



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

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**ABORDAGEM INTEGRADA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E OPERAÇÃO DE  
BARRAGENS PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO CONTROLE DE CHEIAS  
NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE**

Recife  
2019

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**ABORDAGEM INTEGRADA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E  
OPERAÇÃO DE BARRAGENS PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO  
CONTROLE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Tecnologia  
Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Almir Cirilo

Recife  
2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

G633a Gomes, Mayara Maria de Arruda.  
Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na Bacia do Rio Capibaribe / Mayara Maria de Arruda Gomes. – 2019.  
155 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Bacia do Rio Capibaribe. 3. CAWM IV. 4. Modelo hidrológico concentrado. 5. Operação de reservatórios. 6. Controle de cheias. I. Cirilo, José Almir. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-85

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**ABORDAGEM INTEGRADA DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E OPERAÇÃO DE  
BARRAGENS PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO CONTROLE DE CHEIAS  
NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE**

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

Aprovada em: 27/02/2019

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leijdane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus, por sempre iluminar meu caminho e me guiar nos momentos difíceis da vida. Ele que sempre me dá forças nos momentos em que não encontro em mim mesma.

À minha mãe e meu pai, por sempre me apoiarem e me possibilitarem seguir o caminho que estou seguindo hoje. Sem vocês, eu não seria nada. À toda minha família, pelas palavras de apoio. E a Junior Duarte, por me apoiar desde o início da graduação em todos os momentos.

Ao meu orientador querido Prof. Almir Cirilo, por acreditar em mim, mesmo nos momentos que pensei que não fosse capaz. Obrigada por acreditar no meu potencial e por ser essa pessoa tão especial. O senhor sempre terá um lugar especial em meu coração.

Aos amigos que fiz no mestrado e que vou levar para a vida, em especial Livia e Yuri, pelo companheirismo e ajuda nos momentos mais difíceis. Agradeço imensamente a Livia todo o apoio e pelas experiências trocadas desde o início.

À CAPES, pela concessão da bolsa, que possibilitou a realização deste estudo.

## RESUMO

Várias inundações já ocorreram na região da bacia do Rio Capibaribe, a exemplo do evento catastrófico ocorrido em 1975, com intensa destruição das cidades ao longo da calha do rio. Por este motivo é necessário um acompanhamento permanente deste sistema hídrico formado pelo Capibaribe e seus afluentes, assim como das estruturas hidráulicas de controle, para que se minimize a vulnerabilidade das cidades ao longo desta bacia. Nesse contexto, a presente pesquisa desenvolveu a integração entre modelagem hidrológica e operação de reservatórios para a avaliação da eficiência das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá no que concerne ao controle de cheias. Para isso, buscou-se aprimorar e aplicar o Campus Agreste Watershed Model (CAWM IV), inédito modelo hidrológico concentrado com apenas três parâmetros a calibrar, criado na Universidade Federal de Pernambuco para bacias do semiárido. Em complemento, simulou-se o comportamento das barragens através de um modelo que representa o balanço de massa nos reservatórios. As simulações hidrológicas com o CAWM IV demonstraram resultados aceitáveis a bons para todas as sub-bacias estudadas na bacia do rio Capibaribe, onde os melhores eventos simulados apresentaram coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,80, 0,95, 0,84, 0,99 e 0,55 para as estações fluviométricas de Santa Cruz, Toritama, Limoeiro, Paudalho e São Lourenço, respectivamente. Estes resultados encorajam a aplicação deste modelo para as demais bacias de Pernambuco pela sua simplicidade e fácil utilização. A simulação do modelo de operação dos reservatórios também representou satisfatoriamente as vazões de chegada nos postos fluviométricos de Limoeiro, Paudalho e São Lourenço e sinalizou a importância das barragens no controle de cheias para estas cidades. Porém, também se concluiu que, mesmo com a presença das barragens, a cidade do Recife não está completamente imune ao efeito de eventos hidrológicos extremos, como o ocorrido em 2011. E também se observou que, devido a mudanças climáticas, os padrões pluviométricos na bacia do rio Capibaribe podem sofrer alterações aumentando-se a intensidade de eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: Bacia do Rio Capibaribe. CAWM IV. Modelo hidrológico concentrado. Operação de reservatórios. Controle de cheias.

## ABSTRACT

Several floods have already occurred in the Capibaribe River basin region, like the catastrophic event of 1975, which caused intense destruction of the cities along the river channel. For this reason, it is necessary a permanent monitoring of this water system formed by the Capibaribe River and its tributaries, as well as hydraulic control structures, in order to minimize the vulnerability of the cities within this basin. In this context, this research developed the integration between hydrological modeling and reservoir operation to evaluate the efficiency of the Jucazinho, Carpina, Tapacurá and Goitá dams in relation to flood control. In order to do so, we sought to improve and apply Agreste Watershed Model Campus (CAWM IV), an unpublished lumped hydrological model with only three parameters to be calibrated, created at the Federal University of Pernambuco for the semi-arid basins. In addition, the behavior of the dams was simulated through a model that represents mass balance in the reservoirs. The hydrological simulations with the CAWM IV demonstrated acceptable results for all sub-basins studied in the Capibaribe river basin, where the best simulated events presented a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.80, 0.95, 0.84, 0.99 and 0.55 for the fluvimetric stations of Santa Cruz, Toritama, Limoeiro, Paudalho and São Lourenço, respectively. These results encourage the application of this model to the other basins of Pernambuco for its simplicity and easy use. The simulation of the reservoirs operation model also satisfactorily represented flows in the cities of Limoeiro, Paudalho and São Lourenço, highlighting the importance of dams for flood control in these municipalities. However, it was also concluded that, even with the presence of dams, the city of Recife is not completely immune to the effects of extreme hydrological events, such as occurred in 2011. It was also observed that, due to climatic change, the pluviometric patterns in the basin of the Capibaribe River may undergo changes, increasing intensities of extreme hydrological events.

Keywords: Capibaribe River Basin. CAWM IV. Lumped hydrological model. Reservoirs operation. Flood control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Bacias Hidrográficas de Pernambuco.....	18
Figura 2	Trechos inundáveis de rios no estado de Pernambuco.....	19
Figura 3	Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém.....	20
Figura 4	Reservatórios no Estado de Pernambuco.....	22
Figura 5	A Estrada dos Remédios na cheia de 1975.....	26
Figura 6	Ilha do Retiro no dia 19 de julho de 1975.....	27
Figura 7	Distribuição espacial da precipitação acumulada entre os dias 25 e 29 de maio de 2017.....	31
Figura 8	Esquema do modelo CAWM IV.....	41
Figura 9	Área de estudo na Bacia do Rio Capibaribe.....	49
Figura 10	Mapa de localização da Bacia do Rio Capibaribe.....	50
Figura 11	Mapa da bacia do Rio Capibaribe e limite dos municípios integrantes.....	52
Figura 12	Hidrografia da bacia do rio Capibaribe.....	53
Figura 13	Principais reservatórios na Bacia do Rio Capibaribe.....	55
Figura 14	Isoietas anuais médias na bacia do Rio Capibaribe.....	58
Figura 15	Sub-bacias em estudo na Bacia do Rio Capibaribe.....	59
Figura 16	Estações pluviométricas utilizadas nesta pesquisa.....	60
Figura 17	Polígonos de Thiessen criados para as sub-bacias em estudo..	65
Figura 18	Influência do parâmetro Be nas vazões simuladas pelo CAWM IV.....	70
Figura 19	Áreas incrementais na bacia do rio Capibaribe.....	78
Figura 20	Mapa de classificação do uso e ocupação do solo na Bacia do Capibaribe.....	85
Figura 21	Vazões calculadas e observadas para o posto de Santa Cruz (parte 1).....	88
Figura 22	Vazões calculadas e observadas para o posto de Santa Cruz (parte 2).....	89
Figura 23	Vazões calculadas e observadas para o posto de Toritama (parte 1).....	90

Figura 24	Vazões calculadas e observadas para o posto de Toritama (parte 2).....	91
Figura 25	Vazões calculadas e observadas para o posto de Limoeiro (parte 1).....	92
Figura 26	Vazões calculadas e observadas para o posto de Limoeiro (parte 2).....	93
Figura 27	Vazões calculadas e observadas para o posto de Paudalho (parte 1).....	94
Figura 28	Vazões calculadas e observadas para o posto de Paudalho (parte 2).....	95
Figura 29	Vazões calculadas e observadas para o posto de São Lourenço (parte 1).....	96
Figura 30	Vazões calculadas e observadas para o posto de São Lourenço (parte 2).....	97
Figura 31	Vazões calculadas para a sub-bacia de Goitá ( parte 1).....	98
Figura 32	Vazões calculadas para a sub-bacia de Goitá ( parte 2).....	99
Figura 33	Vazões calculadas para a sub-bacia de Tapacurá ( parte 1).....	100
Figura 34	Vazões calculadas para a sub-bacia de Tapacurá ( parte 2).....	101
Figura 35	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.....	106
Figura 36	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.....	107
Figura 37	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.....	107
Figura 38	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.....	108
Figura 39	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.....	108
Figura 40	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.....	109
Figura 41	Comparação entre o evento de 2004 com e sem a barragem de Jucazinho.....	109
Figura 42	Comparação entre o evento de 2010 com e sem a barragem de Jucazinho.....	110
Figura 43	Comparação entre o evento de 2011 com e sem a barragem de Jucazinho.....	110
Figura 44	Inundações em trechos da cidade de Limoeiro no evento de 2011.....	111
Figura 45	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.....	112

Figura 46	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.....	112
Figura 47	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.....	112
Figura 48	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.....	113
Figura 49	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.....	113
Figura 50	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.....	114
Figura 51	Comparação entre o evento de 2004 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.....	114
Figura 52	Comparação entre o evento de 2010 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.....	115
Figura 53	Comparação entre o evento de 2011 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.....	115
Figura 54	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.....	116
Figura 55	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.....	116
Figura 56	Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.....	117
Figura 57	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.....	117
Figura 58	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.....	118
Figura 59	Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.....	118
Figura 60	Comparação entre o evento de 2004 com e sem as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.....	119
Figura 61	Comparação entre o evento de 2010 com e sem as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.....	119
Figura 62	Comparação entre o evento de 2011 com e sem as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.....	120
Figura 63	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1974 (São Lourenço).....	121
Figura 64	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 (São Lourenço).....	121
Figura 65	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 alterando volume de espera em Jucazinho (São Lourenço).....	122
Figura 66	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 alterando volume de espera em Jucazinho e Carpina (São Lourenço).....	122
Figura 67	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1977 (São Lourenço).....	123

Figura 68	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2004 (São Lourenço).....	123
Figura 69	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2010 (São Lourenço).....	124
Figura 70	Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2011 (São Lourenço).....	124
Figura 71	Cenário de 1974 com o aumento da chuva.....	126
Figura 72	Cenário de 1975 com o aumento da chuva.....	126
Figura 73	Cenário de 1977 com o aumento da chuva.....	127
Figura 74	Cenário de 2004 com o aumento da chuva.....	127
Figura 75	Cenário de 2010 com o aumento da chuva.....	128
Figura 76	Cenário de 2011 com o aumento da chuva.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Municípios que integram a bacia do Rio Capibaribe.....	51
Tabela 2	Informações gerais dos principais reservatórios.....	54
Tabela 3	Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.....	61
Tabela 4	Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.....	66
Tabela 5	Valores da normal climatológica para o posto de Surubim.....	67
Tabela 6	Postos pluviométricos utilizados na operação das barragens.....	76
Tabela 7	Parâmetros físicos necessários para o cálculo do coeficiente K.....	84
Tabela 8	Parâmetros finais para cada sub-bacia.....	84
Tabela 9	Coeficientes de Nash-Sutcliffe e $R^2$ para os intervalos estudados....	86
Tabela 10	Indicadores calculados para as séries dos postos fluviométricos.....	102
Tabela 11	Características físicas das barragens.....	104
Tabela 12	Vazões regularizadas das barragens.....	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	ATUAL INFRAESTRUTURA HÍDRICA PARA CONTENÇÃO DE CHEIAS.....	17
2.2	HISTÓRICO DE CHEIAS EM PERNAMBUCO E NO RIO CAPIBARIBE....	22
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	32
<b>2.3.1</b>	<b>Breve Histórico.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Classificação dos modelos hidrológicos.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modelos hidrológicos de referência.....</b>	<b>35</b>
2.4	INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E GEOPROCESSAMENTO.....	38
2.5	CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM IV).....	40
2.6	OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	47
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>49</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	49
<b>3.1.1</b>	<b>Localização e Generalidades.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Hidrografia e uso da água.....</b>	<b>52</b>
3.1.2.1	Reservatório de Jucazinho.....	55
3.1.2.2	Reservatório de Carpina.....	56
3.1.2.3	Reservatório de Goitá.....	56
3.1.2.4	Reservatório de Tapacurá.....	57
<b>3.1.3</b>	<b>Clima e precipitações.....</b>	<b>57</b>
3.2	DADOS HIDROLÓGICOS.....	59
<b>3.2.1</b>	<b>Dados pluviométricos.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculo da precipitação média.....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Dados Fluviométricos.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Dados de evaporação.....</b>	<b>67</b>
3.3	DADOS TOPOGRÁFICOS.....	68
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	71

3.5	MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	75
3.5.1	Dados utilizados.....	75
3.5.2	Balanco hídrico.....	76
3.5.3	Definição dos cenários devido a mudanças climáticas.....	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	82
4.2	OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	104
4.2.1	Simulação dos eventos de cheia em Limoeiro.....	106
4.2.2	Simulação dos eventos de cheia em Paudalho.....	111
4.2.3	Simulação dos eventos de cheia em São Lourenço.....	115
4.2.4	Simulação de cenários devido a mudanças climáticas.....	125
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	129
5.1	CONCLUSÕES.....	129
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
	REFERÊNCIAS.....	132
	APÊNDICE A - ALGORITMO CAWM IV.....	138
	APÊNDICE B - ALGORITMO ÍNDICES ESTATÍSTICOS.....	145
	APÊNDICE C - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO.....	149

## 1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste item a problemática que motivou o estudo e a justificativa para tal. Também são apresentados os objetivos gerais e específicos que levaram à investigação hidrológica e hidráulica da Bacia do Rio Capibaribe.

### 1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A água sempre possuiu papel indispensável durante toda a existência da humanidade. Isso se pode notar pelo fato de as cidades se desenvolverem ao longo dos rios. Explorar tal recurso foi o motor do desenvolvimento econômico de muitos países, sobretudo na agricultura, abastecimento humano e animal, geração de energia, indústria e transporte. Apesar dos inúmeros usos, a água também pode estar atrelada à ocorrência de fenômenos extremos, como secas e enchentes, que podem trazer diversos prejuízos à população (STUDART, 2004).

Os desastres naturais relacionados aos recursos hídricos geralmente estão associados ao excesso de água (inundações graduais e bruscas, rompimento de barragens) ou à sua escassez (estiagem, seca, dificuldades no abastecimento de água potável, impactos na agricultura). Ou seja, os desastres naturais sempre estão relacionados aos extremos e não às médias (LONDE *et al.*, 2014).

O Brasil, conhecido por sua grande extensão territorial, possui regiões com climas bastante diversificados e em decorrência disso, também há grande diversidade de fenômenos naturais relacionados aos extremos. A região Nordeste é um exemplo claro da afirmação anterior, onde há locais que sofrem pela escassez hídrica como também há outros que são atingidos pela grande ocorrência de inundações, principalmente próximos ao litoral.

Segundo a ANA (2014), a Região Nordeste possui 3.460 trechos caracterizados como inundáveis, dos quais 752 (22%) têm alta vulnerabilidade e 1.750 (50%), média vulnerabilidade. E ainda, diferentemente de outras regiões, no Nordeste é possível haver períodos de vários anos sem inundações nas áreas urbanas, normalmente

fragilizando as medidas preventivas adotadas pela população e fazendo com que os riscos de vida e perdas materiais aumentem consideravelmente. A parte leste do Estado de Pernambuco concentra o maior número de trechos altamente vulneráveis, como o rio Una, por exemplo.

A ocorrência dos fenômenos naturais relacionados aos recursos hídricos pode gerar prejuízos ainda mais significativos se associados às constantes mudanças climáticas e à má gestão dos recursos hídricos. A implantação de uma infraestrutura hídrica adequada é capaz de tornar possível a convivência da população com a ocorrência desses desastres. Por este motivo, torna-se extremamente importante a construção e o consequente monitoramento das redes de barragens com o objetivo de controle de cheias, mas também que possam servir para outros usos, como o armazenamento de água para garantia do abastecimento das cidades. Desta forma, são imprescindíveis estudos que prevejam o comportamento da rede hídrica perante a eventos extremos.

O monitoramento da infraestrutura hídrica existente também é fundamental para o acompanhamento da eficiência no controle de cheias em resposta a diferentes cenários extremos, pois vários aspectos podem modificar a resposta das bacias hidrográficas, a exemplo das mudanças climáticas. O acompanhamento pode ser realizado a partir da modelagem hidrológica, utilizando-se modelos matemáticos capazes de reproduzir o ciclo hidrológico e assim espelhar o escoamento superficial como consequência do evento chuvoso. A simulação hidrodinâmica também é relevante pelo fato de conseguir reproduzir o comportamento da propagação da vazão ao longo do corpo hídrico com e sem a presença de barragens. Sendo assim, a integração entre a modelagem hidrológica e hidrodinâmica para simular diferentes cenários avaliando o comportamento de redes de barragens compõe algumas das premissas que justificam este trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o efeito do sistema de barragens da bacia do Rio Capibaribe no controle de cheias, composto pelas barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá, diante de cenários simulados através da modelagem hidrológica e modelo de operação de barragens.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- Estruturar e avaliar o modelo hidrológico CAWM IV para as sub-bacias que compõem a bacia do rio Capibaribe;
- Programação do modelo CAWM IV na versão de algoritmo em linguagem Python, como alternativa ao modelo em planilha MS Excel;
- Elaboração de um modelo de operação de barragens para avaliar as vazões regularizadas e o volume defluente de cada uma, todas integradas em um único sistema que inclui a contribuição em marcha ao longo da rede fluvial;
- Obter hidrogramas de chegada em Limoeiro, Paudalho e São Lourenço para avaliar a influência das barragens na proteção das cidades da Região metropolitana do Recife;
- Simular cenários para avaliar o efeito das barragens frente a mudanças do regime de chuvas.

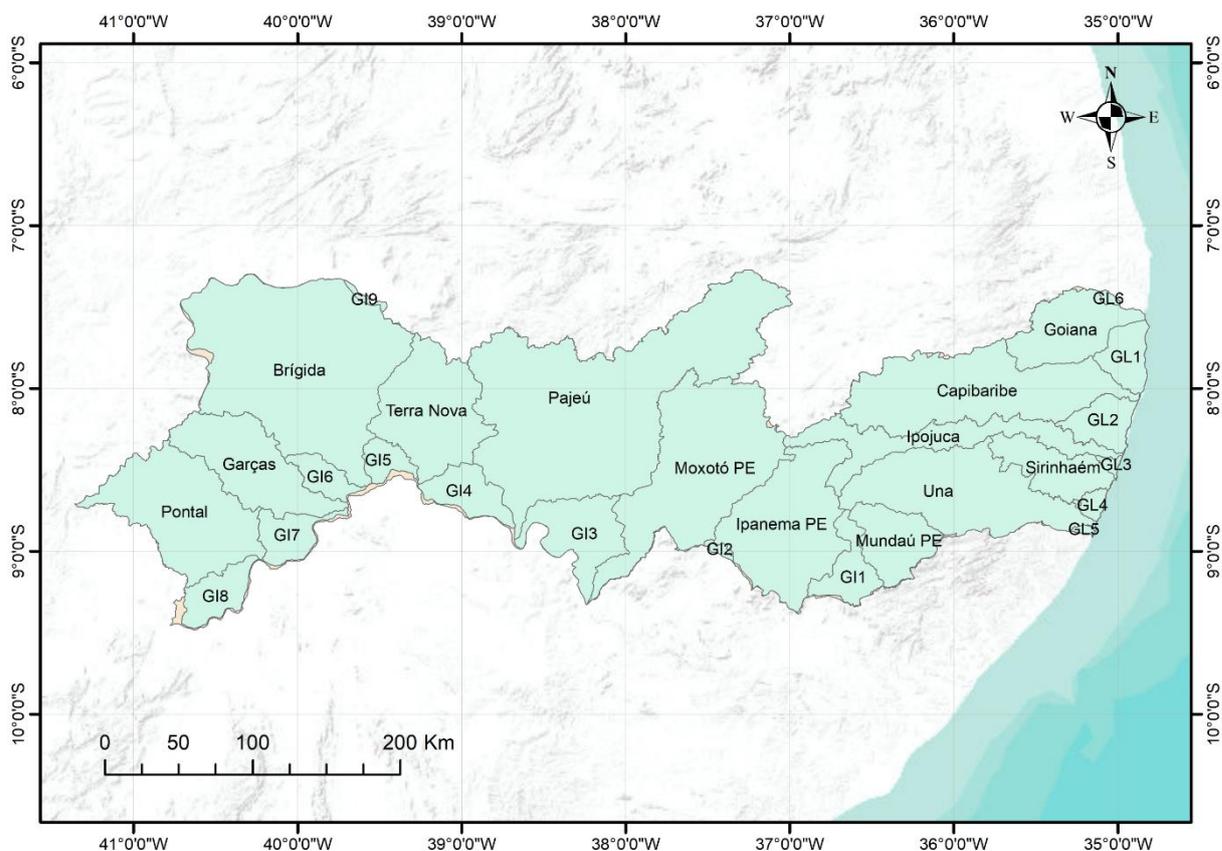
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item é apresentado um levantamento da atual infraestrutura hídrica para contenção de cheias no estado de Pernambuco, bem como um histórico das principais cheias que ocorreram até a data da presente pesquisa. São expostos também breves conceitos dos principais modelos hidrológicos existentes, uma apresentação do novo modelo hidrológico introduzido neste trabalho, o CAWM IV, bem como do modelo utilizado na operação de barragens.

### 2.1 ATUAL INFRAESTRUTURA HÍDRICA PARA CONTENÇÃO DE CHEIAS

Os rios de Pernambuco possuem dois exutórios de destaque: o rio São Francisco e o Oceano Atlântico (além, naturalmente, dos rios principais nos quais deságuam os afluentes). Os rios interiores são compostos pelas bacias que escoam para o Rio São Francisco, e os principais são: Pontal, Garças, Brígida, Terra Nova, Pajeú, Moxotó, Ipanema, além de outros grupos de pequenos rios. Os rios litorâneos são os que escoam diretamente para o Oceano Atlântico, sendo eles: Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una, Mundaú e GL's. A Divisão Hidrográfica Estadual se constitui de 13 bacias hidrográficas, 6 grupos de bacias de rios litorâneos (GL1 a GL6), 9 grupos de bacias de pequenos rios interiores (GI1 a GI9) e uma bacia de pequenos rios que compõem a drenagem de Fernando de Noronha. Observa-se esta divisão a partir da Figura 1 (APAC, 2019b).

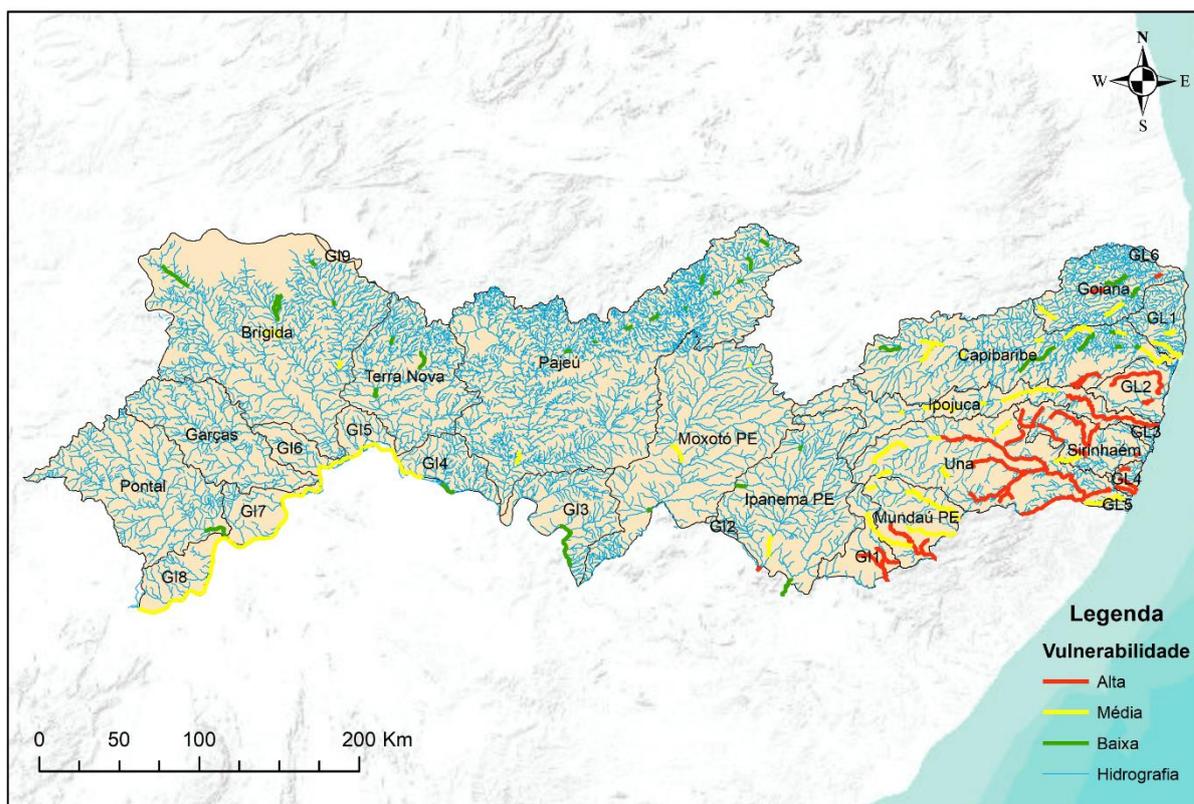
Figura 1 – Bacias Hidrográficas de Pernambuco.



Fonte: A autora, 2019

Em se tratando de ocorrência de cheias, os rios mais afetos a esse tipo de fenômeno são o Capibaribe, Una, Sirinhaém e Ipojuca, pois os eventos hidrológicos críticos influenciam diretamente em áreas densamente urbanizadas. Duas publicações da Agência Nacional de Águas (ANA, 2012, 2014), identificam os trechos de rios com maior vulnerabilidade a inundações em todo o Brasil, inclusive em Pernambuco. A classificação foi determinada a partir de avaliação qualitativa da frequência das inundações e do grau dos impactos decorrentes. A frequência das inundações foi classificada em Alta (onde ocorreram cheias em intervalos inferiores a 5 anos), média (cheias no intervalo entre 5 a 10 anos) e baixa (onde somente ocorrem cheias em intervalos superiores a 10 anos). A estimativa dos impactos foi definida em função da ocorrência de danos à vida e às propriedades e em função da interrupção dos serviços públicos e privados. Portanto, a vulnerabilidade foi definida para cada trecho de rio identificado como inundável em função da frequência e impactos das inundações (MEDEIROS, 2011). Os trechos identificados como inundáveis estão definidos de acordo com sua vulnerabilidade na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Trechos inundáveis de rios no estado de Pernambuco



Fonte: ANA (2012)

Pôde-se identificar a partir da Figura 2 que os trechos de rios mais vulneráveis às inundações se encontram principalmente nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Una, Sirinhaém e Mundaú, além de alguns segmentos em outras bacias menores de rios litorâneos, onde são observados trechos de alta a média vulnerabilidade a inundações. Isto se deve ao fato de essas bacias estarem localizadas em zonas densamente urbanizadas, onde eventos hidrológicos extremos podem causar grandes impactos à população.

Os eventos pluviométricos mais recentes e catastróficos que ocorreram no Estado de Pernambuco foram em 2010 e 2011 que atingiram principalmente as Regiões do Litoral, Zona da Mata e Agreste, resultando em enchentes catastróficas principalmente nas bacias dos rios Una e Mundaú, esta última com reflexos de grande destruição no Estado de Alagoas. A bacia hidrográfica do rio Una, cuja área de drenagem abrange as três regiões geográficas citadas, recebeu a contribuição das chuvas ocorridas na totalidade de sua bacia de contribuição, acarretando a maior enchente dos últimos

cem anos. Várias sedes municipais, localizadas ao longo do curso do rio Una e dos seus principais afluentes foram duramente atingidas, ficando em situação de emergência ou de calamidade (PERNAMBUCO, 2010a).

Após estas enchentes, um conjunto de ações foram tomadas a fim de mitigar o efeito de novas cheias eventuais. Dentre as ações planejadas, destacaram-se investimentos para reconstrução da infraestrutura urbana das cidades afetadas, sistemas de previsão de eventos críticos de catástrofes naturais, ampliação de calha dos rios e construção de barragens para controle de cheias (ALVES, 2017).

Um sistema composto por cinco barragens foi projetado para o controle de cheias na Mata Sul e se propõe a mitigar as enchentes em áreas das bacias hidrográficas dos rios Una e Sirinhaém. Conforme se observa na Figura 3, estas cinco barragens vão proteger 30,58% da bacia hidrográfica do rio Una, equivalente a 2.060km<sup>2</sup>, onde se situam 10 sedes municipais (Belém de Maria, Catende, Cupira, Jaqueira, Lagoa dos Gatos, Maraial, Palmares, São Benedito do Sul, Água Preta e Barreiros) (SIRH, 2011).

Figura 3 – Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém.



Fonte: SIRH (2011)

Atualmente, apenas a barragem de Serro Azul se encontra concluída e as outras ainda estão em fase de construção com as obras paralisadas. Em uma nova enchente que atingiu a Mata Sul em 28 de maio de 2017, a barragem de Serro Azul foi capaz de absorver cerca de 40% do volume das águas, porém a cheia ainda deixou seis mortos,

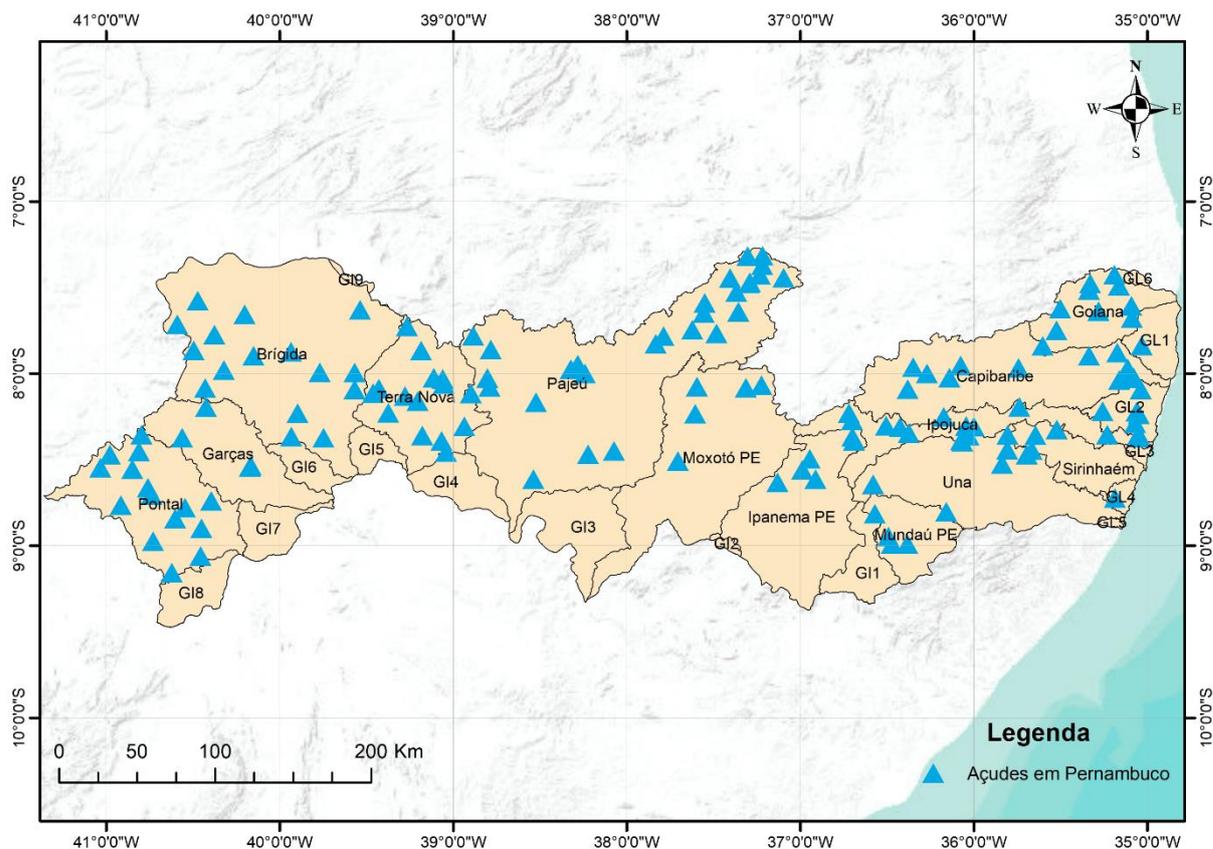
duas pessoas desaparecidas e mais de 55 mil desabrigados. A conclusão de quatro das cinco barragens projetadas já causaria um grande amortecimento nas cheias dos rios da região (ALVES; CIRILO, 2017).

Alguns trechos do rio Ipojuca, principalmente no seu baixo curso, também apresentam alta a média vulnerabilidade a inundações, segundo o Atlas citado (ANA, 2012). Isso se deve principalmente ao impacto que eventos hidrológicos extremos causam em cidades a jusante do rio como Caruaru, Gravatá, Escada e Ipojuca. O sistema de reservatórios da bacia do rio Ipojuca, em toda a sua extensão, é composto por sessenta e seis reservatórios e desse total, trinta e três possuem capacidade abaixo de 100.000 m<sup>3</sup>, seis têm capacidade máxima acima de 1.000.000 m<sup>3</sup> e apenas três reservatórios têm capacidade máxima superior a 10.000.000 m<sup>3</sup>. Apesar desta quantidade de reservatórios na bacia do Rio Ipojuca, todos têm basicamente a função de abastecimento urbano e principalmente agropecuário, nenhum sendo voltado para o controle de cheias (PERNAMBUCO, 2010b).

Apesar de não haverem barragens exclusivamente para o controle de cheias na bacia do rio Ipojuca, a Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos do Estado (SIRH) realiza um constante monitoramento específico através de duas estações, uma localizada no município de Caruaru e outra no Engenho Tabocas, ambas operadas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Nestas estações, as cotas do nível d'água são acompanhadas diariamente em períodos críticos, a fim de viabilizar ações de emergência em tempo hábil (PERNAMBUCO, 2010b).

No geral, o Estado de Pernambuco possui 110 reservatórios (vide Figura 4) monitorados constantemente pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), tendo como principal finalidade o abastecimento das cidades. Destes, 27 barragens foram construídas apenas com a finalidade de controle de cheias.

Figura 4 – Reservatórios no Estado de Pernambuco



Fonte: A autora, 2019

## 2.2 HISTÓRICO DE CHEIAS EM PERNAMBUCO E NO RIO CAPIBARIBE

A mudança no regime de chuvas ao longo do ano é um fenômeno natural e também provoca a variação de vazão nos rios ao longo de sua calha. Essa variação de vazões pode ocasionar no aumento do nível da água ao longo da calha dos rios e possíveis transbordamentos podem ocorrer. Se ainda não houver barragens construídas para contenção de cheias, os resultados desses transbordamentos podem ter sérias consequências em áreas habitadas.

Em Pernambuco foram registradas enchentes desde 1632, umas de maiores e outras de menores proporções, mas que sempre causam muitos prejuízos à população. A seguir, é apresentado um breve resumo dos principais eventos ocasionados por grandes chuvas ocorridas no Estado de Pernambuco (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2018).

- 1632: Primeira enchente registrada no Recife em 28 de janeiro, motivando a destruição de muitas casas e ribeirinhos estabelecidos às margens do Rio Capibaribe.
- 1638: É construída a primeira barragem no leito do rio Capibaribe para proteção contra enchentes, ordenada por Maurício de Nassau. Conhecido como o Dique de Afogados, possuindo mais de 2km de extensão, hoje se tornou uma rua no Recife, a rua Imperial.
- 1824: Durante os meses de fevereiro a abril, estação mais chuvosa da região, ocorre uma nova enchente que atinge o Recife.
- 1842: Em junho, uma enchente atinge novamente o Recife. Foi a primeira grande enchente no Rio Capibaribe onde várias casas foram derrubadas, pontes desabaram, trens descarrilharam e milhares de pessoas ficaram feridas e desabrigadas.
- 1854: Maior enchente já registrada no século XIX. Teve uma duração de três dias consecutivos e atingiu todos os bairros do Recife. Houve sérias consequências no Porto do Recife, onde os navios se chocaram uns contra os outros. A muralha que protegia a Rua da Aurora veio abaixo, o Cais da Casa da Detenção foi derrubado e a cidade ficou totalmente isolada, sem comunicações com o interior.
- 1862: Outra grande enchente registrada no Recife.
- 1869: As pontes da Torre, Remédios e Barbalho foram destruídas e foram rompidos os aterros da via férrea do Recife. Maior enchente até então, tendo o imperador Pedro II determinado que o engenheiro Rafael Arcanjo Galvão viesse a Pernambuco “estudar o problema”.
- 1870: Em 16 de julho, o bacharel em matemática e ciências físicas José Tibúrcio Pereira de Magalhães, diretor de Obras e Fiscalização do Serviço

Público do Estado, sugere a construção de diversas barragens na bacia do Rio Capibaribe, a fim de evitar cheias no Recife.

- 1884: Nova enchente ocorreu.
- 1894: Mais uma enchente no rio Capibaribe atinge todos os subúrbios da cidade do Recife.
- 1899: Em 1 de julho muitos bairros foram atingidos por cheia no rio Capibaribe. O município de Vitória de Santo Antão também foi atingido e o segundo encontro da ponte sobre o Rio Itapicuru desabou.
- 1914: Outra enchente provoca várias mortes no Recife.
- 1920: Em 14 de abril, uma enchente deixou o Recife sem comunicação com o resto do Estado durante três dias. Postes caíram, linhas telegráficas foram interrompidas, pontes vieram abaixo, entre elas a da Torre. Os bairros da Caxangá, Cordeiro, Várzea e Iputinga ficaram totalmente isolados do resto da cidade.
- 1924: Outra enchente no Recife deixa os bairros da Ilha do Leite, Santo Amaro, Afogados, Dois irmãos, Apipucos, Torre, Zumbi e Cordeiro completamente submersos. O prédio do Serviço de Saúde e assistência desabou e as obras do Quartel do Derby sofreram grandes prejuízos.
- 1960: Grande enchente castiga o Recife.
- 1961: Duas mil pessoas ficaram desabrigadas no Recife com nova enchente.
- 1965: Grande enchente castiga o Recife, sendo que os bairros da Caxangá, Iputinga, Zumbi e Bongi ficaram completamente inundados. Nas áreas mais próximas ao Rio Capibaribe a água cobriu o telhado das casas.

- 1966: Mais uma enchente catastrófica atinge o rio Capibaribe, chegando a água a 2 metros de altura nas áreas mais baixas da cidade. Em pouco tempo, toda a Avenida Caxangá foi tomada pela água. Na capital e interior, mais de 10 mil casas (a maioria mocambos) foram destruídas e outras 30 mil sofreram danos, como paredes derrubadas. Morreram 175 pessoas e mais de 10 mil ficaram desabrigadas. O nível do Rio Capibaribe subiu 9,20 metros além do nível normal. O presidente da República, Marechal Humberto de Alencar Castelo Branco, veio ao Recife verificar os danos causados.
- 1967: A Sudene apresenta relatório de uma comissão de técnicos, constituída logo após a enchente de 1966, para encontrar soluções para o problema. O relatório sugere a construção de barragens nos seus principais afluentes e no próprio Rio Capibaribe, que é a mesma sugestão apresentada quase um século antes pelo engenheiro José Tibúrcio.
- 1970: Ocorrem duas enchentes em Pernambuco. Em julho, as águas atingem a zona da Mata Sul e o Agreste do Estado, por conta do transbordamento dos rios Una, Ipojuca, Formoso, Tapacurá, Pirapama, Gurjaú, Amaraji e outros. A cidade que mais sofreu foi o Cabo, que teve 4 dos seus 5 hospitais inundados e várias indústrias pararam suas atividades. No Recife, as águas da Capibaribe causaram grande destruição. Na capital e interior, 500 mil pessoas foram atingidas e 150 morreram; 1.266 casas foram destruídas em 28 cidades. Só no Recife, 50 mil pessoas ficaram desabrigadas.
- 1973: Um material de propaganda da Secretaria de Obras do governo do Estado anuncia, em letras garrafais, que a Barragem de Tapacurá, inaugurada naquele ano, era solução definitiva para dois graves problemas que afetavam o Recife: abastecimento de água da população e "o fim" das enchentes no Recife.
- 1974: Outra enchente atinge o Recife. A Comissão de Defesa Civil, que tinha previsão do avanço das águas, retirou a tempo a população das áreas ribeirinhas. Em São Lourenço da Mata, uma ponte ficou parcialmente destruída

e a população isolada. No município de Macaparana, 20 pessoas morreram, por conta do transbordamento do riacho Tiúma.

- 1975 (A maior cheia da história da bacia do Rio Capibaribe): essa enchente ocorreu entre os dias 17 e 18 de julho, deixando 80% da cidade do Recife sob as águas. A Figura 5 apresenta uma das principais avenidas do Recife, a Estrada dos Remédios, tomada pelas águas. Outros 25 municípios da cidade do Recife foram atingidos. Morreram 107 pessoas e 350 mil ficaram desabrigadas.

Na capital e interior, 1.000 km de ferrovias foram destruídos, pontes desabaram, casas foram arrastadas pelas águas. Só no Recife, 31 bairros, 370 ruas e praças ficaram submersos; 40% dos postos de gasolina da cidade foram inundados; o sistema de energia elétrica foi cortado em 70% da área do município; quase todos os hospitais recifenses ficaram inundados, tendo o depósito de alimentos do Hospital Pedro II sido saqueado. Na Figura 5, observa-se imagem de um dos principais estádios de Pernambuco, a Ilha do Retiro, quase submerso pela água. Por terra, o Recife ficou isolado do resto do País durante dois dias.

Figura 5 – A Estrada dos Remédios na cheia de 1975.



Fonte: ROBERTO (2014)

O governador Moura Cavalcanti decretou estado de calamidade pública na capital e em 9 municípios do interior. O presidente da República, em cadeia nacional de televisão, anunciou medidas para socorrer as cidades pernambucanas atingidas. No Recife, a cheia atingiu seu ponto culminante às 4h da madrugada do dia 18.

Figura 6 - Ilha do Retiro no dia 19 de julho de 1975.



Fonte: ROBERTO (2014)

- 1977: Em 1 de Maio, nova enchente do Rio Capibaribe deixa 16 bairros do Recife embaixo d'água. Olinda e outras 15 cidades do interior do Estado também foram atingidas. Mais de 15 mil pessoas ficaram desabrigadas e só não foram registradas mortes porque a população das áreas ribeirinhas foi retirada 24 horas antes. São Lourenço da Mata foi o município mais atingido. Em Limoeiro houve desabamento de ponte.
- 1978: Em 29 de Maio, o presidente da República, Ernesto Geisel, vem ao Recife inaugurar a Barragem de Carpina, construída para conter as enchentes

do Rio Capibaribe. Com 950 metros de comprimento, 42 metros de altura, a barragem tem capacidade para armazenar 270 milhões de m<sup>3</sup> de água e ficava em princípio a maior parte do ano seca, só enchendo no período chuvoso. Hoje ela é utilizada para abastecimento de água de diversas cidades e para pesca, porém restringindo o volume armazenado no início dos períodos chuvosos a no máximo 50 milhões de m<sup>3</sup>.

- 2000: Entre os dias 30 de julho e 1 de agosto fortes chuvas castigaram o estado, inclusive a Região Metropolitana do Recife, deixando um total de 22 mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas. Cidades foram parcialmente destruídas onde as águas dos rios transbordaram e levaram pontes e casas.

A possibilidade de um período com chuvas acentuadas foi anunciada com 40 dias de antecedência pelos serviços de meteorologia, mas as autoridades governamentais deram pouca importância à previsão. As chuvas atingiram 300 milímetros em apenas três dias e só na RMR aconteceram 102 deslizamentos de barreiras. No município de Belém de Maria, com 15 mil habitantes, 450 casas foram arrastadas pelas águas.

O centro de Palmares ficou completamente debaixo de água e em Barreiros a água atingiu o teto do hospital da cidade. Dos 33 municípios seriamente atingidos, em 16 foi decretado estado de emergência e em 17, estado de calamidade pública, entre os quais Rio Formoso, Gameleira, Belém de Maria, Goiana, Cupira e São José da Coroa Grande.

O presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, veio a Pernambuco observar de perto os efeitos da calamidade e, dias depois, autorizou a liberação de apenas 30% dos R\$ 129 milhões que, segundo levantamento do governo do Estado, seriam os recursos emergenciais necessários para recuperação das áreas atingidas.

- 2004: Fortes chuvas entre 08 de janeiro a 02 de fevereiro de 2004 castigaram todas as regiões do Estado, deixando 36 mortos e cerca de 20 mil pessoas

desabrigadas. As chuvas (jamais registradas entre os dois primeiros meses do ano) foram provocadas por fenômenos atípicos (frente fria e outros) e destruíram pontes e estradas, açudes romperam, casas desabaram, populações inteiras ficaram ilhadas.

Treze cidades ficaram em estado de calamidade pública e setenta e seis em estado de emergência. Petrolina, no sertão do São Francisco, ficou vários dias isolada, depois que as águas levaram a estrada de acesso à cidade. Todos os reservatórios do Sertão e Agreste transbordaram, inclusive o de Jucazinho, em Surubim, cuja barragem foi a última a entrar em operação na bacia do Capibaribe, em 1998. De acordo com levantamento do governo estadual, os prejuízos em todo o Estado chegaram a R\$ 54 milhões.

- 2005: Entre os dias 30 de maio e 02 de junho, fortes chuvas provocaram enchentes em 25 cidades do Agreste, Zona da Mata e Litoral pernambucanos, deixando 36 mortos e mais de 30 mil pessoas desabrigadas. Cerca de 7 mil casas foram parcialmente ou totalmente destruídas; 40 pontes foram danificadas; 11 rodovias estaduais foram atingidas, sendo que sete delas ficaram interditadas; a água inundou ruas centrais, hospitais, escolas e casas comerciais de várias cidades, provocando enormes prejuízos materiais. Mais de 30 mil estudantes da rede estadual de ensino ficaram vários dias sem aulas, porque em todas as cidades atingidas, 93 escolas foram danificadas e outras 11 foram transformadas em abrigos para os desabrigados. As cidades mais atingidas foram Moreno, Vitória de Santo Antão, Jaboatão, Nazaré da Mata, Pombos, Ribeirão, Cabo e Escada. O município que teve o maior número de casas destruídas ou parcialmente danificadas foi Vitória, com 5 mil casas.
- 2010: Na madrugada do dia 17 para o dia 18 de junho, nova enchente castiga os Estados de Alagoas e Pernambuco, deixando um rastro de destruição por 30 cidades. Em Pernambuco, houve 16 mortes e mais de 80 mil pessoas ficaram desabrigadas em 14 cidades do Agreste, Litoral e Zona da Mata. As chuvas danificaram 2.013 quilômetros de estradas e 79 pontes caíram. Em Barreiros, uma das cidades mais afetadas, a igreja foi uma das poucas construções que ficaram de pé e em Palmares, a região central da cidade ficou

submersa. Escolas, hospitais e quase tudo foi levado pelas águas. As cidades afetadas foram: Palmares, Cortês, Água Preta, Barreiros, Correntes, Vitória de Santo Antão, Barra de Guabiraba, Jaqueira, Escada, Nazaré da Mata, Primavera, Amaraji, Chã Grande e Gravatá (CIRILO *et al*, 2011a)

No evento de 2010, um dos maiores eventos de cheia no estado de Pernambuco, o sistema das quatro barragens na bacia do rio Capibaribe foi capaz de reter o volume d'água escoado sem necessidade imediata ou prévia de abertura das comportas. A barragem de Carpina foi a principal responsável pelo controle de cheias, ocupando 2/3 de sua capacidade, o que equivale a cerca de 180 milhões de m<sup>3</sup>, e suas comportas só foram abertas após a redução do volume de água na calha do rio, praticamente sem prejuízos à população das cidades a jusante. Alguns dias depois aconteceu um repique da enchente, de menor magnitude.

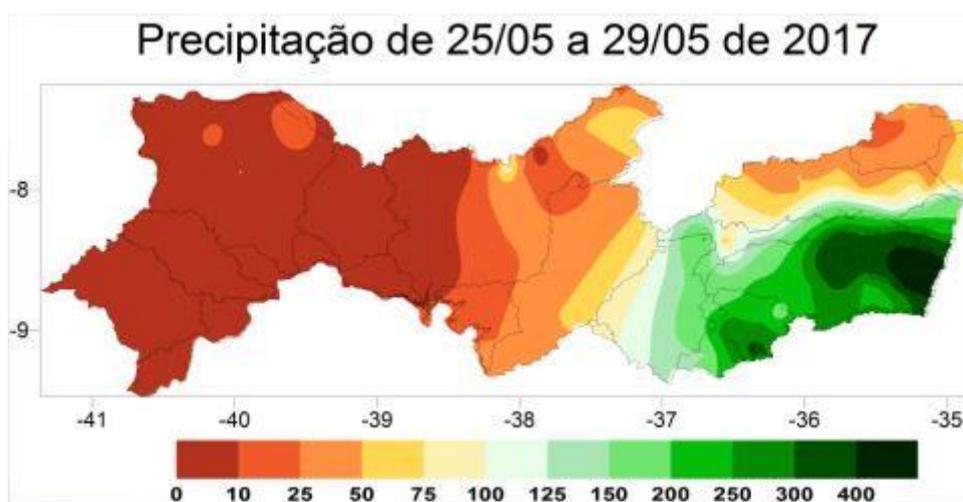
- 2011: Após uma primeira noite onde as chuvas provocaram elevação do volume acumulado para 170 milhões de m<sup>3</sup>, de forma similar à ocorrida em 2010, a meteorologia alertou quanto à ocorrência na noite seguinte de um evento chuvoso de magnitude ainda maior, o que requeria medidas urgentes de operação de barragens e alerta à população. A Defesa Civil do estado e dos municípios foi de imediato alertada, entrando em ação para retirada da população ribeirinha das áreas mais afetadas pela abertura de comportas que se fez necessária para dar à barragem de Carpina capacidade de retenção do volume de água previsto. Essa operação passou a liberar na calha do rio Capibaribe cerca de 350 m<sup>3</sup>/s que, acrescida à contribuição das demais barragens, todas com vertimento, e dos tributários e escoamento difuso, elevou a vazão do rio no perímetro urbano da Região Metropolitana de Recife a cerca de 700 m<sup>3</sup>/s, no limite atual da calha em quase todo o seu curso, com alagamentos nas áreas ribeirinhas mais baixas. Ao longo dessa operação, que durou em torno de dez dias até o restabelecimento do nível de segurança, o rio foi monitorado por telemetria a cada 15 minutos.

A avaliação da operação mostrou que, sem a abertura prévia das comportas, o vertimento inevitável da barragem de Carpina elevaria o pico de vazão a valores

além de 1000 m<sup>3</sup>/s, o que provocaria inundações similares às ocorridas na década de 1970 (CIRILO *et al.*, 2011b).

- 2017: entre os dias 25 a 29 de maio, fortes chuvas atingiram o Agreste e novamente a zona da Mata Sul do estado de Pernambuco e também o estado de Alagoas deixando seis pessoas mortas e mais de 55,1 mil pessoas desabrigadas. A partir da noite do dia 27/05, chuvas fortes e contínuas atingiram toda a parte sul do Agreste, da Zona da Mata e da RMR, permanecendo até o dia 29/05, gerando grande fluxo nesses três dias acumulados de chuvas extremas que causaram enchentes nos rios dessas regiões, sendo o maior valor registrado no Agreste: 297 mm; na Zona da Mata: 318 mm e na RMR: 213 mm. A distribuição espacial da precipitação acumulada entre os dias 25 e 29 em Pernambuco, que ocasionou o evento extremo de cheias no Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife, está representada na Figura 7. Os valores ultrapassaram 500 mm em algumas localidades e cerca de 51 municípios decretaram estado de emergência (APAC, 2017)

Figura 7 – Distribuição espacial da precipitação acumulada entre os dias 25 e 29 de maio de 2017.



Fonte: APAC (2017)

Pelo exposto, a construção de reservatórios formados por barragens e o controle dos mesmos com regras estabelecidas e testadas é fundamental para garantir a mitigação dos efeitos dos eventos de cheias sobre as cidades, a fim de que catástrofes não

possam se repetir e causar sérios desastres em áreas urbanizadas. Para isso, são necessários estudos que prevejam as vazões geradas pelas chuvas nas bacias hidrográficas, previsão antecipada por meio de satélites e radares e sistema de alerta e defesa civil organizados e treinados. Para montar o Sistema de Suporte à Decisão é da maior importância o uso de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.

## 2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

### 2.3.1 Breve Histórico

Os modelos hidrológicos buscam representar a etapa terrestre do ciclo hidrológico, quantificando a precipitação que cai sobre a bacia através dos diversos processos físicos até ser gerado o escoamento numa determinada seção de um rio. A partir da ocorrência da precipitação, fragmenta-se o conhecimento pela análise de cada um dos processos que ocorrem: 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. Desta forma, os modelos hidrológicos conseguem integrar todos estes processos de modo a obter variáveis intermediárias e de saída da bacia, como a vazão (TUCCI, 2010b).

De acordo com Tucci (2005), os modelos hidrológicos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos, pois as séries de precipitação geralmente são mais longas do que as de vazão. Além disso, com a modificação das bacias pela construção de obras hidráulicas e alterações no uso do solo, as séries de vazões deixaram de ser homogêneas e estacionárias. Desse modo, tendo como ponto de partida as séries de precipitação, é possível avaliar as vazões desconhecidas para os novos cenários existentes ou previstos nas bacias. Com isso, possibilita-se determinar e estudar situações hipotéticas para uma certa área de estudo.

A modelagem hidrológica surgiu há mais de um século, a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos, como por exemplo o Método Racional, proposto por

Mulvany por volta de 1850, destinado a prever a vazão máxima decorrente de um evento de chuva. Esse método foi registrado na literatura por suas aplicações no projeto de redes de esgoto nos últimos anos do século XIX (LIMA, 2011; TODINI, 2007).

Os grandes avanços começaram a partir de 1930 quando agências governamentais de países desenvolvidos começaram a desenvolver seus próprios programas de pesquisas hidrológicas. Os modelos desenvolvidos nessas pesquisas tratavam de descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico. A seguir, em 1932, Sherman desenvolveu o Hidrograma Unitário. Logo após, em 1933, Horton desenvolveu a teoria da infiltração. E em 1939, MacCarthy desenvolveu um modelo de escoamento em rios, baseando-se no modelo Muskingum e Puls para o escoamento em reservatório (FAYAL, 2008).

Desde então, os modelos hidrológicos foram se desenvolvendo a partir da evolução de novas técnicas da computação. Estas tecnologias foram se tornando cada vez mais necessárias para a obtenção de grandes quantidades de informações de entrada através de sistemas geográficos de informações (BALTOKOSKI *et al.*, 2010). Segundo Lou (2010), a utilização dos modelos hidrológicos depende da modelagem matemática, que é uma ferramenta de apoio a projetos por sua capacidade de prever e antecipar os efeitos resultantes de medidas dos mesmos.

Entre as décadas de 1960 e 1970, com a disseminação dos computadores e maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos, o conceito de distribuição espacial distribuído teve sua aplicação iniciada na modelagem hidrológica (FAYAL, 2008; FREEZE, 1969). Dentre os primeiros modelos hidrológicos semi-conceituais precipitação-vazão, os mais conhecidos são SSAR e o STANFORD IV.

Ao decorrer do tempo, a modelagem hidrológica vem sendo desenvolvida e tem originado diversos modelos, que variam de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas e dos padrões de uso e ocupação dos solos. Os modelos têm sido utilizados para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade e

também vêm sendo aplicados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas. Uma vez que os modelos podem ser usados para prever condições futuras por meio de simulação, eles são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

### 2.3.2 Classificação dos modelos hidrológicos

De acordo com Lucas *et al.* (2009) e Tucci (2005), os modelos hidrológicos se classificam em quatro critérios diferentes, os quais são: contínuos ou discretos (quanto a forma de representar os dados); concentrados ou distribuídos (existência ou não de relações espaciais); estocásticos ou determinísticos (de acordo com os tipos de variáveis utilizadas); conceituais ou empíricos (quanto ao tipo de relação entre as variáveis); estacionários ou dinâmicos (quando existe dependência temporal).

**Modelos discretos e contínuos:** o modelo hidrológico é considerado discreto quando tem o intuito de representar eventos isolados, ou seja, objetiva a modelagem de períodos isolados de uma série de dados, normalmente eventos de cheia ou recessão. Já os modelos contínuos buscam a representação de um longo período da série de dados, incorporando épocas de comportamentos hidrológicos distintos. Logo, este segundo tipo de modelo deve apresentar uma estrutura mais detalhada, a fim de simular todas as fases do ciclo hidrológico com maior literalidade. Porém, até os modelos contínuos também possuem discretização temporal, denominada passo de cálculo, pois, na maioria das vezes, os fenômenos são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo depende do fenômeno estudado, da disponibilidade dos dados e da precisão desejada nos resultados. Geralmente, quanto menor o intervalo de tempo, maior será a precisão dos resultados (RENNÓ; SOARES, 2010).

**Modelos Estocásticos e Determinísticos:** um modelo é considerado estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Por exemplo, o nível futuro de um reservatório depende da vazão afluente futura, que é uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. Se os conceitos de probabilidade forem negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será

denominado determinístico. Nota-se, no entanto, que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. Sistemas multivariados não lineares podem levar a resultados caóticos, que erroneamente são interpretados como variáveis aleatórias (FAYAL, 2008).

**Modelos Conceituais e Empíricos:** o modelo conceitual se fundamenta na representação dos processos físicos que compõem o fenômeno estudado. Este tipo de modelo relaciona as características físicas do processo mantendo razoável empirismo na definição dos parâmetros. Já os modelos empíricos não apresentam nenhuma relação com os processos físicos envolvidos, eles utilizam funções baseadas em análises estatísticas, sendo denominados de modelos “caixa-preta” (FAYAL, 2008).

**Modelos Estacionários e Dinâmicos:** alguns modelos são ditos estacionários quando os parâmetros não variam com o tempo ao descrever um fenômeno em determinado período. Já nos modelos dinâmicos, os parâmetros variam com o tempo.

**Modelos Concentrados e Distribuídos:** os modelos concentrados não consideram a heterogeneidade das variáveis hidrológicas envolvidas no processo. Ou seja, todas as variáveis são avaliadas em termos de média de uma bacia hidrográfica. Portanto, chuva, evaporação, infiltração, vazões e outras variáveis são utilizadas em valores médios na bacia. Estas médias são consideradas como representativas de toda a área estudada (FAYAL, 2008). Em contrapartida, os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia. Este tipo de modelo aplica a lei de conservação de massa em escala local e utiliza uma grande quantidade de informações como parâmetros de entrada (CUNHA, 2004).

### 2.3.3 Modelos hidrológicos de referência

De acordo com Silva (2011), os modelos chuva-vazão procuram abordar as fases do ciclo hidrológico de forma simplificada, com o objetivo de avaliar qual será a resposta da bacia hidrográfica em termos de vazão, dada uma precipitação, influenciada por

outras variáveis. Esses modelos podem representar os processos que acontecem na bacia em função da precipitação, evaporação, entre outros.

Como os primeiros modelos na década de 70 apresentavam muitos parâmetros a serem determinados de acordo com as características das bacias hidrográficas, optou-se por construir modelos que utilizassem somente os parâmetros mais importantes para a sua caracterização. A partir desta simplificação, viu-se que era possível obter resultados equivalentes aos dos modelos que representassem quase todos os processos, devido à pequena sensibilidade dos parâmetros. A necessidade de modelos mais simples também surgiu da indisponibilidade do conhecimento dos valores reais de todos os parâmetros de uma bacia. Por isso, foi preciso idealizar modelos que representassem bem os processos com menos parâmetros a determinar, assim surgindo os modelos concentrados.

A literatura internacional sobre o assunto aponta alguns modelos hidrológicos que seguem o princípio de parcimônia dos parâmetros e que são mais eficientes para o uso na engenharia. O primeiro a ser citado é o Simple Water Balance Model (SWB), desenvolvido pelo US National Weather Service (NWS). O SWB é um modelo conceitual que simula a formação do escoamento fluvial em uma bacia hidrográfica com o uso de dados de precipitação atmosférica e evapotranspiração potencial. O modelo inclui dois reservatórios de água, onde o reservatório superior é uma camada fina projetada para a interceptação da precipitação e somente a evaporação é descontada deste reservatório. Já o reservatório inferior é uma camada mais espessa, da qual a água pode se evaporar ou formar escoamento abaixo da superfície. O escoamento superficial no modelo começa a se formar uma vez que a taxa de precipitação excede a taxa de infiltração de água no solo (conceito de gênese de escoamento de Horton) e o hidrograma de fluxo contínuo é calculado com base no método do hidrográfico unitário. O modelo possui cinco parâmetros e duas variáveis de estado. Todos os cinco parâmetros são calibrados automaticamente com o uso do algoritmo SCE-UA. O modelo é usado pelo Serviço Nacional de Meteorologia dos EUA (NASONOVA, 2011).

Outro modelo que busca a simplicidade é o GR4J, originário da França e que é a última modificação do GR3J, modelo originalmente proposto por Edijatno e Michel

(1989) e então sucessivamente melhorado por Edijatno *et al.* (1999) e Nascimento (2011) no Instituto de ciência e tecnologia para o meio ambiente e agricultura, o IRSTEA. Trata-se de um modelo conceitual com quatro parâmetros e possui uma estrutura simplificada. Os dados meteorológicos de entrada consistem em precipitação diária e evapotranspiração potencial. O modelo possui dois reservatórios de interação: um reservatório de recepção e outro da calha fluvial. O primeiro consiste em um reservatório de água no solo e o segundo dá origem ao escoamento dos rios. O modelo também leva em conta áreas de subsuperfície além da área de drenagem. 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. Todos os quatro parâmetros do modelo (capacidades máximas dos reservatórios, coeficiente de troca de água subterrânea e o tempo base da unidade hidrográfica) são calibrados. Um algoritmo de otimização passo a passo, baseado na pesquisa de gradiente local, é usado para calibração. Os resultados de vários testes desse algoritmo mostraram que, no caso de 4 a 10 parâmetros, ele é tão bom quanto os algoritmos de busca global (NASONOVA, 2011; PERRIN, 2004).

No Brasil, alguns modelos de poucos parâmetros também já foram desenvolvidos e aplicados em diversas bacias. Verificou-se que com apenas alguns parâmetros (cerca de 3 a 4) podia-se obter resultados equivalentes devido à baixa sensibilidade dos demais, resultando em modelos com menor número de funções e parâmetros e mais eficientes na engenharia (TUCCI, 2010a). Um desses modelos é o SMAP, introduzido por Lopes, Braga Júnior e Conejo (1981). Trata-se de um modelo conceitual com apenas 4 parâmetros calibráveis e 2 parâmetros de inicialização fixos. Este modelo mostrou resultados satisfatórios em estudos realizados até então e necessita somente de dados mensais de precipitação e evaporação (SARAIVA; FERNANDES; NAGHETTINI, 2011). Outros modelos hidrológicos que seguem essa mesma linha são o IPH II, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da UFRGS e o MODHAC, também desenvolvido no IPH-UFRGS (VIRÃES, 2018). Este último, porém, apresenta 14 parâmetros a calibrar.

Santos, Oliveira e Mauad (2018) compararam a aplicação de um modelo concentrado (SCS-CN) e um modelo distribuído (SWAT) na bacia hidrográfica de Jacaré-Guaçu,

no Brasil, com o objetivo de entender se o esforço necessário para executar um modelo de balanço hídrico distribuído e detalhado levaria a melhores resultados, quando comparado com um modelo parcimonioso e de fácil aplicação. Os resultados confirmaram que o esforço necessário para entender completamente a formulação da SWAT, para obter os dados necessários e para calibrar o modelo, é demorado e não leva a resultados significativamente melhores, quando comparado com os resultados do modelo concentrado. Confirmou-se também que em muitas situações, o modelo concentrado mais simples leva a valores mais confiáveis de variáveis hidrológicas, tanto em escala diária quanto mensal. O poder de previsibilidade dos modelos é maior em uma etapa de tempo mensal, porque ambos os modelos não conseguem reproduzir os valores diários de fluxo de maneira consistente, embora sejam capazes de reproduzir a variabilidade global. Por fim, o estudo concluiu que, quando os dados disponíveis não conseguem representar a distribuição espacial das variáveis de entrada e dos parâmetros do modelo, há pouca vantagem em usar o modelo distribuído mais complexo.

O modelo Campus Agreste Watershed Model versão 4 (CAWM IV), utilizado nesta dissertação, é um modelo concentrado chuva-vazão que segue a mesma linha dos outros modelos com poucos parâmetros citados anteriormente na literatura nacional e internacional. A sua fundamentação é descrita na seção 2.5.

## 2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E GEOPROCESSAMENTO

A eficiência e confiabilidade dos resultados do modelo hidrológico está intimamente ligada à qualidade dos dados envolvidos nos processos de simulação. Uma das grandes dificuldades relacionadas aos modelos, principalmente os distribuídos, é a grande quantidade de dados requeridos pelos mesmos. Neste sentido, Tucci (2005) afirma que os SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos.

As ferramentas de SIG podem auxiliar de várias formas: no processamento de uma grande quantidade de dados armazenados em locais adequados, na análise e calibração de modelos, nas previsões e estimativas e ativamente no pós-

processamento dos resultados através da tabulação e mapeamento dos dados. Além disso, a utilização de sistemas de informações geográficas possibilita a aquisição, manuseio e integração de dados, auxiliando na obtenção dos dados de entrada e saída dos modelos hidrológicos (GROSSI, 2003; MENDES; CIRILO, 2013).

Essa integração entre os modelos hidrológicos e os sistemas de informações geográficas vem sendo uma área de cada vez maior interesse e em crescente desenvolvimento pelo fato dos SIG atenderem as necessidades demandadas pelos modelos hidrológicos de forma satisfatória (MELO, 2010). Para a modelagem hidrológica, os Sistemas de Informação Geográfica fornecem uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e apresentar diferentes dados, podendo facilitar a compilação, calibração do modelo, e visualização dos parâmetros do modelo e dos resultados, contribuindo assim, para a geração de informações valiosas para a tomada de decisão (TSOU; WHITTEMORE, 2001).

Todos os tipos de modelos hidrológicos necessitam de parâmetros físicos a serem determinados por modelos digitais do terreno. No entanto, para Mendes e Cirilo (2013), os modelos distribuídos utilizam um volume de dados no seu processamento muito superior a modelos concentrados e o processo de obtenção de parâmetros e validação desses modelos são trabalhosos e a variabilidade de dados é maior conforme se aumenta a área de modelagem.

Existem diversas bases de dados espaciais em diferentes resoluções que representam o terreno pelos Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Modelos digitais de Elevação (MDE). Uma das bases de dados globais mais utilizadas são os produtos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A missão SRTM incorpora a técnica InSar (Interferometric Synthetic Aperture Radar), que possibilita a obtenção de informações sobre as variações de altitude da superfície terrestre, e dispõe publicamente seus dados em escala global por intermédio do United States Geological Survey (USGS). Os dados possuem resolução espacial de 30 m e elipsoide de referência WGS84 (ALVES SOBRINHO *et al.*, 2010). Por longo tempo, porém, apenas pontos cotados a cada 90 m foram disponibilizados para regiões fora dos Estados Unidos. No Brasil, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) realizou uma interpolação dos dados

gerando um produto final com resolução de 30 metros (VALERIANO, 2008). No presente, os dados de elevação a cada 30 m estão sendo disponibilizados.

Em Pernambuco, surgiu o programa Pernambuco Tridimensional (PE 3D), iniciado pela Secretaria de Recursos hídricos e Energéticos do estado em 2013 e concluído em 2016. Inicialmente realizou-se o levantamento de dados para as regiões atingidas pelas grandes enchentes de 2010/2011 (bacias do Rio Una, Mundaú e Sirinhaém) e posteriormente a varredura a laser foi estendida para toda a área continental de Pernambuco (CIRILO *et al*, 2014). Os produtos são orto-imagens de alta resolução de toda a região pernambucana através da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging). Os produtos obtidos foram os modelos digitais do terreno e elevação com escalas de 1:5000 (erro vertical inferior a 25 cm) e 1:1000 (erro vertical inferior a 10 cm) e as orto-imagens com escala de 1:5000 (pixel da imagem de 50cm) e 1:1000 (pixel da imagem de 12cm). Todos os dados estão sendo disponibilizados na medida em que são validados através do endereço eletrônico <http://www.pe3d.pe.gov.br/>.

## 2.5 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM IV)

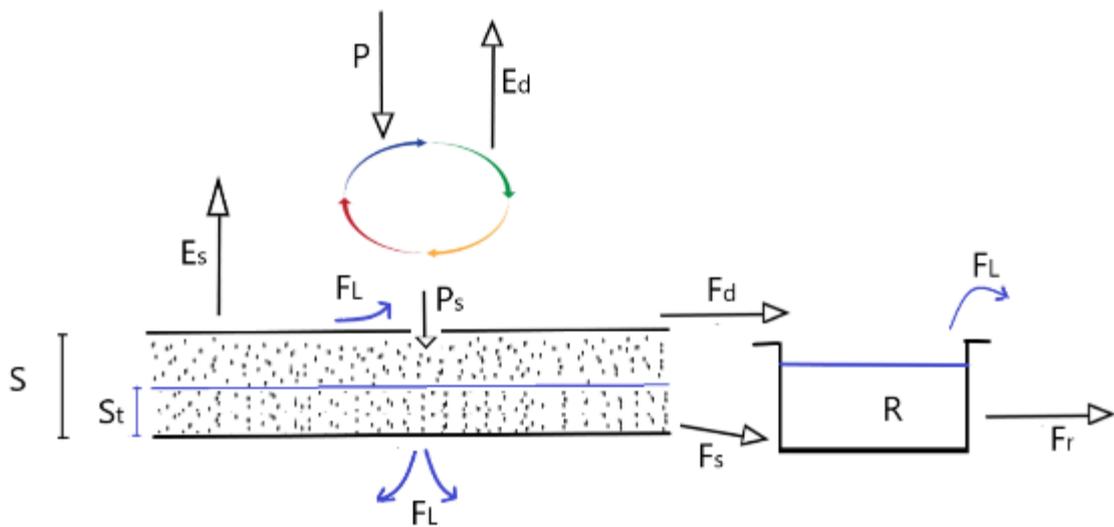
O CAWM IV é um modelo hidrológico concentrado, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, que possui como principal característica a sua simplicidade e poucos parâmetros a calibrar. Tem como um de seus principais objetivos a regionalização de parâmetros, ou seja, a transferência de seus valores entre bacias distintas, mas que possuam características semelhantes.

Este modelo tem como objetivo simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas, visando trazer um modelo que represente melhor estas áreas e preencher a lacuna sobre esse tipo de modelo. Visou-se aproveitar o potencial de procedimentos mais modernos de entrada e saída de dados e a possibilidade de utilização de informações geradas por técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais como SRTM – Shuttle Radar Topography Mission e o Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D.

O modelo se encontra em sua quarta versão e sua fundamentação será descrita logo a seguir. A conceituação e aplicação das outras três versões podem ser encontradas

em Feitoza (2018). Esta versão do modelo tem seu esquema representado na Figura 8 e possui em sua conceituação dois reservatórios, um reservatório do solo (**S**) e o reservatório da calha fluvial (**R**). Neste modelo, o balanço chuva-evaporação é feito de forma imediata. Se houver precipitação suficiente, toda a evapotranspiração é atendida e descontada. Se não, toda a precipitação é considerada como evapotranspiração direta ( $E_d$ ) e registra-se uma parcela não atendida ( $E_n$ ), que poderá ser total ou parcialmente retirada do reservatório do solo (**S**).

Figura 8 – Esquema do modelo CAWM IV.



Fonte: A autora, 2019

Quando a precipitação for maior que a evapotranspiração, o valor excedente é denominado de chuva efetiva, ou seja, é a precipitação descontada da evapotranspiração. A chuva efetiva ( $P_n = P - E_d$ ), que cai no solo, se distribui em três parcelas:

1. A primeira parcela é a recarga do solo ( $P_s$ ), baseada no conceito de recarga apresentado por Edijatno e Michel (1989), e é calculada por meio da Equação 1:

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

Sendo  $S$  o valor máximo de  $S_t$ , que é a capacidade máxima de retenção de água no solo e  $S_t$  é o armazenamento de água no solo ao longo do tempo. No CAWM IV, o parâmetro  $S$  passa a ser variável de decisão (parâmetro a calibrar) ou pode ser estimado a partir do Curve Number médio da área em estudo.

2. A segunda parcela é a evapotranspiração complementar  $E_s$ , extraída das camadas mais superficiais do solo e limitada pelo valor  $E_n$ . Esta variável tem sua magnitude dependente do valor atribuído ao parâmetro  $\alpha$ . A expressão para sua avaliação é dada pela Equação 2:

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

Onde:

$E_n$  – Evapotranspiração potencial não atendida ( $E_n = E - E_d$ )

A constante  $\alpha$  é definida para especificar a magnitude da evapotranspiração complementar. Este parâmetro foi introduzido para ajustar os dados pouco precisos dessa variável, se necessário podendo ser definido por calibração, conforme foi realizado nesta pesquisa. O balanço hídrico de longo período feito pelo modelo compara as lâminas de precipitação, vazão e evapotranspiração para identificar se a evapotranspiração está sub ou superdimensionada, com  $\alpha$  podendo variar de 0 a um valor elevado (50, por exemplo), o que significa nenhuma ou máxima evapotranspiração complementar.

3. Da chuva efetiva  $P_n$ , descontados  $P_s$  e  $E_s$ , chega-se à terceira parcela, que representa o escoamento superficial direto para a calha fluvial  $F_d$ , dado pela Equação 3:

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

Onde:

$F_d$  – Escoamento superficial direto (mm)

$P_n$  – Chuva efetiva (mm)

$P_s$  – Recarga do solo (mm)

$E_s$  – Evapotranspiração complementar (mm)

A partir do reservatório do solo com lâmina de água  $S_t$  armazenada no tempo  $t$ , ocorre o fluxo  $F_s$  que percola em direção ao reservatório da calha dos rios  $R$ . O fluxo que percola é representado pela Equação 4:

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

Onde:

$F_s$  – Percolação em direção ao reservatório da calha fluvial.

$K_s$  – Parâmetro a ser calibrado no modelo associado à permeabilidade dos solos.

$S_t$  – Armazenamento no solo ao longo do tempo, medido em mm.

A lâmina de água  $R$  armazenada no reservatório da calha fluvial é acrescida dos fluxos  $F_d$  e  $F_s$ . Esse reservatório não é limitado para considerar os extravasamentos por ocasião das cheias. Dele sai o escoamento fluvial  $F_r$ , dado pela Equação 5. A relação não linear obtida na equação 5 é utilizada no CAWM em todas as suas versões para representar o escoamento na calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear adotada na maioria dos modelos hidrológicos.

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

Onde:

$b$  – definido como uma constante que tem o valor de  $b = 5/3$ . Este valor é justificado adiante.

$R$  – Lâmina de água na calha fluvial.

$K$  – Parâmetro característico para cada sub-bacia que pode ser calculado através da expressão conceituada a seguir.

A expressão para cálculo do parâmetro  $K$  foi desenvolvida como uma forma de regionalizar o parâmetro dentro de uma mesma bacia, por sub-bacias com áreas e extensões de rio fracionadas, bem como avaliar os valores do parâmetro em situações onde o passo de tempo  $\Delta t$  seja alterado. O desenvolvimento da expressão é esclarecido a seguir:

Considerando que o volume do reservatório da calha fluvial ( $V_{sup}$ ) pode ser representado pela capacidade do conjunto de rios que compõem a bacia com extensão total  $L_t$  e a área de seção equivalente  $A_e$ , tem-se a Equação 6:

$$V_{sup} = A_e * L_t \quad (6)$$

Como nos modelos hidrológicos, os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica em Km<sup>2</sup>, a acumulação  $R$  é dada pela Equação 7:

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

Sendo a constante  $c = 1000$  utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando  $V = A.L$  o volume de água acumulada em um trecho de rio com extensão  $L$ , a seguinte relação pode ser obtida:

$$Q = \frac{I^{1/2}}{n \cdot L^{5/3} \cdot B^{2/3}} V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (8)$$

Por similaridade, a equação 8 sugere que o valor do expoente  $b$  da Equação 5 pode ser estimado como  $5/3$ . As equações seguintes são desenvolvidas considerando as simplificações de utilizar uma área retangular equivalente para as seções da rede de rios  $A_e$  e sua largura superficial  $B_e$ .

Considerando o escoamento na calha equacionado pela Fórmula de Manning com as simplificações de seção retangular de largura equivalente  $B_e$ , assim como raio hidráulico aproximadamente igual à lâmina escoada, tem-se o escoamento representado pela Equação 9:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot y^{2/3} \cdot I^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} I^{1/2} \quad (9)$$

Onde  $A_e = B_e \cdot y$  e  $R_h \cong y$

A relação entre a vazão (m<sup>3</sup>/s) e a lâmina escoada (mm) é dada pela Equação 10:

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (10)$$

Onde  $\Delta t$  é o passo de tempo em segundos. Combinando a Equação 10 com o último termo da Equação 9, tem-se a Equação 11:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} I^{1/2} \quad (11)$$

Explicitando a área equivalente na Equação 7, tem-se a Equação 12 e substituindo na Equação 11, chega-se à Equação 13:

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (12)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \frac{I^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (13)$$

Substituindo-se a Equação 5 ( $F_r = K \cdot R^b$  sendo  $b = 5/3$ ) na Equação 13 e explicitando o  $K$ , chega-se à expressão final do parâmetro obtida pela Equação 14:

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left( \frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} I^{1/2} \quad (14)$$

Portanto, o parâmetro  $K$  é calculado de acordo com as características da bacia e estas informações podem ser obtidas a partir de técnicas de geoprocessamento utilizando o modelo digital do terreno.

As perdas de água no sistema podem ser devidas a diversas causas: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do reservatório da calha fluvial ( $R$ ), considerando que o efeito do extravasamento seja o mais significativo. Utiliza-se para cálculo das perdas a Equação 15:

$$F_L = K_L \cdot R^{1,5} \quad (15)$$

Onde:

$K_L$  – Coeficiente de perdas a ser calibrado no modelo.

$R$  – Lâmina de água na calha fluvial.

$F_L$  – Perdas de água do sistema.

O expoente 1,5 tem sido testado e aprovado nas diversas simulações desenvolvidas.

Portanto, os parâmetros a calibrar do modelo CAWM IV são:  $K_s$ ,  $K_L$  e eventualmente  $\alpha$  e  $S$ . Nas simulações feitas até agora se constata que é possível ajustar o modelo adequadamente com o parâmetro  $b = 5/3$  fixo. O parâmetro  $K$  tem se mostrado adequado para rios sem declividades acentuadas. Caso isso não aconteça, é necessário calibrar o valor desse parâmetro ou adotar valores artificialmente elevados para a largura da seção equivalente  $B_e$ . Além disso, o parâmetro  $S$  pode deixar de ser calibrado, utilizando-se para sua estimativa a capacidade de retenção máxima de água do solo  $S$  calculada a partir do Curve Number médio da bacia através da Equação 16. Este procedimento foi realizado para a geração dos resultados desta pesquisa e demonstrou-se adequado para as calibrações e validações dos demais parâmetros.

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (16)$$

## 2.6 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A previsão de vazões através de modelos hidrológicos é extremamente importante para se antecipar a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica frente a um evento hidrológico extremo. Quando essa bacia possui reservatórios que controlam o fluxo do rio principal e afluentes, é necessário integrar o modelo hidrológico a outro sistema que simule a capacidade de retenção das barragens para se avaliar a real resposta da vazão dos rios.

A utilização de ferramentas computacionais, tais como modelos matemáticos, hidrológicos e climáticos, auxilia na operação do reservatório com o objetivo de propor possíveis cenários de vazões, mitigando tanto os efeitos de cheias quanto de secas (CABRAL *et al.*, 2013). Neste contexto, os modelos matemáticos que visam simular um sistema de reservatórios utilizam como princípio básico o balanço hídrico com o intuito de prever o volume da barragem sob efeito de alguns condicionantes impostos ao local.

Os modelos de operação de reservatórios são, em geral modelos simples baseados no balanço de massa hídrica dentro do reservatório para a previsão de vazões de saída. Um exemplo é o modelo de previsão desenvolvido por Andreolli (2013) para avaliar diversos cenários propostos para um reservatório na bacia do Rio Candiota, no Rio Grande do Sul e verificar se ele atende à todas as demandas hídricas propostas. O estudo mostrou que a disponibilidade hídrica do reservatório existente é insuficiente para atender alguns cenários avaliados, com probabilidade significativa de falha no atendimento. Além disso, verificou-se que o volume que o reservatório se propõe a regularizar, segundo os estudos da época de construção, se mostrou condizente com as análises numéricas realizadas.

Outro modelo de operação de reservatórios mais complexo é o HEC-ResSim. Este software de simulação de sistema de reservatórios foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, Instituto de Recursos Hídricos, e é usado para modelar a operação de reservatórios em um ou mais reservatórios de acordo com uma variedade de metas e restrições operacionais (USACE, 2013). Ahn *et al* (2018) utilizaram o modelo hidrológico SSARR e o HEC-ResSim para avaliar como o

ambiente fluvial é influenciado pelas mudanças no fluxo do rio devido a mudanças climáticas e a operação das estruturas hidráulicas. Este estudo concluiu que o uso eficiente de recursos hídricos pode ser alcançado através da operação integrada das barragens e represas multifuncionais em tempos de escassez de água.

Diante destas considerações, o modelo de operação de reservatórios utilizado nesta pesquisa também tem como princípio o balanço de massa hídrica e foi desenvolvido para simular o fluxo vertido pelas barragens em estudo de acordo com as vazões simuladas no modelo hidrológico CAWM IV. O modelo se encontra em formato de planilha MS Excel e sua metodologia estará descrita a seguir na seção 3.5. Considerou-se no balanço a retirada da vazão regularizável para outros fins, o que efetivamente se faz nesses mananciais. Deduzidas a evaporação e a retirada, o balanço de massa é feito com o auxílio da curva cota-área-volume. As características dos sistemas de descarga (seção, cotas, equações) são inseridas no modelo para cálculo da vazão defluente.

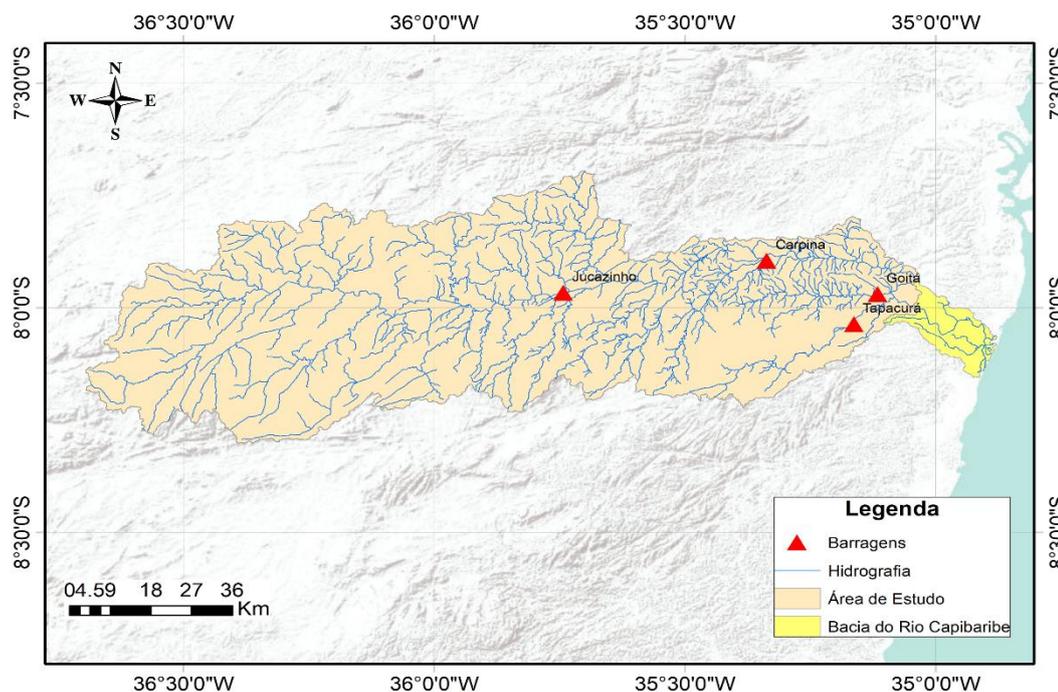
### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo caracteriza-se primeiramente a área de estudo e são conceituados os materiais e métodos utilizados tanto para a modelagem hidrológica quanto para a operação de barragens.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido na maior parte da bacia do Capibaribe envolvendo o alto, médio e baixo curso onde se encontra o sistema das principais barragens de controle de cheias: Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá. Dispensou-se somente a região metropolitana do Recife pois o foco será justamente avaliar a vazão de chegada sob a influência destas barragens até à estação fluviométrica localizada no município de São Lourenço da Mata, seção essa que serve de controle para avaliação das vazões que chegam a Recife no rio Capibaribe. Portanto, a área de estudo desta pesquisa corresponde à área de contribuição da bacia do Rio Capibaribe até à estação de São Lourenço da Mata, conforme ilustração da Figura 9. Sendo assim, é pertinente apresentar uma descrição geral da bacia, caracterizando-a em termos de divisão político-administrativa, hidrografia, usos da água, clima e precipitações.

Figura 9 - Área de estudo na Bacia do Rio Capibaribe

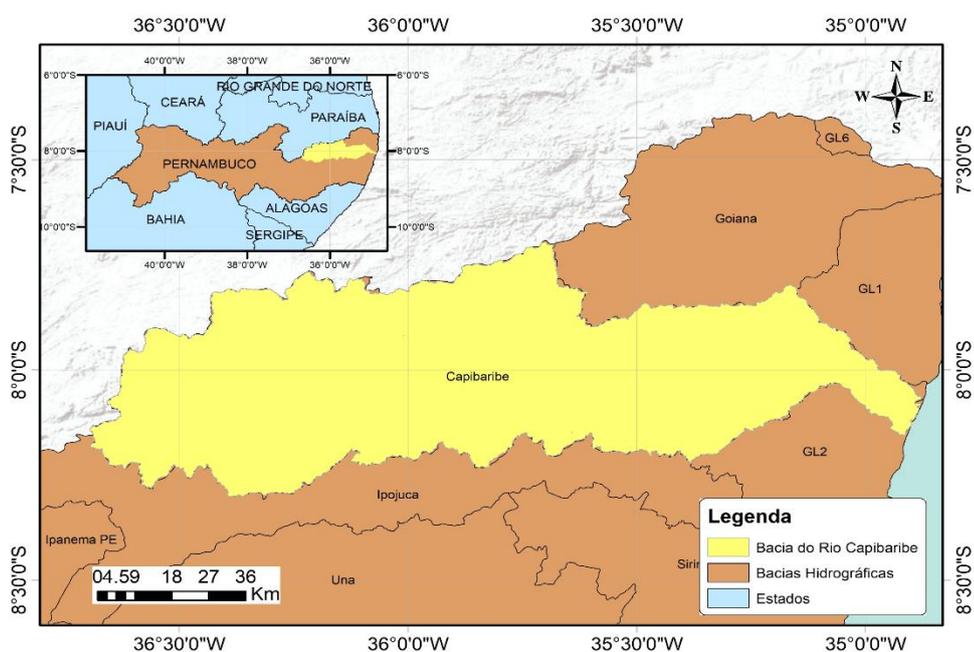


Fonte: A autora, 2019

### 3.1.1 Localização e Generalidades

A Bacia hidrográfica do Rio Capibaribe corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico UP2 e está localizada na porção norte oriental do estado de Pernambuco, entre as coordenadas 07°41'20" e 08°19'30" de latitude sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude oeste, conforme Figura 10. Abrange parte das regiões de desenvolvimento Agreste Central (RD 08), Agreste Setentrional (RD 09), Mata Sul (RD 10), Mata Norte (RD 11) e região metropolitana do Recife (RD 12) (APAC, 2019a).

Figura 10 – Mapa de localização da Bacia do Rio Capibaribe



Fonte: A autora, 2019

O Plano Diretor da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, elaborado em 2002, estabeleceu a divisão da bacia em quatro unidades de análise (UA), de acordo com suas características hidrológicas, climatológicas e socioeconômicas. A UA1 ou Unidade de Toritama abrange o terço superior da bacia; A UA2 ou Unidade de Jucazinho envolve parte da bacia que vai desde Toritama até o reservatório Jucazinho; A UA3 ou Unidade de Limoeiro, compreende as áreas de drenagem do Capibaribe desde o reservatório de Jucazinho até o reservatório de Carpina, e a UA4 ou a unidade de São Lourenço da Mata, abrange as áreas de drenagem do terço inferior da bacia.

Devido à grande extensão regional da bacia abrangendo agreste, mata e litoral, há um ambiente complexo onde se evidenciam contrastes climáticos, de relevo, de solos e de cobertura vegetal, além de socioeconômicos, que exigem um modelo de gestão hídrica e ambiental, que atenda às suas peculiaridades sub-regionais e locais.

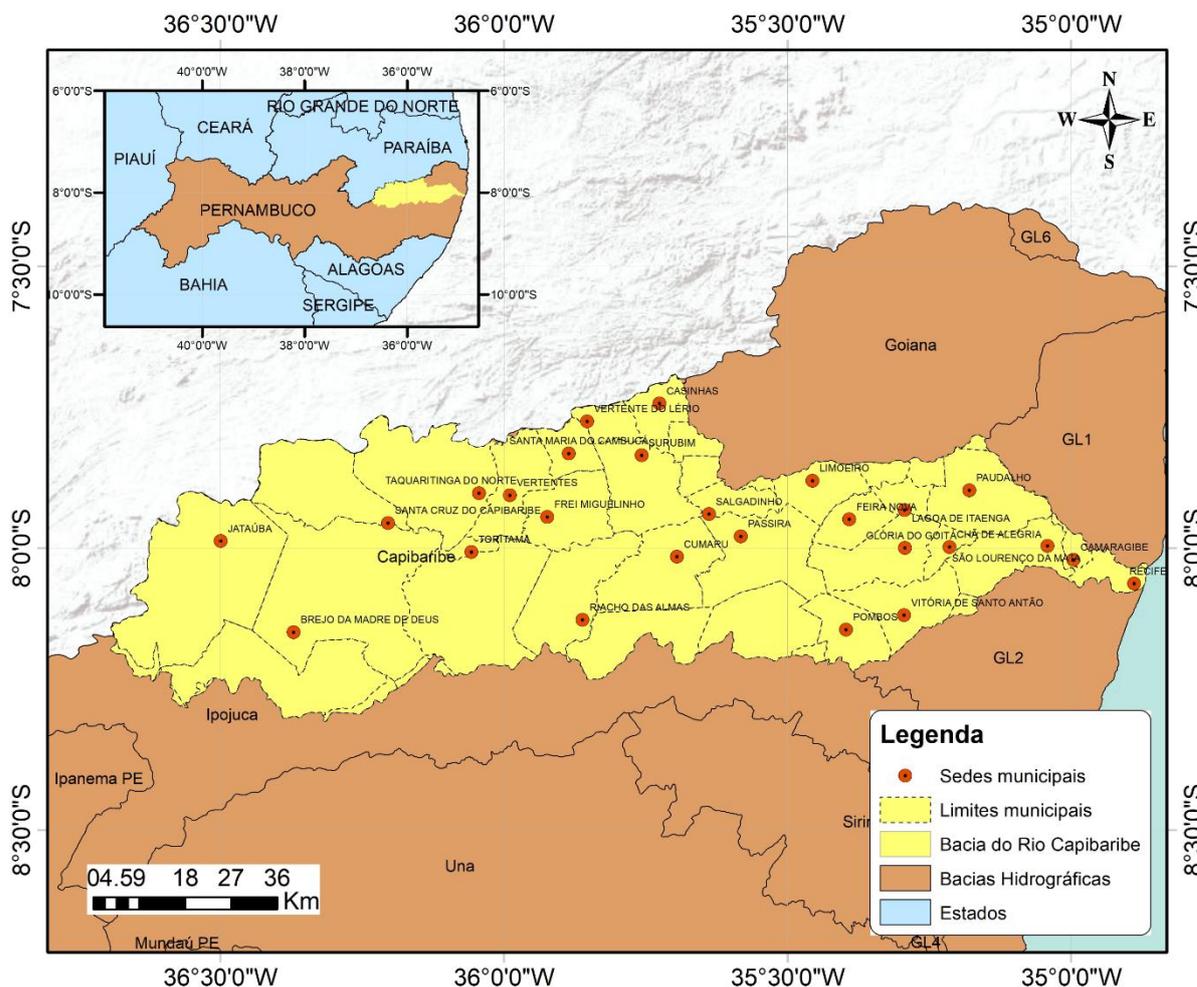
A área da bacia abrange cerca de 7,58% do território Pernambucano, que corresponde a 7.455 Km<sup>2</sup>. O rio Capibaribe passa por 42 municípios, desde a sua nascente entre os municípios de Poção e Jataúba, até à sua foz, no Recife. A Tabela 1 indica quais são estes municípios e sua área percentual em relação à área total da bacia, dos quais 15 estão totalmente inseridos na bacia e os outros 26 possuem sua sede nela, conforme Figura 11.

Tabela 1 – Municípios que integram a bacia do Rio Capibaribe

Município	Área da Bacia (%)	Município	Área da Bacia (%)	Município	Área da Bacia (%)
Belo Jardim	5,5	Gravatá	3,22	Salgadinho	1,12
Bezerros	2,97	Jataúba*	9,57	Sanharó	0,08
Bom Jardim	0,73	João Alfredo	0,72	Santa Cruz do Capibaribe*	4,55
Brejo da Madre de Deus*	10,19	Lagoa do Carro	0,52	Santa Maria do Cambucá*	1,18
Camaragibe*	0,46	Lagoa do Itaenga*	0,76	São Caetano	0,17
Carpina*	4,02	Limoeiro*	1,85	São Lourenço da Mata*	2,82
Caruaru	7,13	Moreno	0,21	Surubim*	3,44
Casinhas*	1,41	Passira*	4,57	Tacaimbó	0,35
Chã de Alegria*	0,66	Paudalho*	3,57	Taquaritinga do Norte*	5,96
Chã Grande	0,18	Pesqueira	0,05	Toritama*	0,41
Cumaru*	3,99	Poção	0,23	Tracunhaém	0,14
Feira Nova*	1,42	Pombos*	2,04	Vertente do Lério*	0,94
Frei Miguelino*	2,93	Recife*	0,92	Vertentes*	2,62
Glória do Goitá*	3,11	Riacho das Almas	4,11	Vitória de Santo Antão*	2,71

Fonte: Pernambuco (2010b)

Figura 11 – Mapa da bacia do Rio Capibaribe e limite dos municípios integrantes



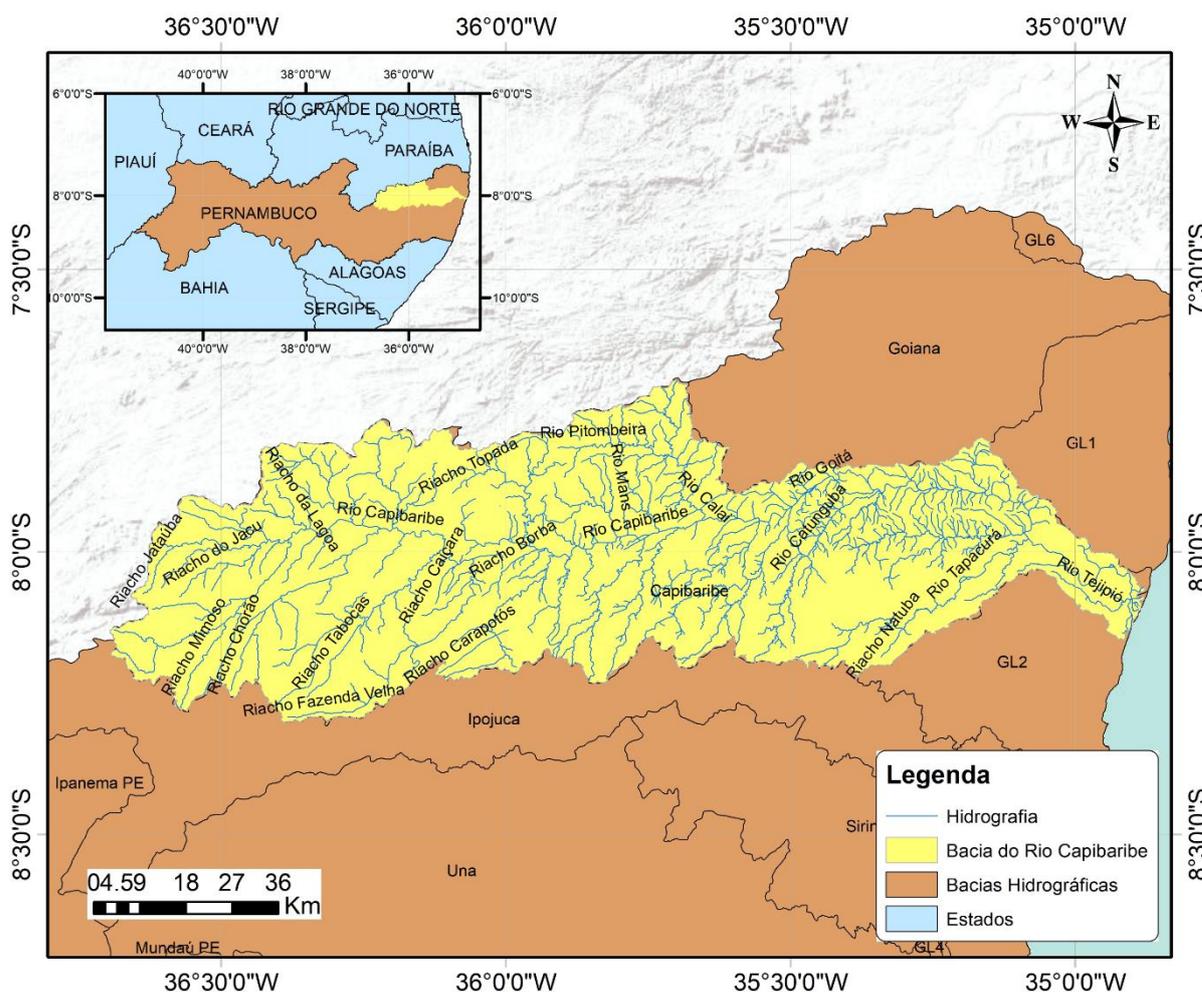
Fonte: A autora, 2019

### 3.1.2 Hidrografia e uso da água

O rio principal pertencente à bacia é o rio Capibaribe, que nasce na divisa dos municípios de Jataúba e Poção, percorrendo vários centros urbanos até chegar à cidade do Recife. Possui cerca de 280 km até sua foz e tem direção sudeste-nordeste, até as proximidades de Santa Cruz do Capibaribe, quando seu curso toma a direção oeste-leste até o Recife. Em seus alto e médio cursos, apresenta regime fluvial intermitente, tornando-se perene somente a partir do município de Limoeiro, no seu baixo curso (APAC, 2019a).

Seus principais afluentes pela margem direita são: riacho do Mimoso, riacho Tabocas, riacho da Onça, riacho Carapatós, riacho das Éguas, riacho Caçatuba, riacho Batatã, rio Cotumgubá, rio Goitá e rio Tapacurá. Pela margem esquerda, destacam-se: riacho Jataúba, riacho Doce, riacho Topada, riacho do Manso e riacho Cajai. A Figura 12 apresenta a rede de drenagem da bacia, bem como seus principais tributários.

Figura 12 – Hidrografia da bacia do rio Capibaribe



Fonte: A autora, 2019

As descargas em São Lourenço da Mata que, em época de estiagem, são poucos  $m^3/s$ , atinge valores próximos a  $3.000 m^3/s$ , durante as grandes enchentes. Os deflúvios anuais são muito variáveis. No período em que se dispõe de registros, eles variam entre 400 a 1.200 milhões de  $m^3$ , em São Lourenço da Mata. Dada a proximidade desta localidade com a cidade do Recife, pode-se dizer que as descargas, que ali são registradas, são praticamente aquelas que atingem a capital. Apesar de não se dispor de uma extensa série de registros, os dados anteriormente

indicados revelam o caráter tipicamente torrencial do rio, sendo seus defluxos diretamente dependentes do regime pluviométrico (BARROS, 1979).

O sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, apesar da densa rede hidrográfica, totaliza um volume de armazenamento da ordem de 800 milhões de metros cúbicos, sendo distribuídos em sete reservatórios com capacidade acima de 10 milhões de metros cúbicos e outros com menor capacidade, sendo a maior parte, aproximadamente 900, inferiores a 500 mil metros cúbicos.

Os principais reservatórios atuantes na bacia do rio Capibaribe são Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Poço Fundo. Juntos, eles representam cerca de 94,7% do total de água acumulada na bacia (COMPESA, 2009) apud PERNAMBUCO (2010c). A Tabela 2 a seguir apresenta algumas características destes reservatórios quanto à área da bacia hidrográfica abastecida, área hidráulica, capacidade máxima, finalidade e ano de construção.

Tabela 2 – Informações gerais dos principais reservatórios.

Reservatório	Área da bacia		Capacidade (x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Finalidade	Ano de construção
	Hidrográfica (km <sup>2</sup> )	Hidráulica (ha)			
Jucazinho	3.918	2.361	327.035*	Abastecimento e piscicultura	1998
Carpina	1.828	3.200	270.000	Controle de cheias e pesca	1978
Tapacurá	360	1.300	94.200	Abastecimento e Controle de cheias	1973
Goitá	450	970	52.000	Controle de cheias	1978
Poço Fundo	854	450	27.750	Abastecimento e irrigação	1987

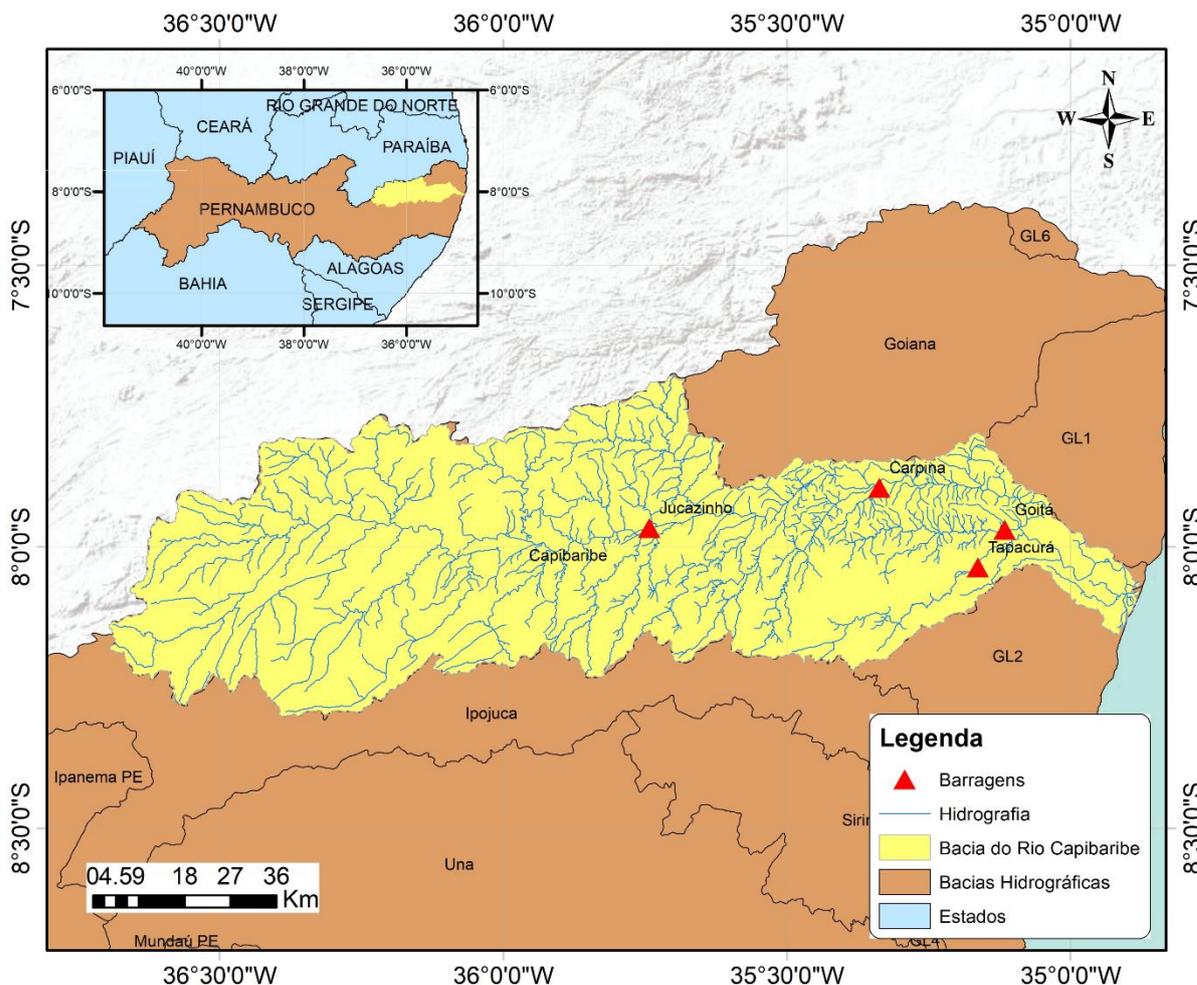
Fonte: Pernambuco (2010c)

\* Estudos de geoprocessamento feitos no Campus Agreste da UFPE revelam que a capacidade real de Jucazinho é cerca de 204 milhões de m<sup>3</sup>, valor utilizado nesta pesquisa.

Quatro desses reservatórios são considerados de grande porte e elevada relevância tanto para o Médio/Baixo Capibaribe quanto para a região metropolitana do Recife. São eles o Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá. Eles estão situados estrategicamente onde podem controlar e regularizar as maiores vazões do rio principal. Estes reservatórios são operados para usos múltiplos, principalmente

controle de enchentes e abastecimento, e são gerenciados por uma comissão constituída por órgãos federais e estaduais sob a coordenação da Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos de Pernambuco (SIRH/PE). A Figura 13 a seguir, apresenta a localização destes reservatórios inseridos na bacia do Rio Capibaribe.

Figura 13 – Principais reservatórios na Bacia do Rio Capibaribe



Fonte: A autora, 2019

### 3.1.2.1 Reservatório de Jucazinho

O reservatório de Jucazinho está localizado na Unidade de Análise 2 (UA2) nas coordenadas geográficas de 7°57'53,41"S e 35°44'33,52"W e tem sua maior importância no abastecimento urbano. Inaugurado em 1998, nos municípios de Surubim e Cumaru, tem a capacidade máxima informada de 327,04 milhões de metros cúbicos e um volume de amortecimento de enchentes de  $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ . As cidades de

Salgadinho e Limoeiro são as que mais se beneficiam com sensíveis reduções no risco de inundações oferecidas por Jucazinho. Vale ressaltar que a operação atual do reservatório ainda não é utilizada para controle de enchentes (PERNAMBUCO, 2010c). Porém a SIRH-PE planeja manter volume de espera da ordem de 40 milhões de m<sup>3</sup> em Jucazinho, motivado principalmente pelo ocorrido nas cheias de 2010 e 2011. Para isso, a COMPESA, principal usuária do reservatório, fez modificações no sistema de captação que irão permitir esse regime de operação.

### 3.1.2.2 Reservatório de Carpina

O reservatório de Carpina recebe toda a drenagem da Unidade de Análise 3 (UA3) e em conjunto com Jucazinho, compõe o binômio de controle de cheias no Médio e Alto Capibaribe. Este reservatório foi construído em 1978 com a finalidade de evitar possíveis enchentes na região metropolitana do Recife e foi projetado para ter acumulação nula. No entanto, a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) vem operando o reservatório com uma acumulação média de  $56,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. Situa-se no rio Capibaribe, no município de Feira Nova, nas coordenadas geográficas de 7°53'41"S e 35°20'14"W e tem uma extensão de coroamento de 1.720m, sendo 990m de barragem e mais 730m de diques, com as duas comportas, que abertas, podem liberar cerca de 400 m<sup>3</sup>/s (PERNAMBUCO, 2010c)

### 3.1.2.3 Reservatório de Goitá

A bacia do reservatório Goitá também faz parte da UA4. O reservatório se encontra no rio Goitá, afluente do rio Capibaribe, localizando-se nos municípios de Glória de Goitá e Paudalho; tem o objetivo de controle de enchentes, mas também é utilizado para regularização de vazão no rio. Fica distante 27,8km do Recife, sendo 23,8km pela BR-408 com destino a Paudalho, mais 4km de acesso em estrada carroçável até o reservatório. Geograficamente o reservatório se localiza nas coordenadas 7°58'12"S e 35°06'45"W. O reservatório Goitá foi construído com o objetivo de contenção de cheias.

O reservatório Goitá, iniciado em janeiro de 1976 e concluído em maio de 1978, tem o vertedor na cota 70m, o que corresponde à capacidade máxima de acumulação de

52 milhões de metros cúbicos, sendo considerado o volume de até  $54,4 \times 10^6 \text{ m}^3$  para atenuação de enchentes. Permite laminar uma vazão efluente máxima de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , fazendo diminuir a probabilidade de enchentes na RMR (PERNAMBUCO, 2010c).

#### 3.1.2.4 Reservatório de Tapacurá

O reservatório de Tapacurá está localizado nas coordenadas  $8^\circ 02' 12'' \text{ S}$  e  $35^\circ 09' 46'' \text{ W}$  e fica a 31 km do Recife. Foi construído em 1973 e se situa no Rio Tapacurá, que faz parte da UA4. Esta barragem foi construída para funcionar como parte do sistema de proteção contra enchentes no Recife, laminando uma vazão máxima do rio Tapacurá em  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ . O reservatório de Tapacurá, na verdade, é formado por um conjunto de barramentos composto por uma barragem principal, em concreto-massa e mais duas barragens de terra, que funcionam como diques laterais. O que controla o nível das águas é o barramento principal, onde se localiza o vertedouro, que disciplina a passagem das cheias (PERNAMBUCO, 2010c).

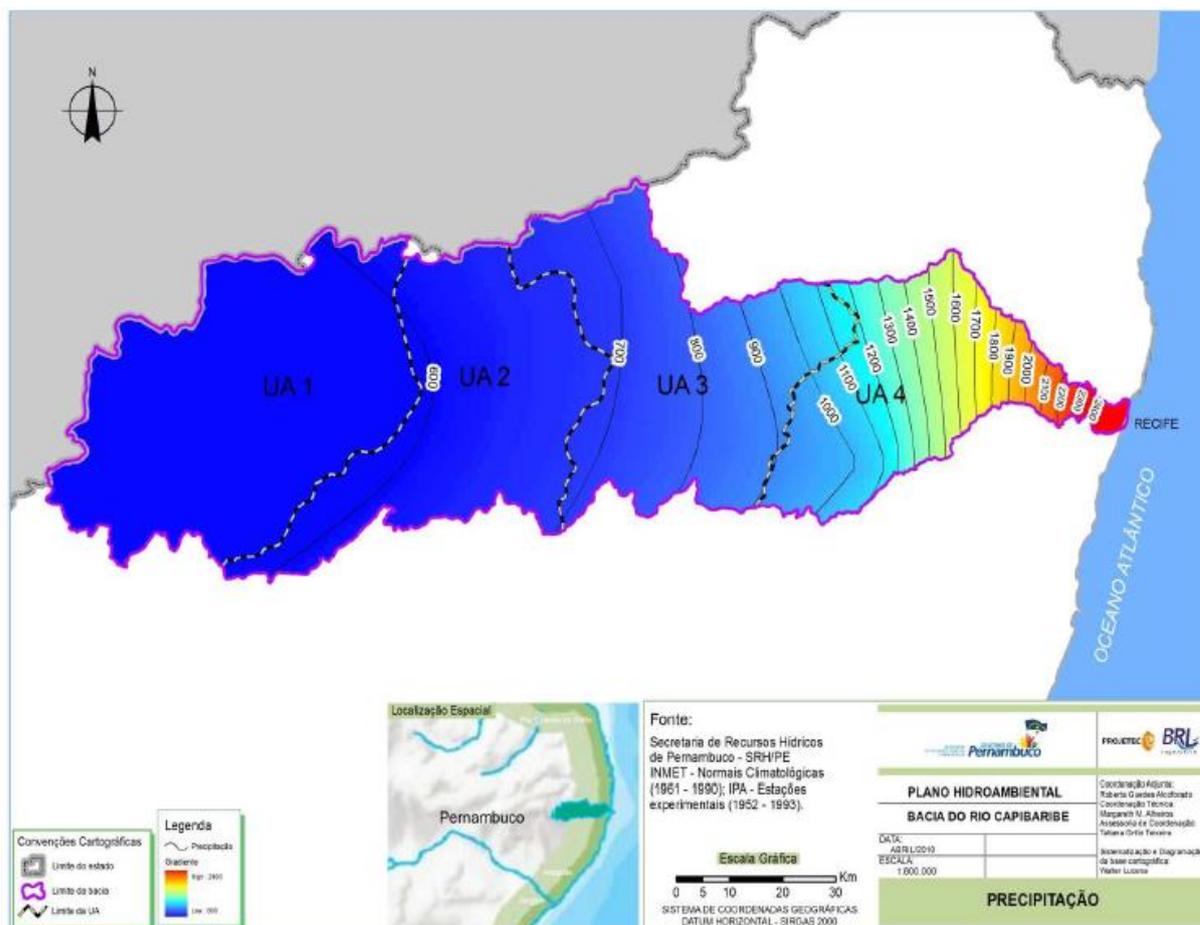
#### 3.1.3 Clima e precipitações

A bacia do Rio Capibaribe apresenta dois tipos climáticos distintos. No alto e médio curso, localizados no Agreste, predomina o clima quente e semiárido, enquanto seu baixo curso apresenta clima quente tropical úmido. O alto e médio curso apresentam pluviosidade média de  $550 \text{ mm/ano}$ , solos rasos e vegetação da caatinga. Já o baixo curso apresenta solos profundos, vegetação típica da Floresta Atlântica e alta pluviosidade, com média anual de  $2400 \text{ mm}$  (RIBEIRO NETO *et al.*, 2014).

De acordo com o Plano Hidroambiental da Bacia do rio Capibaribe, publicado em 2010, os totais anuais precipitados têm um valor médio de  $1133,59 \text{ mm}$ , com o aumento da precipitação na medida em que os postos se aproximam do litoral. Isto pode estar relacionado à diminuição da altitude dos postos estudados. Na Figura 14 pode-se observar que a área que compreende a UA1 e UA2, considerando as estações de Arcoverde, São Bento do Una, Garanhuns e Caruaru, a precipitação anual média foi de  $702,95 \text{ mm}$ . Os postos de Surubim e Vitória de Santo Antão, localizados na UA3 e ao oeste da UA4, apresentaram uma média do total anual de

861,40mm. No litoral as precipitações chegaram a uma média anual de 2267,05mm, levando-se em conta as estações do Recife e Ipojuca (PERNAMBUCO, 2010c).

Figura 14 – Isoietas anuais médias na bacia do Rio Capibaribe.

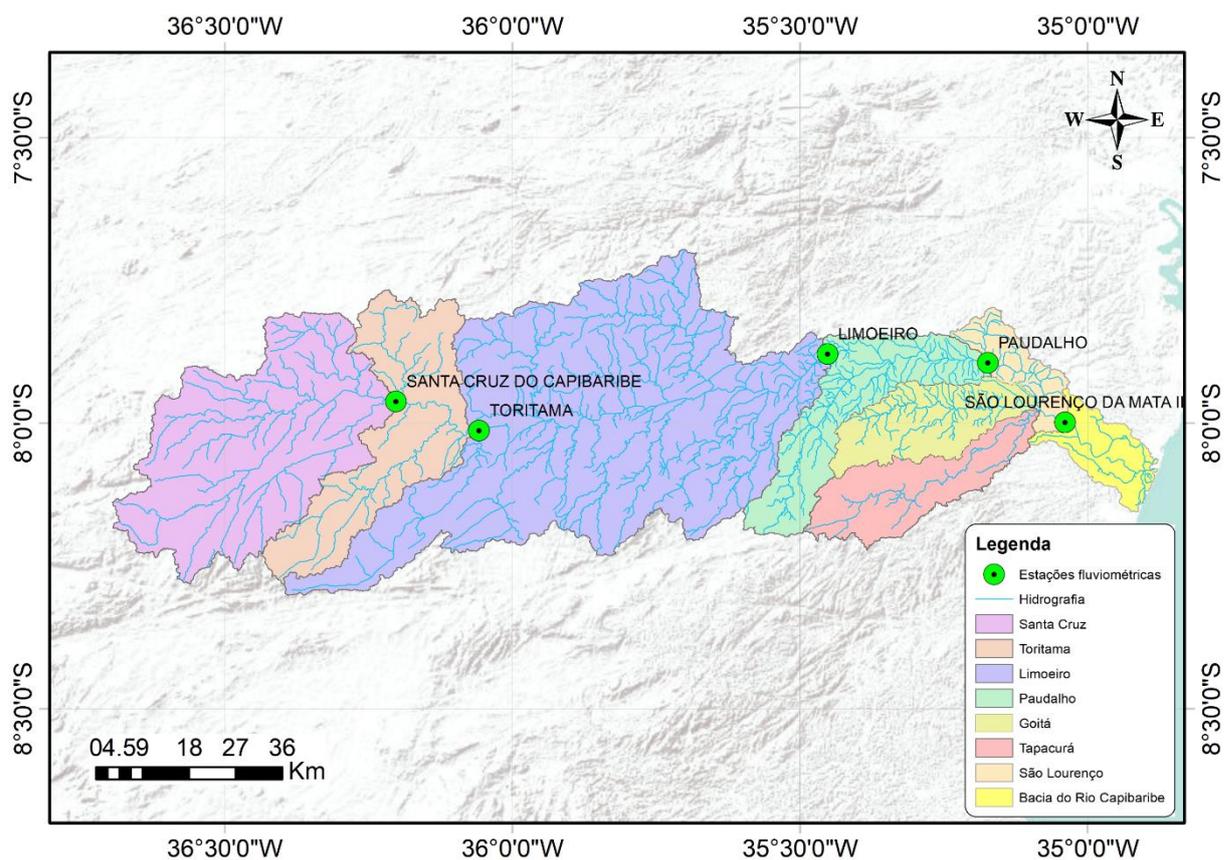


Fonte: Pernambuco (2010c)

### 3.2 DADOS HIDROLÓGICOS

A bacia do Rio Capibaribe foi dividida em sete sub-bacias menores com exutório localizado em um posto fluviométrico correspondente (com exceção das sub-bacias de Goitá e Tapacurá, que não possuem postos em seus exutórios), conforme representado na Figura 15. Foi realizada a modelagem hidrológica em cada sub-bacia com o objetivo de comparar a resposta hidrológica de cada sub-bacia com os dados fluviométricos dos postos fluviométricos disponíveis na bacia. Para isso, foram necessários dados pluviométricos e fluviométricos descritos a seguir.

Figura 15 – Sub-bacias em estudo na Bacia do Rio Capibaribe



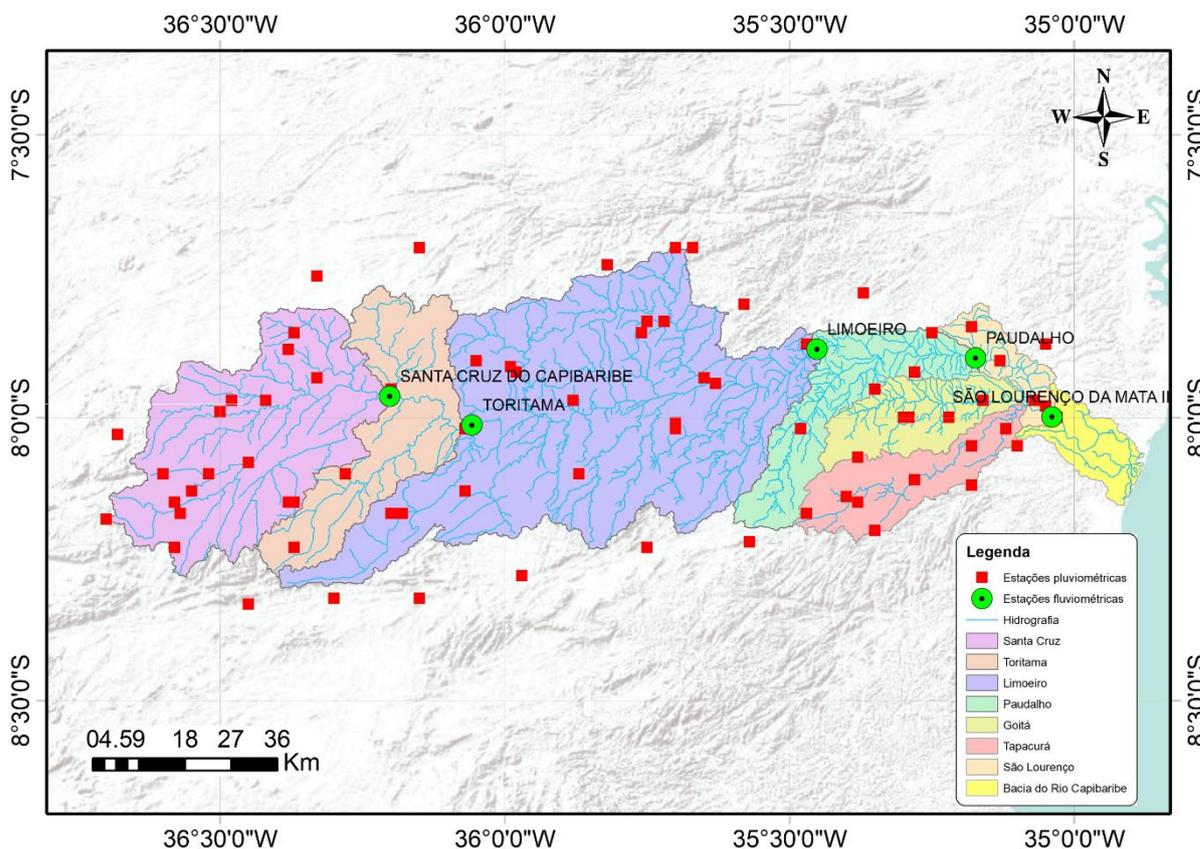
Fonte: A autora, 2019

### 3.2.1 Dados pluviométricos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da base de dados Hidroweb da Agência Nacional de Águas – ANA, onde se encontra todo o acervo das estações operadas por diferentes órgãos em todo o território nacional.

Foram escolhidas 77 estações pluviométricas para o presente estudo, que podem ser identificadas na Tabela 3 a seguir. Para cada posto, foram utilizados os dados de precipitação diária disponíveis entre os períodos de 01/01/1966 a 31/07/2018 e a disposição espacial destes postos pluviométricos escolhidos pode ser identificada na Figura 16.

Figura 16 – Estações pluviométricas utilizadas nesta pesquisa



Fonte: A autora, 2019

Tabela 3 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto pluviométrico	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
		Latitude	Longitude	
UMBUZEIRO	735001	-7,7	-35,7	INMET
UMBUZEIRO	735002	-7,7	-35,67	AESA-PB
MATA VIRGEM	735011	-7,73	-35,82	AESA-PB
ALGODÃO DO MANSO (DNOCS)	735037	-7,97	-35,88	SUDENE
BOM JARDIM	735041	-7,8	-35,58	DNOCS
BUENOS AIRES	735045	-7,78	-35,37	SUDENE
CARPINA (FLORESTA DOS LEÕES)	735046	-7,85	-35,25	DNOCS
ENGENHO CARRAPATO	735049	-7,92	-35,28	SUDENE
ENGENHO SÍTIO	735050	-7,97	-35,16	ANA
FEIRA NOVA (JARDIM)	735051	-7,95	-35,35	SUDENE
LIMOEIRO	735058	-7,87	-35,47	DNOCS
PAUDALHO	735066	-7,89	-35,17	ANA
SALGADINHO	735067	-7,94	-35,63	ANA
SURUBIM	735068	-7,83	-35,75	SUDENE
SURUBIM	735069	-7,83	-35,72	INMET
USINA MUSSUREPE	735081	-7,9	-35,13	SUDENE
USINA TIUMA (IAA)	735084	-7,97	-35,07	IAA
VERTENTES	735085	-7,92	-35,98	DNOCS
LIMOEIRO	735100	-7,88	-35,45	ANA
SÃO LOURENÇO DA MATA (RFN)	735125	-7,98	-35,05	RFFSA
PASSIRA	735148	-7,93	-35,65	EMATER
CARPINA	735157	-7,84	-35,18	ANA
SURUBIM	735158	-7,85	-35,76	ANA

Fonte: A autora, 2019

... Continuação Tabela 3 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto pluviométrico	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
		Latitude	Longitude	
VERTENTES	735159	-7,91	-35,99	ANA
BOTAFOGO	735166	-7,87	-35,05	SUDENE
RIACHO SANTO ANTÔNIO	736013	-7,7	-36,15	AESA-PB
BARRA DE SÃO MIGUEL	736025	-7,75	-36,33	AESA-PB
JATAÚBA (JATOBÁ)	736028	-7,97	-36,48	SUDENE
POÇO FUNDO	736029	-7,93	-36,33	SUDENE
SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	736030	-7,95	-36,2	SUDENE
TAQUARITINGA DO NORTE	736031	-7,9	-36,05	DNOCS
SÍTIO MULUNGU	736032	-7,88	-36,38	SUDENE
SÍTIO SALGADO	736033	-7,97	-36,42	SUDENE
VILA DO PARÁ	736036	-7,85	-36,37	SUDENE
JATAÚBA	736040	-7,99	-36,5	ANA
SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	736041	-7,96	-36,2	ANA
APOTI (DUARTE DIAS)	835001	-8,07	-35,38	SUDENE
BENGALAS	835006	-8,02	-35,48	SUDENE
BEZERROS	835007	-8,23	-35,75	SUDENE
CARUARU	835009	-8,28	-35,97	SUDENE
CHÃ DE ALEGRIA	835012	-8	-35,22	SUDENE
CUMARU (MALHADINHA)	835016	-8,02	-35,7	SUDENE
ENGENHO BELA ROSA	835017	-8,02	-35,12	ANA
ENGENHO SERRA GRANDE	835018	-8,2	-35,35	SUDENE
GLÓRIA DE GOITA	835027	-8	-35,3	SUDENE
GRAVATA	835030	-8,22	-35,57	DNOCS
POMBOS (SÃO JOSÉ DOS POMBOS)	835039	-8,15	-35,38	SUDENE

Fonte: A autora, 2019

... Continuação Tabela 3 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto pluviométrico	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
		Latitude	Longitude	
RUSSINHA	835045	-8,17	-35,47	SUDENE
SÃO BENTO DO UNA	835046	-8,05	-35,18	SUDENE
SÃO LOURENÇO DA MATA II	835048	-8	-35,03	ANA
SÍTIO BARRIGUDA	835051	-8,1	-35,87	SUDENE
TAPERA	835055	-8,12	-35,18	SUDENE
NOSSA SENHORA DA LUZ	835067	-8,05	-35,1	SUDENE
VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	835068	-8,11	-35,28	ANA
CUMARU	835135	-8,01	-35,7	ANA
GLÓRIA DO GOITÁ	835136	-8	-35,29	ANA
POMBOS	835137	-8,14	-35,4	ANA
SANTA MARIA DA PARAIBA	836001	-8,03	-36,68	AESA-PB
BELO JARDIM	836004	-8,33	-36,45	APAC-PE
BREJO DA MADRE DE DEUS	836005	-8,15	-36,38	DNOCS
CARAPOTOS (RIACHO DOCE)	836010	-8,13	-36,07	SUDENE
FAZENDA NOVA	836012	-8,17	-36,2	SUDENE
MANDACAIA	836023	-8,1	-36,28	SUDENE
PASSAGEM DO TÓ	836028	-8,1	-36,52	SUDENE
POÇÃO	836034	-8,18	-36,7	SUDENE
SÃO CAETANO 463	836038	-8,32	-36,15	INMET
SERRA DO VENTO	836045	-8,23	-36,37	SUDENE
SÍTIO APOLINÁRIO	836046	-8,08	-36,45	SUDENE
SÍTIO CANHOTO	836047	-8,15	-36,58	SUDENE
SÍTIO LAGOA DO FÉLIX	836048	-8,17	-36,57	SUDENE
SÍTIO LOGRADOURO	836049	-8,17	-36,18	SUDENE

Fonte: A autora, 2019

... Continuação Tabela 3 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto pluviométrico	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
		Latitude	Longitude	
SÍTIO MUQUEM	836050	-8,1	-36,6	SUDENE
SÍTIO SEVERO	836051	-8,13	-36,55	SUDENE
TACAIMBO	836052	-8,32	-36,3	SUDENE
TORITAMA (TORRES)	836054	-8,02	-36,07	SUDENE
XUCURU (ALDEIA VELHA)	836055	-8,23	-36,58	SUDENE
BREJO DA MADRE DE DEUS	836092	-8,15	-36,37	ANA

Fonte: A autora, 2019

Como a área de estudo desta pesquisa é muito extensa e são muitas estações para fazer o download uma a uma, desenvolveu-se uma rotina em linguagem Python para fazer o download das estações selecionadas de forma automatizada através do HIDROWEB. O algoritmo desenvolvido tem a função de baixar os dados pluviométricos das estações pelo código inserido em um arquivo .txt. A rotina reconhece o código de cada estação neste arquivo e faz o download automaticamente da série. Este algoritmo necessita apenas de um arquivo em formato .txt com os códigos das estações de interesse. O código, bem como seu tutorial de utilização, se encontra no seguinte repositório para livre download:

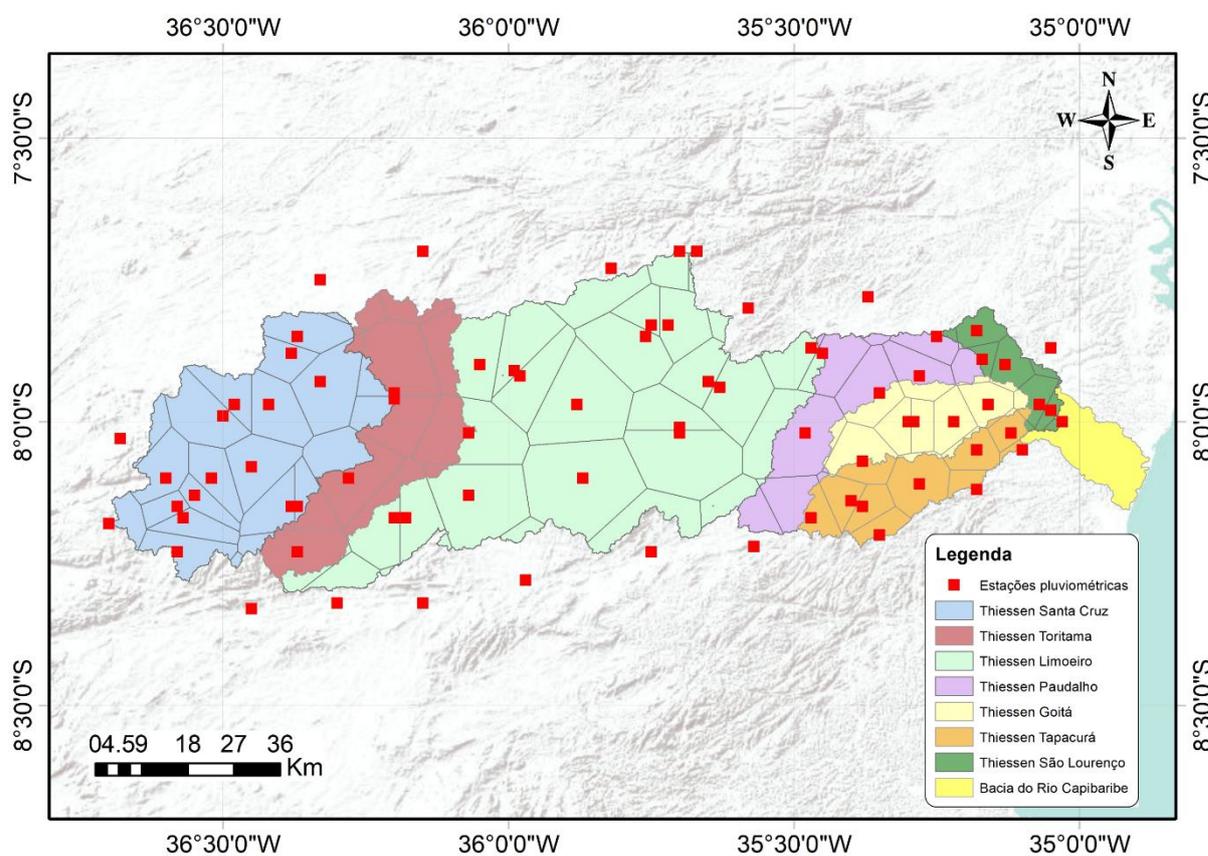
<https://github.com/mayaraarrudaeng/Hidroweb.git>

### 3.2.2 Cálculo da precipitação média

Para o processamento dos dados pluviométricos, foram desenvolvidos algoritmos escritos em linguagem Python com a finalidade de facilitar a obtenção da série final de chuva média necessária para a modelagem hidrológica. O primeiro algoritmo criado intitulado “matriz\_chuva” consiste em compilar os dados de todas as estações dentro de um determinado intervalo de tempo definido em uma única planilha MS Excel no formato .csv (arquivo de valores separado por vírgulas). Desta forma, cria-se um arquivo com todas as estações a serem utilizadas no cálculo da chuva média para cada sub-bacia em estudo.

Para o cálculo da precipitação média em cada sub-bacia, utilizou-se o método dos Polígonos de Thiessen. Este método consiste em atribuir pesos aos totais precipitados em cada estação, proporcionais à área de influência de cada estação na sub-bacia estudada. O cálculo dos polígonos de Thiessen foi realizado pelo software ArcGis, através da ferramenta “Create Thiessen Polygons” do conjunto de algoritmos do pacote Analysis Tools onde foi desenhado o traçado dos polígonos e foram calculadas as áreas de influência de cada estação nas sub-bacias. A seguir, na Figura 17, foi apresentado o traçado dos polígonos de Thiessen sobre a bacia do Rio Capibaribe.

Figura 17 – Polígonos de Thiessen criados para as sub-bacias em estudo.



Fonte: A autora, 2019

Com a matriz de chuva criada para cada sub-bacia com o código anterior (matriz\_chuva), o próximo passo foi utilizar o algoritmo intitulado “chuva\_media” para o cálculo da chuva média em cada sub-bacia. Para isto, o código necessita da matriz de chuva criada e também de um arquivo .csv contendo o código da estação e a parcela de área de influência de cada estação pluviométrica calculada pelo Thiessen

na sub-bacia. Todos estes algoritmos citados anteriormente estão disponíveis para download gratuito no seguinte repositório:

<https://github.com/mayaraarrudaeng/calculochuvamedia.git>

Quando não existe dado de precipitação em um posto, sua área de influência é distribuída proporcionalmente entre as demais. O arquivo contendo a chuva média e as datas correspondentes para cada sub-bacia em estudo é o dado de entrada requerido para o modelo hidrológico CAWM IV.

### 3.2.3 Dados Fluviométricos

As estações fluviométricas selecionadas para o estudo podem ser identificadas através da Tabela 4 a seguir. Foram utilizados cinco postos para calibração e validação dos dados no modelo hidrológico, todos de responsabilidade da ANA e operados pela CPRM.

Tabela 4 – Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto Pluviométrico	Área de Drenagem (Km <sup>2</sup> )	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
			Latitude	Longitude	
SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	1.560	39100000	-7,96	-36,20	ANA/CPRM
TORITAMA	2.450	39130000	-8,01	-36,06	ANA/CPRM
LIMOEIRO	5.580	39145000	-7,88	-35,45	ANA/CPRM
PAUDALHO	6.190	39150000	-7,89	-35,17	ANA/CPRM
SÃO LOURENÇO DA MATA II	7.290	39187800	-8,00	-35,04	ANA/CPRM

Fonte: A autora, 2019

Foi realizado um tratamento dos dados fluviométricos antes de ser utilizado no modelo hidrológico. Este tratamento consistiu na utilização de outro código escrito em Python intitulado “matriz\_vazao”, que cria uma planilha com os dados de vazão

correspondentes a cada estação ordenados em datas corridas anteriormente definidas. Isto facilitará a entrada dos dados no modelo hidrológico. Este código se encontra também disponível em: <https://github.com/mayaraarrudaeng/matrizvazao.git>

Como alguns períodos de dados apresentavam falhas em sua série, foi realizado um ajuste por regressão linear entre os postos mais próximos a fim de preencher os registros ausentes.

### 3.2.4 Dados de evaporação

Os dados de evaporação utilizados no presente trabalho foram provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Utilizaram-se os dados de evaporação total obtidos pela Normal climatológica para o intervalo de 1981 a 2010 no posto de Surubim. Este posto foi escolhido por se localizar no centro da Bacia do Rio Capibaribe e representar bem a evaporação nas sub-bacias delimitadas. Os valores mensais de evaporação utilizados podem ser observados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Valores da normal climatológica para o posto de Surubim

<b>Normal climatológica</b>	
<b>Posto: Surubim</b>	
<b>1981 a 1990</b>	
<b>Meses</b>	<b>Evaporação total (mm)</b>
Janeiro	196,2
Fevereiro	180,5
Março	165,3
Abril	128,4
Mai	108,2
Junho	80,8
Julho	85,1
Agosto	102,8
Setembro	146,0
Outubro	199,4
Novembro	214,5
Dezembro	223,0
<b>Ano</b>	<b>1830,2</b>

Fonte: Adaptado de INMET (2010)

### 3.3 DADOS TOPOGRÁFICOS

Para a realização da simulação hidrológica são necessárias informações acerca da topografia da área de estudo. Há diversos meios para obter essas informações, um deles é através de técnicas de sensoriamento remoto, a partir da qual é gerado o modelo digital do terreno (MDT). O MDT pode ser definido como uma matriz de números que representam a distribuição geográfica de elevações. Portanto, o MDT corresponde à representação de uma superfície real em meio digital, fornecendo a altimetria de um terreno sob a forma de uma grade regular de pontos.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o MDT proveniente do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com dados de elevação a cada 30 metros. Para bacias com área de contribuição menor, tem sido utilizada a base de dados espaciais PE3D para geração da malha dos rios, pois estas imagens são precisas e oferecem uma representação muito confiável do terreno. Porém, para bacias da ordem de grandeza do Capibaribe, a geração dos parâmetros chega a ser inviável por conta do tempo de processamento dos dados. Como pequenos desvios no traçado do rio não afetam muito o cálculo dos parâmetros da bacia, o uso de dados Topodata do SRTM foi razoável para o propósito do trabalho.

A delimitação da bacia do rio Capibaribe e a geração da rede de rios foi executada utilizando o SRTM interpolado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o software de geoprocessamento ArcGIS na versão 10.5. Foram empregadas as ferramentas do pacote ArcHydro e os processos foram aplicados na seguinte sequência para obtenção da rede de drenagem:

1. Fill sinks
2. Flow Direction
3. Flow Accumulation
4. Stream Definition
5. Stream Segmentation
6. Catchment Grid Delineation
7. Catchment Polygon Processing
8. Drainage Line Processing

9. Adjoint Catchment Processing

10. Drainage Point Processing

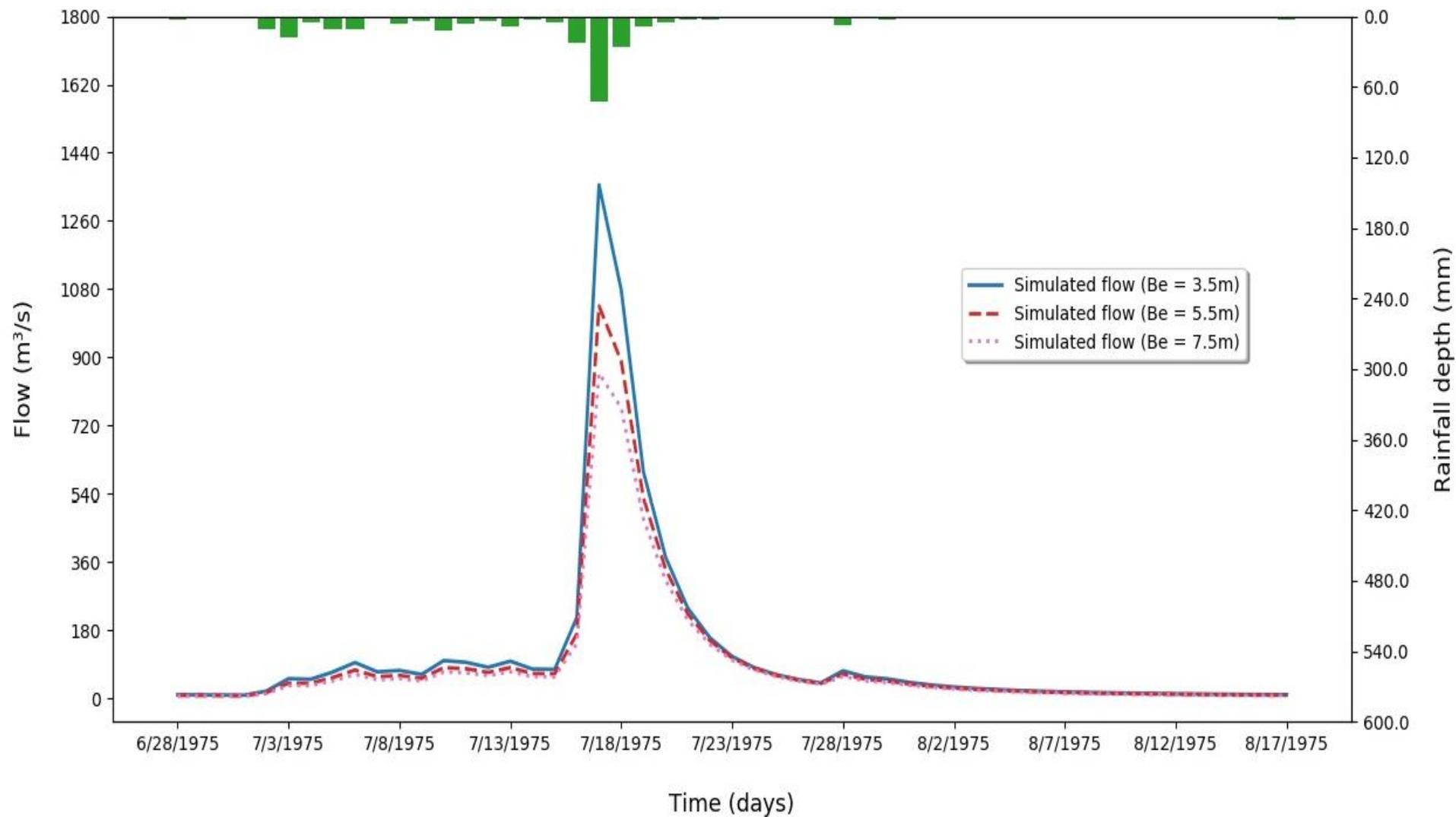
11. Batch Point Generation

12. Watershed Delineation

Os passos 11 e 12 foram repetidos sete vezes para a criação das sete sub-bacias de interesse e o resultado da delimitação foi apresentado anteriormente na Figura 15. Após a criação da rede de drenagem e a delimitação das sub-bacias, foi possível a determinação de alguns parâmetros necessários para entrada no modelo hidrológico, sendo eles o somatório dos comprimentos da rede de drenagem de cada sub-bacia (m), a área da sub-bacia (km<sup>2</sup>) e a declividade do rio principal (m/m). Estes parâmetros são necessários para o cálculo do parâmetro **K** apresentado na Equação 14 apresentado na seção 2.5 deste trabalho.

A largura equivalente da rede de rios da bacia precisou ser estimada, porém esse valor é de fácil ajuste a partir da magnitude dos picos de cheia. O valor de **B<sub>e</sub>** é inversamente proporcional aos valores das vazões de pico calculadas no hidrograma, sendo assim, para valores maiores de **B<sub>e</sub>** as vazões de pico diminuem, conforme pode ser observado na Figura 18. O coeficiente de Manning *n* é a rugosidade da calha dos rios, tendo sido estimado o valor de 0,03. *C* é uma constante de conversão de unidades igual a 1000 para as selecionadas.  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em segundos, no caso igual a 86400. Com todos esses parâmetros determinados, foi possível o cálculo do **K**.

O cálculo do parâmetro **K** tem levado a bons resultados para declividades normais de rios como o Capibaribe (da ordem de 10<sup>-4</sup>, por exemplo), que não apresentam grandes declives. Para rios com declividades acentuadas, de acordo com as análises em andamento pela equipe que desenvolve o modelo, os valores de **K** obtidos não levam a bons resultados nas simulações. Isso é compreensível, visto que o escoamento deixa de ser bem representado pela fórmula de Manning, de onde deriva a expressão de cálculo. Nesses casos deve-se considerar **K** como um parâmetro a calibrar. Outra ressalva a considerar é que a densidade de drenagem que deve ser bem detalhada, com rios de oito ordens segundo a classificação de Strahler. Isso permite maior refinamento na capacidade da calha fluvial.

Figura 18 – Influência do parâmetro  $B_e$  nas vazões simuladas pelo CAWM IV.

Fonte: A autora, 2019

### 3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

No presente trabalho, foi utilizado o modelo hidrológico Campus Agreste Watershed model versão 4 (CAWM IV) em dois formatos. Nesta pesquisa foram desenvolvidos três algoritmos em python para compor o modelo, a fim de que possam, futuramente, substituir o programa em formato MS Excel. A seguir será explanada a conceituação de cada uma destas rotinas desenvolvidas. Cada um deles se encontra disponível gratuitamente para download no seguinte repositório: <https://github.com/mayaraarrudaeng/CAWM-IV.git>

#### 1. Algoritmo CAWM\_IV

Este algoritmo tem a função de calcular o balanço hídrico realizado na bacia a partir dos dados de entrada. As informações requeridas para esse algoritmo são: um arquivo contendo os dados de evaporação, um arquivo contendo dados de precipitação, um arquivo com dos dados de vazão para o mesmo período da precipitação e outro arquivo contendo os valores dos parâmetros iniciais para a simulação. O arquivo de saída é uma planilha em formato .csv contendo o balanço hídrico realizado para a bacia. O algoritmo também pode ser visualizado no Anexo 01.

#### 2. Algoritmo Índices Estatísticos

Este algoritmo calcula os índices estatísticos responsáveis pela avaliação da qualidade de representação do modelo, são eles: coeficiente de Nash Sutcliffe (ENS), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio de vazão absoluto. O algoritmo também pode ser visualizado no Anexo 02.

#### 3. Algoritmo Calibração

Com os índices estatísticos calculados, este algoritmo reconhece o intervalo que obteve o melhor resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS) e calibra todos os outros intervalos a partir dos parâmetros obtidos. A otimização é executada através da função “`scipy.optimize.minimize`”, que tem como método de cálculo o algoritmo de

Newton trucado, que atua minimizando uma função objetivo de um ou mais variáveis e restrições. Este método foi escolhido pela possibilidade de variação de mais de um parâmetro e pelo resultado da otimização se aproximar muito do GRG não Linear utilizado pelo solver do MS Excel. O algoritmo pode ser visualizado no Anexo 3.

Uma vez inseridas as características das sub-bacias, os dados de entrada de precipitação, vazão e evaporação no CAWM IV tanto na versão excel quanto na versão em python, são escolhidos os períodos a serem avaliados para calibração e validação. Nesta pesquisa foram utilizados o CAWM IV tanto na versão em python quanto na versão em planilha MS Excel para comparar se os resultados obtidos pelos algoritmos estão sendo calculados corretamente.

Após a escolha dos intervalos a serem avaliados da série de dados de cada sub-bacia, será avaliado qual intervalo será escolhido para a calibração. Para verificação dos dados de saída, foram utilizados três índices estatísticos. O primeiro deles foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), calculado através da Equação 17:

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (17)$$

Onde:

$ENS$  - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$Q_{i,obs}$  - Vazão observada no tempo  $i$ , ( $m^3/s$ )

$Q_{i,calc}$  - Vazão calculada pelo modelo no tempo  $i$ , ( $m^3/s$ )

$\bar{Q}_{obs}$  - Vazão observada média no período simulado, ( $m^3/s$ )

Segundo Collischonn (2001), este coeficiente de Nash-Sutcliffe representa bem o erro entre as vazões máximas, variando de  $-\infty$  a 1, sendo considerado adequado e bom os resultados obtidos que possuem  $ENS$  maior que 0,75 e aceitável quando os valores do  $ENS$  estiverem entre 0,75 e 0,36.

Outro índice utilizado para avaliação dos resultados foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), representado pela Equação 18. O coeficiente  $R^2$  é obtido através da análise de variância, na qual se determina o quanto da variabilidade da variável dependente é considerado pela regressão. Os valores de  $R^2$  podem variar entre 0 e 1, quando este valor for 1 a regressão foi perfeita, sendo que, o inverso ocorre quando o valor de  $R^2$  se aproxima de 0 (zero).

$$R^2 = \frac{\frac{n \sum_{i=1}^n Q_{i,calc}^2 - \left(\sum_{i=1}^n Q_{i,obs}\right)^2}{n(n-1)}}{\frac{n \sum_{i=1}^n Q_{i,obs}^2 - \left(\sum_{i=1}^n Q_{i,obs}\right)^2}{n(n-1)}} \quad (18)$$

Onde:

$R^2$  - Coeficiente de determinação

$Q_{i,obs}$  - Vazão observada no tempo i, ( $m^3/s$ )

$Q_{i,calc}$  - Vazão calculada pelo modelo no tempo i, ( $m^3/s$ )

$\overline{Q_{obs}}$  - Vazão observada media no período simulado, ( $m^3/s$ )

n – número de intervalos considerados

Outro índice para constatação do desempenho do modelo foi o desvio de vazão absoluto (Equação 19), que indica a soma das diferenças absolutas entre a vazão calculada e a medida para um determinado intervalo de dados. Quanto maior o valor deste índice, maior é o erro da vazão calculada.

$$S_{abs} = \sum_{i=1}^n |Q_{i,calc} - Q_{i,obs}| \quad (19)$$

Onde:

$S_{abs}$  – Soma dos desvios de vazão absoluta

$Q_{i,calc}$  - Vazão calculada pelo modelo no tempo i, ( $m^3/s$ )

$Q_{i,obs}$  - Vazão observada no tempo i, ( $m^3/s$ )

Para calibração do modelo, escolheu-se o intervalo que obteve o maior coeficiente de Nash-Sutcliffe e fez-se a otimização da função objetivo calculada. Esta função objetivo (Equação 20) busca maximizar o ENS e minimizar a diferença entre os valores de vazão calculados e observados. A constante  $10^6$  busca se destina a evitar valores muito baixos.

$$F_{obj} = \frac{ENS * 10^6}{S_{abs}} \quad (20)$$

A função objetivo do intervalo escolhido para ser calibrado é otimizada através da ferramenta Solver do Microsoft Excel pelo método GRG não linear ou através do algoritmo calibração citado anteriormente. Após a calibração do intervalo escolhido, os outros intervalos servem para validação do modelo.

Para avaliação do período contínuo das séries de vazões, foi calculado o desvio de vazão de acordo com a Equação 21 em cada estação fluviométrica. Este índice foi utilizado para verificar o desvio absoluto entre as vazões calculadas e observadas.

$$\Delta Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,obs} - \sum_{i=1}^n Q_{i,calc}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,obs}} \times 100\% \quad (21)$$

Onde:

$\Delta Q$  - Soma dos desvios de vazão absoluta

$Q_{i,calc}$  - Vazão calculada pelo modelo no tempo i, (m<sup>3</sup>/s)

$Q_{i,obs}$  - Vazão observada no tempo i, (m<sup>3</sup>/s)

### 3.5 MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

O modelo para simulação de operação dos reservatórios foi desenvolvido também na Universidade Federal de Pernambuco e se encontra em formato de planilha MS Excel. O método utilizado neste modelo para simulação dos reservatórios consiste no balanço de massa. Foi executado este balanço para os quatro reservatórios em estudo: Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá.

#### 3.5.1 Dados utilizados

Para verificação do comportamento dos reservatórios em estudo e realização da simulação do balanço hídrico, foi necessário um conjunto de informações que compreendem as características do reservatório, sendo elas: capacidade máxima de acumulação, cota de coroamento, cota da soleira e extensão do vertedouro e curva cota x área x volume. Estas características foram obtidas pelo site da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, porém alguns dados geométricos das barragens não estavam disponíveis, como a extensão do vertedouro. Deste modo, as extensões dos vertedouros de Carpina, Tapacurá e Goitá foram obtidas pelas ortofotos geradas pelo PE3D por oferecerem grande precisão.

Também foram necessários dados hidrológicos como as séries pluviométricas, evaporação e vazões afluentes. Os dados pluviométricos utilizados foram provenientes dos postos mais próximos às barragens para o cálculo do volume precipitado, conforme Tabela 6. Os dados de evaporação foram os mesmos utilizados na modelagem hidrológica correspondentes ao posto de Surubim, explicitados na Tabela 5 da seção 3.1.3. Por fim, as vazões afluentes a cada barragem foram obtidas pelo modelo hidrológico em cada ponto à montante das barragens de acordo com as áreas de influência.

Tabela 6 – Postos pluviométricos utilizados na operação das barragens

Reservatório	Posto Fluviométrico	Código	Coordenadas geográficas	
			Latitude	Longitude
Jucazinho	CUMARU	835135	-8,01	-35,7
Carpina	FEIRA NOVA (JARDIM)	735051	-7,95	-35,35
Goitá	ENGENHO SÍTIO	735050	-7,97	-35,16
Tapacurá	SÃO BENTO DO UNA	835046	-8,05	-35,18

Fonte: A autora, 2019

### 3.5.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico do reservatório corresponde ao cálculo das entradas e saídas de água durante um dado intervalo de tempo (ROCHA; CÉZAR, 2015). O intervalo de tempo escolhido para a operação das barragens foi o mesmo utilizado no CAWM IV: 01/01/1966 a 31/07/2018 com o objetivo de simular os períodos antes e depois da construção das quatro barragens. Na execução do estudo, foi utilizada a seguinte Equação 22 para o balanço hídrico em cada reservatório, onde o intervalo de tempo considerado foi a cada 4 horas:

$$V_{t+4h} = V_t + (V_{afl} + V_{prec} - V_{evap} - V_{cap})/6 \quad (22)$$

Onde:

$V_{t+4h}$  - Volume armazenado após 4h

$V_t$  - Volume armazenado no início do intervalo de tempo

$V_{afl}$  - Volume afluyente ao reservatório no intervalo de tempo

$V_{prec}$  - Volume precipitado sobre o reservatório no intervalo de tempo

$V_{evap}$  - Volume evaporado do reservatório no intervalo de tempo

$V_{cap}$  - Volume a ser captado do reservatório de acordo com a vazão regularizável

Os volumes no segundo membro da equação 22 foram divididos por 6 pois são seis intervalos de 4h contidos em um dia. A partir dos volumes calculados a cada 4h, são calculados os volumes médios, que é a média entre o volume em 4h e o volume no passo de tempo anterior, conforme Equação 23:

$$V_{m\u00e9dio} = (V_{t+4h} + V_t)/2 \quad (23)$$

Onde:

$V_{m\u00e9dio}$  – Volume m\u00e9dio a cada 4h

$V_{t+4h}$  - Volume armazenado ap\u00f3s 4h

$V_t$  – Volume armazenado no intervalo de tempo anterior.

Com o volume m\u00e9dio calculado, obteve-se a cota m\u00e9dia em 4h atrav\u00e9s da equa\u00e7\u00e3o da curva cota x volume calculada. Para se adquirir a vaz\u00e3o vertida em 4h, fez-se o teste l\u00f3gico a fim de constatar se a cota calculada \u00e9 maior ou menor do que a cota da soleira do vertedouro. Se a cota for menor, nenhuma vaz\u00e3o \u00e9 vertida, se for maior, a vaz\u00e3o vertida ser\u00e1 calculada pela Equa\u00e7\u00e3o 24:

$$Q_{vert} = 2.2 * L_{vert} * (Z_{t+4h} - Z_{vert})^{1.5} \quad (24)$$

Onde:

$Q_{vert}$  – Vaz\u00e3o vertida no intervalo de tempo

$L_{vert}$  – Extens\u00e3o do vertedouro na barragem considerada

$Z_{t+4h}$  - Cota da \u00e1gua calculada para o intervalo de tempo

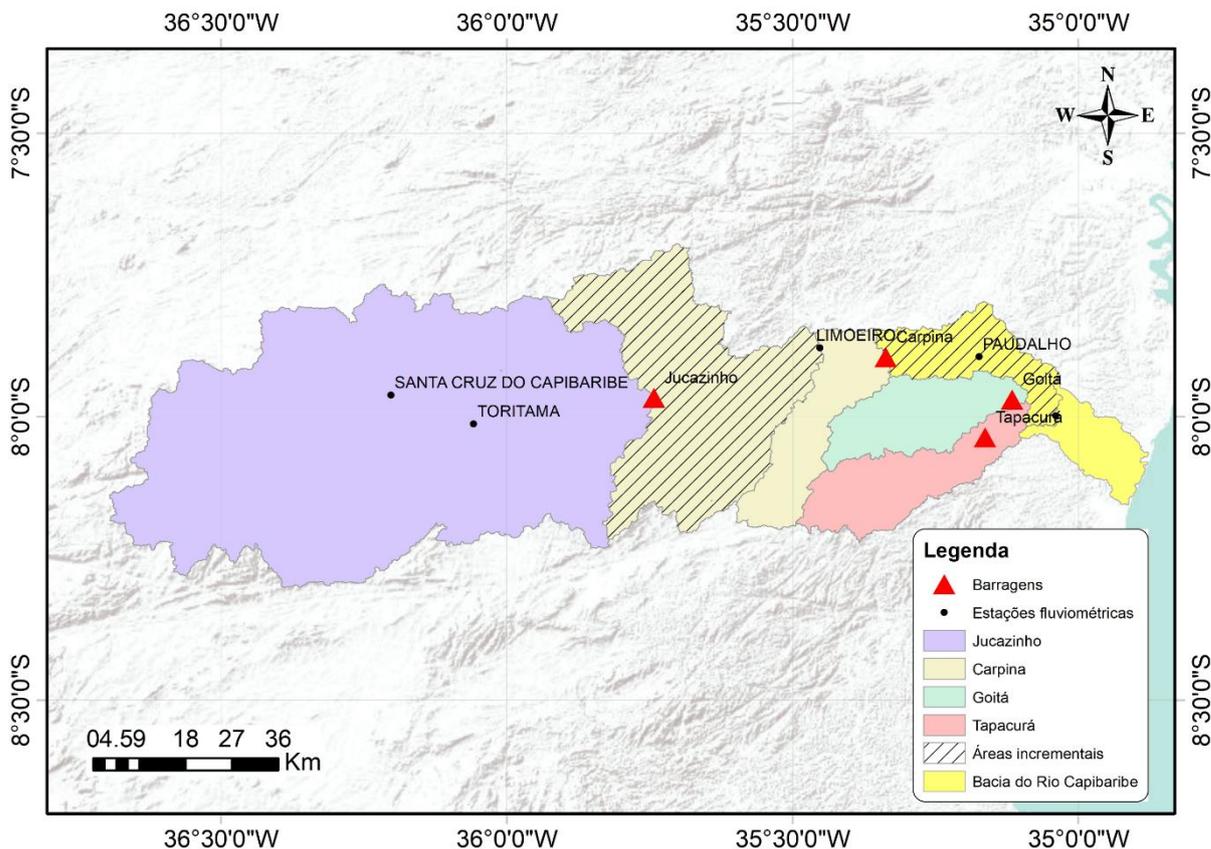
$Z_{vert}$  – Cota da soleira do vertedouro

O volume vertido ser\u00e1 a vaz\u00e3o vertida multiplicada por 14400, que \u00e9 a quantidade em segundos que se tem em 4h. As cotas e \u00e1reas a cada passo de tempo foram calculadas de acordo com a equa\u00e7\u00e3o das curvas cota x volume e volume x \u00e1rea definidas para cada reservat\u00f3rio. Ap\u00f3s estes c\u00e1lculos, finalmente obt\u00eam-se a vaz\u00e3o defluente m\u00e9dia di\u00e1ria para cada reservat\u00f3rio.

Com o objetivo de se obter a influ\u00eancia das barragens ao longo do Rio Capibaribe e se comparar a vaz\u00e3o de chegada em cada posto fluviom\u00e9trico em que se tinham dados di\u00e1rios medidos, foram escolhidas as cidades de Limoeiro, Paudalho e S\u00e3o Louren\u00e7o para estas verifica\u00e7\u00f5es. Para o c\u00e1lculo das vaz\u00f5es incrementais em cada posto, utilizou-se a vaz\u00e3o simulada para cada posto fluviom\u00e9trico multiplicando pelo

fator de área correspondente entre a barragem e o posto fluviométrico a ter seus dados comparados. A Figura 19 a seguir ilustra as áreas incrementais da afirmação anterior.

Figura 19 – Áreas incrementais na bacia do rio Capibaribe.



Fonte: A autora, 2019

A partir da soma entre as vazões incrementais calculadas e as vazões defluentes de cada barragem, obteve-se as vazões de chegada nos postos fluviométricos das cidades de Limoeiro, Paudalho e São Lourenço, objetivo final deste trabalho.

### 3.5.3 Definição dos cenários devido a mudanças climáticas

Diversos estudos têm demonstrado que o aumento da temperatura média do planeta causa uma intensificação do ciclo hidrológico, o que poderá ocasionar mudanças nos regimes das chuvas, como o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, alterando fortemente a disponibilidade hídrica de uma região e a qualidade de vida da população. Eventos extremos de precipitação, como secas severas ou

grandes enchentes, alteram consideravelmente as características habituais das bacias hidrográficas e principalmente suas áreas antropizadas, podendo causar grandes transtornos para a população, seja nos grandes centros urbanos, com inundações, como também estiagens prolongadas no sertão.

Tendo em vista as visíveis mudanças climáticas ocorrentes no planeta, a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) criou um grupo de trabalho que elaborou índices de detecção de mudanças climáticas. Ao todo foram definidos 27 (vinte e sete) índices, sendo que alguns destes são aplicados para latitudes médias, outros para os trópicos e parte deles são válidos para qualquer local. Destes índices 11 são para precipitação e 16 da temperatura do ar.

Baseando-se nesses índices, várias pesquisas procuraram estabelecer tendências de precipitação para Pernambuco e suas bacias hidrográficas. Nesse sentido, Nóbrega, Farias e Santos (2015), desenvolveram um estudo para analisar a tendência espacial e temporal da precipitação pluviométrica do Estado de Pernambuco, tendo como base índices de extremos climáticos e a técnica dos quantis. Os resultados dos índices conjuntamente indicam que as chuvas estão cada vez mais concentradas em poucos dias ao longo do ano nos sertões e agreste de Pernambuco. Também sobre o sertão, foram encontrados os maiores números de episódios extremamente secos, assim como, a maior quantidade de ocorrência de eventos extremamente chuvosos, concentrados nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, período chuvoso do Sertão de Pernambuco. Estes resultados corroboraram com estudos anteriores realizados para o Nordeste do Brasil, como no caso de Groisman *et al.* (2005) e Marengo (2007), nos quais identificaram tendência sistemática para aumento da magnitude dos eventos extremos.

Nessa mesma linha de estudo, Souza (2011) buscou classificar possíveis limiares da precipitação pluviométrica na cidade do Recife e avaliou tendências climáticas que possam ocorrer. A partir disso, foram diagnosticadas mudanças locais relacionadas à precipitação e à temperatura durante um período de 47 anos, com aumento da frequência de eventos extremos de chuvas a partir da década de 80 e precipitações diárias superiores a 100 mm em poucos dias. Portanto, pode-se afirmar que a

probabilidade de ocorrência de eventos extremos está ficando cada vez maior e o risco de desastres pode aumentar, sendo importante o constante acompanhamento para diminuir a vulnerabilidade da população.

Lima *et al.* (2018) também visaram estudar a distribuição espaço-temporal das chuvas na bacia do Rio Capibaribe e constataram a elevada variabilidade temporal e espacial das chuvas, onde os maiores índices pluviométricos são encontrados para a região metropolitana do Recife.

Silva, Montenegro e Souza (2017) relataram que diversos estudos têm demonstrado o aumento da temperatura média do planeta causando uma intensificação do ciclo hidrológico, o que poderá ocasionar mudanças nos regimes de chuvas, como o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, alterando fortemente a disponibilidade hídrica de uma região e a qualidade de vida da população. Este estudo analisou tendências de mudanças climáticas nas bacias dos rios Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una, Mundaú, Ipanema, Moxotó, Terra Nova, Brígida, Garças e Pontal e constatou uma tendência de aumento dos eventos extremos máximos de precipitação.

Outro estudo realizado anteriormente por Assis *et al* (2012) confirmou a detecção de mudanças climáticas no padrão pluviométrico da bacia do Rio Capibaribe. Nesta pesquisa foram utilizados os índices de detecção de mudanças climáticas sugeridos pela OMM (Organização Meteorológica Mundial) e os resultados mostraram mudança no padrão das precipitações observadas sobre a bacia do Rio Capibaribe com tendência de aumento de dias secos e intensificação dos dias com precipitações fortes.

Tendo como base estes estudos, nota-se uma grande convergência entre os pesquisadores para a acentuação dos eventos climáticos com maiores magnitudes de cheias e secas mais prolongadas. Seguindo essa perspectiva, o presente estudo também procurou simular a intensificação dos eventos extremos na bacia do Capibaribe através do CAWM IV e do modelo de operação de reservatórios.

Como o desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados, optou-se por calculá-lo para as séries pluviométricas utilizadas no modelo hidrológico e maximizar seu valor de modo que a diferença entre as médias das séries não ultrapassasse em 10% a fim de aumentar os picos de chuva, mas também diminuir os valores de precipitações em dias secos sem alterar significativamente a chuva média. O desvio padrão das séries pluviométricas foi calculado pela Equação 25:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_a)^2}{n}} \quad (25)$$

Onde:

$P_i$  – Precipitação no dia  $i$ ;

$M_a$  – Média aritmética da série pluviométrica

$n$  – número de dias da série.

Procurou-se alterar o valor do desvio padrão maximizando o valor da função objetivo determinada na Equação 26, respeitando o aumento da média da série em até 10%.

$$F_{obj} = \frac{DP_{novo}}{DP_{original}} \quad (26)$$

Onde:

$F_{obj}$  – Função objetivo;

$DP_{novo}$  – Desvio padrão novo;

$DP_{original}$  – Desvio padrão da série original

Essa maximização foi executada através do Solver em planilha do MS Excel pelo método GRG não linear. As novas séries pluviométricas calculadas foram inseridas no CAWM IV, obtendo-se as novas vazões simuladas. Por sua vez, estas vazões simuladas foram inseridas no modelo de operação de barragens para avaliação dos novos cenários.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui serão apresentados os principais resultados obtidos na modelagem hidrológica e nas simulações executadas para as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.

### 4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica na Bacia do rio Capibaribe foi efetuada em sete sub-bacias, de acordo com a Figura 15 apresentada anteriormente, sendo elas: Santa Cruz, Toritama, Limoeiro, Paudalho, Goitá, Tapacurá e São Lourenço. Os dados de entrada iniciais para cada sub-bacia correspondem à chuva média (calculada conforme seção 3.2.2), vazão medida no exutório da sub-bacia e valores de evaporação. O intervalo para a modelagem foi igual em todas as sub-bacias, sendo ele de 1 de janeiro de 1966 a 31 de julho de 2018, com o objetivo de simular os períodos antes e depois da construção das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá.

Conforme explanado na seção 2.5, é necessária a introdução de alguns parâmetros no CAWM IV para o cálculo da vazão simulada. Primeiramente, deve-se determinar algumas características físicas das sub-bacias para o cálculo do parâmetro  $K$  (coeficiente utilizado na equação do escoamento na calha fluvial), sendo elas: declividade do rio principal ( $I$ , em m/m), área da sub-bacia de contribuição ( $A_b$ , em km<sup>2</sup>), comprimento total dos rios da sub-bacia ( $L_t$ , em metros), Largura equivalente dos rios ( $B_e$ , em metros), coeficiente de Manning ( $n$ ), intervalo de tempo ( $\Delta t$ , em segundos) e a constante de conversão de unidades ( $c$ ). Todos os valores obtidos podem ser observados na Tabela 7.

A equação do escoamento fluvial também requer uma constante  $b$ , que neste estudo teve o valor constante de 5/3. Na quarta versão do CAWM, a capacidade de retenção de água no solo ( $S$ ) pode ser definida através do cálculo do Curve Number (CN) médio, conforme a Equação 16. Para a bacia do Rio Capibaribe, o valor de  $S$  encontrado foi de 130 mm. Os valores de CN para a bacia do Rio Capibaribe foram obtidos através do mapa de monitoramento de uso e ocupação do solo de

Pernambuco em 2016, fornecido pelo IBGE e foi gerado um mapa de uso e ocupação do solo para a bacia do rio Capibaribe.

Determinados todos os parâmetros anteriores, restam a calibrar somente o  $K_s$  (parâmetro de permeabilidade do solo),  $K_L$  (coeficiente linear de perdas) e o parâmetro do fator multiplicador da taxa de evapotranspiração a extrair do solo ( $\alpha$ ). Em testes anteriores, utilizava-se o  $\alpha$  como parâmetro fixo, porém, na aplicação atual, o modelo apresentou melhor desempenho com a inclusão dele como parâmetro calibrável.

A calibração do modelo se fez através da escolha dos maiores eventos hidrológicos ocorridos na bacia. Deste modo, foram escolhidos 8 eventos a serem avaliados. Os intervalos que apresentaram maior coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS) foram escolhidos para otimização dos parâmetros do modelo. A calibração foi realizada diversas vezes para os diferentes eventos e, assim foram escolhidos os parâmetros com melhor comportamento gráfico e melhores coeficientes estatísticos também para os períodos não utilizados na calibração. A otimização foi feita a partir da maximização da função objetivo apresentada na equação 20 da seção 3.4. Os valores finais dos parâmetros calibrados estão exibidos na Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros físicos necessários para o cálculo do coeficiente K.

Parâmetros	Santa Cruz	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Goitá	Tapacurá	São Lourenço
I (m/m)	0,001876	0,002344	0,002351	0,002188	0,001937	0,001132	0,002148
Ab (km <sup>2</sup> )	1.567,07	2.457,85	5.592,84	6.199,30	399,76	383,00	7.296,54
Lt (m)	1.221.719,35	1.926.719,04	4.508.891,08	5.008.012,00	1.092.820,00	1.184.766,93	5.891.544,53
Be (m)	5,00	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
n	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$\Delta t$ (s)	86400	86400	86400	86400	86400	86400	86400
c	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>K</b>	<b>0,04122</b>	<b>0,02911</b>	<b>0,01148</b>	<b>0,00995</b>	<b>0,01904</b>	<b>0,01236</b>	<b>0,00839</b>

Fonte: A autora, 2019

I = declividade do rio principal; Ab = Área da bacia; Lt = Comprimento total dos rios; Be = Largura equivalente; n = coeficiente de rugosidade de Manning;  $\Delta t$  = intervalo de tempo; c = constante

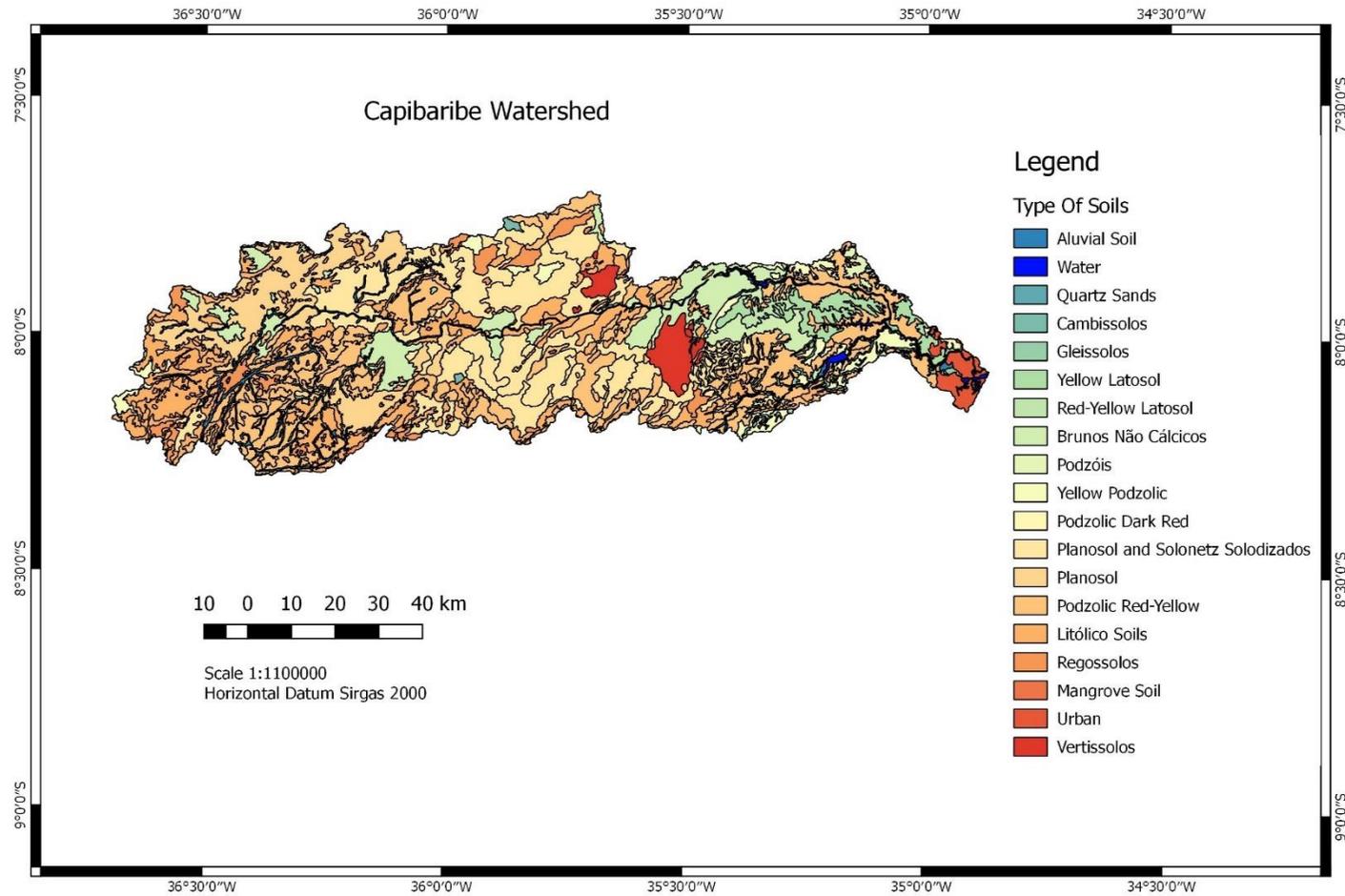
Tabela 8 – Parâmetros finais para cada sub-bacia

Parâmetros	Santa Cruz	Toritama	Limoeiro	Paudalho	Goitá	Tapacurá	São Lourenço
$\alpha$	50,000000	2,500000	2,500000	0,119528	0,119528	0,119528	0,119528
$K_s$	0,001000	0,000159	0,003700	0,000015	0,000015	0,000015	0,035364
$B_e$	5,00	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
b	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
$K_L$	0,0276914	0,0276914	0,0264868	0,0599905	0,0599905	0,0599905	0,0370222
S	130	130	130	130	130	130	130

Fonte: A autora, 2019

$\alpha$  = coeficiente de magnitude da evaporação;  $K_s$  = coeficiente de permeabilidade dos solos;  $B_e$  = Largura equivalente; b = constante;  $K_L$  - coeficiente de perdas; S = capacidade máxima de armazenamento no solo.

Figura 20 – Mapa de classificação do uso e ocupação do solo na Bacia do Capibaribe



Fonte: José Bandim de Almeida Neto, GEOLAB – Laboratório de geoprocessamento do Campus Agreste da UFPE.

Para as sub-bacias de Goitá e Tapacurá, foram utilizados todos os parâmetros obtidos para o posto de Paudalho por conta da falta de vazões medidas nos exutórios delas, impossibilitando a calibração. Portanto, por conta da proximidade geográfica entre os exutórios de Goitá e Tapacurá e o posto de Paudalho, optou-se por fazer esta adaptação.

Os resultados em forma de gráficos das simulações podem ser observados adiante nas Figuras 21 a 34. E também os coeficientes de Nash-Sutcliffe (ENS) e  $R^2$  de todos os intervalos dos gráficos estão registrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe e  $R^2$  para os intervalos estudados

Período*	Santa Cruz		Toritama		Limoeiro		Paudalho		São Lourenço	
	ENS	$R^2$	ENS	$R^2$	ENS	$R^2$	ENS	$R^2$	ENS	$R^2$
a)	0,663	0,616	0,458	0,374	0,837	0,875	0,796	0,760	-0,700	0,379
b)	0,707	0,705	0,674	0,693	0,777	0,883	0,749	0,798	-1,441	0,522
c)	0,256	0,712	0,776	0,747	0,759	0,768	0,946	0,952	0,557	0,607
d)	0,804	0,812	0,955	0,959	0,726	0,750	0,963	0,967	0,405	0,667
e)	0,803	0,779	0,829	0,803	0,751	0,759	0,516	0,995	-1,991	0,248
f)	0,320	0,305	0,539	0,551	0,656	0,646	0,452	0,956	0,39	0,184
g)	0,182	0,553	0,692	0,625	0,560	0,592	0,960	0,550	-1,404	0,554
h)	0,365	0,482	0,427	0,458	0,824	0,833	0,991	0,460	-2,011	0,097

\*Os períodos estão descritos na legenda de cada gráfico dos intervalos

Fonte: A autora, 2019

Nota-se por meio das Figuras 21 e 22 que a sub-bacia de Santa Cruz apresentou desempenho bom a aceitável na estimativa dos eventos de 1969 a 2011, mas somente após o ajuste realizado nas vazões observadas através de regressão linear. Sem esse ajuste, nenhum evento passaria a ser aceitável nesta sub-bacia. Percebe-se também que mesmo após o ajuste, as vazões máximas não foram muito bem representadas, a exemplificar pelo evento de 17/07/1975 que o modelo alcançou o valor de 74,37  $m^3/s$  enquanto a vazão observada nesta estação foi de 675,85  $m^3/s$ . Observa-se também a influência da barragem de Poço Fundo, construída em 1987, na estação de Santa Cruz, quando o modelo apresenta resultados bons a aceitáveis até 1984. Após este ano, percebe-se que as validações não se mostraram satisfatórias.

A partir das Figuras 23 e 24, infere-se que o modelo conseguiu representar de forma adequada todos os eventos de cheia da sub-bacia de Toritama, a ressaltar o evento de julho de 1975 (Figura 23d) onde a vazão calculada ( $1007,86 \text{ m}^3$ ) representa quase perfeitamente a vazão observada ( $958,39 \text{ m}^3$ ) nesta estação, resultando em um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.95 (ver Tabela 9). De modo geral, o modelo conseguiu representar bem as vazões para a sub-bacia de Toritama, pois apresentou três intervalos com coeficiente de Nash-Sutcliffe bons e todos os outros eventos se enquadram na faixa de valores aceitáveis.

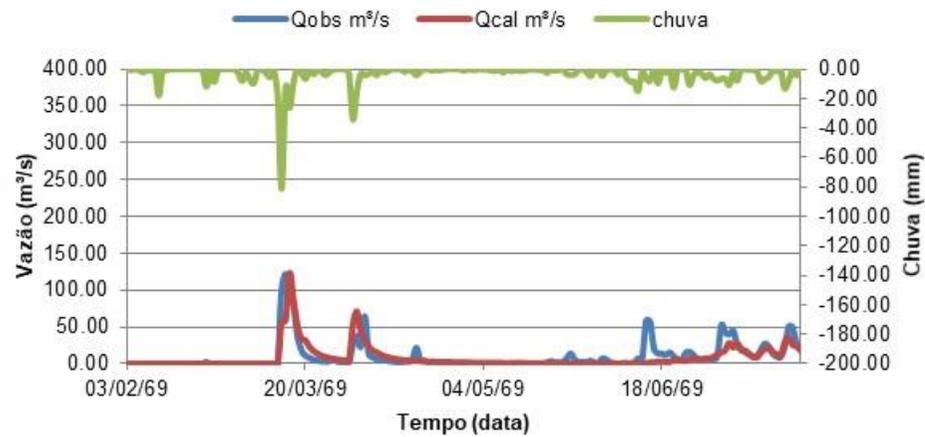
As sub-bacias de Limoeiro e Paudalho foram as que obtiveram melhores resultados na calibração e validação do modelo. O CAWM IV conseguiu representar satisfatoriamente tanto as vazões mais altas quanto as mais baixas nestas duas sub-bacias, dando destaque ao evento de 1975 (maior evento de cheia já registrado na bacia do Rio Capibaribe), com ENS resultando em 0,78 e 0,95 para as sub-bacias de Limoeiro e Paudalho, respectivamente. A sub-bacia de Paudalho alcançou o melhor desempenho no cálculo das vazões estimadas com seis eventos bons e apenas dois aceitáveis.

Na sub-bacia de São Lourenço, também foi feita a regressão linear para o preenchimento dos dados faltantes, pois só existiam dados de vazões medidas a partir do ano de 1996. Foram obtidos cinco intervalos aceitáveis e três não aceitáveis nesta sub-bacia. Porém, este resultado é compreensível devido à influência da construção das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá.

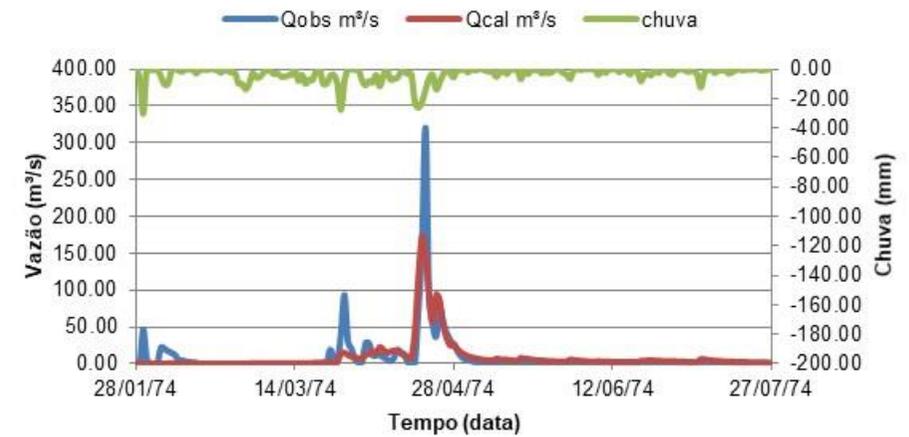
Para cada posto foi utilizado um único evento para calibração dos parâmetros. Os demais eventos são apresentados como validação do modelo. Os eventos utilizados para calibração foram: Santa Cruz (20/01/1985 a 09/06/1985), Toritama (28/06/1975 a 17/08/1975), Limoeiro (19/03/1977 a 14/11/1977), Paudalho (23/03/1977 a 20/08/1977), São Lourenço da Mata (09/12/2003 a 15/08/2004).

Figura 21 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Santa Cruz (parte 1)

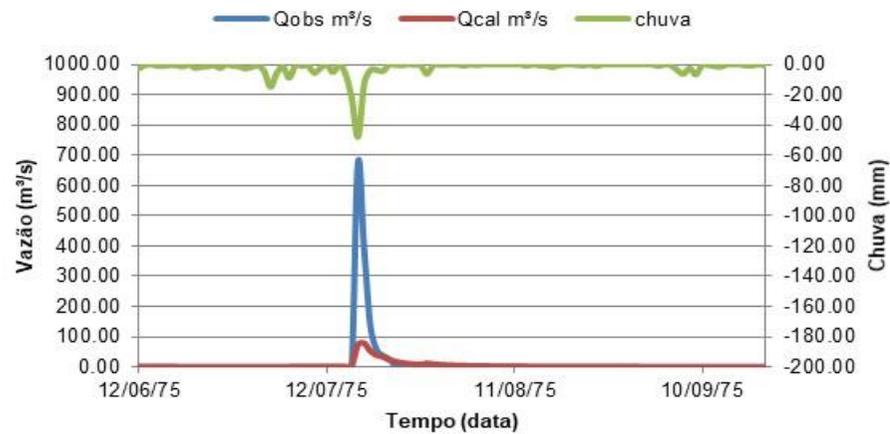
a) Período: 03/02/1969 a 23/07/1969 (ENS = 0.66)



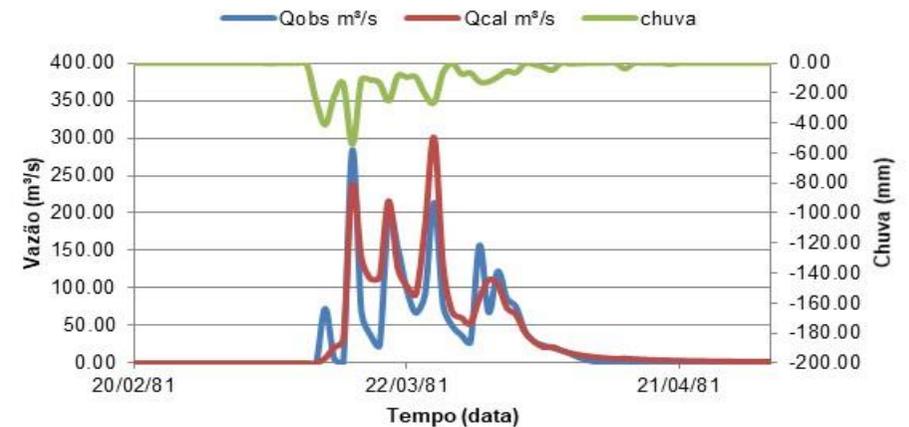
b) Período: 28/01/1974 a 27/07/1974 (ENS = 0.71)



c) Período: 12/06/1975 a 20/09/1975 (ENS = 0.26)



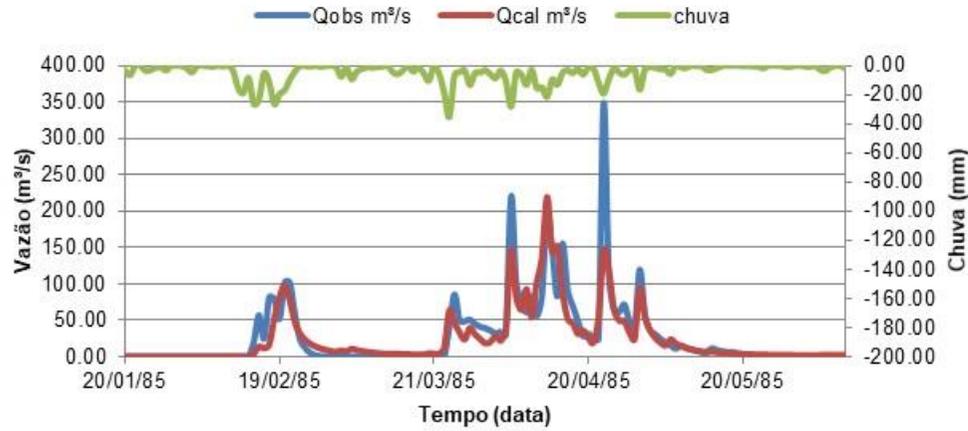
d) Período: 20/02/1981 a 01/05/1981 (ENS = 0.80)



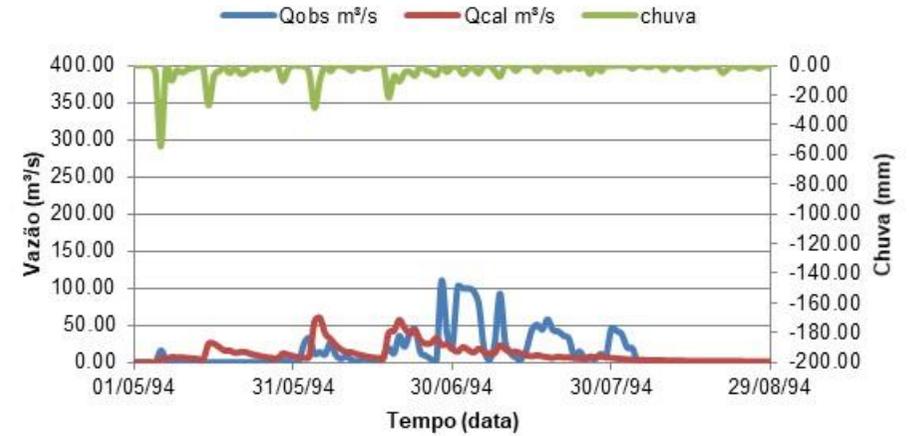
Fonte: A autora, 2019

Figura 22 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Santa Cruz (parte 2)

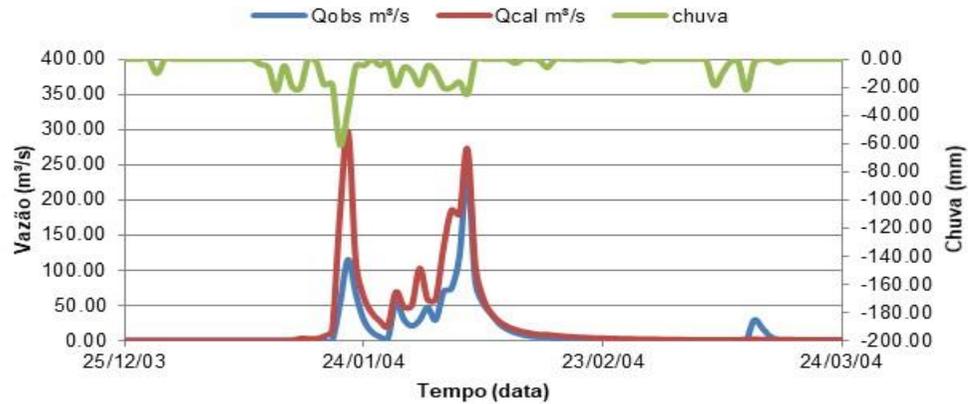
e) Período: 20/01/1985 a 09/06/1985 (ENS = 0.80)



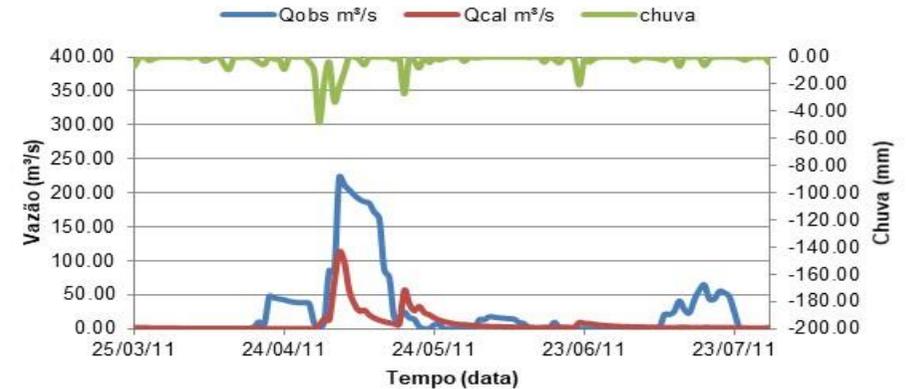
f) Período: 01/05/1994 a 29/08/1994 (ENS = 0.32)



g) Período: 25/12/2003 a 24/03/2004 (ENS = 0.18)



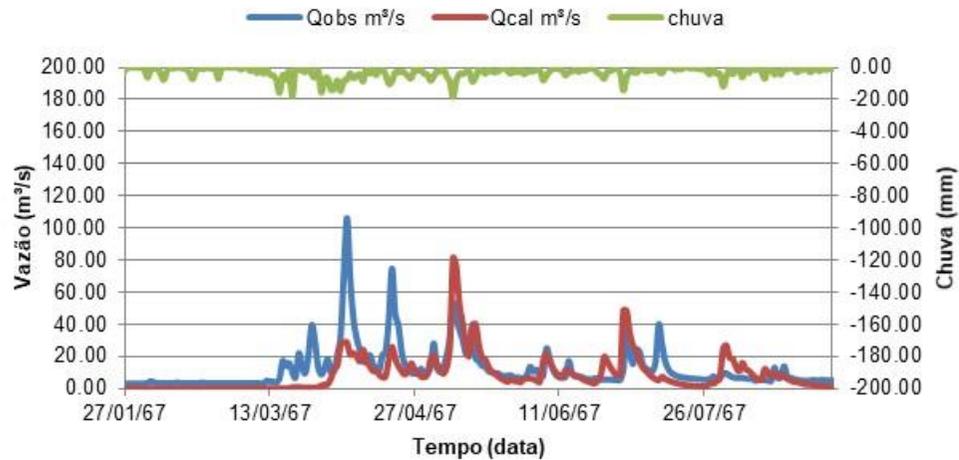
h) Período: 25/03/2011 a 30/07/2011 (ENS = 0.36)



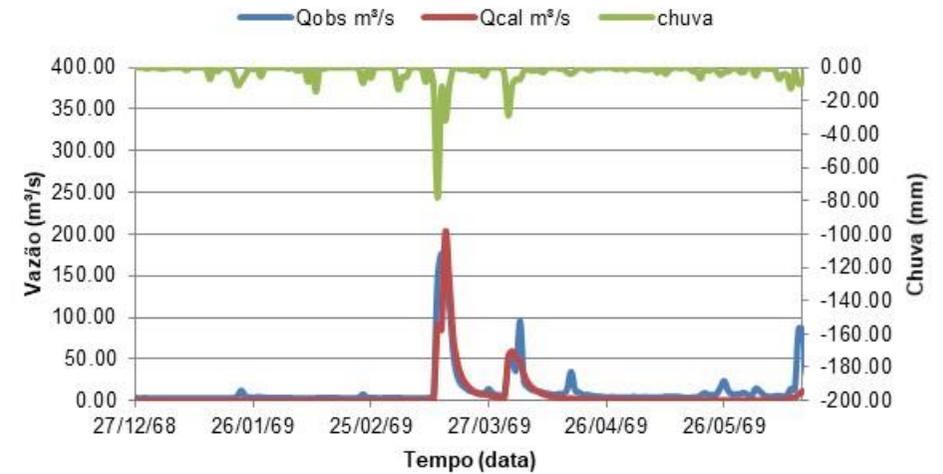
Fonte: A autora, 2019

Figura 23 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Toritama (parte 1)

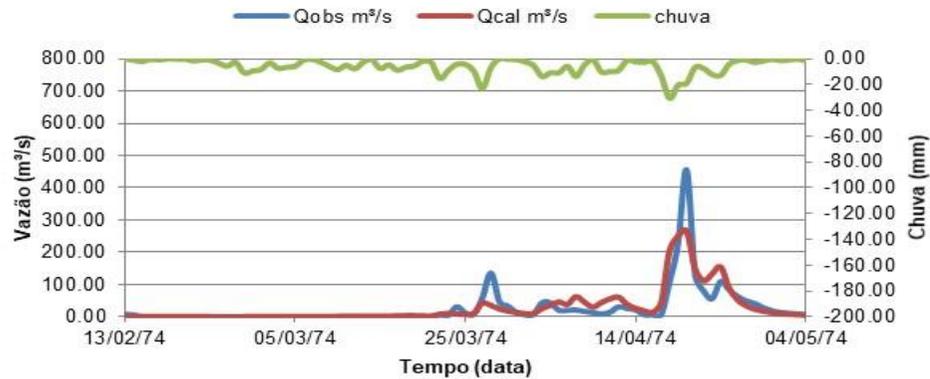
a) Período: 27/01/1967 a 04/09/1967 (ENS = 0.46)



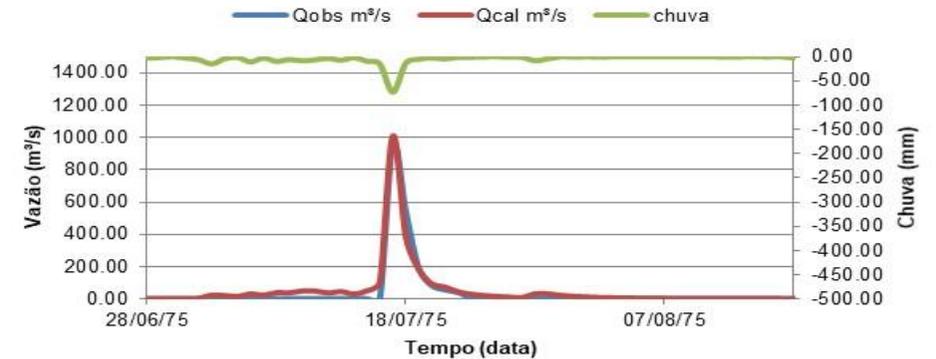
b) Período: 27/12/1968 a 15/06/1969 (ENS = 0.67)



c) Período: 13/02/1974 a 04/05/1974 (ENS = 0.78)



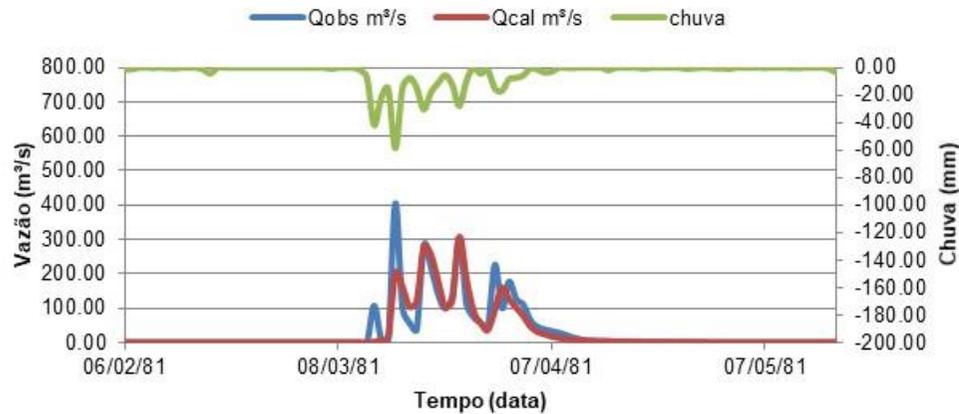
d) Período: 28/06/1975 a 17/08/1975 (ENS = 0.95)



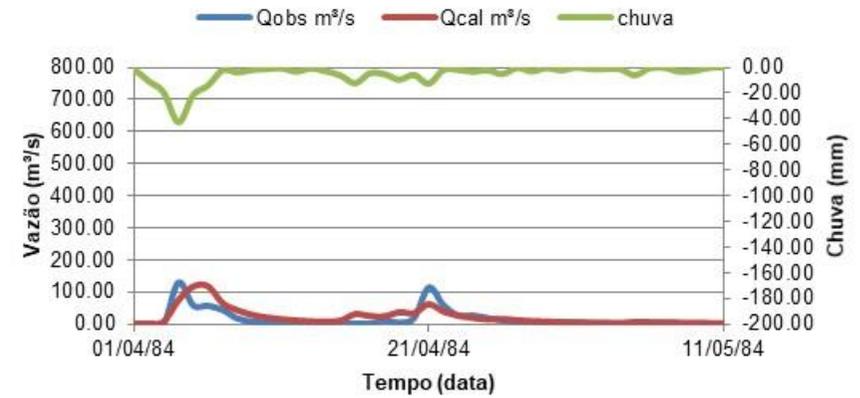
Fonte: A autora, 2019

Figura 24 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Toritama (parte 2)

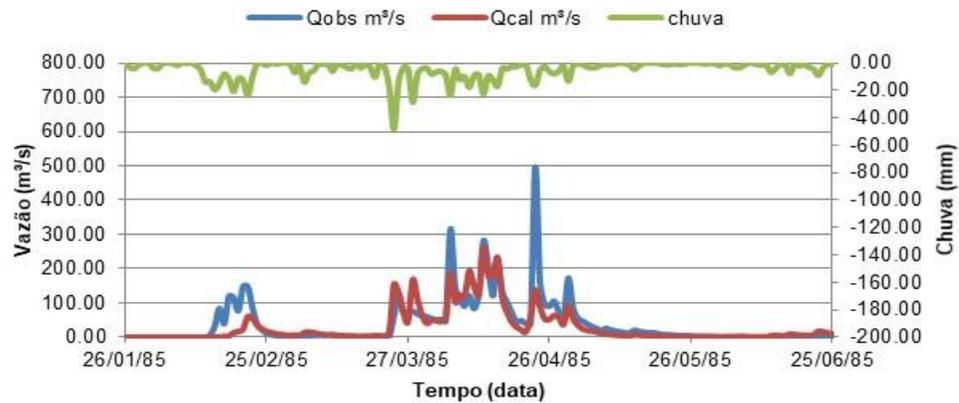
e) Período: 06/02/1981 a 17/05/1981 (ENS = 0.83)



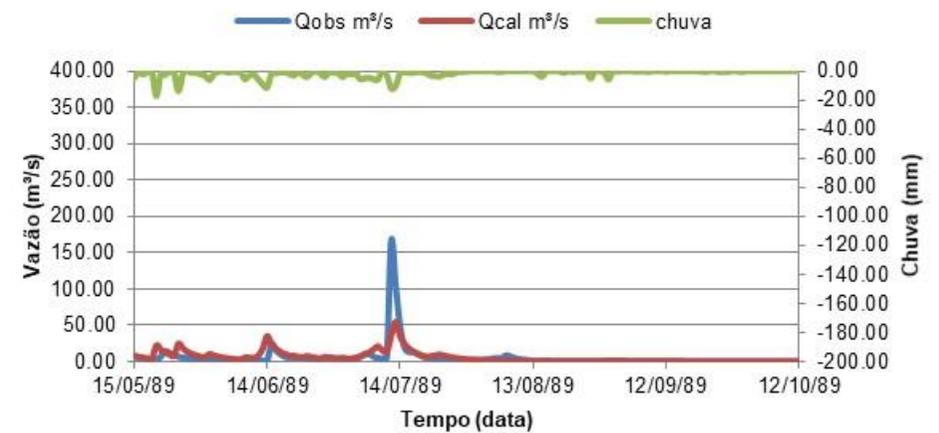
f) Período: 01/04/1984 a 11/05/1984 (ENS = 0.54)



g) Período: 26/01/1985 a 25/06/1985 (ENS = 0.69)



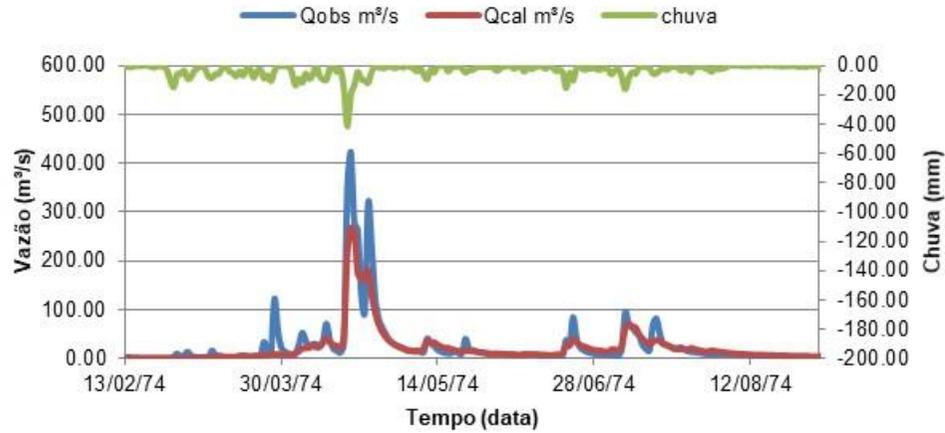
h) Período: 15/05/1989 a 12/10/1989 (ENS = 0.43)



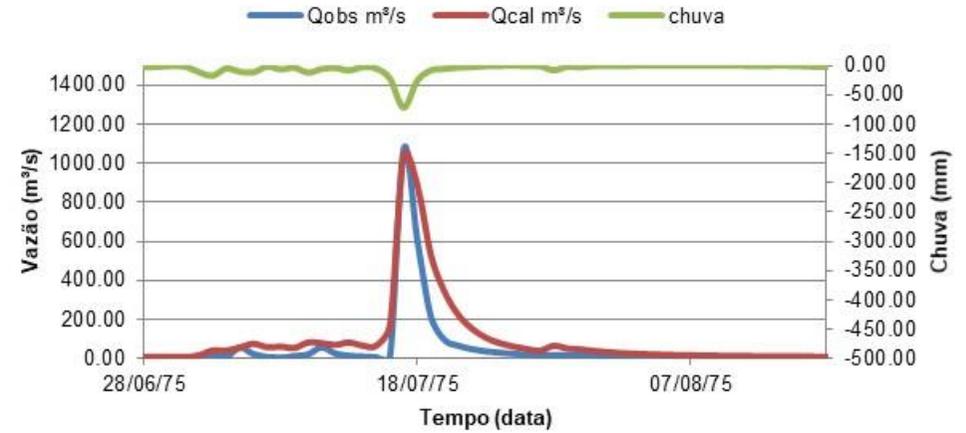
Fonte: A autora, 2019

Figura 25 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Limoeiro (parte 1)

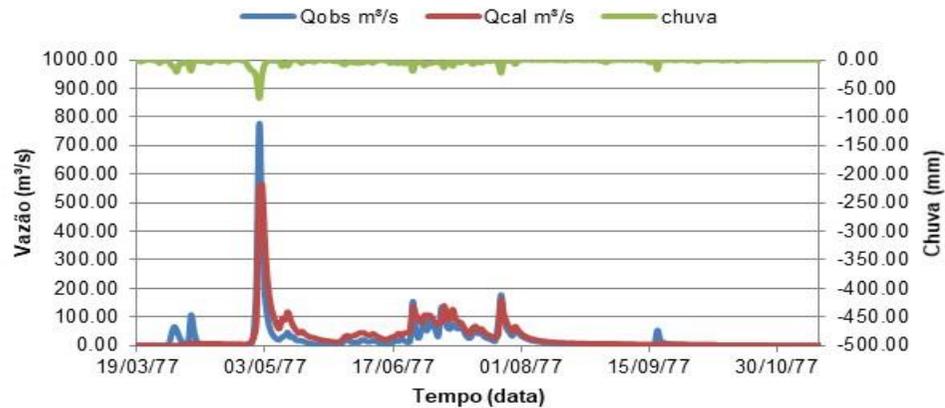
a) Período: 13/02/1974 a 01/09/1974 (ENS = 0.84)



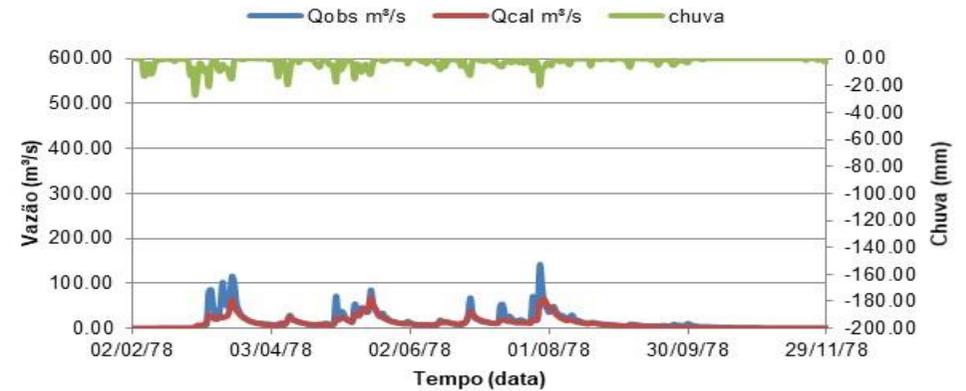
b) Período: 28/06/1975 a 17/08/1975 (ENS = 0.78)



c) Período: 19/03/1977 a 14/11/1977 (ENS = 0.76)



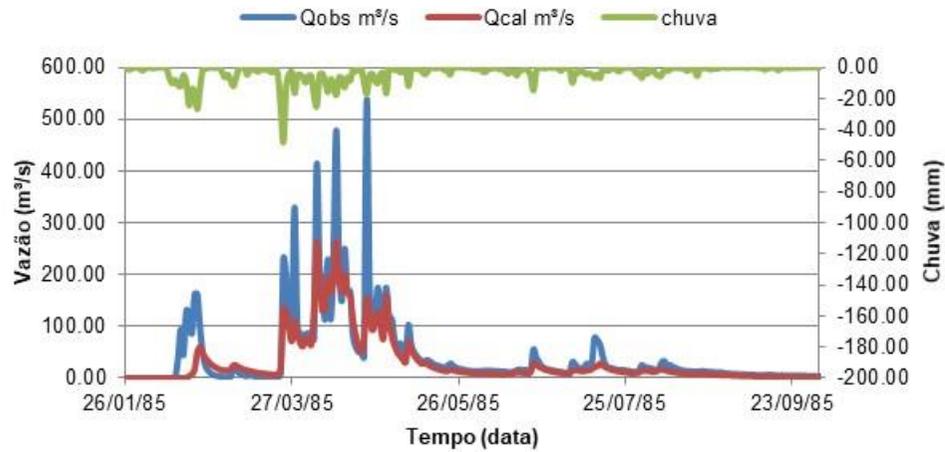
d) Período: 02/02/1978 a 29/11/1978 (ENS = 0.73)



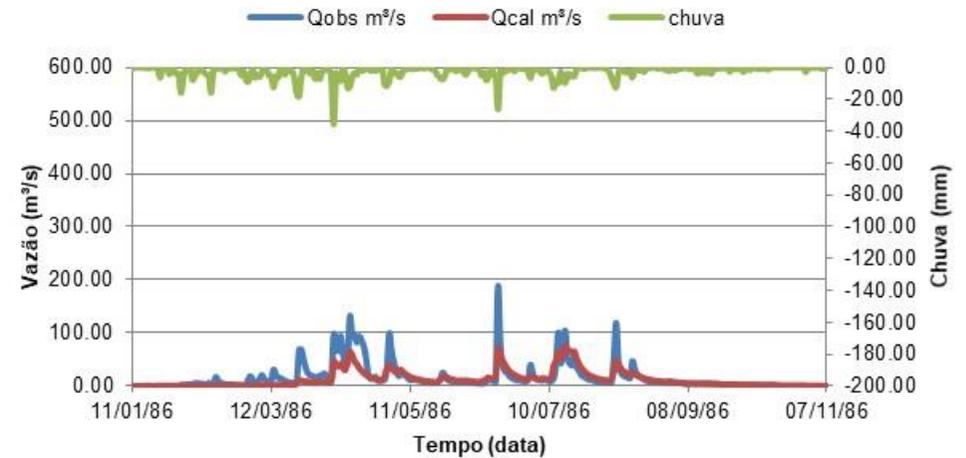
Fonte: A autora, 2019

Figura 26 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Limoeiro (parte 2)

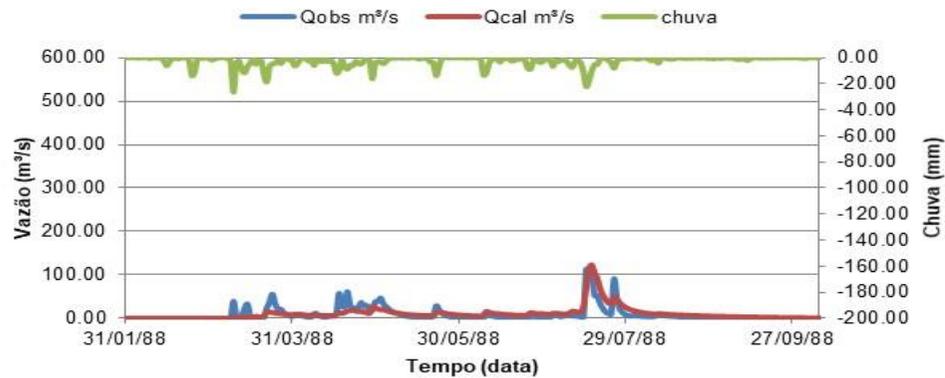
e) Período: 26/01/1985 a 03/10/1985 (ENS = 0.75)



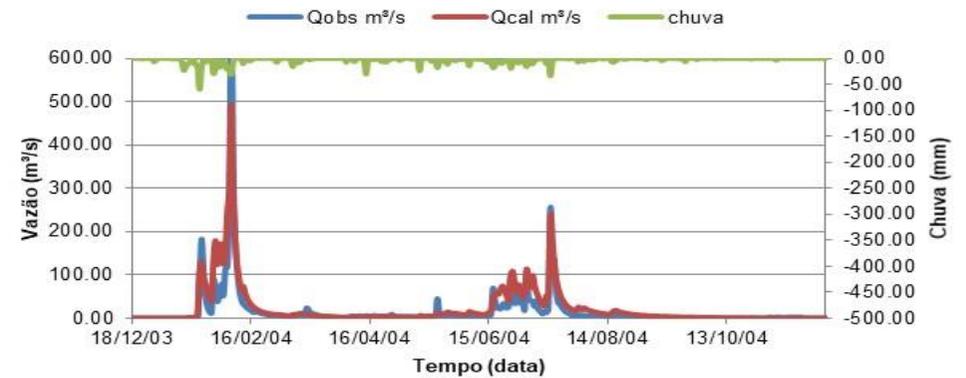
f) Período: 11/01/1986 a 07/11/1986 (ENS = 0.66)



g) Período: 31/01/1988 a 07/10/1988 (ENS = 0.56)



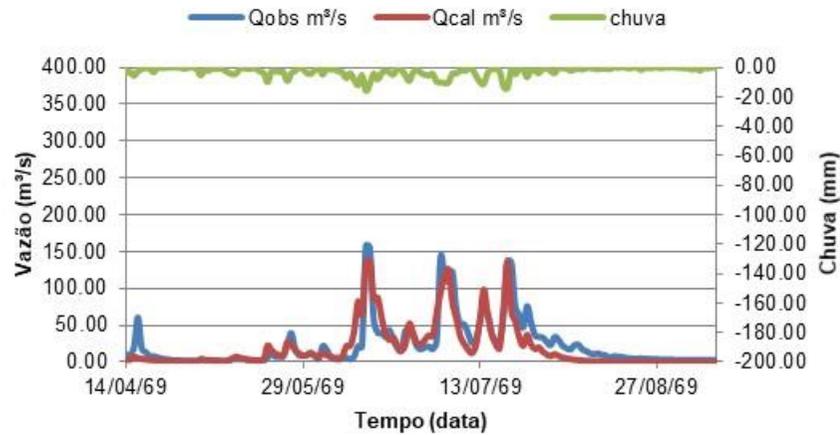
h) Período: 18/12/2003 a 02/12/2004 (ENS = 0.82)



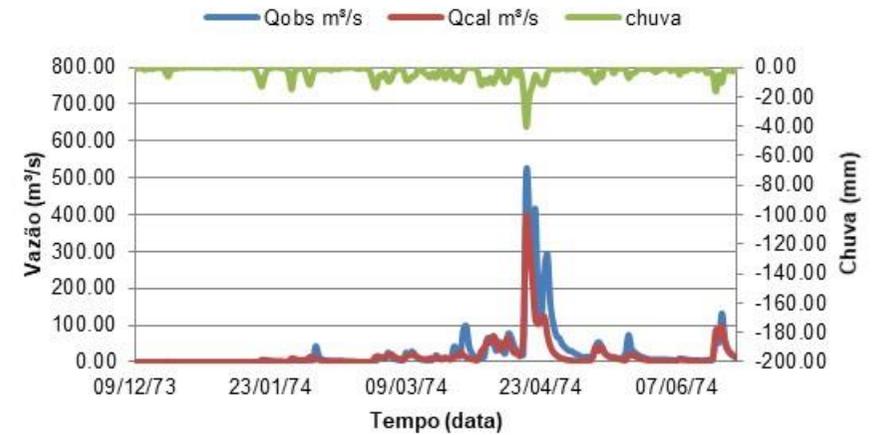
Fonte: A autora, 2019

Figura 27 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Paudalho (parte 1)

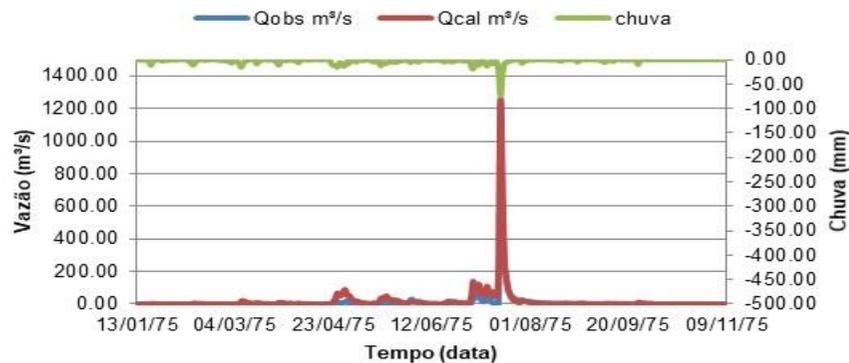
a) Período: 14/04/1969 a 11/09/1969 (ENS = 0.80)



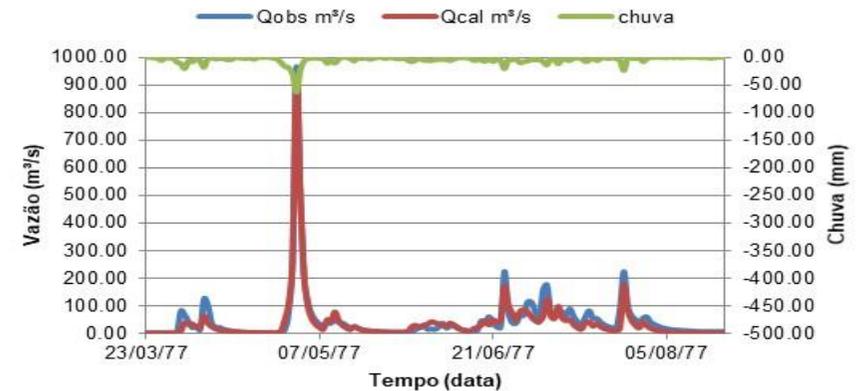
b) Período: 09/12/1973 a 27/06/1974 (ENS = 0.75)



c) Período: 13/01/1975 a 09/11/1975 (ENS = 0.95)



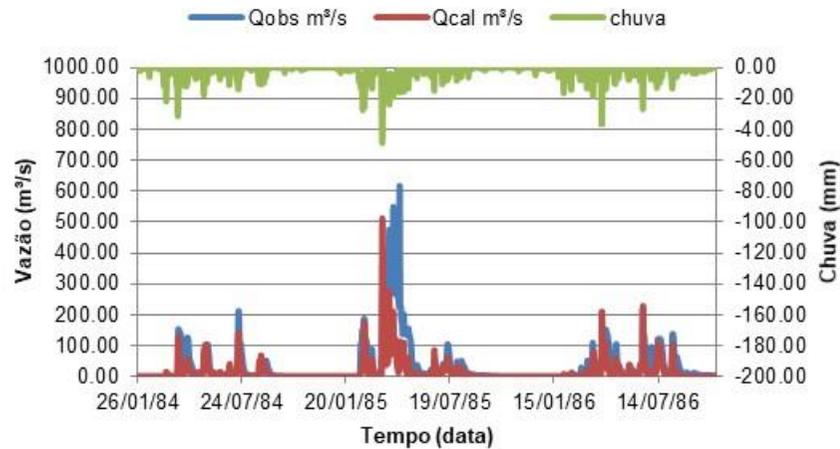
d) Período: 23/03/1977 a 20/08/1977 (ENS = 0.96)



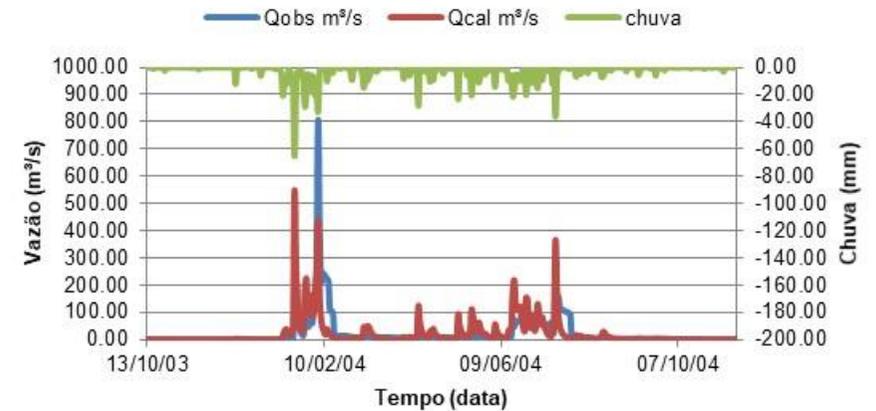
Fonte: A autora, 2019

Figura 28 - Vazões calculadas e observadas para o posto de Paudalho (parte 2)

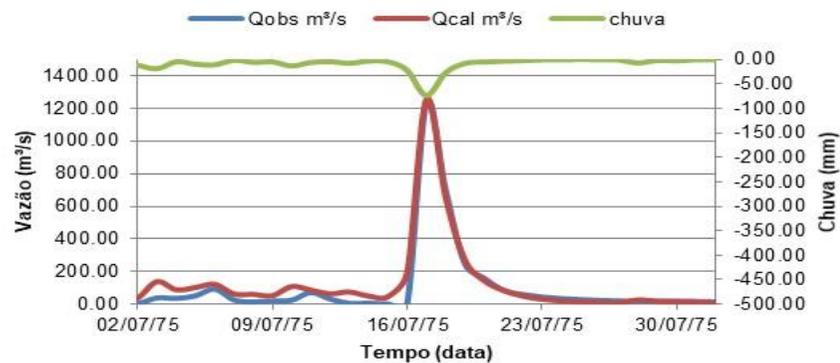
e) Período: 26/01/1984 a 22/10/1986 (ENS = 0.52)



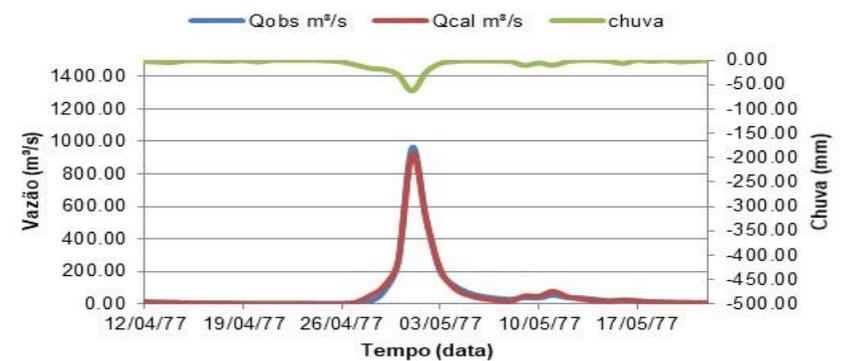
f) Período: 13/10/2003 a 16/11/2004 (ENS = 0.45)



g) Período: 02/07/1975 a 01/08/1975 (ENS = 0.96)



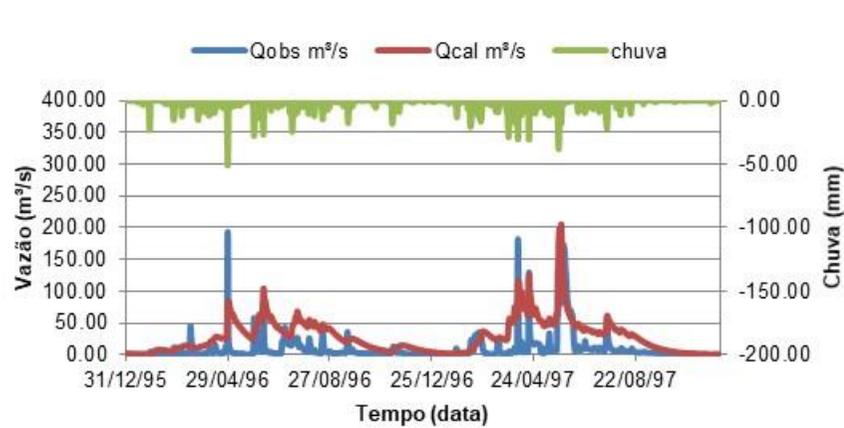
h) Período: 12/04/1977 a 22/05/1977 (ENS = 0.99)



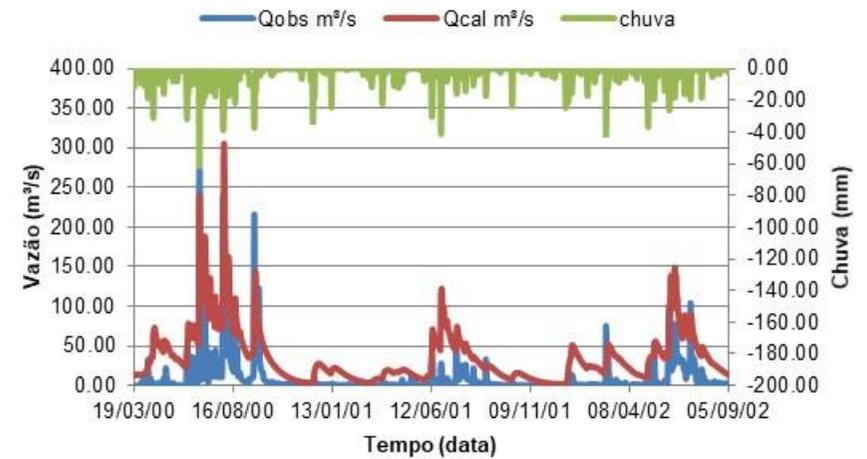
Fonte: A autora, 2019

Figura 29 - Vazões calculadas e observadas para o posto de São Lourenço (parte 1)

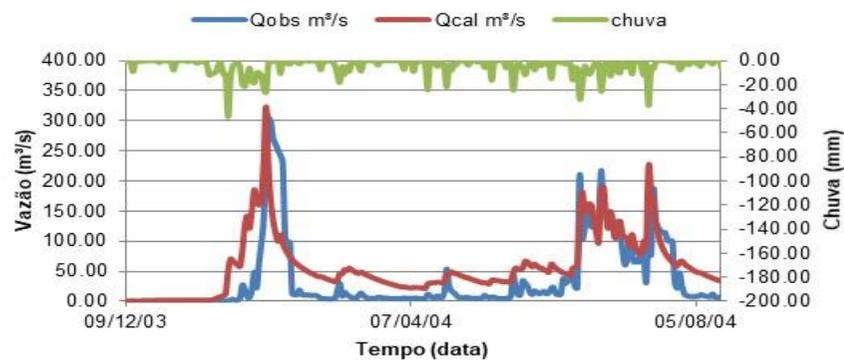
a) Período: 31/12/1995 a 30/11/1997 (ENS = -0.70)



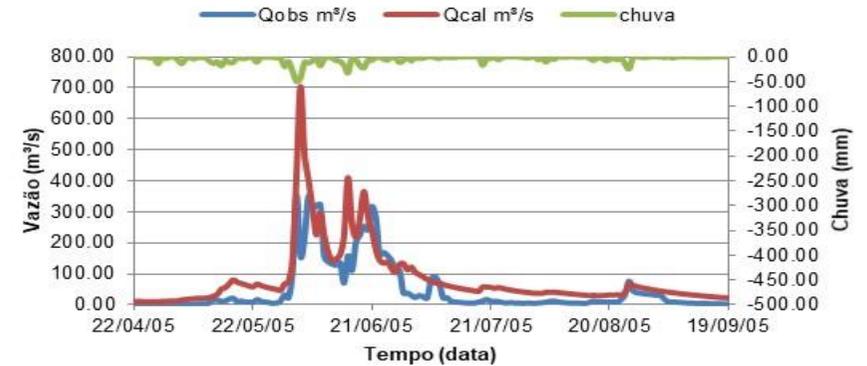
b) Período: 19/03/2000 a 05/09/2002 (ENS = -1.44)



c) Período: 09/12/2003 a 15/08/2004 (ENS = 0.56)



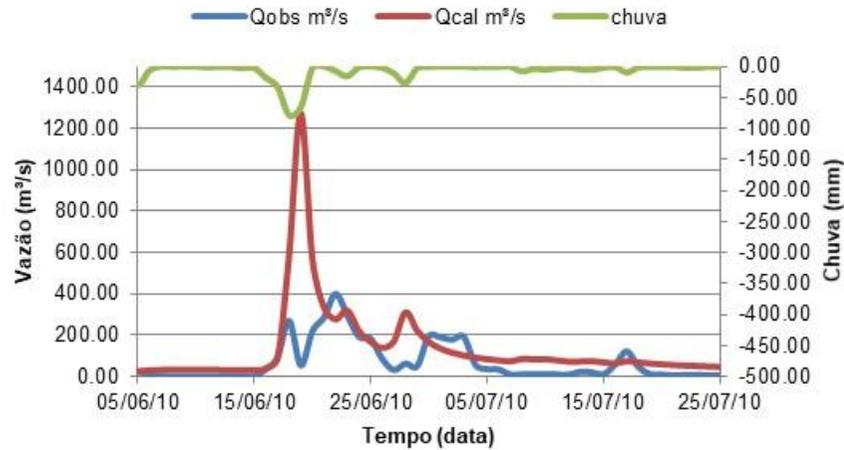
d) Período: 22/04/2005 a 19/09/2005 (ENS = 0.40)



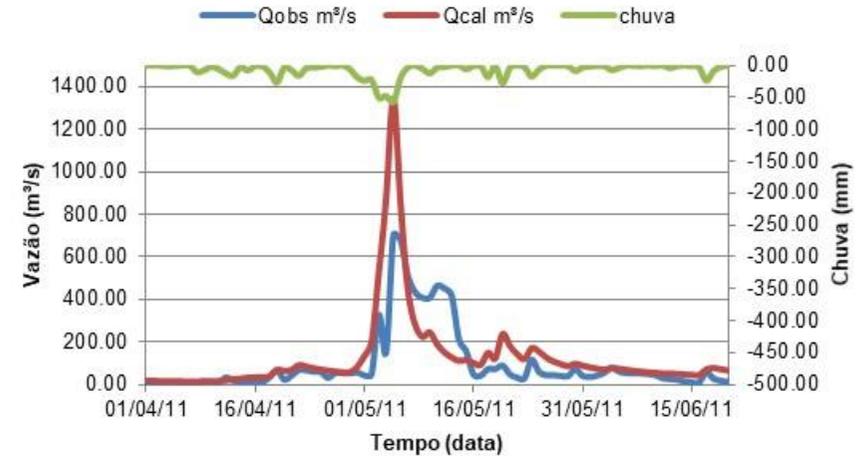
Fonte: A autora, 2019

Figura 30 - Vazões calculadas e observadas para o posto de São Lourenço (parte 2)

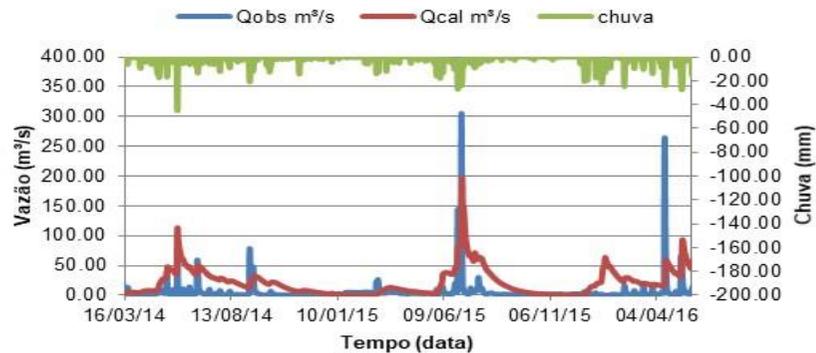
e) Período: 05/06/2010 a 25/07/2010 (ENS = -1.99)



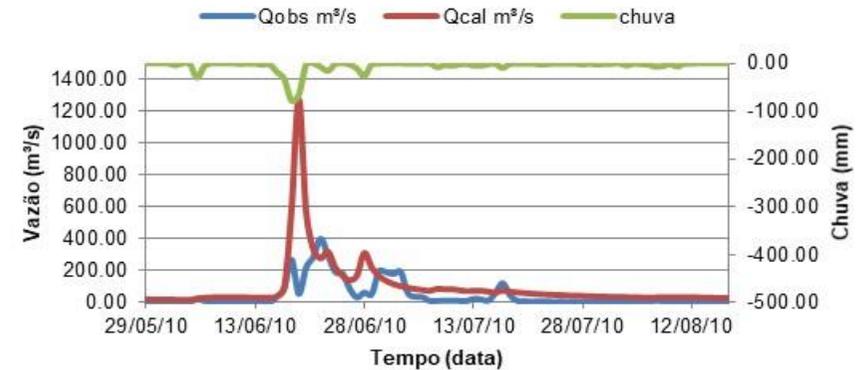
f) Período: 01/04/2011 a 20/06/2011 (ENS = 0.39)



g) Período: 16/03/2014 a 24/05/2016 (ENS = -1.40)



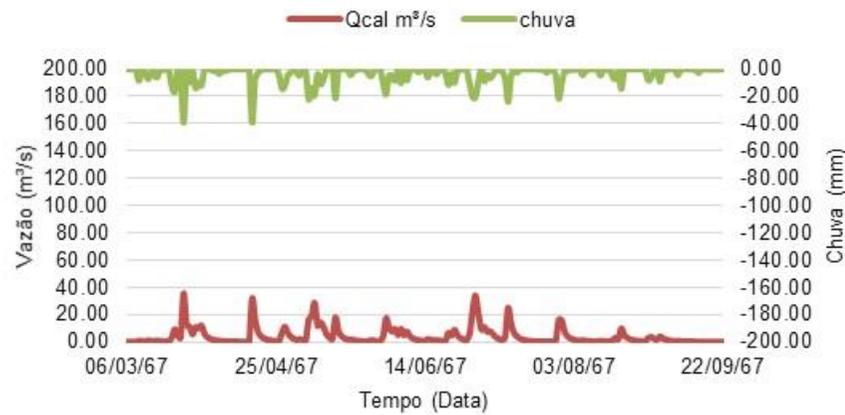
h) Período: 29/05/2010 a 17/08/2010 (ENS = -2.01)



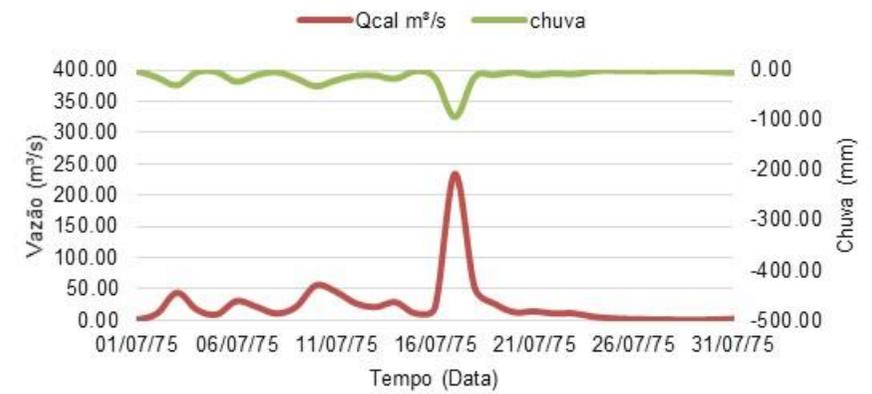
Fonte: A autora, 2019

Figura 31 – Vazões calculadas para a sub-bacia de Goitá ( parte 1)

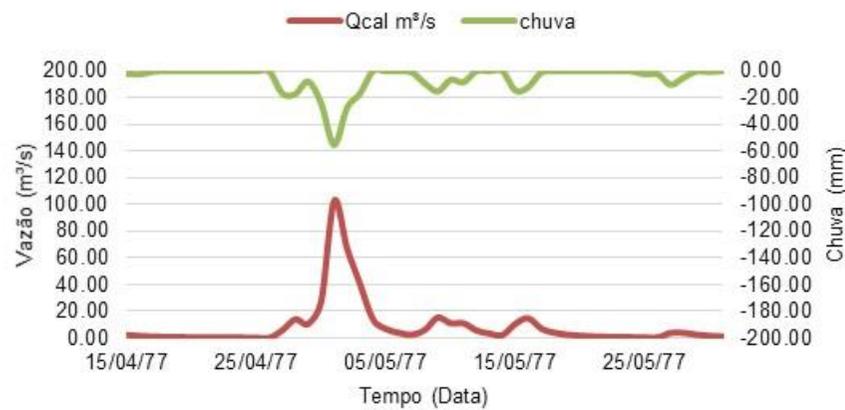
a) Período: 06/03/1967 a 22/09/1967



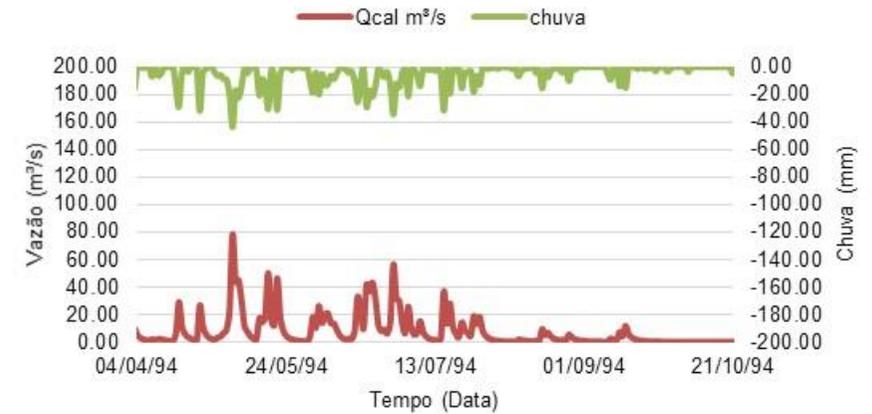
b) Período: 01/07/1975 a 31/07/1975



c) Período: 15/04/1977 a 31/05/1977



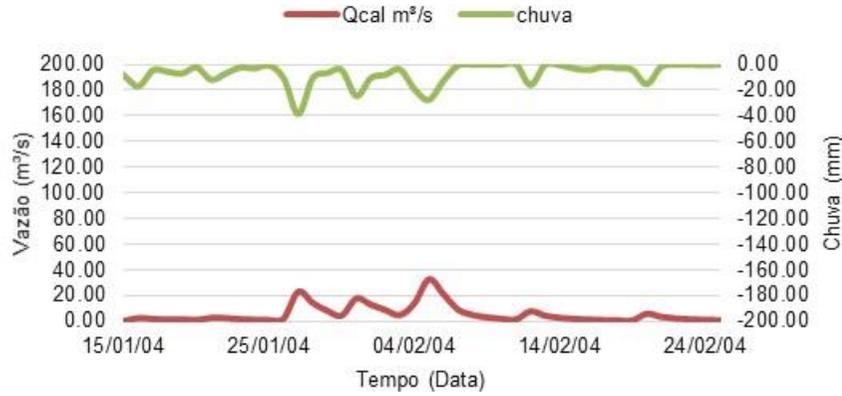
d) Período: 04/04/1994 a 21/10/1994



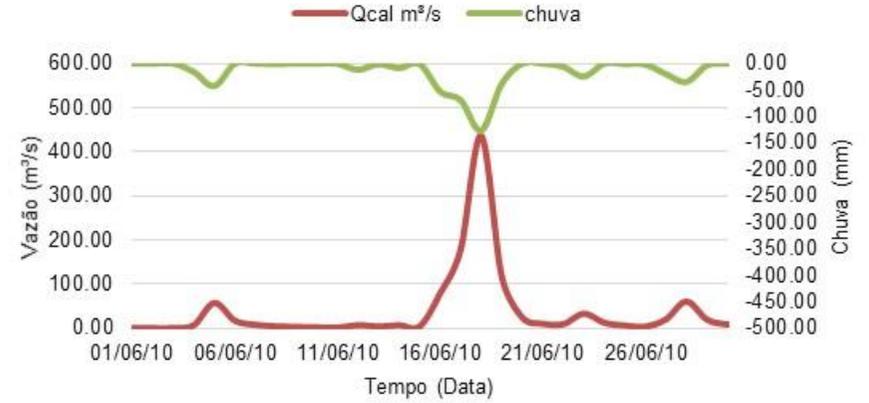
Fonte: A autora, 2019

Figura 32 - Vazões calculadas para a sub-bacia de Goitá ( parte 2)

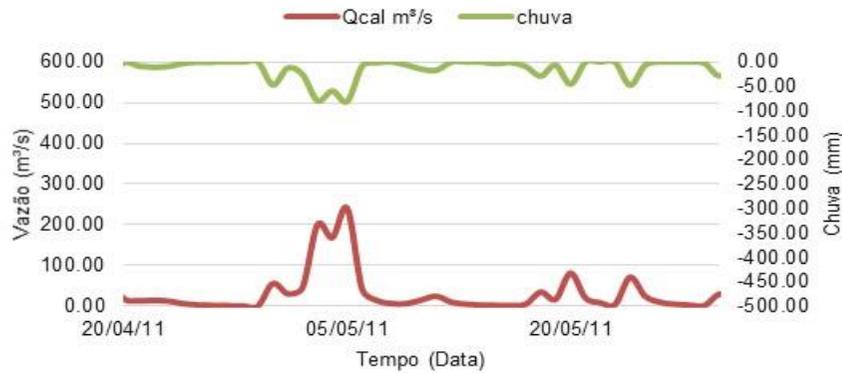
e) Período: 15/01/2004 a 25/02/2004



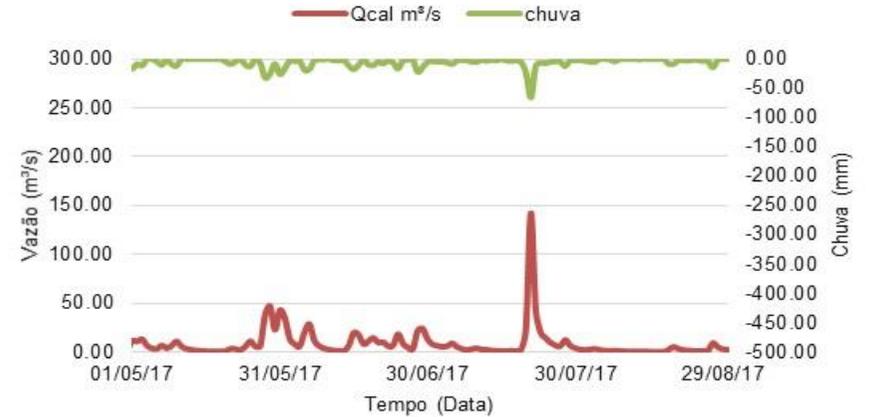
f) Período: 01/06/2010 a 30/06/2010



g) Período: 20/04/2011 a 30/05/2011



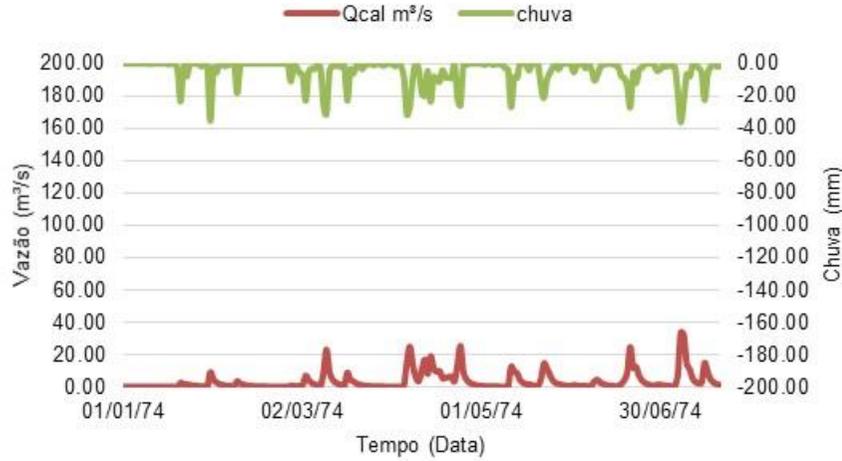
h) Período: 01/05/2017 a 29/08/2017



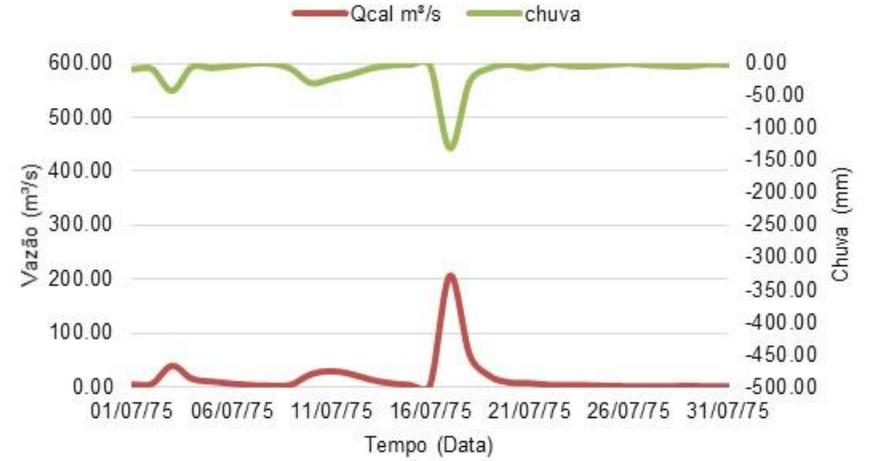
Fonte: A autora, 2019

Figura 33 - Vazões calculadas para a sub-bacia de Tapacurá ( parte 1)

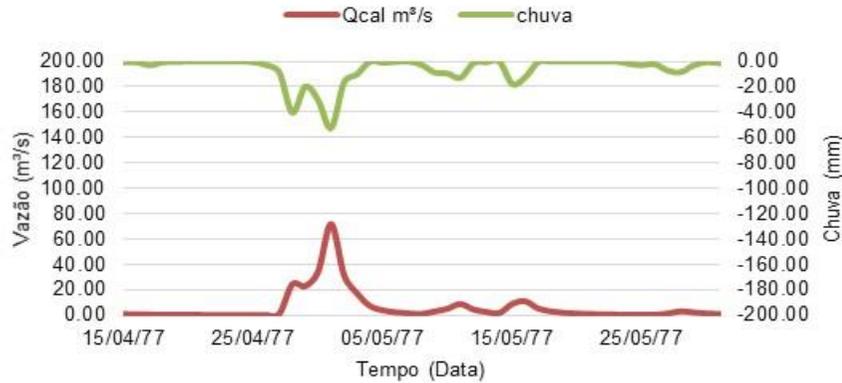
a) Período: 01/01/1974 a 20/07/1974



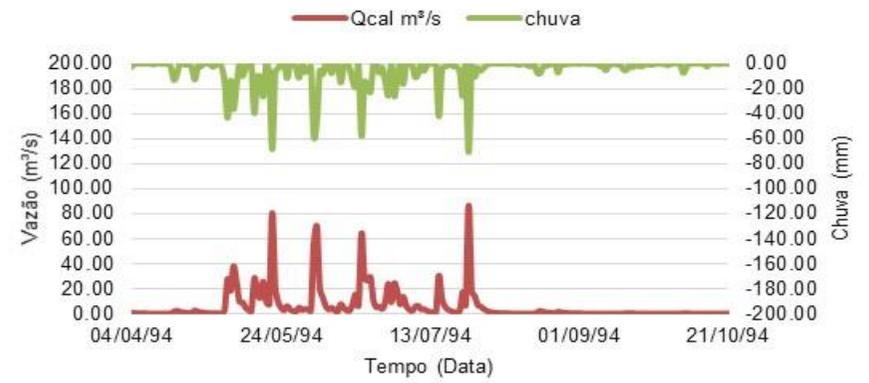
b) Período: 01/07/1975 a 31/07/1975



c) Período: 15/04/1977 a 31/05/1977



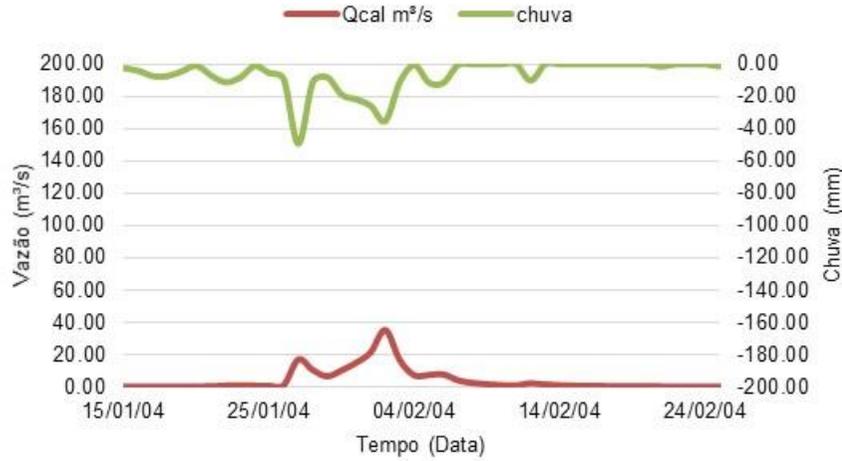
d) Período: 04/04/1994 a 21/10/1994



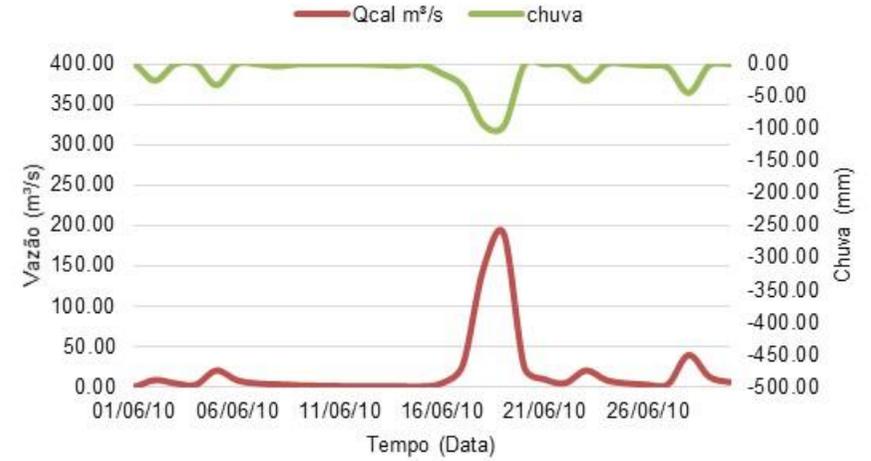
Fonte: A autora, 2019

Figura 34 - Vazões calculadas para a sub-bacia de Tapacurá ( parte 2)

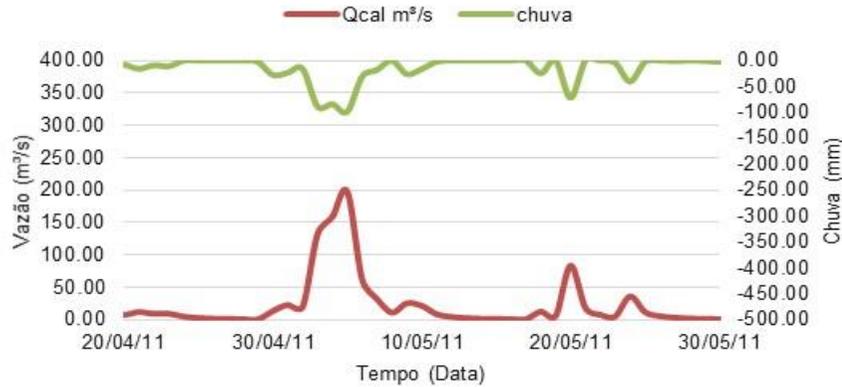
e) Período: 15/01/2004 a 24/02/2004



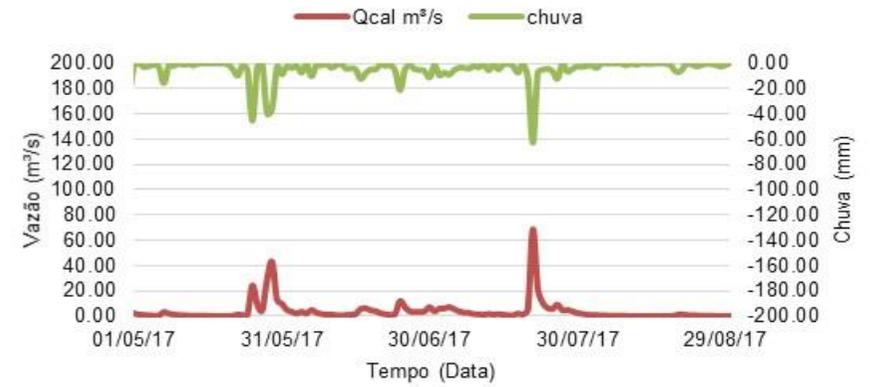
f) Período: 01/06/2010 a 30/06/2010



g) Período: 20/04/2011 a 30/05/2011



h) Período: 01/05/2017 a 29/08/2017



Fonte: A autora, 2019

Entre os eventos simulados, observa-se que os resultados foram piores para os postos de Santa Cruz do Capibaribe e São Lourenço da Mata. Sobre este último, ocorre a influência das 4 barragens sobre todo o histórico de dados de vazão disponível do posto. Nos anos anteriores os dados foram interpolados a partir de outras estações, o que de certa forma já compromete os resultados. Quanto ao posto de Santa Cruz do Capibaribe, ocorre a influência da barragem de Poço Fundo. Além disso a comparação das vazões desse posto com os vizinhos mostrou inconsistências frequentes que se buscou corrigir por regressão linear com os dados dos postos vizinhos, estando ainda assim prejudicados, contudo.

Para todos os postos os indicadores de ajuste de maneira geral foram melhores para períodos anteriores à construção das barragens, o que era esperado. As séries foram simuladas de forma contínua para todo o período de tempo considerado, destacando-se para ajuste os períodos mais chuvosos.

Também foram calculados os desvios de vazão dos hidrogramas e o coeficiente de Nash-Sutcliffe para a série completa de todos os postos. A Tabela 10 a seguir mostra os indicadores citados para toda a série de Santa Cruz do Capibaribe, Toritama, Limoeiro, Paudalho e São Lourenço. Observa-se que os desvios de volume do hidrograma só foram mais significativos no caso dos dados do primeiro posto, pelas razões expostas e o ENS apresentou desempenho aceitável para os postos de Toritama, Limoeiro e Paudalho.

Tabela 10 – Indicadores calculados para as séries dos postos fluviométricos

Estação Fluviométrica	$\Delta Q$ (%)	ENS
Santa Cruz do Capibaribe	30,2	0,13
Toritama	10,0	0,41
Limoeiro	3,0	0,51
Paudalho	4,5	0,53
São Lourenço	10,9	0,11

Fonte: A autora, 2019

$\Delta Q$  = Desvio de vazão; ENS = Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Os hidrogramas apresentados na Figuras 31 a 34, referentes à área controlada pelas barragens de Tapacurá e Goitá mostram a potencialidade de regionalização dos

parâmetros do modelo: somente dois parâmetros tiveram seus valores transferidos de outras áreas da bacia e as características da bacia em estudo foram utilizadas para o cálculo dos demais.

Em suma, infere-se que o modelo hidrológico conseguiu representar satisfatoriamente os eventos para a bacia do Rio Capibaribe e se mostrou adequado quanto à ordem de grandeza das vazões calculadas, principalmente para a sub-bacia de Paudalho onde apresentou seis intervalos com ajustes considerados bons e dois aceitáveis (Tabela 9). Trata-se da série de dados mais longa e que apresenta poucas falhas, o que explica a qualidade do ajuste.

Notou-se também, de modo geral, que todos os postos apresentaram melhores calibrações e validações para os períodos anteriores à construção das barragens de Jucazinho e Carpina, ou seja, antes de 1978, já que as barragens de Goitá e Tapacurá só exercem influência no posto de São Lourenço. Após a construção destas, evidencia-se o efeito da infraestrutura nas vazões medidas, não sendo possível uma boa aproximação entre as vazões estimadas (sem o efeito das barragens) e as vazões observadas em diversos eventos.

Os parâmetros calculados para todas as sub-bacias, como o  $K$  (coeficiente utilizado na equação do escoamento superficial), demonstraram boa adequação à realidade, visto que o modelo conseguiu representar os picos de vazões na maioria dos eventos simulados.

Optou-se, nesta aplicação para as sub-bacias do Rio Capibaribe, calibrar os parâmetros  $K_s$ ,  $K_L$  e  $\alpha$  e calcular o  $S$ , pelo fato de o modelo apresentar melhores resultados desta forma. Portanto, foram apenas três parâmetros calibráveis nesta versão IV do CAWM. Esta quantidade de apenas três parâmetros a calibrar agrega simplicidade ao modelo, característica principal dos modelos concentrados, e facilita a fase de calibração. E como cita Alves (2017) em seu trabalho, a fase de calibração é uma das fases mais exaustivas da modelagem hidrológica.

## 4.2 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

As barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá são as principais responsáveis pelo amortecimento de eventos de cheias na cidade do Recife. Desta forma, é imprescindível o constante acompanhamento deste sistema para garantir a segurança na capital do Estado de Pernambuco. O modelo de operação de barragens desenvolvido neste trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito destas estruturas na entrada das cidades frente a ocorrências hidrológicas extremas e agregar a influência dos reservatórios no escoamento, visto que o modelo hidrológico não consegue representá-la.

O modelo de operação de reservatórios utilizado simulou a operação das barragens a partir do balanço hídrico conceituado na seção 3.5.2 deste trabalho. Para esta simulação, foram necessários alguns dados das características físicas das barragens expostos na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Características físicas das barragens

<b>Características</b>	<b>Jucazinho</b>	<b>Carpina</b>	<b>Goitá</b>	<b>Tapacurá</b>
<b>Capacidade (x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)</b>	204*	270	52,53	98,70
<b>Cota de coroamento (m)</b>	299	124	78	110
<b>Cota da soleira (vertedouro) (m)</b>	292	118	70	103
<b>Extensão do vertedouro (m)</b>	170	160	60	32

Fonte: A autora, 2019.

\* A informação de projeto é que a barragem teria capacidade de 327 milhões de m<sup>3</sup>. Estudos de geoprocessamento realizados no GEOLAB: Laboratório de Geoprocessamento do Campus Agreste da UFPE atestam que essa capacidade está incorreta. Em função disso, nova curva cota-área-volume foi avaliada e utilizada neste estudo.

Procurou-se avaliar os efeitos das barragens para os principais eventos de cheia (períodos mais chuvosos) que ocorreram na Bacia do Rio Capibaribe, portanto os eventos escolhidos foram nos anos de 1974, 1975, 1977, 2004, 2010 e 2011. Estes eventos foram simulados para as estações ao longo do rio Capibaribe em que existiam

dados de vazões diárias medidas, sendo elas: Limoeiro, Paudalho e São Lourenço. O período de simulação escolhido para todas as barragens foi de 01/01/1966 a 31/07/2018, mesmo período utilizado na modelagem hidrológica.

A primeira condição imposta para todas as quatro barragens foi o volume inicial em 01/01/1966 (data inicial de operação) sendo de 70% da capacidade das barragens. Na barragem de Carpina também foi imposta uma regra de operação de abertura das galerias: A partir da cota 109 m, abre-se a primeira galeria. Quando a cota de água chegar a 114 m, abrem-se as duas galerias. Para o evento de 1975, também foi simulado um volume de espera nas barragens de Jucazinho de 40%, portanto com a barragem com no máximo 60% de sua capacidade, condição essa em análise pela SIRH/APAC para operação futura do reservatório. Ao mesmo tempo, para a barragem de Carpina já existe a regra de manter o volume máximo no início do período chuvoso em 50 milhões de m<sup>3</sup>. Estas condições foram postas para a simulação.

Após as simulações através do balanço de massa realizado para as quatro barragens, chegou-se ao valor das vazões regularizáveis identificadas na Tabela 12 a seguir. Estas vazões são aquelas que podem ser retiradas das barragens sem que se anule a sua capacidade (considerou-se volume mínimo de 1 milhão de m<sup>3</sup>).

Esses valores são próximos aos decorrentes da operação da COMPESA no aproveitamento dos mananciais.

Tabela 12 – Vazões regularizadas das barragens

<b>Barragens</b>	<b>Vazões regularizadas (m<sup>3</sup>/s)</b>
Jucazinho	0,94
Carpina	0,45
Goitá	1,50
Tapacurá	1,16

Fonte: A autora, 2019

Para a barragem de Carpina, respeitou-se o limite do volume mínimo para a pesca de 25 milhões de m<sup>3</sup>. Por este motivo, o valor encontrado da vazão regularizada para esse reservatório foi mais baixo do que o registrado nos estudos realizados sobre a bacia.

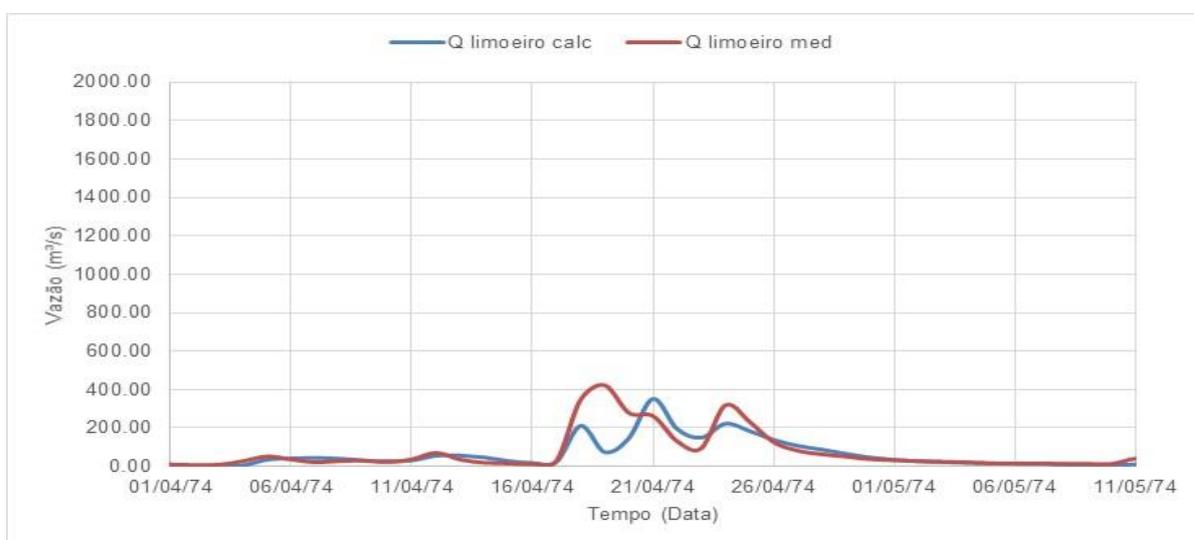
Através da simulação de operação das barragens, também procurou-se identificar a influência das mesmas na entrada das cidades de Limoeiro, Paudalho e em especial, São Lourenço, por conta da sua proximidade com a cidade do Recife, capital do Estado. A seguir, são apresentados estes resultados nas cidades citadas acima.

#### 4.2.1 Simulação dos eventos de cheia em Limoeiro

Para fins de simulação do efeito das barragens se elas existissem na época, utilizaram-se os eventos de 1974, 1975 e 1977, pois nestes anos as vazões medidas no posto fluviométrico ainda não eram influenciadas pela barragem de Jucazinho. Estes eventos estão ilustrados nas Figuras 35, 36 e 37.

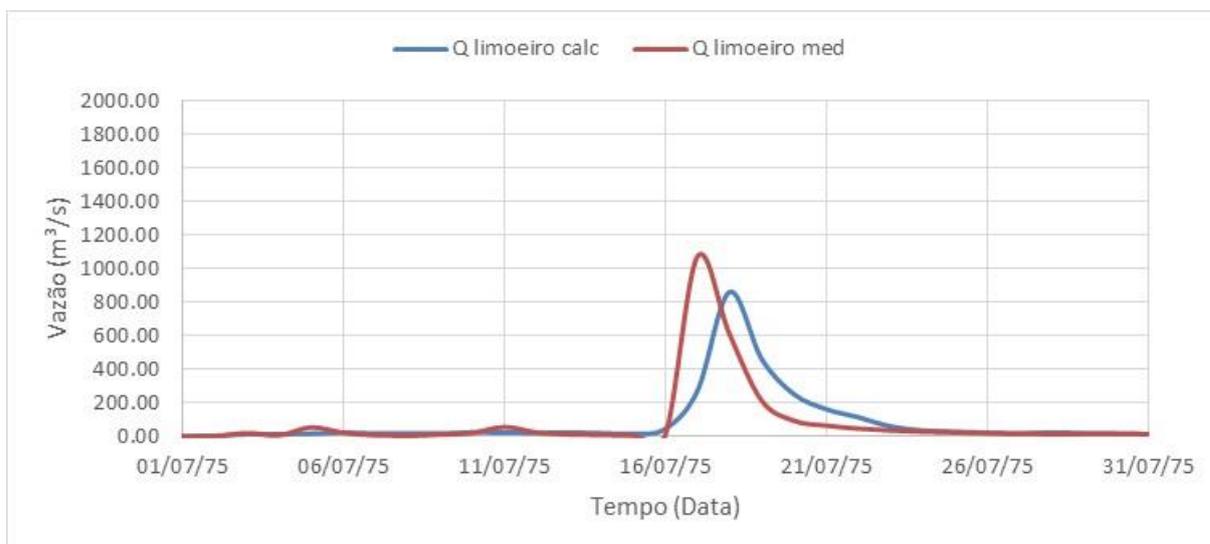
As vazões representadas em azul nas figuras a seguir são as efluentes da barragem somada à vazão incremental de chegada no posto de Limoeiro. No evento de 1974 (Figura 35) não se percebe um grande amortecimento nas vazões de pico, já nos eventos de 17/07/1975 e 01/05/1977, nota-se um amortecimento de 20% e 81% na vazão de pico, respectivamente, se houvesse a barragem de Jucazinho na época. Também se percebe o retardo de 1 dia na chegada da vazão de pico no evento de 1975.

Figura 35 – Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.



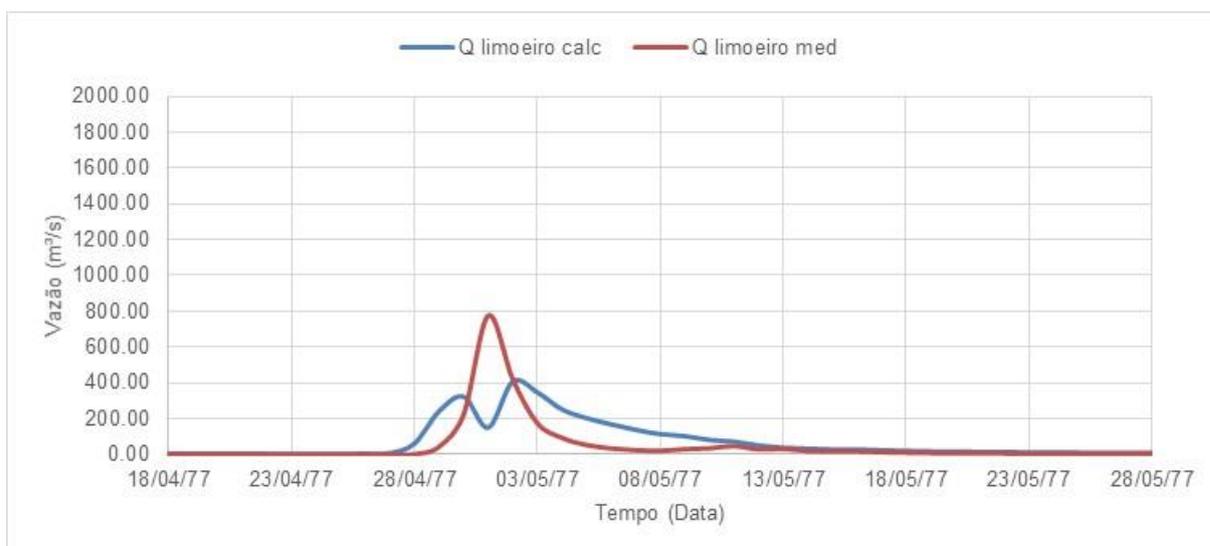
Fonte: A autora, 2019

Figura 36 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.



Fonte: A autora, 2019

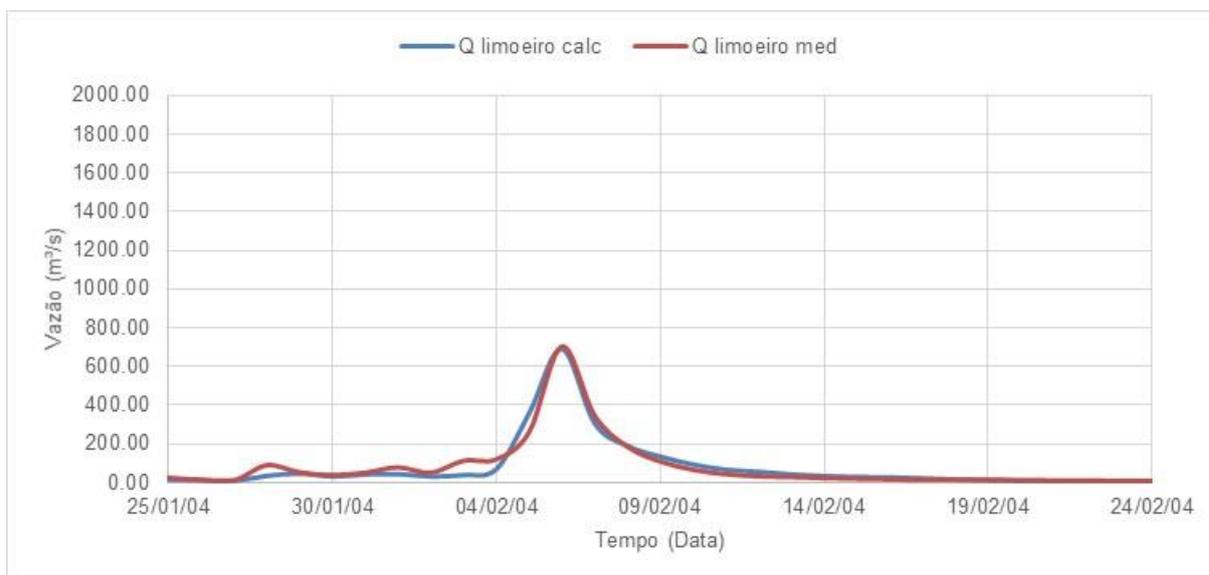
Figura 37 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.



Fonte: A autora, 2019

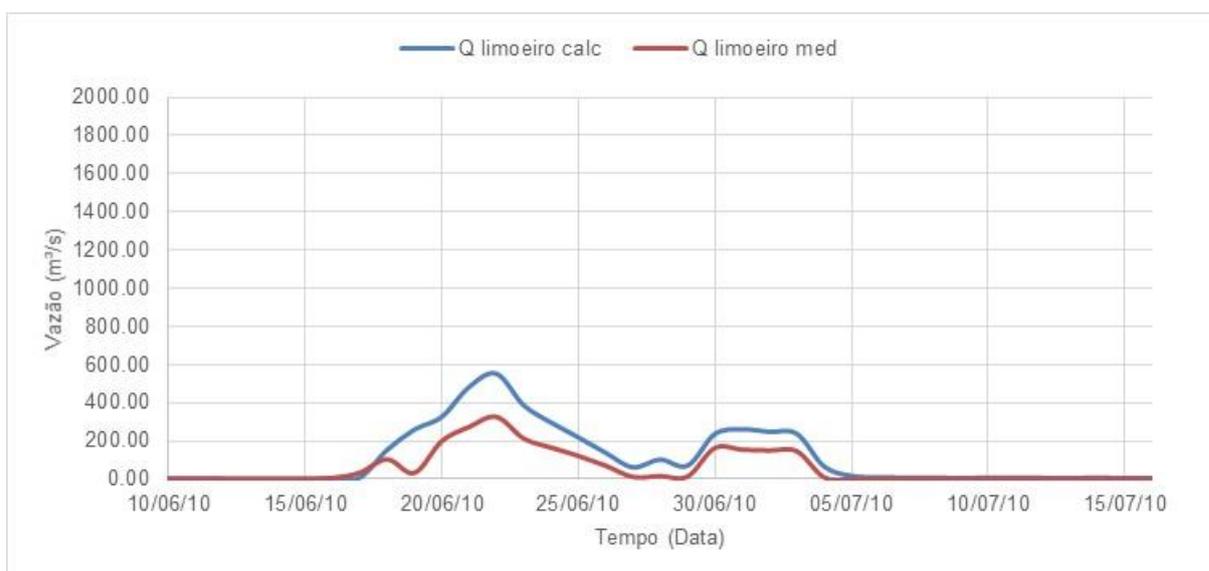
Nas Figuras 38, 39 e 40, tem-se a validação do modelo através da comparação entre as vazões provenientes do modelo e as vazões medidas no posto fluviométrico de Limoeiro. Com isso, percebe-se um bom ajuste do modelo na representação do evento de 2004 (Figura 38), já para os eventos de 2010 e 2011 (Figuras 39 e 40), o modelo superestimou os picos de cheia.

Figura 38 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.



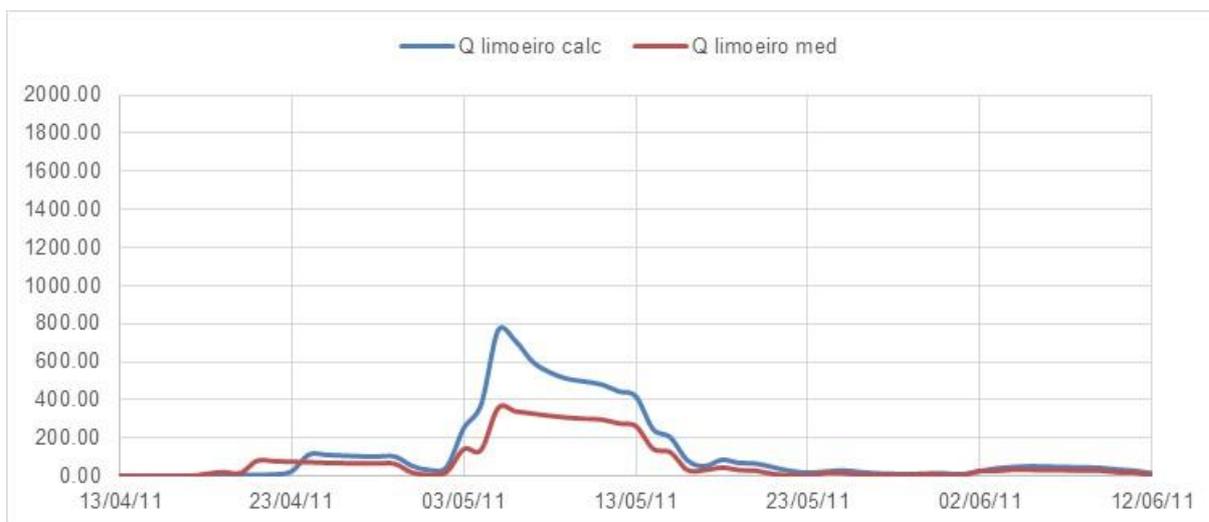
Fonte: A autora, 2019

Figura 39 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.



Fonte: A autora, 2019

Figura 40 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.

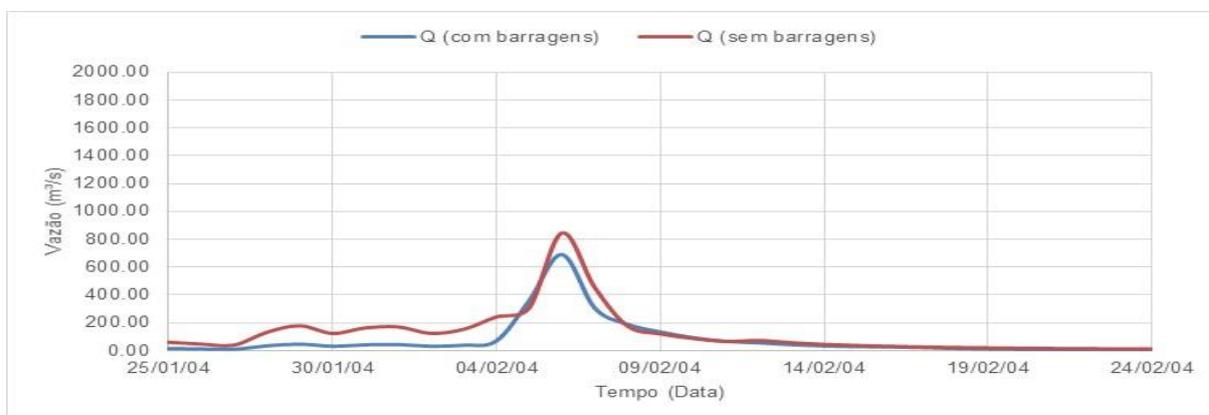


Fonte: A autora, 2019

Também foi realizada uma comparação entre os eventos que ocorreram após a conclusão da barragem de Jucazinho, a fim de verificar a importância do reservatório no controle de cheias, visto que ele tem como principal uso o abastecimento. As vazões sem o efeito da barragem foram provenientes das vazões simuladas pelo modelo hidrológico na sub-bacia de Limoeiro.

Verifica-se através das vazões ilustradas nas Figuras 41 e 43 que a barragem de Jucazinho teve pouco efeito no controle de cheias para a cidade de Limoeiro, já no evento de 2010 (Figura 42) foi representado um maior retardo na vazão de pico .

Figura 41 – Comparação entre o evento de 2004 com e sem a barragem de Jucazinho.



Fonte: A autora, 2019

Figura 42 - Comparação entre o evento de 2010 com e sem a barragem de Jucazinho.



Fonte: A autora, 2019

Figura 43 - Comparação entre o evento de 2011 com e sem a barragem de Jucazinho.



Fonte: A autora, 2019

Percebe-se através dos resultados anteriores que apesar da existência da barragem de Jucazinho a montante de Limoeiro, a mesma não foi capaz de conter um grande volume de água proveniente de um evento hidrológico extremo, como o ocorrido em 2011, onde a vazão ainda chegou a 766.81 m<sup>3</sup>/s em 05/05/2011. Isto é compreensível, visto que o uso principal da barragem de Jucazinho é o abastecimento e não havia nenhuma medida de manter volume de espera para o controle de cheias. É fato que em 2011 a cidade de Limoeiro ainda sofreu prejuízos com o transbordamento do rio Capibaribe em algumas partes, como se pode observar na Figura 44.

Figura 44 – Inundações em trechos da cidade de Limoeiro no evento de 2011

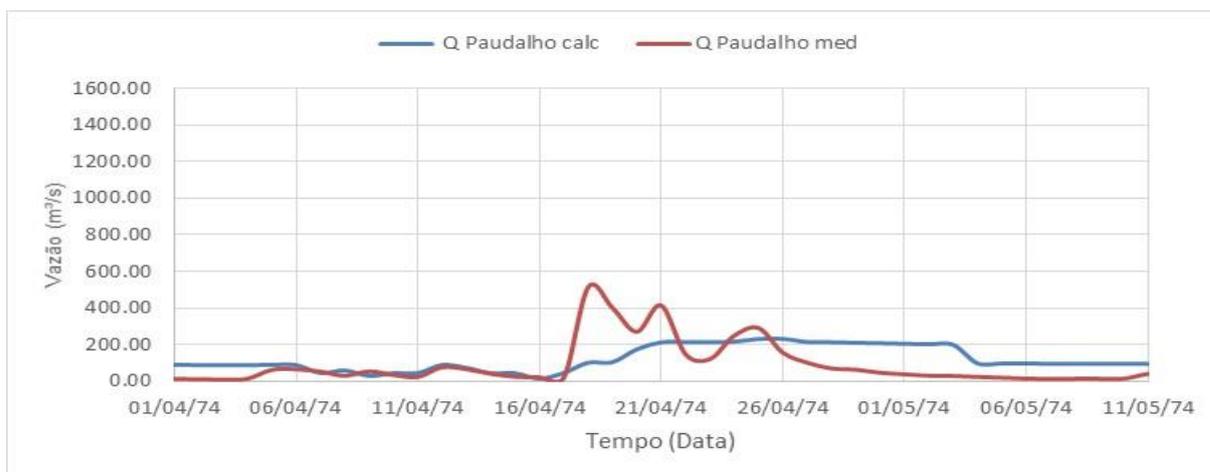


Fonte: Aragão (2017)

#### 4.2.2 Simulação dos eventos de cheia em Paudalho

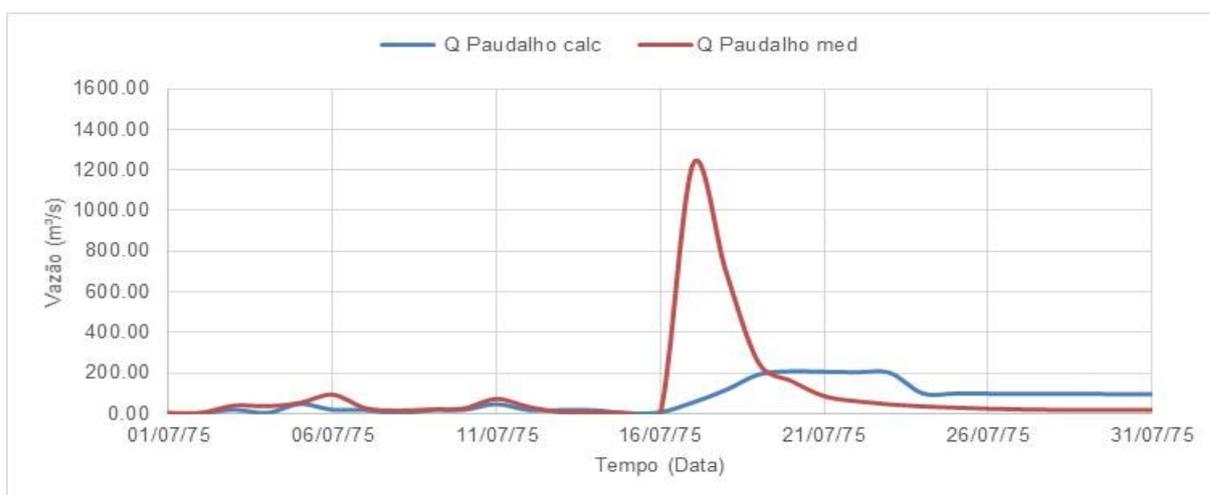
Na cidade de Paudalho, percebe-se um grande amortecimento das vazões de cheia para os eventos de 1974, 1977 e em especial 1975 (Figuras 45, 46 e 47), que teria a vazão de pico amortecida para 200,00 m<sup>3</sup>/s se existissem as barragens de Jucazinho e Carpina na época do evento. Este grande amortecimento observado na cidade de Paudalho deve-se à inserção da barragem de Carpina no sistema, operada exclusivamente para o controle de cheias.

Figura 45 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.



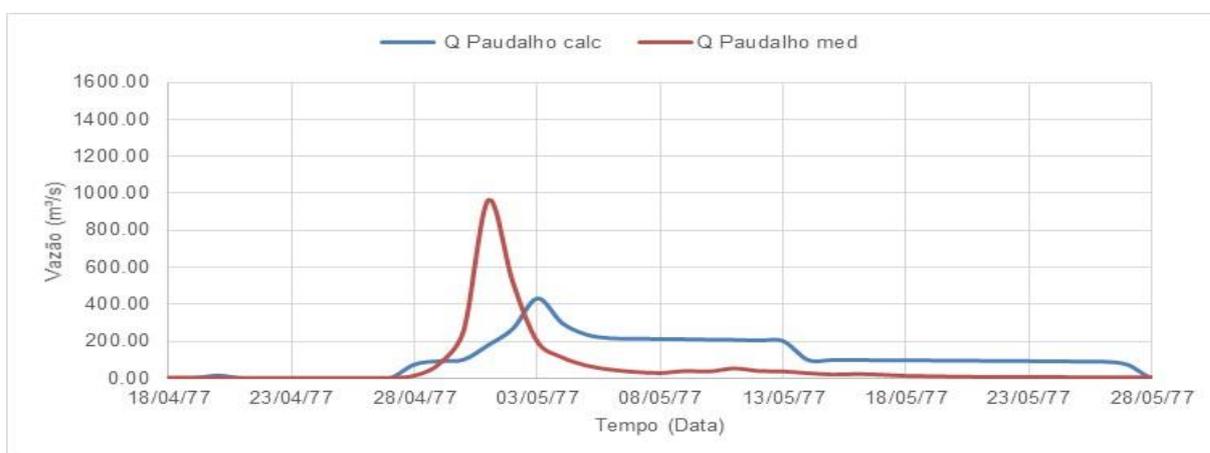
Fonte: A autora, 2019

Figura 46 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.



Fonte: A autora, 2019

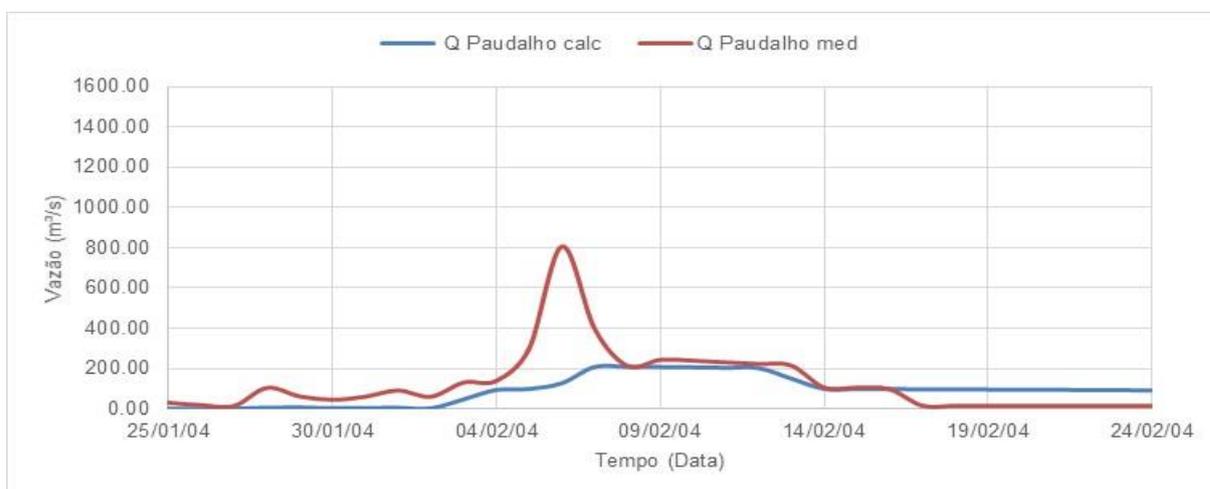
Figura 47 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.



Fonte: A autora, 2019

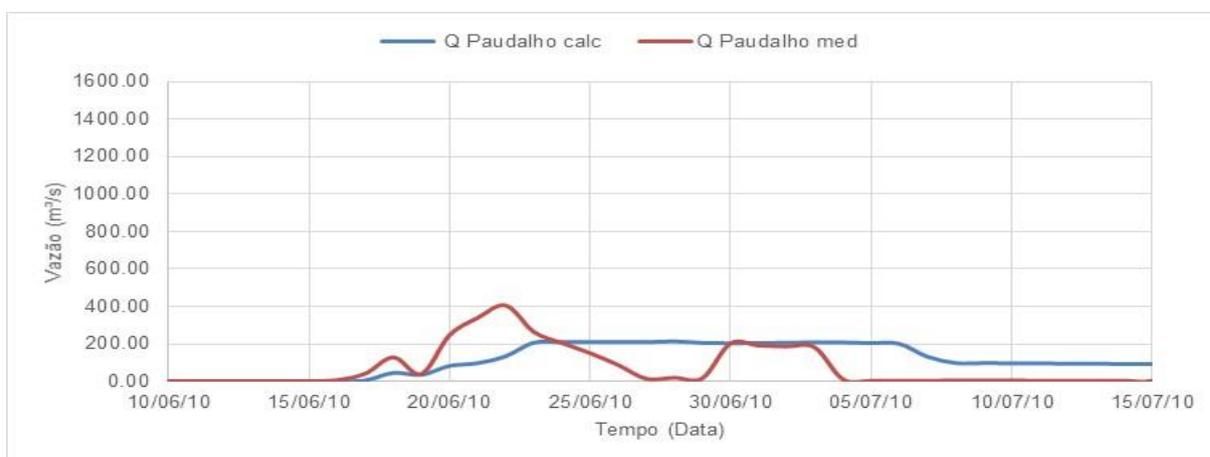
Os eventos de 2004, 2010 e 2011 ilustrados nas Figuras 48, 49 e 50 serviram de validação para o modelo, conforme foi apresentado para o posto de Limeiro. No entanto, percebe-se que não foram verificados bons ajustes das vazões para o posto de Paudalho.

Figura 48 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.



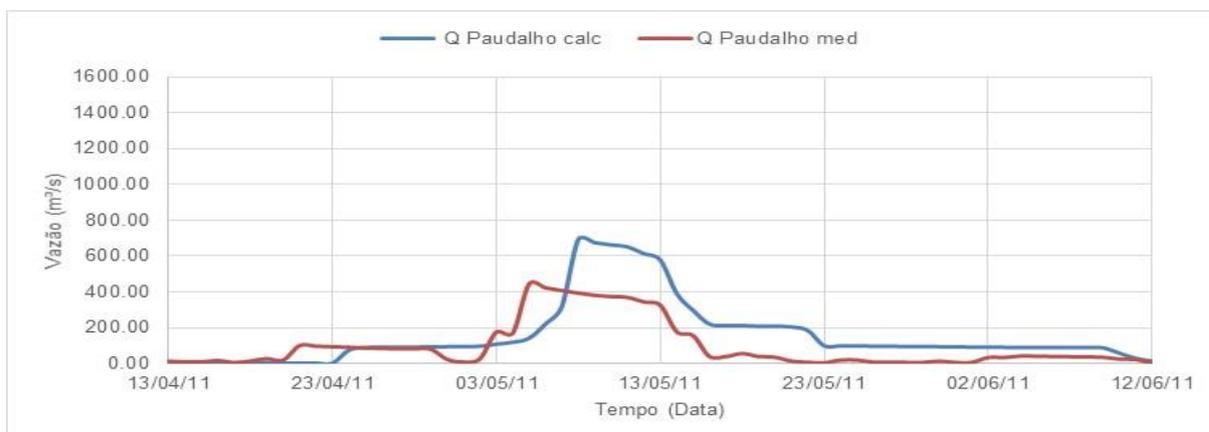
Fonte: A autora, 2019

Figura 49 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.



Fonte: A autora, 2019

Figura 50 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.

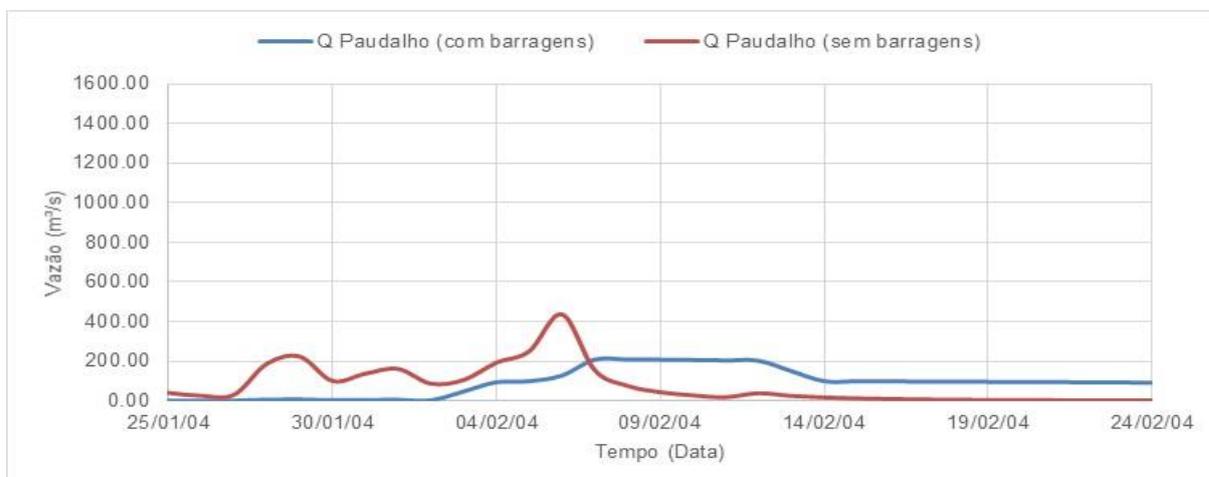


Fonte: A autora, 2019

Igualmente à cidade de Limoeiro, comparou-se as vazões de saída na cidade do Paudalho sob o efeito das barragens de Jucazinho e Carpina e sem a presença delas.

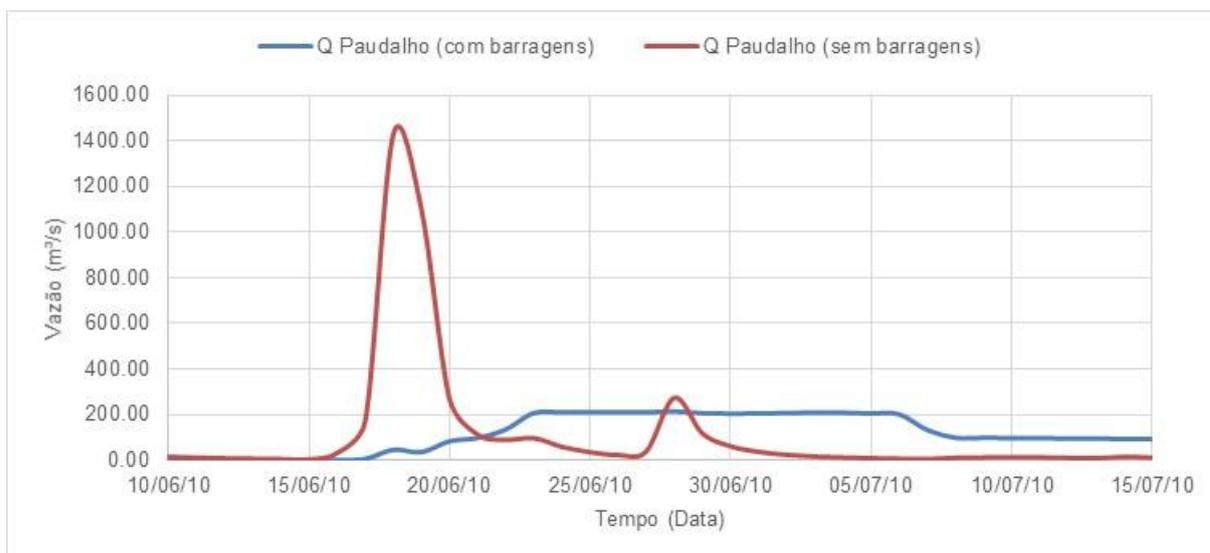
Analisou-se através dos resultados, que em 2004, a cheia aumentaria de 127,55 m³/s para 436,42 m³/s no dia 06 de fevereiro se não houvessem barragens (Figura 51). No entanto, a maior influência de proteção das barragens é percebida no evento de 2010, onde, sem as barragens a vazão chegaria a 1429,45 m³/s no dia 18 de junho (Figura 52). No evento de 2011 também se percebe um retardo na chegada da vazão de pico do dia 05 de maio para 08 de maio, graças às barragens de Jucazinho e principalmente Carpina (Figura 53).

Figura 51 - Comparação entre o evento de 2004 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.



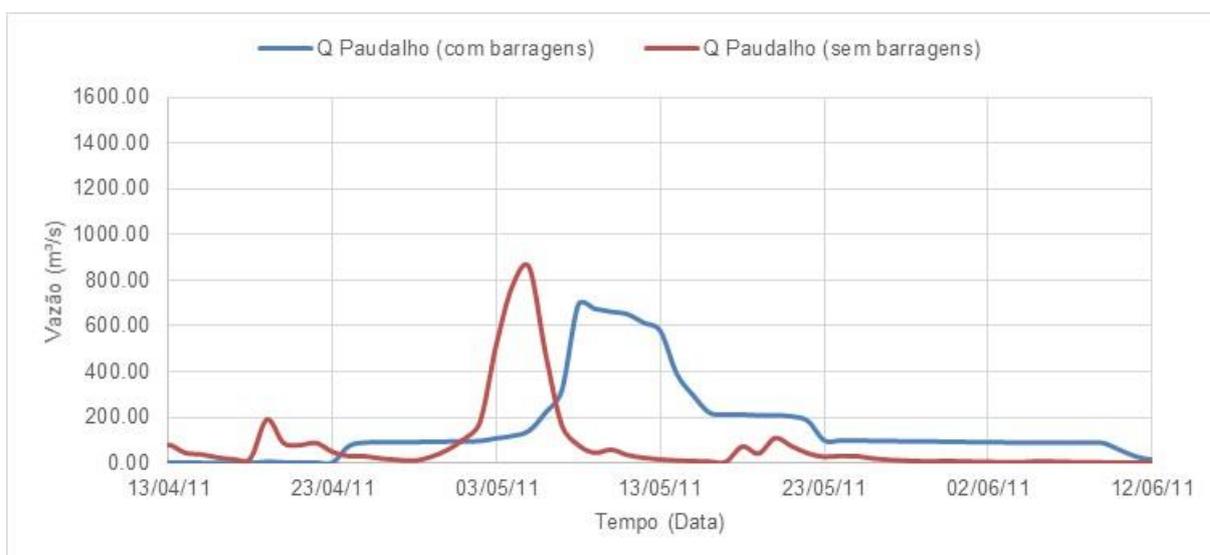
Fonte: A autora, 2019

Figura 52 - Comparação entre o evento de 2010 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.



Fonte: A autora, 2019

Figura 53 - Comparação entre o evento de 2011 com e sem as barragens de Jucazinho e Carpina.



Fonte: A autora, 2019

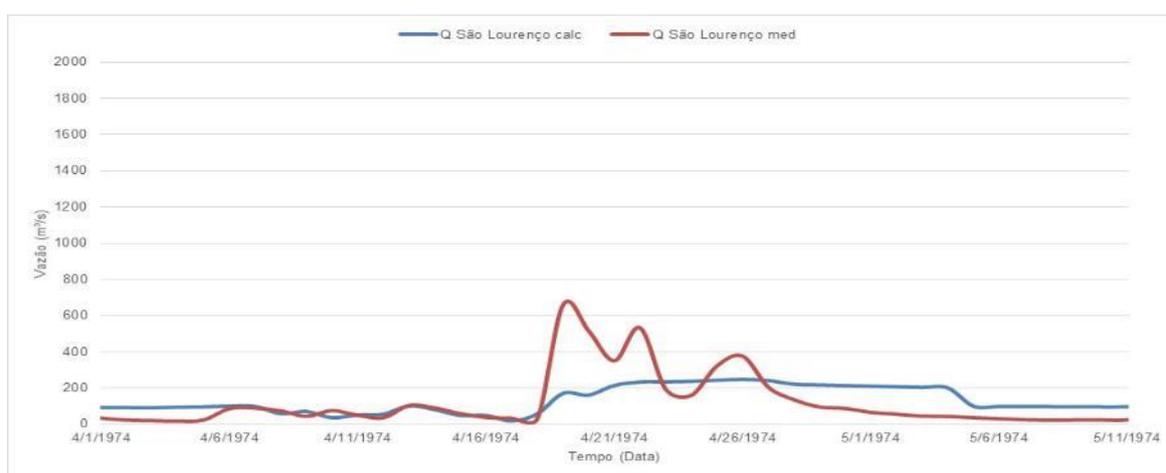
#### 4.2.3 Simulação dos eventos de cheia em São Lourenço

Deve ser dada atenção especial às vazões de chegada na cidade de São Lourenço, pois devido a sua proximidade com a cidade do Recife, as vazões que chegam a São Lourenço têm praticamente a mesma magnitude das vazões que atingem a calha dos rios na capital do Estado de Pernambuco. Além das barragens de Jucazinho e

Carpina, a cidade do Recife conta com as barragens de Goitá e Tapacurá para o controle das vazões transportadas pela calha do Rio Capibaribe e afluentes.

Nas simulações para a vazão de chegada na cidade de São Lourenço, consideraram-se as vazões vertidas da barragem de Carpina, somadas às vazões incrementais do Posto de Paudalho até o posto de São Lourenço e também às vazões vertidas das barragens de Goitá e Tapacurá. Deste modo, percebe-se o grande efeito destas barragens no controle de cheias principalmente no evento de 1975, ilustrado pela Figura 55. Com todas as barragens construídas, a vazão de pico em 1975 chegaria a 897 m<sup>3</sup>/s, contra 1570 m<sup>3</sup>/s estimados na época do evento catastrófico. O efeito de amortecimento também é bastante evidente nos eventos de 1974 e 1977, ilustrados nas Figuras 54 e 56.

Figura 54 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1974.



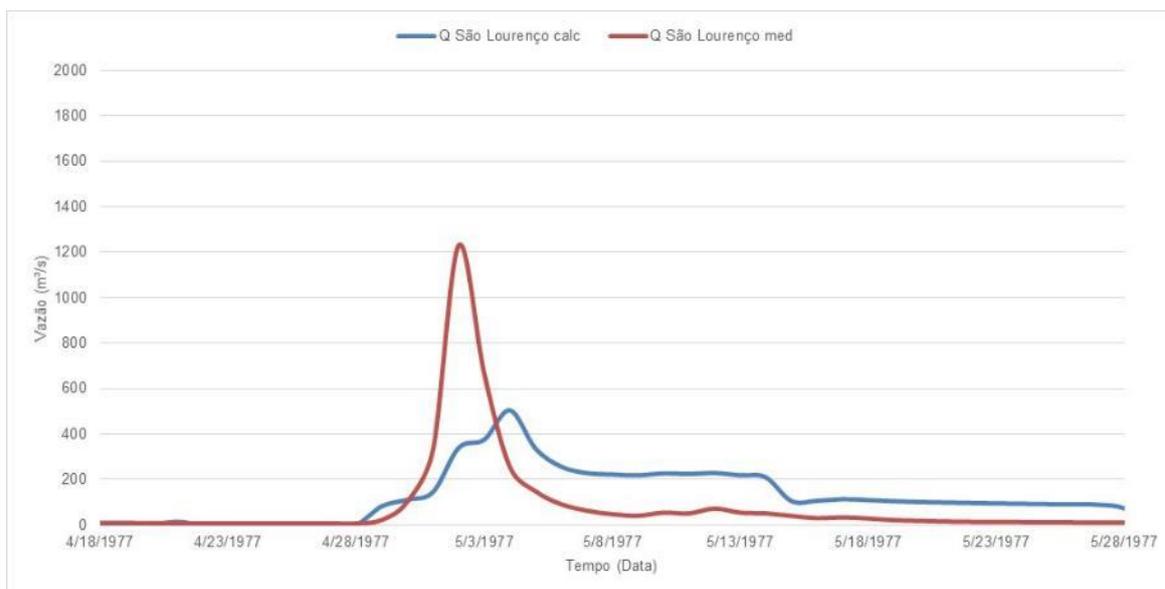
Fonte: A autora, 2019

Figura 55 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1975.



Fonte: A autora, 2019

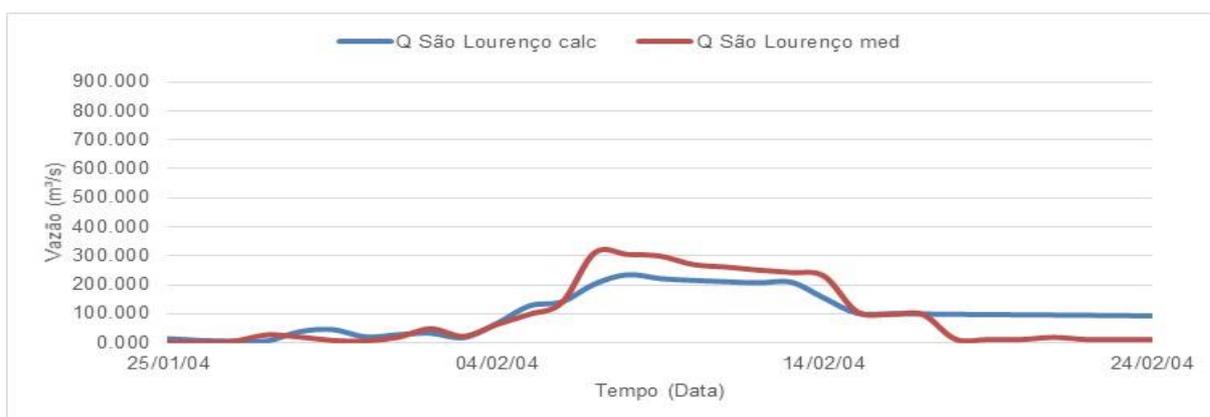
Figura 56 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 1977.



Fonte: A autora, 2019

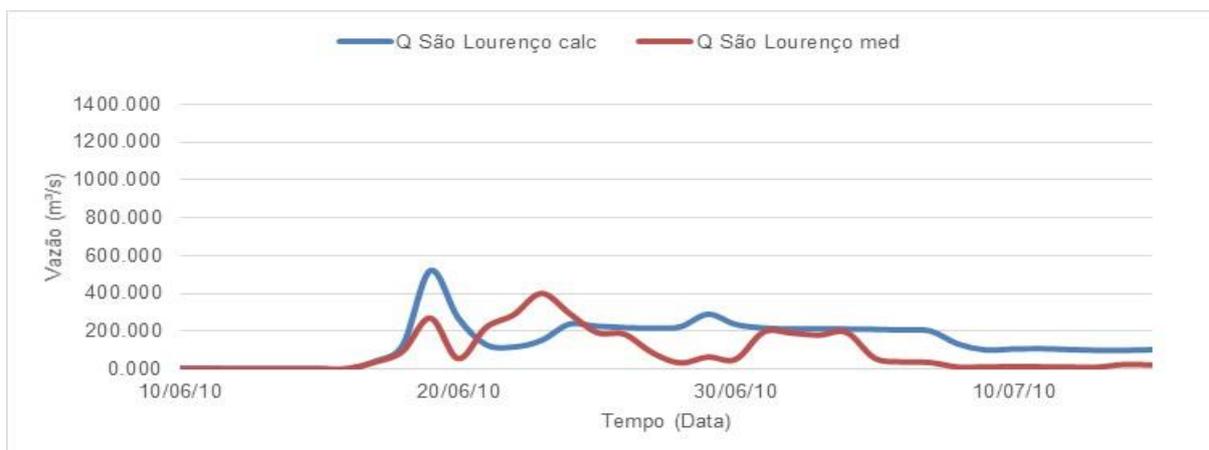
Para fins de validação das vazões simuladas pelo modelo, observa-se os eventos de 2004, 2010 e 2011 nas Figuras 57, 58 e 59. Logo, infere-se a partir de observação gráfica que o modelo está representando de modo satisfatório as vazões afluentes a São Lourenço.

Figura 57 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2004.



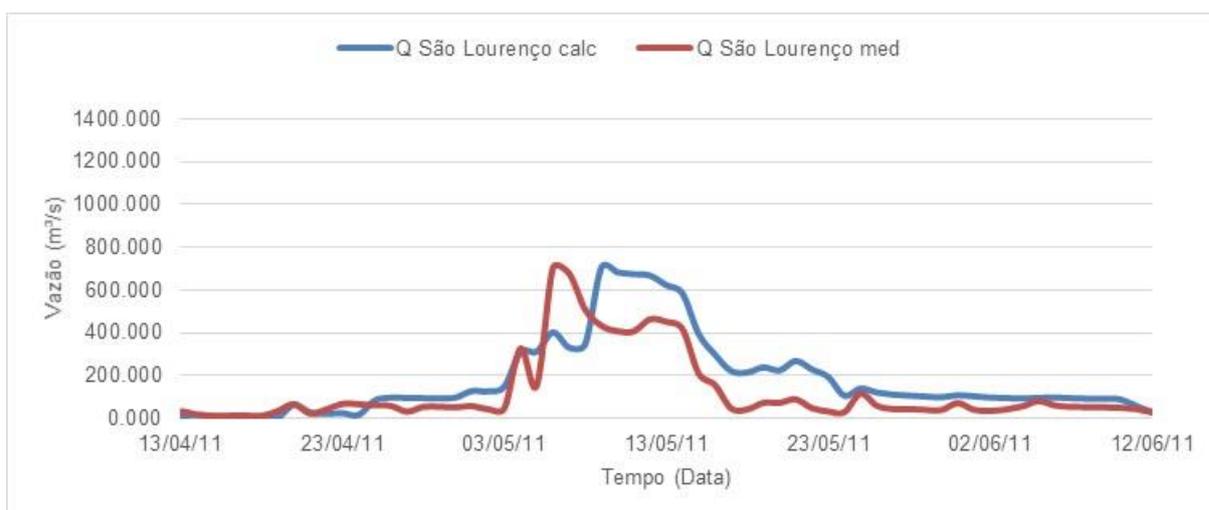
Fonte: A autora, 2019

Figura 58 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2010.



Fonte: A autora, 2019

Figura 59 - Vazões simuladas e medidas para o evento de 2011.

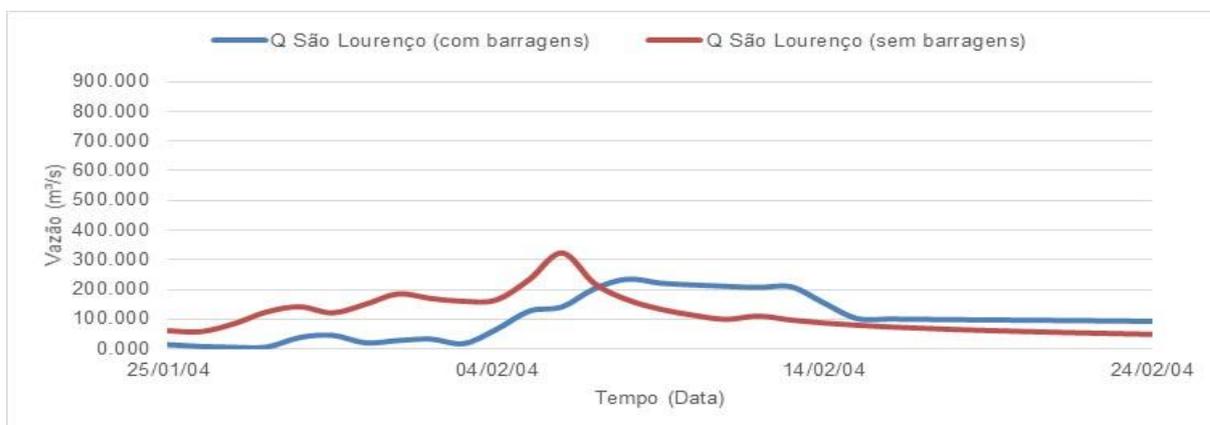


Fonte: A autora, 2019

Simulando também os mesmos eventos de 2004 (Figura 60), 2010 (Figura 61) e 2011 (Figura 62) sem o efeito das barragens, observam-se grandes vazões de chegada nos dias 19 de junho de 2010 e 05 de maio de 2011 (Figura 61 e Figura 62). Sem as barragens, as vazões chegariam a  $1273 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $1344 \text{ m}^3/\text{s}$ , em 2010 e 2011 respectivamente, ultrapassando o limite de suporte da calha dos rios no Recife, que é de  $838 \text{ m}^3/\text{s}$ , conforme Barros (1979), menos no presente, tendo em vista assoreamentos e obstruções causadas por detritos na calha. Tais eventos causariam grandes prejuízos, próximos aos que ocorreram em 1975. Porém, mesmo com as barragens, em 2011 a vazão de pico em São Lourenço foi simulada em  $707 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

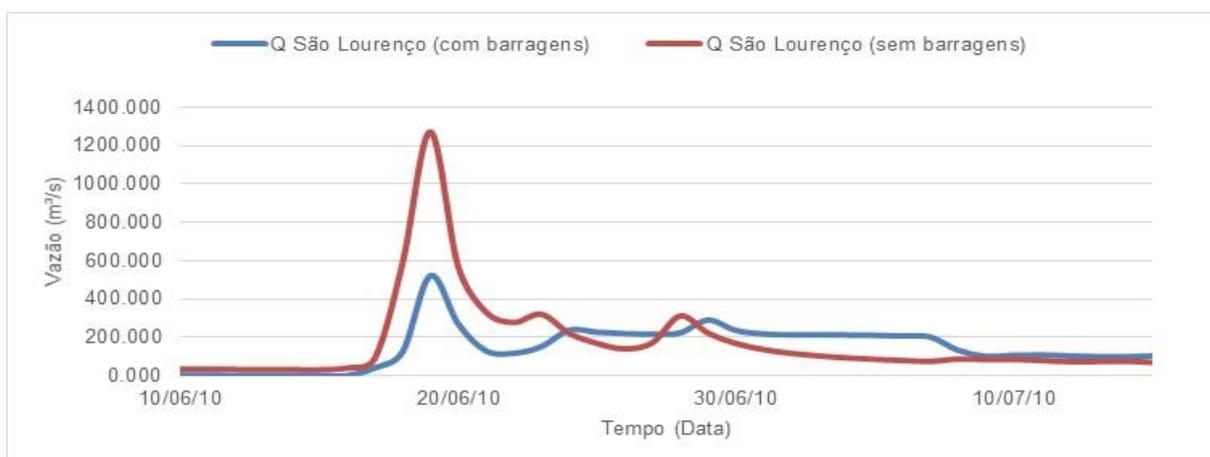
gerando inundação em alguns trechos do Rio Capibaribe nas áreas mais baixas da cidade.

Figura 60 - Comparação entre o evento de 2004 com e sem as barragens de Jucazinho ,Carpina, Goitá e Tapacurá.



Fonte: A autora, 2019

Figura 61 - Comparação entre o evento de 2010 com e sem as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.



Fonte: A autora, 2019

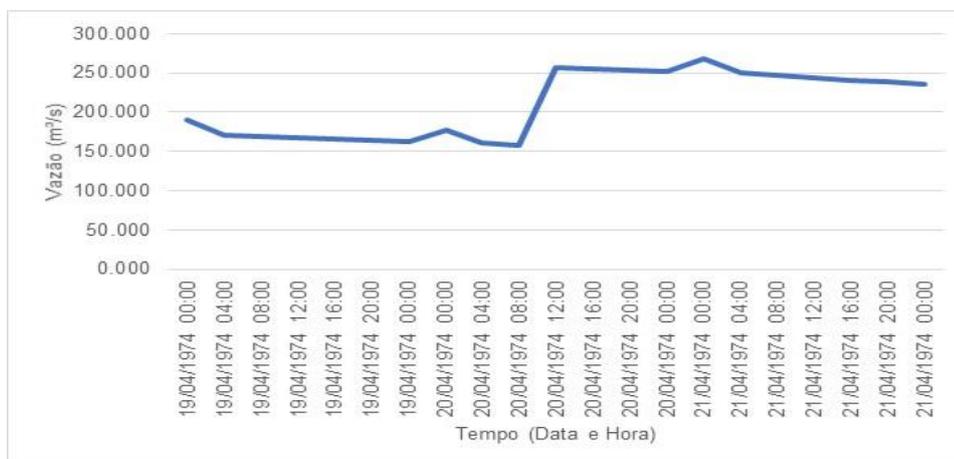
Figura 62 - Comparação entre o evento de 2011 com e sem as barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá.



Fonte: A autora, 2019

Dando maior ênfase às vazões propagadas pela rede hídrica da bacia do rio Capibaribe até a entrada do município de São Lourenço, também foram simulados os principais eventos de cheia ocorridos a cada 4 horas com o objetivo de maior detalhamento das vazões de chegada. Estes eventos podem ser observados das Figuras 63 a 70. Todos os eventos levam em conta o efeito das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá. De maneira geral, é possível concluir que nas simulações a cada 4h as vazões são maiores do que quando comparadas aos gráficos anteriores em que foi considerada a média diária das vazões de saída das barragens.

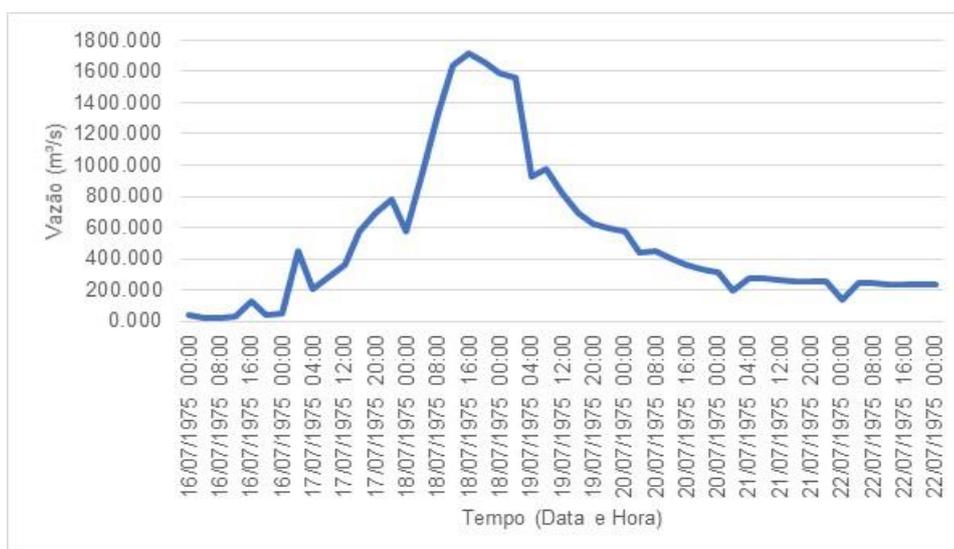
Figura 63 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1974 (São Lourenço)



Fonte: A autora, 2019

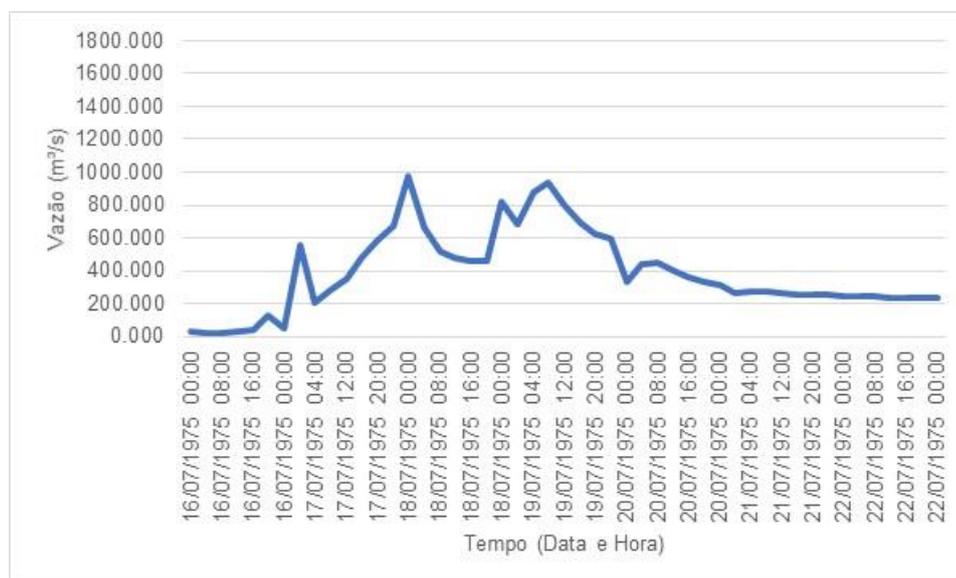
No evento de 1975, observou-se um grande pico nas vazões na ordem de 1700 m³/s se não houvesse operação para controle do volume de espera nas barragens de Jucazinho e Carpina. Portanto, se o volume de espera em Jucazinho fosse mantido em 40% no evento de cheia, a vazão vertida cairia de 1700 para 1000 m³/s (Figura 65). E, se a barragem de Carpina fosse operada para trabalhar com um volume inicial de 50.000.000 m³ no dia do evento (como é feito atualmente em eventos de cheia), a vazão vertida cairia para 600 m³/s (Figura 66), explicitando-se a importância da barragem de Carpina no controle de cheias.

Figura 64 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 (São Lourenço)



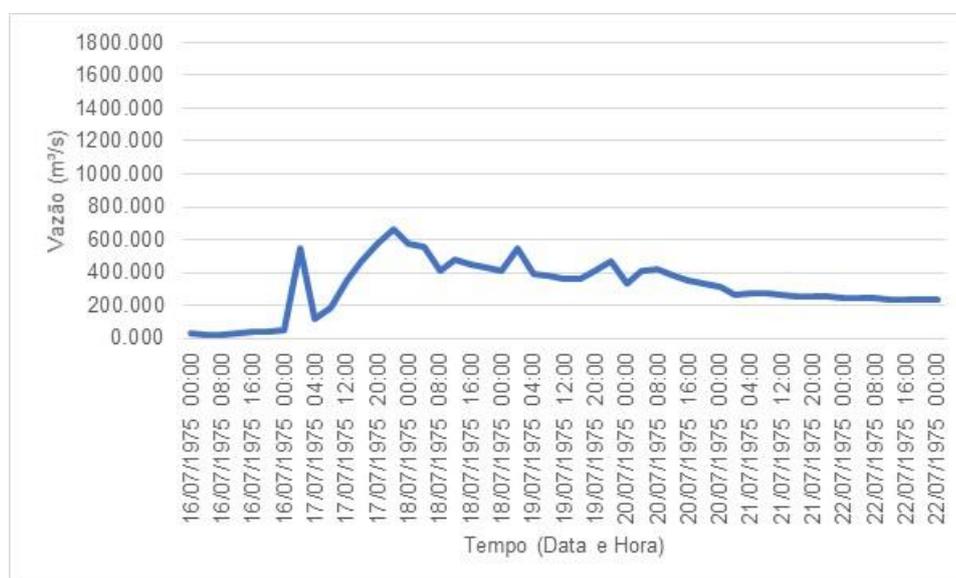
Fonte: A autora, 2019

Figura 65 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 alterando volume de espera em Jucazinho (São Lourenço)



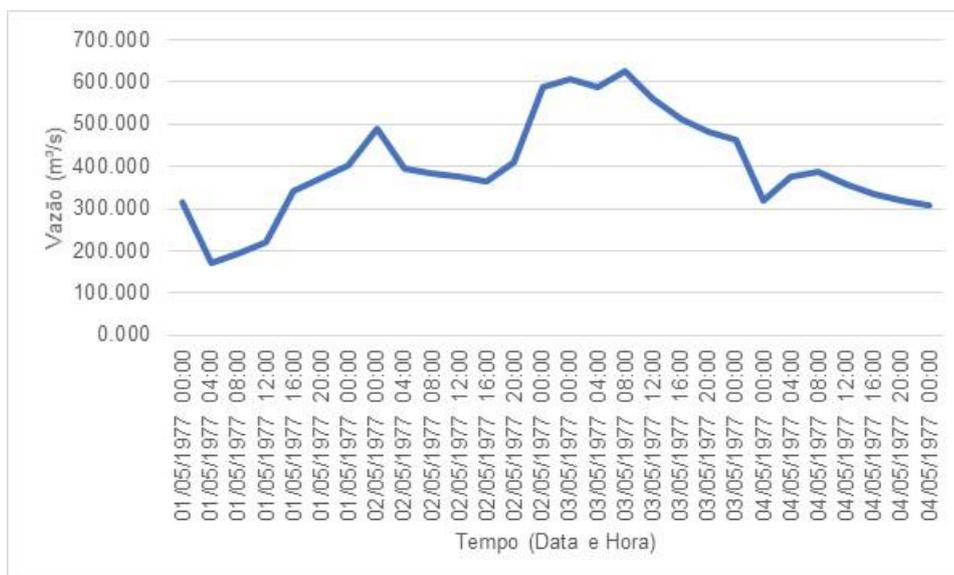
Fonte: A autora, 2019

Figura 66 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1975 alterando volume de espera em Jucazinho e Carpina (São Lourenço)



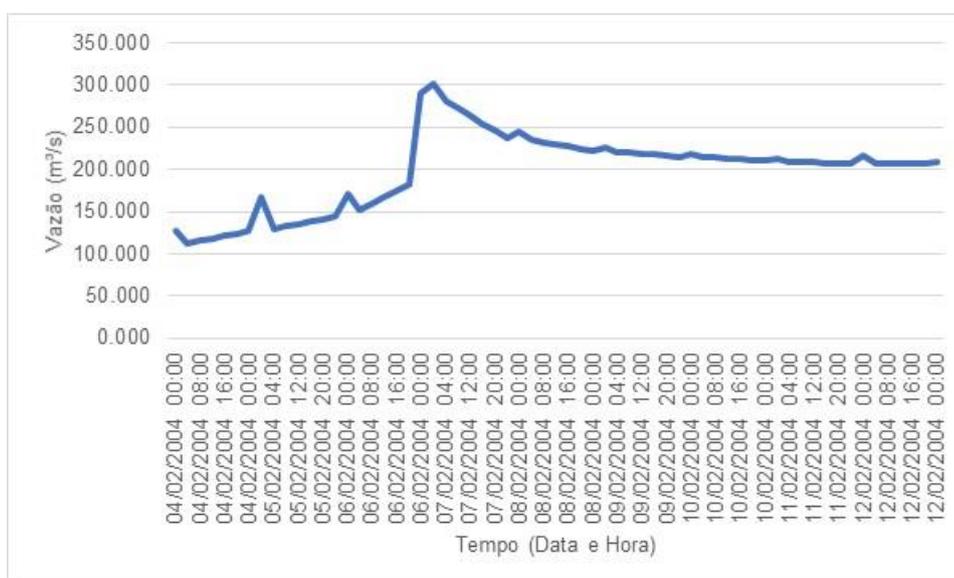
Fonte: A autora, 2019

Figura 67 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 1977 (São Lourenço)



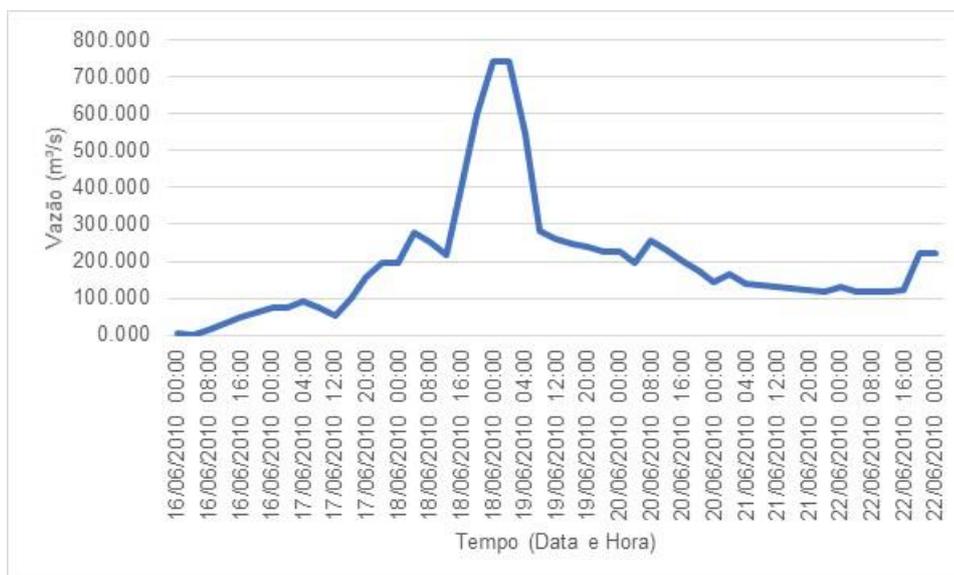
Fonte: A autora, 2019

Figura 68 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2004 (São Lourenço)



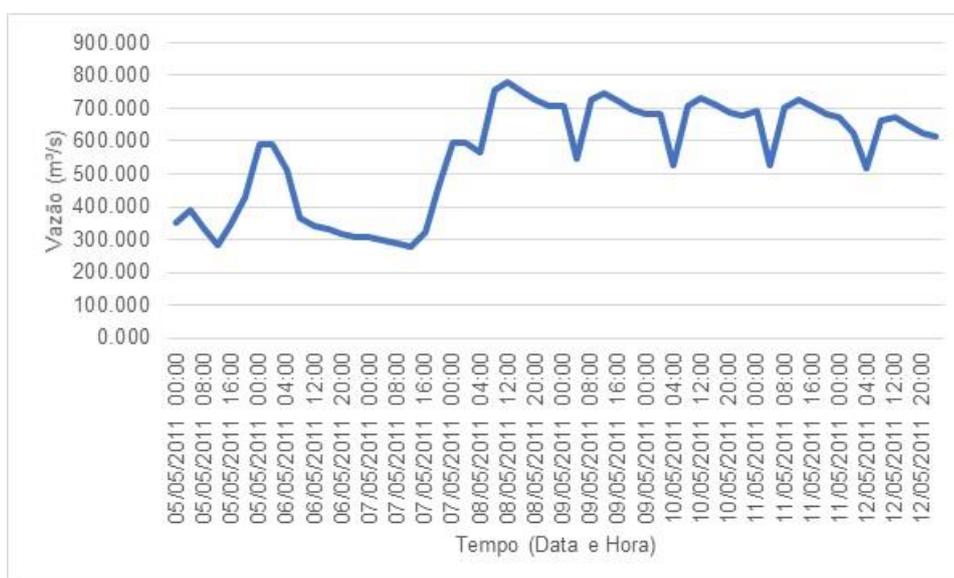
Fonte: A autora, 2019

Figura 69 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2010 (São Lourenço)



Fonte: A autora, 2019

Figura 70 – Vazões simuladas a cada 4h para o evento de 2011 (São Lourenço)



Fonte: A autora, 2019

Diante de todos estes cenários, percebe-se a grande importância das barragens na prevenção de desastres na cidade do Recife, porém as cidades ao longo do rio Capibaribe não estão completamente imunes às inundações, como se pôde observar no evento de 2011. Por isso, estes sistemas devem estar sob constante monitoramento para que não ocorram catástrofes devido a eventos hidrológicos extremos como o observado em 1975. Lima *et al* (2018) também procuraram

caracterizar e analisar climaticamente o comportamento das precipitações na bacia do Capibaribe e obtiveram a conclusão através dos estudos que esta bacia apresenta uma elevada variabilidade temporal e espacial das chuvas e que o constante monitoramento dos índices pluviométricos minimiza os impactos ambientais, sociais e econômicos impulsionados pelas altas intensidades pluviométricas.

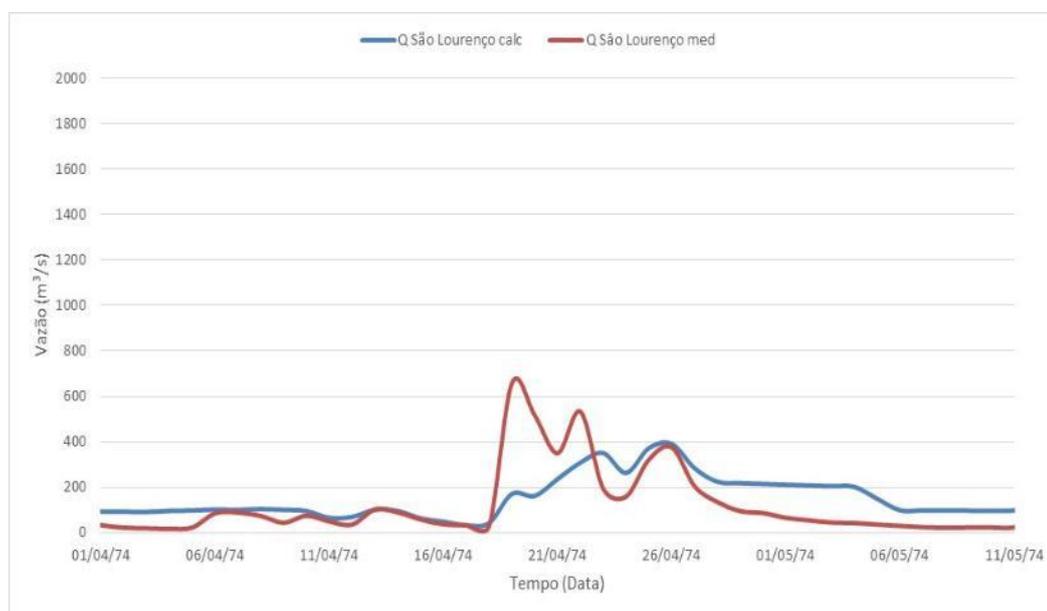
Após 44 anos da cheia de 1975, ela ainda continua sendo a maior cheia já registrada na bacia do Rio Capibaribe e de acordo com os resultados obtidos neste estudo, a cidade do Recife se encontra parcialmente protegida de um evento desta magnitude. No estudo realizado por Barros (1979) para avaliar o grau de proteção do plano de controle de enchentes na bacia do Capibaribe, calculou-se o tempo de recorrência desta enchente para a bacia entre 83 a 115 anos. Portanto, não é um tempo de recorrência tão elevado e se pode esperar que a bacia do Rio Capibaribe possa ser atingida por uma cheia desta magnitude.

#### **4.2.4 Simulação de cenários devido a mudanças climáticas**

A partir da observação de eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes, procurou-se simular alguns cenários de mudanças climáticas para avaliar a resposta hidrológica da bacia na entrada da cidade de São Lourenço (à montante da cidade do Recife). Para simular estes cenários, foi utilizada a metodologia exposta no item 3.5.3 desse estudo. Logo, as vazões de entrada simuladas foram alteradas e introduzidas no modelo de operação das barragens. Estas simulações visam considerar os efeitos que as vazões de picos possam sofrer frente a um cenário de acentuação de eventos extremos como inundações e secas. O aumento no desvio padrão das séries pluviométricas foi de 14,1%, 16,0%, 13,7%, 13,9% e 13,8% para Toritama, Limoeiro, Paudalho, Goitá e Tapacurá respectivamente.

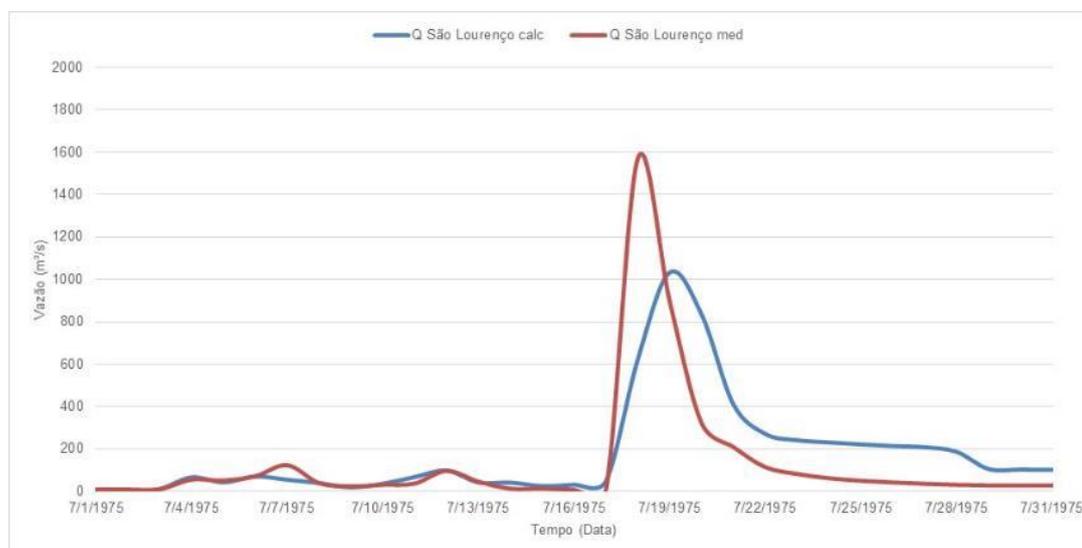
Em todos os casos (Figura 71 a Figura 76), verificou-se um aumento considerável nos picos de cheia, principalmente no evento de 2011 (Figura 76) tendo a vazão de pico aumentada de 703 m<sup>3</sup>/s para 823 m<sup>3</sup>/s. Em 2010 (Figura 75) também se observa uma antecipação no pico e um aumento de 400 m<sup>3</sup>/s para 552 m<sup>3</sup>/s.

Figura 71 – Cenário de 1974 com o aumento da chuva.



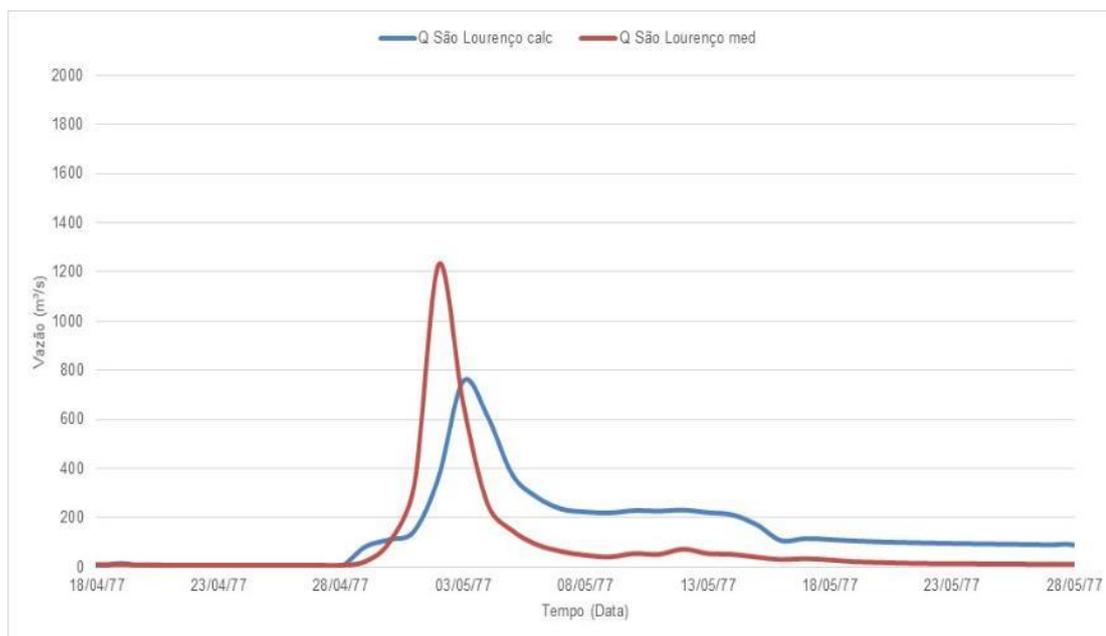
Fonte: A autora, 2019

Figura 72 – Cenário de 1975 com o aumento da chuva.



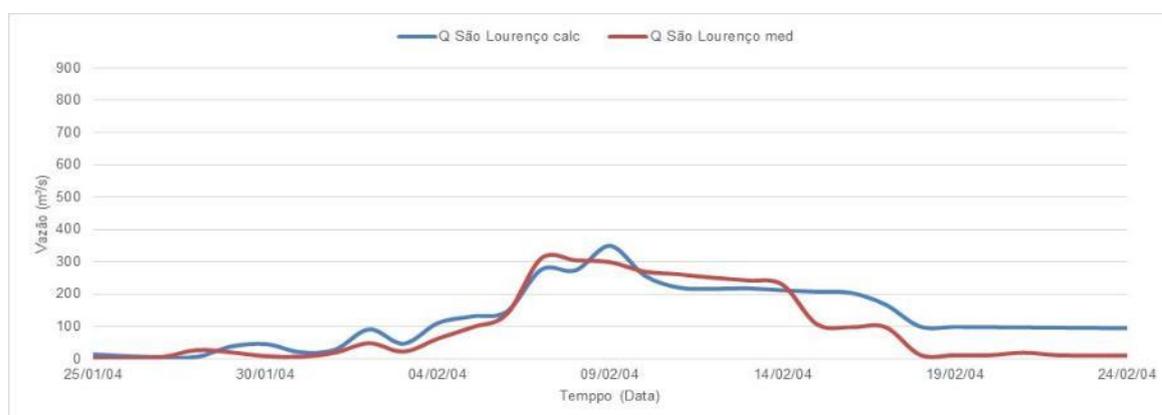
Fonte: A autora, 2019

Figura 73 – Cenário de 1977 com o aumento da chuva.



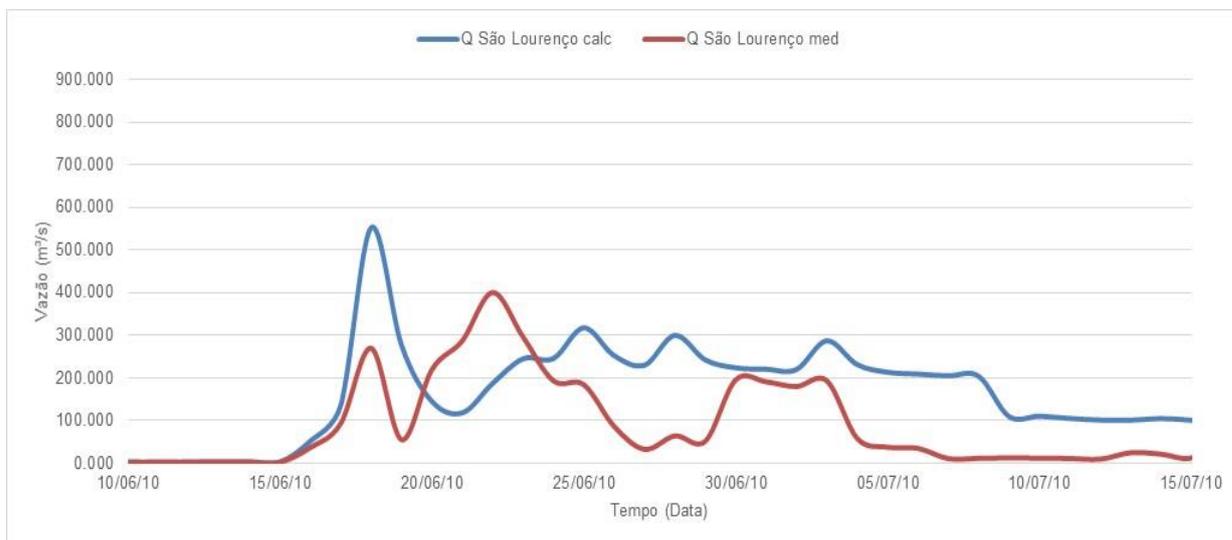
Fonte: A autora, 2019

Figura 74 – Cenário de 2004 com o aumento da chuva.



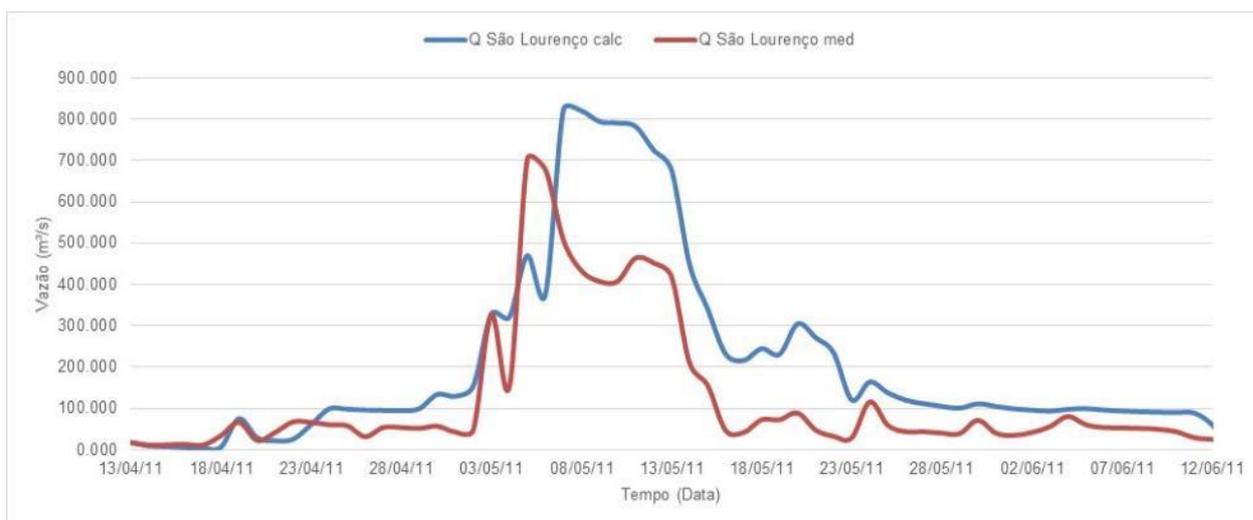
Fonte: A autora, 2019

Figura 75 – Cenário de 2010 com o aumento da chuva.



Fonte: A autora, 2019

Figura 76 – Cenário de 2011 com o aumento da chuva.



Fonte: A autora, 2019

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste item, delineiam-se as conclusões obtidas a partir dos resultados, como também são feitas algumas recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

Com base nas análises e simulações voltadas para o comportamento hidrológico da bacia do rio Capibaribe, pode-se concluir que o modelo hidrológico CAWM IV, recentemente desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, conseguiu representar os eventos hidrológicos de modo satisfatório, de acordo com os coeficientes de avaliação obtidos. Das sub-bacias escolhidas para o estudo, a de São Lourenço não alcançou coeficientes de Nash-Sutcliffe bons por sofrer influência da construção das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá nos anos em que se tinham dados de vazões medidas e a de Santa Cruz do Capibaribe requer uma análise mais atenta ao efeito do reservatório de Poço Fundo e à qualidade dos dados de vazão. As demais bacias obtiveram resultados bons a satisfatórios, principalmente nos eventos que tiveram pouca ou nenhuma influência dos barramentos, o que naturalmente modifica as vazões a jusante.

A simplicidade do modelo promovida pelos poucos parâmetros calibráveis também é um forte ponto a ser considerado, visto que para a bacia do rio Capibaribe, apenas três parâmetros foram calibrados para a obtenção dos resultados. A aquisição de características físicas da bacia através de modelos digitais do terreno também confere maior segurança nos resultados obtidos e potencializa a transferência de dados para outras bacias, como se fez no caso para as sub-bacias de Tapacurá e Goitá.

Como o CAWM IV necessita da determinação de poucos parâmetros para entrada no modelo e todos possuem significado físico, a calibração se torna bem menos exaustiva e menos incertezas são incorporadas nesta fase, encorajando a aplicação deste modelo para outras bacias. O CAWM, em suas diferentes versões, busca cada vez mais relacionar os parâmetros com dados físicos da bacia, sendo útil para auxiliar o

processo de regionalização, de modo a aplicar o modelo em bacias onde os dados hidrológicos são escassos ou inexistentes.

A integração do modelo hidrológico CAWM IV com o modelo de operação de barragens permitiu análise mais precisa do comportamento do sistema para a bacia do rio Capibaribe pós-construção das barragens, avaliando-se o impacto das mesmas também para eventos anteriores à sua construção. Foi possível avaliar de modo mais confiável as vazões de chegada nas cidades de Limoeiro, Paudalho e São Lourenço no modelo de operação de barragens. Por meio dos cenários avaliados, percebeu-se a importância das barragens existentes na Bacia do Rio Capibaribe para o controle de cheias. Sem a presença dos reservatórios, a cidade do Recife estaria completamente vulnerável nos eventos de cheias que ocorreram em 2010 e 2011. No entanto, percebeu-se que mesmo com as barragens, no evento de 2011 a vazão de chegada em São Lourenço chegou a quase 800 m<sup>3</sup>/s, causando inundações nas áreas ribeirinhas.

No tocante às vazões simuladas a cada 4 horas identificou-se uma melhor representação dos picos de cheia e aumento das vazões em comparação com as médias diárias.

Em relação à simulação dos cenários com hipóteses formuladas devido às mudanças climáticas, verificou-se um aumento considerável nas vazões de pico dos eventos de cheia somente com a mudança do padrão das precipitações. Isso reforça a avaliação de que as cidades da bacia não estão suficientemente protegidas das inundações, requerendo-se principalmente a mudança de operação de Jucazinho para participar no processo de contenção de cheias.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A parte do trabalho desenvolvida em planilhas Excel se mostrou extremamente laboriosa e sujeita a erros de atualização de valores em células quando se compunha uma nova planilha para outro reservatório. Assim, recomenda-se que seja feito trabalho de programação complementar, bem como:

- Aplicação do CAWM IV para as demais bacias hidrográficas do semiárido de Pernambuco, buscando reforçar a consistência do modelo;
- Aplicação dos modelos para simular eventos de cheia com pequeno intervalo de tempo, utilizando os dados de estações telemétricas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas de Vulnerabilidade a inundações**. Brasília: ANA, 2014. 1 Atlas.

\_\_\_\_\_. **Atlas de Vulnerabilidade a inundações: Pernambuco**. Brasília: ANA, 2012. 1 Mapa.

AHN, J. M.; KWON, H. G.; YANG, D. S.; KIM, Y. Assessing environmental flows of coordinated operation of dams and weirs in the Geum River basin under climate change scenarios. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 912–925, 2018.

ALVES SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 46–57, 2010.

ALVES, F. H. B. **Sistema Avançado de Previsão de Enchentes: análises e melhorias aos modelos de previsão de chuva, hidrológico e hidrodinâmico**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017

ALVES, F.H.B.; CIRILO, J. A. Comparativo das Precipitações dos Eventos Extremos de 2010 E 2017 Ocorridos na Bacia do Rio Una em Pernambuco e Estimativa dos Efeitos de Barragem de Contenção de Cheias. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.

ANDREOLLI, I. Simulação de um Reservatório com Previsão de Vários Cenários de Demandas Hídricas em uma Bacia com Poucos Dados Hidrológicos. **Unisanta Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2013.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). 2017. **Boletim do clima: síntese climática**. v.5. n. 5. Recife: APAC, 48 p.

\_\_\_\_\_. Bacias hidrográficas - Rio Capibaribe. 2019a. Disponível em: <[http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page\\_id=5&subpage\\_id=14](http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=14)>. Acesso em: 3 jan. 2019.

\_\_\_\_\_. Bacias hidrográficas. 2019b. Disponível em: <[http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page\\_id=5](http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5)>. Acesso em: 17 jan. 2019.

ARAGÃO, J. P. G. de V. **USO E OCUPAÇÃO DAS MARGENS DO RIO CAPIBARIBE: vulnerabilidades socioambientais em áreas urbanas**. 2017. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ASSIS, J. M. O.; LACERDA, F. F.; SOBRAL, M. C. M. Análise de Detecção de Tendências no Padrão Pluviométrico na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 320–331, 2012.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 253–261, 2010.

BARROS, M. C. **Verificação do grau de proteção do plano de controle de enchentes do Governo Federal, Bacia do Rio Capibaribe PE-BR**. 1979. Dissertação (Mestrado em Ciências em Hidrologia Aplicada) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

CABRAL, S. L.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; LEMOS, W. E. D. Determinação do volume de espera do reservatório Castanhão-CE utilizando series sazonais de vazões. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

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

CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, E. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Estrutura Geral do Sistema de Suporte à Decisão. *In*: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011a, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais** [...] Ipojuca: IWRA, 2011a. p. 1-12.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ASFORA, M. C.; TORRES FILHO, C. O. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Aspectos Hidrológicos e Ações de Reconstrução. *In*: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011b, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais** [...]. Ipojuca: IWRA, 2011b. p. 1-14.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto alegre, 2001.

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

EDIJATNO; MICHEL, C. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. **Houille Blanche Revue Internationale De L'Eau**, v. 2, p. 113–121, 1989.

EDIJATNO; NASCIMENTO, N. O.; YANG. X.; MICHEL. Z. M. C. GR3J: A daily watershed model with three free parameters. **Hydrological Sciences Journal**, v. 44, n. 2, p. 263–277, 1999.

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

FEITOZA, M. A. B. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 2018. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil Campus Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS. Pernambuco de A-Z: Enchentes. 2019. Disponível em: <<https://www.pe-az.com.br/o-estado/fenomenos-naturais/1400-enchentes>>. Acesso em: 7 jan. 2018.

FREEZE, R. A.; HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. **Journal of Hydrology**, v. 9, p. 237–258, 1969.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1326-1350, 2005.

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

INMET. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010 Evaporação Total (Evaporímetro de Piché). 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 1 fev. 2019.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica ego**. 2011. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LIMA, M. C. G.; SÁ, S. M. F.; SOUZA, W. M.; SANTOS, T. E. M. Impactos gerados e a gestão da bacia do rio Capibaribe-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 03, n. 01, p. 75–85, 2018.

LONDE, L. R.; COUTINHO, M. P.; GREGÓRIO, L. T.; SANTOS, L. B. L.; SORIANO, E. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 133–152, 2014.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F.; CONEJO, J. G. Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 3., 1981, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABRH, 1981. p. 42-62.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 308–322, 2009.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e seus efeitos sobre a Biodiversidade. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007, 163p.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades. **Revista de ciências ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012.

MEDEIROS, M. J. Diagnóstico da ocorrência de inundações no Brasil como ferramenta de planejamento: O Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: ABRH, 2011. p. 1-11.

MELO, H. A. **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Revista Ampliada., 2013.

NASCIMENTO, N. O. **Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant**. 2011. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas do Ambiente) – Centro de Ensino e Pesquisa para a gestão dos recursos naturais e do ambiente, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée, 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 10, p. 282–290, 1970.

NASONOVA, O. N. Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 2. Comparison with hydrological models. **Water Resources**, v. 38, n. 3, p. 274–283, 2011

NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. L.; SANTOS, C. A. C.; Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 171-180, 2015.

PERNAMBUCO. Secretaria Infraestrutura e Recursos Hídricos (SIRH). Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). **Chuvas e Enchentes Ocorridas em Junho de 2010**. Recife: 2010a. 7p. Nota Técnica.

\_\_\_\_\_. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca** (Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010b, 339p.

\_\_\_\_\_. Secretaria Infraestrutura e Recursos Hídricos (SIRH). **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe** (Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010c, 389p.

PERRIN, C. **Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit**. 2004. Tese (Doutorado em Mecânica dos meios geofísicos e ambientais) – École Doctorale Terre, Univers et Environnement, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2004.

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

RIBEIRO NETO, A.; SCOTT, C. A.; LIMA, E. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A. Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate-induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin-Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p. 3449–3459, 2014.

ROBERTO, P. Cheia de 75 em Recife-PE. 2014. Disponível em: <<http://blogdossantosbaby.blogspot.com/2014/02/cheia-de-75-em-recife-pe.html>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

ROCHA, E. R. L.; CÉZAR, M. C. M. Balanço Hídrico do Reservatório do Rio Descoberto. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: ABRH, 2015. p. 1-8.

SANTOS, F. M.; OLIVEIRA, R. P.; MAUAD, F. F. Lumped versus Distributed Hydrological Modeling of the Jacaré-Guaçu Basin, Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 8, p.1-13, 2018.

SARAIVA, I; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 115–125, 2011

SILVA, R. O. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 579–589, 2017.

SILVA, V. S. V. **Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E RECURSOS HÍDRICOS (SIRH). Controle De Cheias: 2011. Disponível em: <[http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com\\_content&view=article&id=327:barragens-de-contencao-de-cheias](http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=327:barragens-de-contencao-de-cheias)>. Acesso em: 17 jan. 2019.

SOUZA, W. M. **Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-pe**. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

STUDART, T. M. C. Notas de Aula - Hidrologia Aplicada. 2004. (Apostila).

TODINI, E. Hydrological catchment modelling: Past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468–482, 2007.

TSOU, M.; WHITTEMORE, D. O. User Interface for Ground-water Modeling: ArcView Extension. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 06, n. 03, p. 251–257, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2012

\_\_\_\_\_. Histórico do desenvolvimento dos modelos hidrológicos. 2010a. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/historico-do-desenvolvimento-dos-modelos-hidrologicos/>. Acesso em: 23 jan. 2019.

\_\_\_\_\_. Modelos hidrológicos distribuídos. 2010b. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>. Acesso em: 21 jan. 2019.

\_\_\_\_\_. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS Editora – ABRH., 2005.

USACE. **HEC-ResSim Reservoir System Simulation: User's Manual**. Version 3.1. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2013. 556p.

VALERIANO, M. M. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS **TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS**. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia; São José dos Campos, 2008. 75p. Disponível em: <http://mtcm16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf> Acesso em: 26 dez. 2018.

VIRÃES, M. V. **Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro**. 2018. Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Recife, 2018.

## APÊNDICE A - ALGORITMO CAWM IV

```

import pandas as pd
import csv
import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt

print("Bem-vindo ao CAWM versão 4.0 ")

path_par = r'dados\parametros_de_entrada.csv'
parametros = pd.read_csv(path_par,float_precision='high')

A = parametros.loc[0,'Valores']

Ks = parametros.loc[1,'Valores'] #Ks
p = parametros.loc[3,'Valores'] #p
SUBmax = parametros.loc[4,'Valores'] #SUBmax
b = parametros.loc[2,'Valores'] #b = 5/3 Parâmetro não calibrável
T = parametros.loc[6,'Valores'] # intervalo de tempo em segundos
n = parametros.loc[7,'Valores'] #n
c = parametros.loc[8,'Valores'] #c
Be = parametros.loc[9,'Valores'] #B - largura equivalente
Lt = parametros.loc[10,'Valores'] #Comprimento do rio principal até o ponto estudado
l = parametros.loc[11,'Valores'] #Inclinação do rio
a = parametros.loc[12,'Valores'] #<--multiplicador da taxa de evapotranspiração a
extrair do solo

k = (T/n)*((c**2*A**2/Be**2/Lt**5)**(1/3))*l**0.5
print(k)

def filter_nan(sim, obs):
    if sim.isnull().sum() >= 1 or obs.isnull().sum() >= 1:

```

```

    obs.isnull()
    obs.fillna(0, inplace=True)
    sim.isnull()
    sim.fillna(0, inplace=True)
    return sim, obs
else:
    pass

def NS(sim, obs):
    filter_nan(sim, obs)
    return 1 - sum((sim - obs) ** 2) / sum((obs - o_med) ** 2)

def Rsquared():

    f_termo = sum((simulado - s_med) * (observado1 - o_media))
    s_termo = (sum((simulado - s_med) ** 2) * sum((observado1 - o_media) ** 2)) ** (1
/ 2)
    rquad = (f_termo / s_termo) ** 2
    return rquad

def evap_inicial(frame):
    if (frame.loc[i-1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']>= frame.loc[i,'evaporacao']):
        return frame.loc[i, 'evaporacao']
    else:
        return frame.loc[i-1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']

def ret_corrige():
    if(frame.loc[i,'retencao']> 0):
        return 0
    else:
        return frame.loc[i,'retencao']

def reserv_solo():
    if i == 1:
        return parametros.loc[5,'Valores']

```

```

else:
    return frame.loc[i-1,'reserv_solo_corrige']
def reserv_solo_corrige():
    return max(frame.loc[i,'Solo']+frame.loc[i,'rec_solo']-frame.loc[i,'rec_rio'],0)
def RE():
    E=(1-math.exp(-
a*(frame.loc[i,'reserv_solo']/SUBmax)))*frame.loc[i,'evap_n_atendida']
    return min(frame.loc[i,'evap_n_atendida'],frame.loc[i,'reserv_solo'],E)

def C():
    if (frame.loc[i,'S1']<=0):
        return 0
    else:
        return min(k*frame.loc[i,'S1']**b,frame.loc[i,'S1'])
def Ps():
    Pn = frame.loc[i,'chuva_media']-frame.loc[i,'evap_inicial']
    hiperb = np.tanh(Pn/SUBmax)
    Sub = frame.loc[i,'reserv_solo']/SUBmax
    termo1 = SUBmax*(1-Sub**2)*hiperb
    termo2 = 1+Sub*hiperb
    Ps = termo1/termo2
    return max(Ps,0)
def rec_rio():
    return Ks * frame.loc[i, 'Solo']

def zerolistmaker(n):
    listofzeros = [float(0)] * n
    return listofzeros
def solo(frame):
    return max(frame.loc[i, 'reserv_solo']-frame.loc[i, 'RE'], 0)
def perdas():
    return min(p * (frame.loc[i, 'S2'] ** 1.5), frame.loc[i, 'S2'])

```

```

frame = pd.DataFrame()
#caminho do arquivo de vazao
path_vazao =r'dados\vazao.csv'
#caminho do arquivo de chuva
path_chuva =r'dados\precipitacao.csv'
#caminho do arquivo de evaporação
path_evap =r'dados\evaporacao.csv'
diretorio_resultados =r'resultados'

#cria um DataFrame vazio
#lendo o arquivo de vazao
vazao = pd.read_csv(path_vazao,float_precision='high')
#lendo o arquivo de chuva
chuva = pd.read_csv(path_chuva, usecols=['chuva_media'],float_precision='high')
#concatena as colunas de vazao e chuva em um mesmo dataframe
frame = pd.concat([vazao, chuva],axis=1)
frame['mes'] = pd.DatetimeIndex(frame['data']).month
print("Arquivos de chuva e vazão lidos com sucesso.")
#cria um dicionario com o arquivo de evaporação
with open('dados\evaporacao.csv', mode='r') as infile:
    reader = csv.reader(infile)
    mydict = {int(rows[0]):float(rows[1]) for rows in reader}
print("Arquivo de evaporação lido com sucesso.")
#adiciona uma nova coluna no dataframe com os valores de evaporação
frame['evaporacao'] = frame['mes'].map(mydict)

n = len(frame.columns) #numero de colunas do dataframe

frame.loc[-1] = zerolistmaker(n)
frame.index = frame.index+1
frame = frame.sort_index()

frame['evap_inicial'] = ""

```

```
frame.loc[0,'evap_inicial'] = float(0)
frame['retencao'] = ""
frame.loc[0,'retencao'] = float(0)
frame['evap_n_atendida'] = ""
frame.loc[0,'evap_n_atendida'] = float(0)
frame['ret_corrige'] = ""
frame.loc[0,'ret_corrige'] = float(0)
frame['escoamento'] = ""
frame.loc[0,'escoamento'] = float(0)
frame['reserv_solo'] = ""
frame.loc[0,'reserv_solo'] = float(0)
frame['S1'] = ""
frame.loc[0,'S1'] = float(0)
frame['RE'] = ""
frame.loc[0,'RE'] = float(0)
frame['Solo'] = ""
frame.loc[0,'Solo'] = float(0)
frame['C'] = ""
frame.loc[0,'C'] = float(0)
frame['S2'] = ""
frame.loc[0,'S2'] = float(0)
frame['vazao_calc'] = ""
frame.loc[0,'vazao_calc'] = float(0)
frame['Ps'] = ""
frame.loc[0,'Ps'] = float(0)
frame['rec_solo'] = ""
frame.loc[0,'rec_solo'] = float(0)
frame['rec_rio'] = ""
frame.loc[0,'rec_rio'] = float(0)
frame['perdas'] = ""
frame.loc[0,'perdas'] = float(0)
frame['S4'] = ""
frame.loc[0,'S4'] = float(0)
```

```

frame['reserv_solo_corrige'] = ""
frame.loc[0,'reserv_solo_corrige'] = float(0)
for i in range(1,len(frame)):
    print(i)
    frame.loc[i,'evap_inicial'] = evap_inicial(frame)
    frame.loc[i,'retencao'] = max(frame.loc[i-1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']-
frame.loc[i,'evap_inicial'],0)
    frame.loc[i,'evap_n_atendida'] = frame.loc[i,'evaporacao']-frame.loc[i,'evap_inicial']
    frame.loc[i,'ret_corrige'] = ret_corrige()
    frame.loc[i, 'reserv_solo'] = reserv_solo()
    frame.loc[i, 'Ps'] = Ps()
    frame.loc[i, 'rec_solo'] = frame.loc[i, 'Ps']
    frame.loc[i,'escoamento'] = frame.loc[i,'chuva_media']-frame.loc[i,'evap_inicial']-
frame.loc[i,'rec_solo']
    frame.loc[i, 'RE'] = RE()
    frame.loc[i, 'Solo'] = solo(frame)
    frame.loc[i, 'rec_rio'] = rec_rio()
    frame.loc[i, 'S1'] = frame.loc[i - 1, 'S4'] + frame.loc[i, 'escoamento'] + frame.loc[i,
'rec_rio']
    frame.loc[i,'C'] = C()
    frame.loc[i,'S2'] =frame.loc[i,'S1']-frame.loc[i,'C']
    frame.loc[i,'vazao_calc'] = (frame.loc[i,'C']/1000)*(A*1000000/86400)
    frame.loc[i,'perdas'] = perdas()
    frame.loc[i,'S4'] = frame.loc[i,'S2'] - frame.loc[i,'perdas']
    frame.loc[i,'reserv_solo_corrige'] = reserv_solo_corrige()

frame.to_csv(diretorio_resultados+'/CAWM_IV.csv', float_format='%.20f')

print('Arquivo do balanço hídrico criado.')
print('Preparando gráficos do período total')

chuva2 = -1*frame['chuva_media']

```

```
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)

Ins1 = ax.plot(frame.index,frame['vazao'],label='Qobs m³/s',color='red')
Ins2 = ax.plot(frame.index,frame['vazao_calc'],label='Qcalc m³/s',color='blue')
ax2 = ax.twinx()
Ins3 = ax2.plot(frame.index,chuva2,label='chuva',color='green')

Ins = Ins1+Ins2+Ins3
labs = [l.get_label() for l in Ins]
ax.legend(Ins,labs,loc = 0)

#Estabelece os intervalos dos eixos
ax2.set_yticks(np.arange(-1000,0,100))
ax.set_yticks(np.arange(0,800,100))
ax.set_xticks(np.arange(0,len(frame),500))

#Insere nomes nos eixos
ax.set_xlabel('Dias corridos')
ax.set_ylabel('Vazao')
ax2.set_ylabel('Chuva')

#Insere um título no gráfico
plt.title('CAWM_IV: Período Total')
plt.rcParams['figure.figsize'] = (25,10)
plt.show()#Mostrando gráfico
plt.savefig(diretorio_resultados+'/Gráfico_período_total.png', bbox_inches='tight')
```

## APÊNDICE B - ALGORITMO ÍNDICES ESTATÍSTICOS

```

from statistics import mean
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_pdf import PdfPages

df3 = pd.DataFrame()

def filter_nan(sim, obs):
    if sim.isnull().sum() >= 1 or obs.isnull().sum() >= 1:
        obs.isnull()
        obs.fillna(0, inplace=True)
        sim.isnull()
        sim.fillna(0, inplace=True)
        return sim, obs
    else:
        pass

def NS(sim, obs):
    filter_nan(sim, obs)
    return 1 - sum((sim - obs) ** 2) / sum((obs - o_med) ** 2)

def Rsquared():

    f_termo = sum((simulado - s_med) * (observado1 - o_media))
    s_termo = (sum((simulado - s_med) ** 2) * sum((observado1 - o_media) ** 2)) ** (1
/ 2)
    rquad = (f_termo / s_termo) ** 2
    return rquad

```

```
s = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',usecols=['vazao_calc'])
o = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',usecols=['vazao'])
df = pd.concat([o, s], axis=1)
```

```
vazao_obs = df['vazao']
```

```
vazao_obs_corrige = vazao_obs.replace(np.nan, 0, regex=True)
o_med = mean(vazao_obs_corrige)
```

```
inter = pd.read_csv(r'dados\intervalo.csv')
qtde_i = len(inter)
```

```
for i in range(1,qtde_i):
```

```
    x = 0
```

```
    while x < qtde_i:
```

```
        sim = df.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'vazao_calc']
```

```
        obs = df.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'vazao']
```

```
        NS(sim,obs)
```

```
        df3.loc[x+1,'Nash'] = NS(sim,obs)
```

```
        x = x + 1
```

```
s = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',
                usecols=['vazao_calc'])
```

```
o = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',
                usecols=['vazao'])
```

```
df = pd.concat([o, s], axis=1)
```

```
x = 0
```

```
while x < qtde_i:
```

```
    simulado = df.loc[inter.loc[x,'inicio']:inter.loc[x,'fim'],'vazao_calc']
```

```
    observado = df.loc[inter.loc[x,'inicio']:inter.loc[x,'fim'],'vazao']
```

```

s_med = mean(simulado)
o_media = mean(observado.dropna())
observado1 = observado.replace(np.nan, 0, regex=True)
df3.loc[x+1,'R^2'] = Rsquared()
x = x + 1

```

```

s = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',
               usecols=['vazao_calc'])
o = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',
               usecols=['vazao'])

```

```

df2 = pd.concat([o, s], axis=1)
df2['vazao'] = df2['vazao'].replace(np.nan,0,regex=True)
df2['soma_abs'] = abs(df2['vazao_calc']-df2['vazao'])

```

```

x = 0
while x <qtde_i:
    soma_abs1 = sum(df2.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'soma_abs'])
    df3.loc[x+1,'Soma_abs'] = soma_abs1
    x = x + 1

```

```
df3.to_csv(r'resultados/Resultados_estatisticos.csv', float_format='%.4f')
```

```

s = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',usecols=['vazao_calc'])
o = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',usecols=['vazao'])
chuva =pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv',usecols=['chuva_media'])
df4 = pd.concat([o, s,chuva], axis=1)
pp = PdfPages(r'resultados/Graficos_sem_otimizacao.pdf')
x = 0
while x<qtde_i:
    simulado = df4.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'vazao_calc']
    observado = df4.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'vazao']
    chuva1 = df4.loc[inter.loc[x, 'inicio']:inter.loc[x, 'fim'], 'chuva_media']

```

```

df5 = pd.concat([simulado,observado,chuva1], axis=1)
chuva2 = -1 * df5['chuva_media']
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
lns1 = ax.plot(df5.index, df5['vazao'], label='Qobs m³/s', color='red')
lns2 = ax.plot(df5.index, df5['vazao_calc'], label='Qcalc m³/s', color='blue')
ax2 = ax.twinx()
lns3 = ax2.plot(df5.index, chuva2, label='chuva', color='green')
lns = lns1 + lns2 + lns3
labs = [l.get_label() for l in lns]
ax.legend(lns, labs, loc=0)

# Estabelece os intervalos dos eixos
ax2.set_yticks(np.arange(-1000, 0, 100))
ax.set_yticks(np.arange(0, 900, 100))
ax.set_xticks(np.arange(inter.loc[x,'inicio'],inter.loc[x,'fim'],50))

# Insere nomes nos eixos
ax.set_xlabel('Dias corridos')
ax.set_ylabel('Vazao')
ax2.set_ylabel('Chuva')

plt.title('CAWM IV: intervalo ' + str(inter.loc[x, 'inicio']) + ' a ' + str(inter.loc[x, 'fim']))
pp.savefig(bbox_inches='tight')
x = x+1

pp.close()

```

## APÊNDICE C - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO

```

import pandas as pd
import numpy as np
import math
from statistics import mean
import scipy.optimize as opt

frame = pd.DataFrame()
path_par = r'dados\parametros_de_entrada.csv'
parametros = pd.read_csv(path_par,float_precision='high')

A = parametros.loc[0,'Valores']
#estimativas iniciais das variáveis de decisão
x0 = np.zeros(3)
x0[0]= parametros.loc[1,'Valores'] #Ks
x0[1]= parametros.loc[3,'Valores'] #p
x0[2]= parametros.loc[4,'Valores'] #SUBmax

b = parametros.loc[2,'Valores'] #b = 5/3 Parâmetro não calibrável
T = parametros.loc[6,'Valores'] # intervalo de tempo em segundos
n = parametros.loc[7,'Valores'] #n
c = parametros.loc[8,'Valores'] #c
Be = parametros.loc[9,'Valores'] #B - largura equivalente
Lt = parametros.loc[10,'Valores'] #Comprimento do rio principal até o ponto estudado
l = parametros.loc[11,'Valores'] #Inclinação do rio
a = parametros.loc[12,'Valores'] #<--multiplicador da taxa de evapotranspiração a
extrair do solo

k = (T/n)*((c**2*A**2/Be**2/Lt**5)**(1/3))*l**0.5

#Ler os resultados estatísticos
est = pd.read_csv(r'resultados\Resultados_estatisticos.csv')

```

```

#Ler o intervalo correspondente ao Nash máximo
n_inter = est.loc[est['Nash'] == max(est['Nash'],'Unnamed: 0')]

#Ler o arquivo em que se encontra o período
periodo = pd.read_csv(r'dados\intervalo.csv')

#Ler o arquivo em que se encontra o balanço hídrico sem calibração
CAWM = pd.read_csv(r'resultados\CAWM_IV.csv')

def obj_function(x):
    def filter_nan(sim, obs):
        if sim.isnull().sum() >= 1 or obs.isnull().sum() >= 1:
            obs.isnull()
            obs.fillna(0, inplace=True)
            sim.isnull()
            sim.fillna(0, inplace=True)
            return sim, obs
        else:
            pass

    def NS(sim, obs):
        filter_nan(sim, obs)
        return 1 - sum((sim - obs) ** 2) / sum((obs - o_med) ** 2)

    def Rsquared():
        f_termo = sum((simulado - s_med) * (observado1 - o_media))
        s_termo = (sum((simulado - s_med) ** 2) * sum((observado1 - o_media) ** 2)) **
(1 / 2)
        rquad = (f_termo / s_termo) ** 2
        return rquad

```

```

def evap_inicial(frame):
    if (frame.loc[i-1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']>=
frame.loc[i,'evaporacao']):
        return frame.loc[i, 'evaporacao']
    else:
        return frame.loc[i-1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']
def ret_corrige():
    if(frame.loc[i,'retencao']> 0):
        return 0
    else:
        return frame.loc[i,'retencao']
def reserv_solo():
    if i == 1:
        return parametros.loc[5,'Valores']
    else:
        return frame.loc[i-1,'reserv_solo_corrige']
def reserv_solo_corrige():
    return max(frame.loc[i,'Solo']+frame.loc[i,'rec_solo']-frame.loc[i,'rec_rio'],0)
def RE(x):
    E = (1 - math.exp(-
a*(frame.loc[i,'reserv_solo']/x[2]))) * frame.loc[i,'evap_n_atendida']
    return min(frame.loc[i,'evap_n_atendida'],frame.loc[i,'reserv_solo'],E)

def C():
    if (frame.loc[i,'S1']<=0):
        return 0
    else:
        return min(k*frame.loc[i,'S1']**b,frame.loc[i,'S1'])
def Ps(x):
    Pn = frame.loc[i,'chuva_media']-frame.loc[i,'evap_inicial']
    hiperb = np.tanh(Pn/x[2])
    Sub = frame.loc[i,'reserv_solo']/x[2]
    termo1 = x[2]*(1-Sub**2)*hiperb

```

```

    termo2 = 1+Sub*hiperb
    Ps = termo1/termo2
    return max(Ps,0)
def rec_rio(x):
    return x[0] * frame.loc[i, 'Solo']

def zerolistmaker(n):
    listofzeros = [float(0)] * n
    return listofzeros
def solo(frame):
    return max(frame.loc[i, 'reserv_solo']-frame.loc[i, 'RE'], 0)
def perdas(x):
    return min(x[1] * (frame.loc[i, 'S2'] ** 1.5), frame.loc[i, 'S2'])

intervalo1 = int(periodo.loc[n_inter - 1, 'inicio'])-1
intervalo2 = int(periodo.loc[n_inter - 1, 'fim'])
#intervalo3 = intervalo2 - 1

obs = CAWM.loc[intervalo1:intervalo2, 'vazao']
chuva = CAWM.loc[intervalo1:intervalo2, 'chuva_media']
evap = CAWM.loc[intervalo1:intervalo2, 'evaporacao']

frame = pd.concat([obs, chuva, evap], axis=1)

frame['evap_inicial'] = ""
frame.loc[intervalo1,'evap_inicial'] = CAWM.loc[intervalo1,'evap_inicial']
frame['retencao'] = ""
frame.loc[intervalo1,'retencao'] = CAWM.loc[intervalo1,'retencao']
frame['evap_n_atendida'] = ""
frame.loc[intervalo1,'evap_n_atendida'] = CAWM.loc[intervalo1,'evap_n_atendida']
frame['ret_corrige'] = ""
frame.loc[intervalo1,'ret_corrige'] = CAWM.loc[intervalo1,'ret_corrige']

```

```

frame['escoamento'] = ""
frame.loc[intervalo1,'escoamento'] = CAWM.loc[intervalo1,'escoamento']
frame['reserv_solo'] = ""
frame.loc[intervalo1,'reserv_solo'] = CAWM.loc[intervalo1,'reserv_solo']
frame['S1'] = ""
frame.loc[intervalo1,'S1'] = CAWM.loc[intervalo1,'S1']
frame['RE'] = ""
frame.loc[intervalo1,'RE'] = CAWM.loc[intervalo1,'RE']
frame['Solo'] = ""
frame.loc[intervalo1,'Solo'] = CAWM.loc[intervalo1,'Solo']
frame['C'] = ""
frame.loc[intervalo1,'C'] = CAWM.loc[intervalo1,'C']
frame['S2'] = ""
frame.loc[intervalo1,'S2'] = CAWM.loc[intervalo1,'S2']
frame['vazao_calc'] = ""
frame.loc[intervalo1,'vazao_calc'] = CAWM.loc[intervalo1,'vazao_calc']
frame['Ps'] = ""
frame.loc[intervalo1,'Ps'] = CAWM.loc[intervalo1,'Ps']
frame['rec_solo'] = ""
frame.loc[intervalo1,'rec_solo'] = CAWM.loc[intervalo1,'rec_solo']
frame['rec_rio'] = ""
frame.loc[intervalo1,'rec_rio'] = CAWM.loc[intervalo1,'rec_rio']
frame['perdas'] = ""
frame.loc[intervalo1,'perdas'] = CAWM.loc[intervalo1,'perdas']
frame['S4'] = ""
frame.loc[intervalo1,'S4'] = CAWM.loc[intervalo1,'S4']
frame['reserv_solo_corrige'] = ""
frame.loc[intervalo1,'reserv_solo_corrige'] =
CAWM.loc[intervalo1,'reserv_solo_corrige']

for i in range(intervalo1+1,intervalo2+1):
    frame.loc[i,'evap_inicial'] = evap_inicial(frame)

```

```

    frame.loc[i,'retencao'] = max(frame.loc[i-
1,'ret_corrige']+frame.loc[i,'chuva_media']-frame.loc[i,'evap_inicial'],0)
    frame.loc[i,'evap_n_atendida'] = frame.loc[i,'evaporacao']-
frame.loc[i,'evap_inicial']
    frame.loc[i,'ret_corrige'] = ret_corrige()
    frame.loc[i,'reserv_solo'] = reserv_solo()
    frame.loc[i,'Ps'] = Ps(x)
    frame.loc[i,'rec_solo'] = frame.loc[i,'Ps']
    frame.loc[i,'escoamento'] = frame.loc[i,'chuva_media']-frame.loc[i,'evap_inicial']-
frame.loc[i,'rec_solo']
    frame.loc[i,'RE'] = RE(x)
    frame.loc[i,'Solo'] = solo(frame)
    frame.loc[i,'rec_rio'] = rec_rio(x)
    frame.loc[i,'S1'] = frame.loc[i-1,'S4'] + frame.loc[i,'escoamento'] + frame.loc[i,
'rec_rio']
    frame.loc[i,'C'] = C()
    frame.loc[i,'S2'] = frame.loc[i,'S1']-frame.loc[i,'C']
    frame.loc[i,'vazao_calc'] = (frame.loc[i,'C']/1000)*(A*1000000/86400)
    frame.loc[i,'perdas'] = perdas(x)
    frame.loc[i,'S4'] = frame.loc[i,'S2'] - frame.loc[i,'perdas']
    frame.loc[i,'reserv_solo_corrige'] = reserv_solo_corrige()

s = frame.loc[intervalo1+1:intervalo2+1,'vazao_calc']
o = obs.loc[intervalo1+1:intervalo2+1]
vazao_obs = CAWM.loc[1:,'vazao']
vazao_obs_corrige = vazao_obs.dropna()
o_med = mean(vazao_obs_corrige)
Nash = NS(s, o)

simulado = frame.loc[intervalo1+1:intervalo2+1,'vazao_calc']
observado = obs.loc[intervalo1+1:intervalo2+1]
s_med = mean(simulado)
o_media = mean(observado.dropna())

```

```
observado1 = observado.replace(np.nan, 0, regex=True)
Rsqr = Rsquared()
```

```
sim = frame.loc[intervalo1+1:intervalo2+1,'vazao_calc']
obs = obs.loc[intervalo1+1:intervalo2+1]
obs = obs.replace(np.nan, 0, regex=True)
soma_abs= sum(abs(s-o))
```

```
obj_function = (soma_abs/Nash)*1000000
return obj_function
```

```
b1 = (0, 1)
b2 = (10, None)
bnds = (b1, b1, b2)
```

```
final_obj_function = opt.minimize(fun=obj_function, x0=x0, method='TNC',
bounds=bnds)
```

```
print(final_obj_function)
```

```
file = open("resultados/otimizacao.txt", "w")
file.write(str(final_obj_function))
file.close()
```