,9925	-45,5267
1045006	Coaceral	-10,5622	-45,695
1144027	Ibipetuba	-11,0061	-44,5256
942027	Remanso	-9,6025	-42,0683
340105	Ararius	-3,89	-40,6047
440084	Várzea Do Grosso	-4,1378	-40,4397
441014	Saudoso	-4,6186	-41,125
640003	Arneiroz	-6,3264	-40,1589
440042	Fazenda Cajazeiras	-4,3678	-40,5356
639045	Malhada	-6,6461	-39,9594
340104	Tapera	-3,3289	-40,8464
440005	Croatá	-4,4164	-40,9042
539043	Juazeiro	-5,0489	-39,6886
341040	Chaval Retiro	-3,0789	-41,2522
541013	Oiticica	-5,0964	-41,0831
746007	Brejo Comprido	-7,9286	-45,9886
442013	Duque Bacelar	-4,1528	-42,9461
746009	Recursos	-7,3314	-46,3075
845004	Barra Do Fosdão	-8,1014	-45,5875
242002	Barro Duro	-2,9022	-42,3131
645003	Mato Grosso	-6,8442	-45,1092
443012	Aldeias Altas	-4,6242	-43,4658
745007	Balsinhas Br-324	-7,5256	-45,8131
443003	Caxias	-4,8653	-43,3583
745005	Fazenda Tigre	-7,3747	-45,6078
643011	Lages	-6,61	-43,4011
643013	Barão De Grajaú	-6,7614	-43,0278
343009	Mata Roma	-3,6258	-43,1122
746006	Balsas	-7,5233	-46,0339
845003	Babilônia	-8,3175	-45,9678
646005	Fazenda São Vicente	-6,8183	-46,3336

946005	Morrinhos	-9,6247	-46,2903
945011	Alto Parnaíba	-9,1131	-45,9261
342009	Barra Da Onça	-3,3647	-42,7239
543002	Lagoa	-5,4844	-43,3586
643012	Passagem Franca	-6,1747	-43,7792
543011	Vereda Grande	-5,97	-43,4158
845005	Inhumas	-8,8211	-45,9681
846005	Boa Vista	-8,8128	-46,0781
744000	São Félix De Balsas	-7,0814	-44,8125
746008	Morro Vermelho	-7,1578	-46,5544
644016	Nova Iorque	-6,6833	-44,05
745004	Sambaíba	-7,1411	-45,3461
742012	Francisco Ayres	-6,6183	-42,6939
945016	Contrato	-9,7289	-45,0281
342007	Luzilândia	-3,4622	-42,3733
542008	Prata Do Piauí	-5,6675	-42,2061
542023	Passagem Franca Ii	-5,8583	-42,4353
745003	Ribeiro Gonçalves	-7,5572	-45,2444
743009	Barra Do Lance	-7,2453	-43,6444
841017	Pedra Redonda	-8,0056	-41,5014
543010	Palmeirais	-5,9756	-43,0617
1044008	Parnaguá	-10,2197	-44,6414
741000	Campo Largo	-7,4667	-41,8667
543009	Fazenda Veneza	-5,5728	-43,0242
942028	São Raimundo Nonato	-9,0167	-42,6872
541015	Bebedouro	-5,0586	-41,1233
441018	Sangradouro	-4,0378	-41,2681
842014	São João Do Piauí	-8,3589	-42,2453
642018	Fazenda Talhada Ii	-6,9861	-42,0883
442010	Miguel Alves	-4,1708	-42,8917
843010	Ponte Br-324	-8,0939	-43,8144
741003	Itainópolis	-7,4497	-41,4775
442005	Fazenda Alegria	-4,41	-42,1953
542012	Teresina - Chesf	-5,0878	-42,7992
541002	Fazenda Boa Esperança	-5,2247	-41,7369
742011	São Francisco Do Piauí	-7,2464	-42,5419
541014	Santa Cruz Dos Milagres	-5,8003	-41,9594
441000	Açude Caldeirão	-4,3333	-41,7333
342002	Esperantina	-3,9033	-42,2294
844008	Cristino Castro Ii	-8,8131	-44,2156
841016	Açude Ingazeira	-8,1333	-41,1167
341027	Tinguis	-3,7233	-41,9756
744011	Fazenda Bandeira	-7,3958	-44,6117
341038	Piracuruca	-3,9336	-41,7169
642012	Fazenda Talhada	-6,9731	-42,1061
741009	Santa Cruz Do Piauí Ii	-7,1811	-41,7642
847003	Recursolândia	-8,7375	-47,2417
946003	Lizarda	-9,5972	-46,6728
847002	Campos Lindos	-7,9711	-46,8064
1046001	Mateiros	-10,5464	-46,4186
847004	Centenário	-8,9642	-47,3339

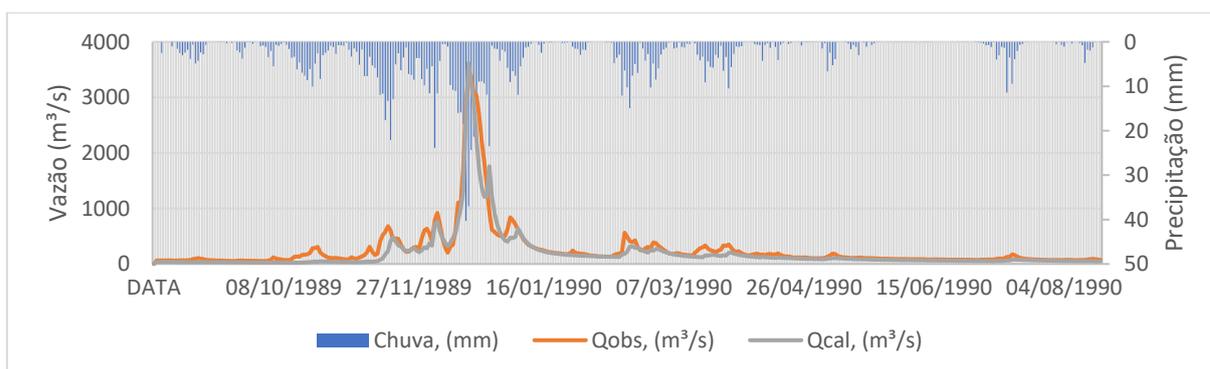
APÊNDICE B – HIDROGRAMAS OBTIDOS COM O CAWM

B.1: Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (chuvas distribuídas com isócronas)

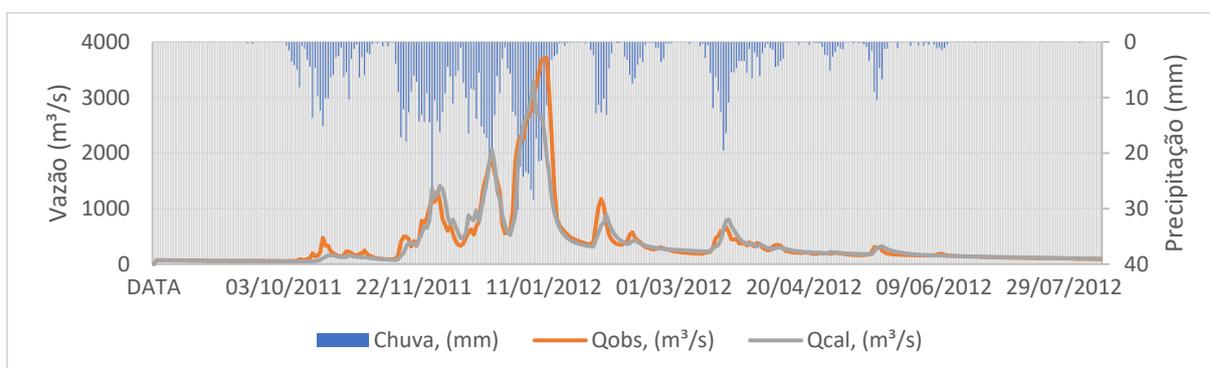
a) Período: 21/08/1985 a 20/08/1986 (NSE = 0,920; PBIAS = -3,8%)



b) Período: 20/08/1989 a 19/08/1990 (NSE = 0,897; PBIAS = -22,4%)

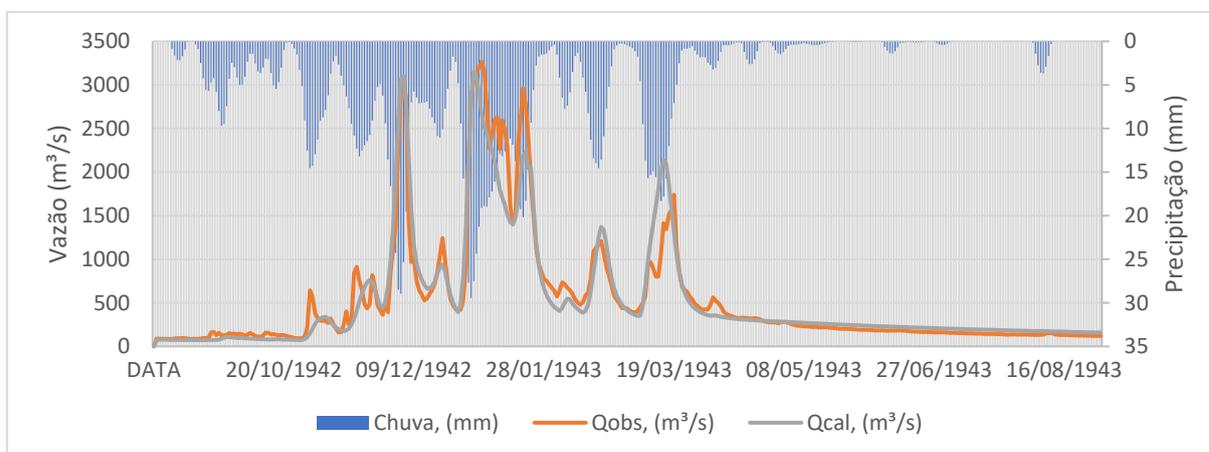


c) Período: 15/08/2011 a 13/08/2012 (NSE = 0,888; PBIAS = -5,9%)

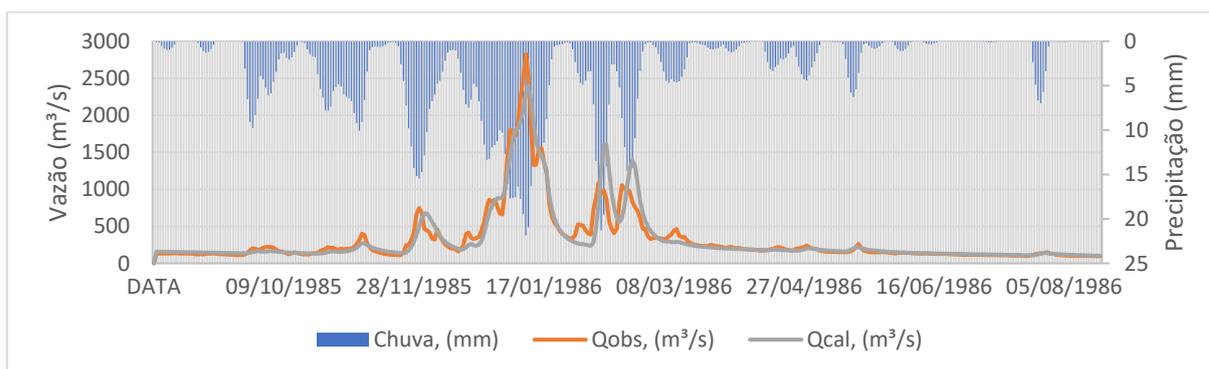


B.2: Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (Clark)

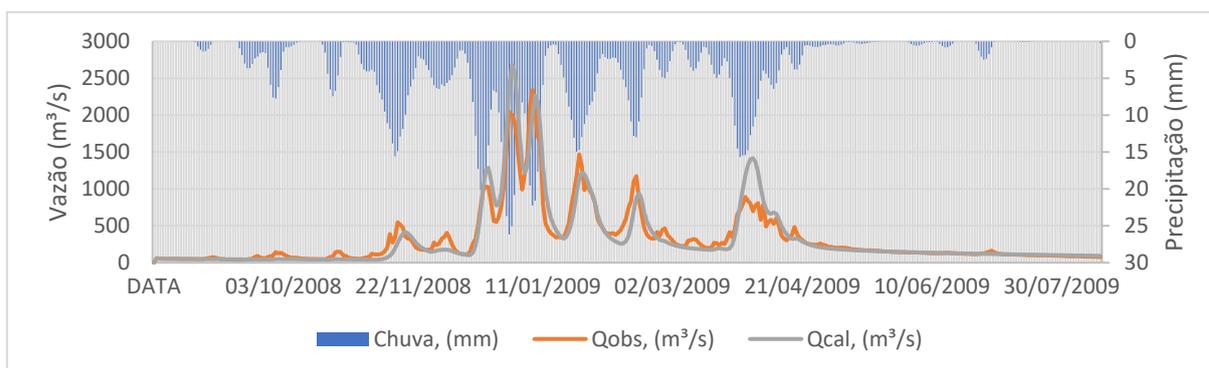
a) Período: 01/09/1942 a 31/08/1943 (NSE = 0,911; PBIAS = -0,9%)



b) Período: 21/08/1985 a 20/08/1986 (NSE = 0,886; PBIAS = 0,2%)

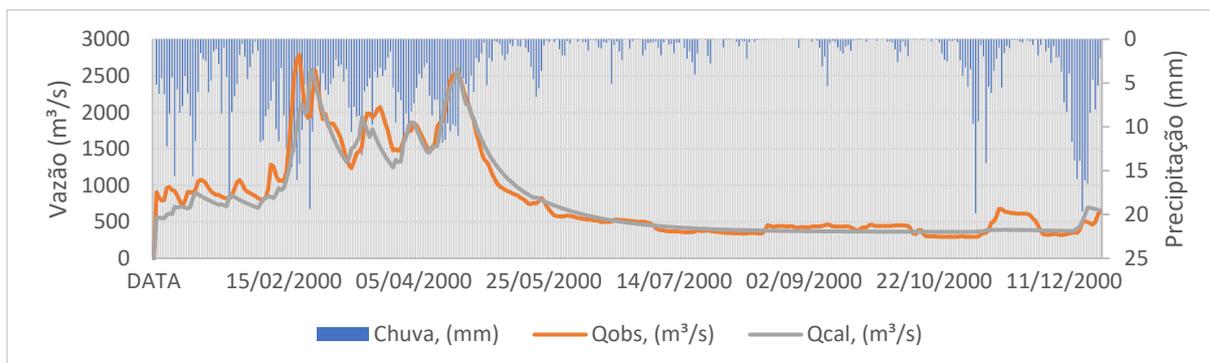


c) Período: 15/08/2008 a 14/08/2009 (NSE = 0,854; PBIAS = 1,7%)

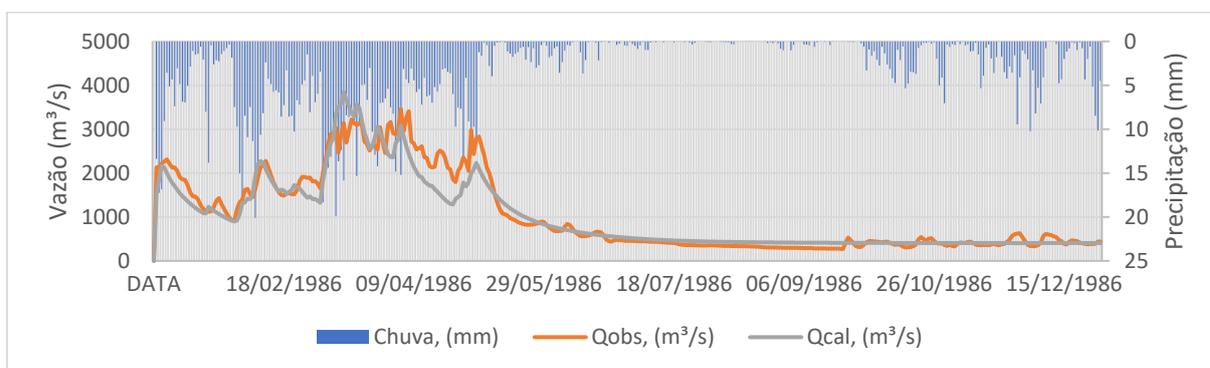


B.3: Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (chuvas distribuídas com isócronas)

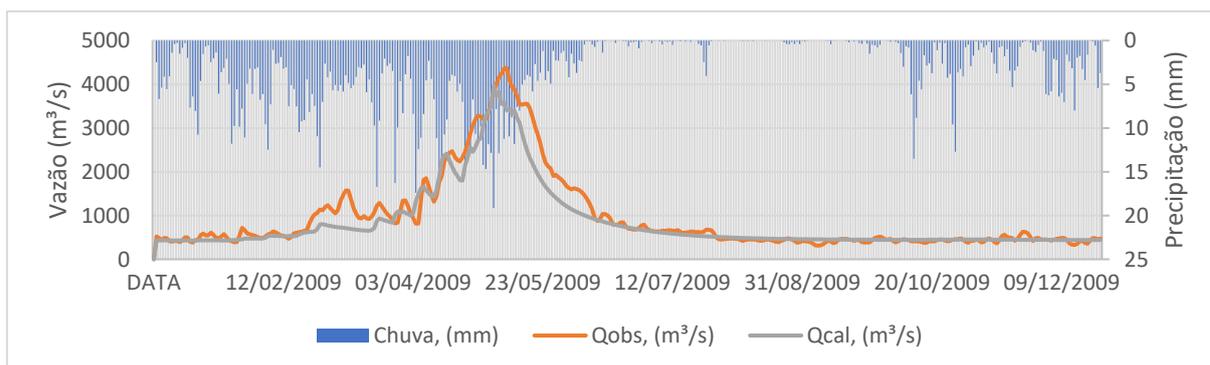
a) Período: 28/12/1999 a 26/12/2000 (NSE = 0,922; PBIAS = -4,7%)



b) Período: 31/12/1985 a 30/12/1986 (NSE = 0,9140; PBIAS = -4,6%)

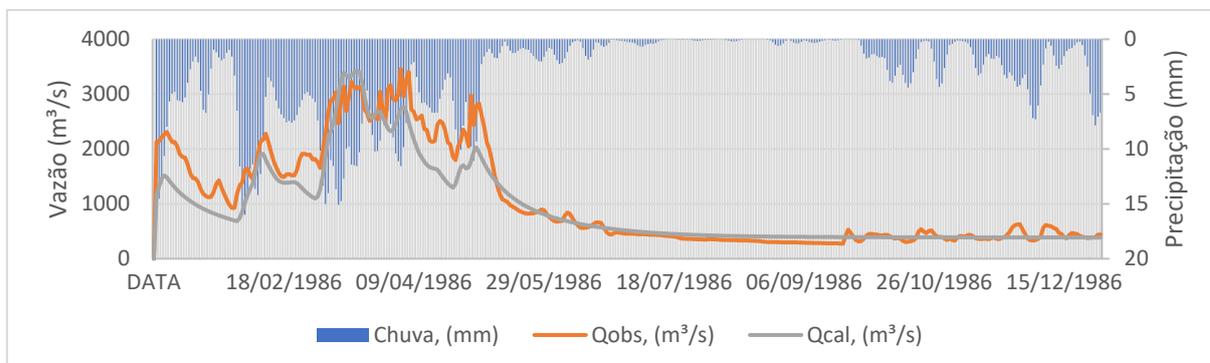


c) Período: 25/12/2008 a 24/12/2009 (NSE = 0,911; PBIAS = -12,2%)

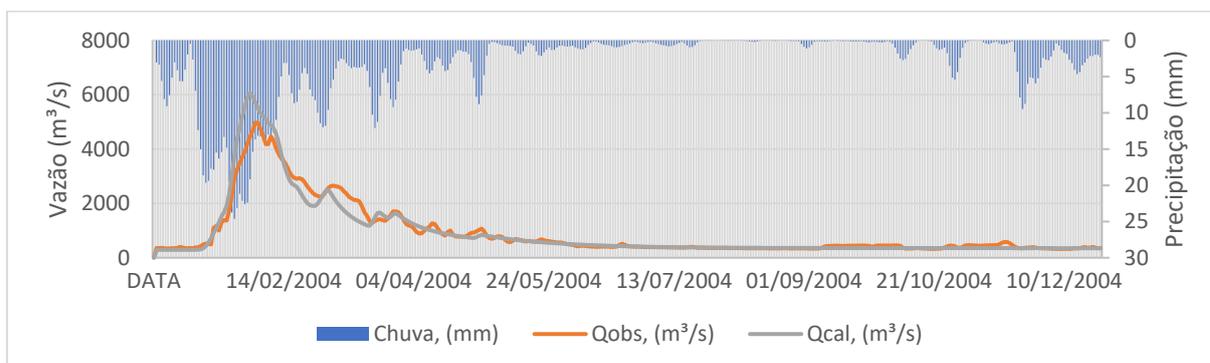


B.4: Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (Clark)

a) Período: 31/12/1985 a 30/12/1986 (NSE = 0,866; PBIAS = -12,5%)



b) Período: 27/12/2003 a 25/12/2004 (NSE = 0,915; PBIAS = -0,2%)



c) Período: 22/12/2008 a 24/12/2009 (NSE = 0,868; PBIAS = -21,4%)

