

ÁTILA MATHEUS BEZERRA DA SILVA

VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROGRÁFICO CAWM ATRAVÉS DA ANÁLISE DE
VAZÕES DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO AGreste MERIDIONAL.
ESTUDO DE CASO: BACIAS DOS RIOS MUNDAÚ E PARAÍBA DO MEIO.

Caruaru
2018

ÁTILA MATHEUS BEZERRA DA SILVA

VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROGRÁFICO CAWM ATRAVÉS DA ANÁLISE DE
VAZÕES DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO AGreste MERIDIONAL.
ESTUDO DE CASO: BACIAS DOS RIOS MUNDAÚ E PARAÍBA DO MEIO.

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco (UFPE), como requisito
parcial para obtenção do grau de bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

Caruaru

2018

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4-1242

S586v Silva, Átila Matheus Bezerra da.
Validação do modelo hidrológico CAWM através da análise de vazões das bacias hidrográficas do Agreste Meridional. Estudo de caso: Bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. / Átila Matheus Bezerra da Silva. – 2018.
100f. ; il. : 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências

1. Bacias hidrográficas. 2. Modelagem. 3. Hidrologia. I. Cirilo, José Almir (Orientador).

ÁTILA MATHEUS BEZERRA DA SILVA

VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROGRÁFICO CAWM ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VAZÕES DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO AGreste MERIDIONAL. ESTUDO DE CASO: BACIAS DOS RIOS MUNDAÚ E PARAÍBA DO MEIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste-CAA, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato **APROVADO** com nota _____.

Caruaru, 06 de setembro de 2018.

Banca examinadora:

Prof. Dr José Almir Cirilo: _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra: _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto: _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador Externo)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina de TCC)

RESUMO

O presente trabalho trata do estudo da modelagem de vazões, tendo como estudo de caso as bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. Foi utilizado para isso o modelo hidrológico CAWM III – Campus Agreste Watershed Model, junto com a utilização de ferramentas de geoprocessamento do software QGis, em toda extensão pernambucana das bacias. Como resultados do estudo, são apresentados gráficos comparativos das vazões observadas e calculadas nas bacias em questão e comparação com alguns resultados do modelo HEC-HMS para a mesma área. Uma característica marcante destas bacias está nos valores significativos de pluviosidade anual, que lhe conferem um aspecto divergente à microrregião inserida, o Agreste pernambucano. Outra é a elevada declividade das bacias, que dificulta a modelagem do escoamento. Os resultados obtidos com a execução do modelo hidrológico se mostraram satisfatórios, em especial para as sub-bacias dos rios Canhoto e Paraíba do Meio, que não constam com dados próprios de vazão. Os resultados obtidos para estas duas sub-bacias apresentaram, inclusive, resultados mais satisfatórios que a sub-bacia do rio Mundaú, que constava com dados próprios de vazão, apesar da carência de dados pluviométricos. O auxílio dos modelos MDT foram de grande importância para a obtenção dos parâmetros necessários para calibração do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Bacias hidrográficas; Modelagem; CAWM.

ABSTRACT

This work deals with the study of flow modeling, taking as a case study the basins of the Mundaú and Paraíba do Meio rivers. The hydrological model CAWM III - Campus Agreste Watershed Model was used for this purpose, along with the use of geoprocessing tools from the QGis software, throughout the Pernambuco extension of the referred basins. As results of the study are presented comparative graphs of the observed and calculated flows, as well as statistical parameters of the adjustment for the validation of the hydrological model in the basins in question and comparison with some results of the HEC-HMS model for the same area. A striking feature of these basins is the significant values of annual rainfall, which give to them a different aspect when compared with precipitation rates on the other parts of the semi-arid region, the Agreste of Pernambuco. Another is the high slope of the basins, which makes it difficult to model the flow. the results were considered very satisfactory. The results obtained with the execution of the hydrological model were satisfactory, especially for the sub-basins of the Canhoto and Paraíba do Meio rivers, which do not have their own flow data. The results obtained for these two sub-basins were even more satisfactory than the Mundaú river sub-basin, which had its own flow data, despite the lack of pluviometric data. The aid of the MDT models was of great importance to obtain the necessary parameters for calibration of the model.

KEYWORDS: River basins; Hydrologic modelling; CAWM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo hidrológico.....	16
Figura 2 – Precipitação convectiva.....	18
Figura 3 – Precipitação Frontal.	19
Figura 4 – Precipitação Orográfica.....	19
Figura 5 – Variação da temperatura oceânica sem El Niño (acima), e variação da temperatura oceânica com El Niño (abaixo).....	23
Figura 6 – Imagem realçada das Ondas de Leste de 2010.	26
Figura 7 – Municípios que tiveram 40% ou mais da população afetada.....	27
Figura 8 – Representação do modelo CAWM I.	34
Figura 9 – Representação do modelo CAWM II.....	34
Figura 10 – Representação do modelo CAWM III.	37
Figura 11 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.....	38
Figura 12 – Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	38
Figura 13 – Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	40
Figura 14 – Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.	41
Figura 15 – Perfil de declividade da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	42
Figura 16 – Comando de inserção da camada de mapas do Google.	43
Figura 17 – Área com representação das quadrículas.	44
Figura 18 – Agreste pernambucano com perfilamento laser aplicado. Cidade de Garanhuns destacada.....	45
Figura 19 – Marcação de contorno exterior à área de estudo.....	45
Figura 20 – Área de estudo após execução da ferramenta Remover Depressão do TauDEM.	47
Figura 21 – Área de estudo após execução da ferramenta Direção de Fluxo D8 do TauDEM.	48
Figura 22 – Grade de declividades da ferramenta Direção de Fluxo D8 do TauDEM.	48
Figura 23 – Área de estudo após execução da ferramenta Área de Contribuição D8 do TauDEM.	49
Figura 24 – Falhas por não integridade dos dados no ponto de exutório da bacia do rio Paraíba (ponto em cor).....	50

Figura 25 – Área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.	51
Figura 26 – Área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	52
Figura 27 – Definições para execução da ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM.	53
Figura 28 – Microbacias geradas pela ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM para sub-bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	54
Figura 29 – Rede de drenagem gerada pela ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM para sub-bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	54
Figura 30 – Traçado da mediatriz para os polígonos de Voronoi.	55
Figura 31 – Estações pluviométricas (em vermelho), segundo dados da ANA.	56
Figura 32 – Comando de execução da ferramenta Polígonos de Voronoi.	57
Figura 33 – Estações pluviométricas remanescentes.....	58
Figura 34 – Polígonos de Voronoi.	58
Figura 35 – Recorte da sobreposição dos polígonos de Voronoi sobre as sub-bacias.	59
Figura 36 – Representação da disposição dos dados específicos na planilha Excel. Dados pertencentes à bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.....	61
Figura 37 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 14/07/94 a 13/08/94 ($R^2=0,4183$ e $NS=0,6445$).	66
Figura 38 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 03/06/1996 a 23/06/1996 ($R^2 = 0,6619$ e $NS=-7,9241$).	66
Figura 39 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 23/07/1996 a 12/08/1996 ($R^2= 0,6443$ e $NS=0,6868$).	67
Figura 40 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 03/06/1998 a 23/07/1998 ($NS=-1,6001$).	67
Figura 41 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 08/05/2001 a 18/06/2001 ($R^2= 0,3725$ e $NS=-0,8814$).	68
Figura 42 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 11/06/2004 a 01/07/2004 ($R^2= 0,5082$ e $NS=0,1522$).	68
Figura 43 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 27/05/2005 a 16/06/2005 ($R^2= 0,7824$ e $NS=0,8161$).	69
Figura 44 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 01/05/2008 a 26/05/2008 ($R^2= 0,6602$ e $NS=0,7563$).	69
Figura 45 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 16/05/2009 a 05/06/2009 ($R^2= 0,2374$ e $NS=0,2082$).	70

Figura 46 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 23/06/2017 a 13/07/2017 ($R^2= 0,7869$ e $NS=0,6957$).	70
Figura 47 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 01/09/2017 a 21/09/2017 ($R^2= 0,4196$ e $NS=0,0534$).	71
Figura 48 – Comparação de resultado da modelagem através do modelo CAWM e do modelo HEC-HMS. Período entre os dias 30/07/00 e 15/08/00.....	72
Figura 49 – Comparação de resultado da modelagem através do modelo CAWM e do modelo HEC-HMS. Período entre os dias 26/05/05 e 12/06/05.....	72
Figura 50 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Evento 2010 (07/06/2010 a 20/06/2010).	73
Figura 51 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 14/07/98 a 13/08/98 ($R^2= 0,8793$ e $NS=0,8546$).	74
Figura 52 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 03/06/00 a 23/06/00 ($R^2= 0,9676$ e $NS=0,9205$).	74
Figura 53 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 23/07/00 a 12/08/00 ($R^2= 0,7665$ e $NS=0,7767$).	75
Figura 54 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 06/09/00 a 01/10/00 ($R^2= 0,7496$ e $NS=0,6835$).	75
Figura 55 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 03/06/02 a 23/07/02 ($R^2= 0,7986$ e $NS=0,8418$).	76
Figura 56 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 08/05/05 a 20/06/05 ($R^2= 0,6634$ e $NS=0,6797$).	76
Figura 57 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 05/08/09 a 14/09/09 ($R^2= 0,2865$ e $NS=0,4219$).	77
Figura 58 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 14/07/98 a 13/08/98 ($R^2=0,8746$ e $NS=0,8510$).	78
Figura 59 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 03/06/00 a 23/06/00 ($R^2=0,9629$ e $NS=0,9094$).	78
Figura 60 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 23/07/00 a 12/08/00 ($R^2=0,7302$ e $NS=0,7796$).	79
Figura 61 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 06/09/00 a 01/10/00 ($R^2=0,7521$ e $NS=0,6873$).	79
Figura 62 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 03/06/02 a 23/07/02 ($R^2=0,7883$ e $NS=0,8399$).	80

Figura 63 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 08/05/05 a 20/06/05 ($R^2=0,6481$ e $NS=0,6808$). 80

Figura 64 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 05/08/09 a 14/09/09 ($R^2=0,2962$ e $NS=0,4279$). 81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

CAWM – Modelo Hidrológico Centro do Agreste

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

GIS – Sistema de Informação Geográfica

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LAMEPE – Laboratório de Meteorologia do Estado de Pernambuco

MDT – Modelo Digital do Terreno

MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável

QGIS – Quantum Gis

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TAUDEM – Análise de Terreno Usando Modelos de Elevação Digitais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Motivação	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	15
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Conceitos básicos	16
2.1.1	<i>Precipitação</i>	17
2.1.1.1	<i>Formação de Precipitações</i>	17
2.1.1.2	<i>Precipitação Convectiva, de Convecção ou de Verão</i>	17
2.1.1.3	<i>Precipitação Frontal ou Ciclônica</i>	18
2.1.1.4	<i>Precipitações Orográficas</i>	19
2.1.2	<i>Evapotranspiração</i>	20
2.1.3	<i>Escoamento Superficial</i>	20
2.1.3.1	<i>Fatores Fisiográficos</i>	21
2.1.3.2	<i>Fatores Climáticos</i>	21
2.1.3.3	<i>Fatores de Natureza Antrópica</i>	21
2.1.4	<i>Infiltração</i>	22
2.2	Eventos Extremos	22
2.2.1	<i>Previsibilidade de Eventos Extremos</i>	24
2.2.2	<i>Evento 2010</i>	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Modelos Hidrológicos	29
3.1.1	<i>MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável</i>	31
3.1.2	<i>HEC-RAS e HEC-HMS</i>	32
3.1.3	<i>Modelos Hidrológicos de Poucos Parâmetros</i>	32
3.1.3.1	<i>Modelo Conceitual Chuva-Vazão CAWM</i>	33
3.2	Região de Estudo: Bacias Hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio	37

3.2.1	<i>Localização e hidrologia</i>	37
3.2.2	<i>Clima</i>	39
3.2.3	<i>Relevo</i>	39
3.3	Processamento de Dados Espaciais	42
3.3.1	<i>Configuração do software, inserção dos dados e definição da área</i>	43
3.3.2	<i>Ferramenta de análises hidrológicas TauDEM</i>	46
3.3.3	<i>Identificação e determinação do fator de área das Estações Pluviométricas necessárias</i>	55
3.3.4	<i>Configuração das Macros Auxiliares do CAWM</i>	60
3.3.5	<i>Calibragem do Modelo Hidrológico</i>	62
4	APLICAÇÕES E RESULTADOS	64
4.1	Bacia Hidrográfica do rio Mundaú	65
4.4.1	<i>Sub-bacia do rio Mundaú</i>	65
4.1.2	<i>Sub-bacia do rio Canhoto</i>	73
4.2	Bacia Hidrográfica do Paraíba do Meio	77
5	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICES A – DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ÁREA	85
	APÊNDICE B – UTILIZAÇÃO DAS MACROS	88

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade humana sempre esteve, desde seus primórdios, intimamente ligado com a proximidade aos corpos hídricos. Tal ligação trazia não somente benefícios pois, sabe-se através de documentos antigos que as águas acabavam por inundar determinadas áreas ocupadas por essas sociedades, obrigando-as a erguer moradias mais distantes, livrando-os das inundações.

Segundo Tucci (2007, p. 128):

As inundações são mais antigas que a existência do homem na Terra. A sociedade sempre procurou ficar perto dos rios para usá-los como transporte, obter água para seu consumo e mesmo dispor seus dejetos. As áreas ribeirinhas que correspondem ao leito maior geralmente são planas, propícias para o assentamento humano. Isto tem motivado a sua ocupação, principalmente quando a frequência de inundaçõa é baixa.

Sabe-se, através do estudo hidrológico, que eventos extremos ocorrem periodicamente. Quando a precipitação é intensa, a quantidade de água drenada pela bacia pode superar sua capacidade de descarga, resulta-se em inundações nas áreas ribeirinhas. Os problemas oriundos de tais inundações vão depender do grau de ocupações dessas áreas, não somente no local das chuvas, mas em todo o decorrer da bacia afetada.

Sabe-se atualmente que certas condições são mais propícias a ocorrências de inundações, sendo elas naturais ou artificiais. Mas, devido ao grande número de fatores que envolvem os fenômenos meteorológicos, é muito difícil conhecer o comportamento atmosférico a longo prazo.

Um agravante para situações de inundaçao tem-se observado nos últimos anos, onde é possível notar de uma forma mais nítida, se comparado ao século passado, o aumento na frequência de eventos extremos, não somente em quantidade, mas também em intensidade.

Na região Nordeste, mais especificamente nas bacias do rio Mundaú e Paraíba, áreas de estudo deste trabalho, registraram-se eventos excepcionais em 2000, 2010 e, mais recentemente, 2017. O evento de 2010 provocou uma grande devastação nos territórios de Pernambuco e Alagoas, em especial nas cidades localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Mundaú, Paraíba, Sirinhaém, Uma e Capibaribe. O Banco Mundial avaliou as perdas e danos gerados para a economia pernambucana em três bilhões de dólares.

Diante dessas catástrofes, foram iniciados estudos, obras e monitoramentos, por parte da União e dos governos estaduais, para tentar controlar os impactos das cheias. Para que os danos causados em tais situações possam ser limitados, o perfil hidrológico das bacias hidrográficas começou a ser analisado. Contudo, esses estudos não eliminarão todas as possibilidades de enchentes, mas ajudarão a minimizar suas consequências.

Assim, o presente trabalho propõe a validação do modelo hidrológico CAWM para as bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, através da análise de vazões das referidas bacias, tornando-o um modelo que possa ser utilizado como referencial para determinação de situações de inundações.

1.1 Justificativa

O trabalho se justifica em função dos eventos que repetidamente têm ocorrido nas bacias estudadas, com o agravante que não existem ainda obras para contenção das cheias nem estratégias suficientes para gerar os alertas e proteger a população na ocorrência de eventos extremos.

1.2 Motivação

Tendo em vista o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos no agreste meridional, este trabalho foi elaborado com o intuito de calibrar o modelo hidrológico CAWM, de modo a adquirir dados e definir parâmetros confiáveis para aplicação do modelo à área estudada, podendo tais dados e parâmetros serem utilizados como referência em futuros estudos.

Outro fator importante recai na falta de redes de monitoramento na quantidade suficiente para o monitoramento, conforme identifica o presente estudo. Assim, faz-se necessária a utilização de modelos hidrológicos mais simples, que não tenham tanta dependência de muitos parâmetros, e que ainda assim, se possa gerar resultados suficientemente confiáveis para o planejamento de ações nas bacias.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho apresenta como objetivo principal a aplicação do modelo hidrológico CAWM III integrado ao software de geoprocessamento QGis para modelagem de vazões em bacias hidrológicas. O estudo foi realizado nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analisar a qualidade da rede de monitoramento hidrológico nas bacias de estudo;
2. Utilizar a ferramenta TauDEM para delimitação das bacias, determinando a malha hídrica, bem como o fluxo de escoamento;
3. Calibrar e validar o modelo hidrológico CAWM III para as bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos Básicos

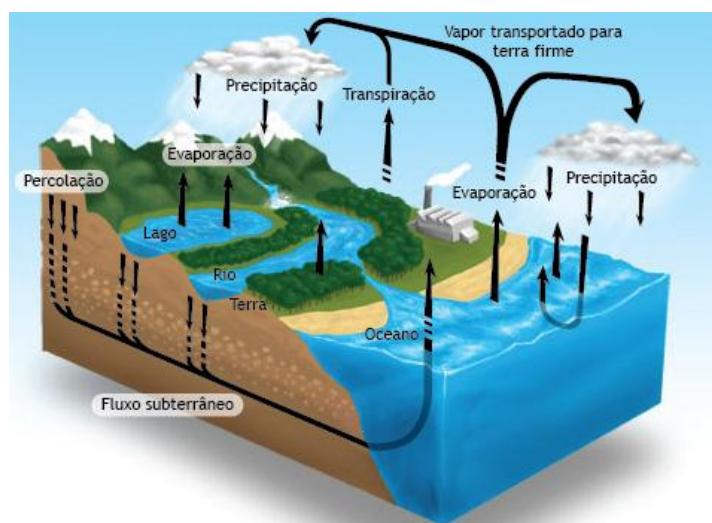
No planeta, a água pode ser encontrada nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. O processo pelo qual ela passa alterna entre os estados físicos, simultaneamente com sua movimentação pelo globo terrestre, é chamado de ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é um sistema gigantesco, alimentado pela energia solar. Neste ciclo, com o calor proveniente do Sol, a água evapora, deixando o ar úmido. Os ventos frequentemente transportam a umidade atmosférica através de grandes distâncias antes que haja a formação de nuvens e, consequentemente, precipitação.

Caso a precipitação ocorra no oceano, já há a conclusão do ciclo e a água já está pronta para recomeçá-lo. Quando a água precipita no continente, pode seguir várias etapas. Uma porção da água acaba por infiltrar no solo, parte deságua em lagos e rios. Quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, há escoamento superficial, que é direcionado para rios e lagos.

Grande parte do escoamento superficial, e mesmo parte da infiltração acaba evaporando. Em adição a essa evaporação do solo, lagos e rios, outra parte é absorvida pela vegetação, que a libera para superfície através da transpiração.

Figura 1 – Ciclo hidrológico.



A esquematização da Figura 1 mostra o balanço hídrico, ou seja, o balanço de entrada e saída de água na superfície terrestre.

2.1.1 *Precipitação*

Segundo Tucci (2009):

Precipitação é entendida em hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitação. O que diferencia essas formas de precipitação é o estado em que a água se encontra.

Na hidrologia, a chuva é tida como o tipo de precipitação mais importante, devido a sua capacidade de gerar escoamento. A ocorrência de precipitações são processos aleatórios que, devido ao grande número de variáveis que influenciam, não se permite uma previsão de longa data.

2.1.1.1 *Formação de Precipitações*

O principal elemento para a formação de precipitações é a umidade atmosférica. O vapor começa a se acumular, e quando há o resfriamento do ar à temperatura do ponto de saturação do vapor, acontece a condensação.

O processo de resfriamento do ar é adiabático, pois não ocorre perda de calor para o meio. Assim, a causa básica para a ocorrência de chuvas é a ascensão de uma massa de ar úmida.

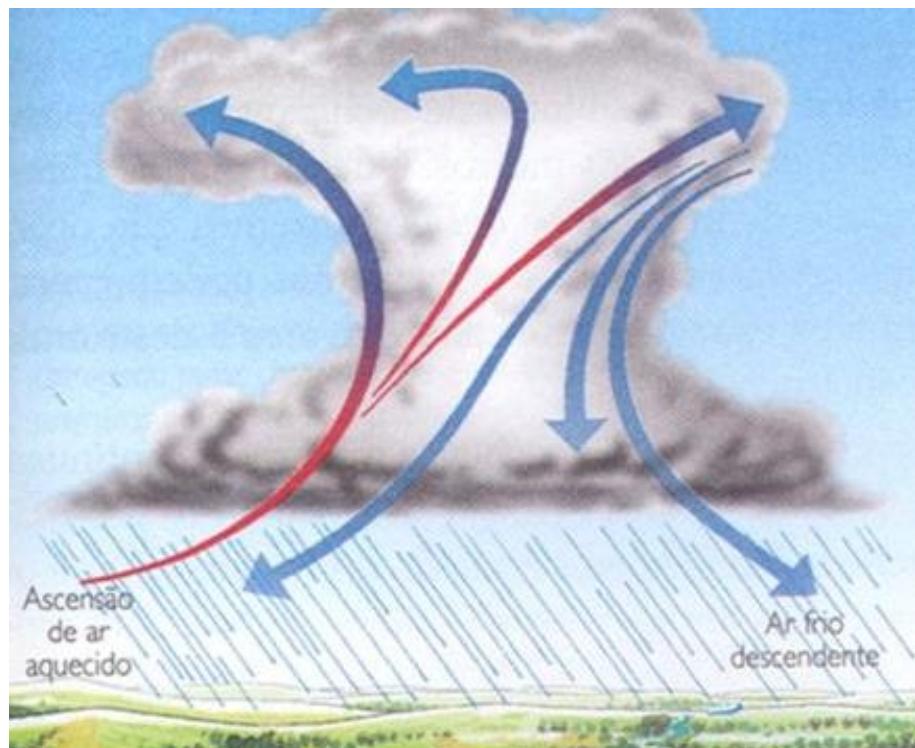
As precipitações podem ser classificadas segundo as condições que produzem movimentos de ascensão do ar. Essas condições surgem diante fatores como convecção térmica, relevo e ação de massas de ar. Podem ser classificadas em convectiva, frontal e orográfica.

2.1.1.2 *Precipitação Convectiva, de Convecção ou de Verão*

Típicas de regiões tropicais, onde o aquecimento da superfície terrestre é, em geral, desigual. Esse aquecimento desigual provoca o surgimento de camadas de ar com diferentes densidades, gerando um instável equilíbrio de estratificação térmica. Caso aconteça a quebra do equilíbrio, como um aquecimento anormal, o ar menos denso ascende bruscamente, atingindo grandes altitudes.

Como características, as precipitações convectivas têm uma duração pequena, mas com grande intensidade, concentradas em áreas limitadas e pequenas.

Figura 2 – Precipitação convectiva.

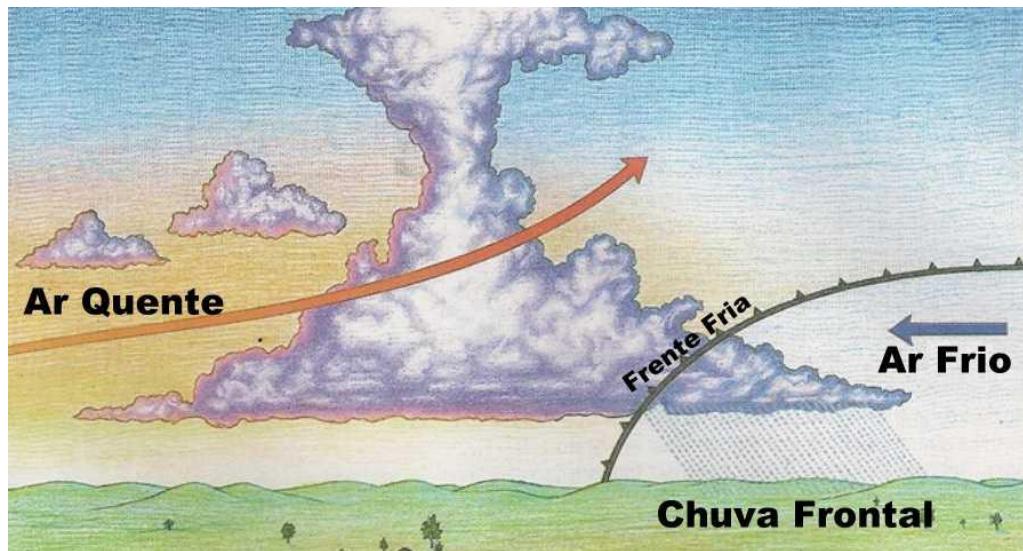


2.1.1.3 Precipitação Frontal ou Ciclônica

Ocorrem normalmente ao longo da superfície de descontinuidade entre duas massas de ar que possuem temperaturas e umidades distintas. Essas massas de ar têm movimento da área de alta pressão para a área de baixa pressão, ocasionado pelo aquecimento irregular e desigual da superfície terrestre.

Surge da ascensão do ar quente sobre o ar frio, na área de contato entre as massas de ar. As precipitações ciclônicas têm uma duração consideravelmente longa, mas apresentam intensidades moderadas e baixas, geralmente abrangendo grandes áreas. São as principais responsáveis pela geração dos grandes volumes de água, sendo de interesse aos projetos hidrelétricos, de controle de cheias e navegações.

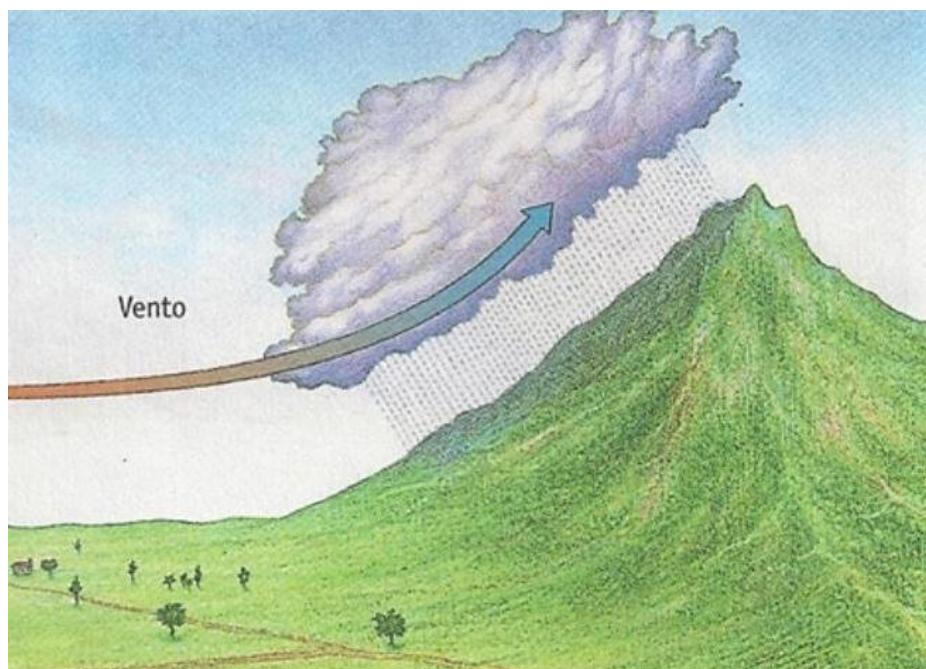
Figura 3 – Precipitação Frontal.



2.1.1.4 Precipitações Orográficas

São resultantes da ascensão de correntes de ar úmido, em movimento horizontal, sobre obstáculos naturais, como montanhas e planaltos

Figura 4 – Precipitação Orográfica.



2.1.2 Evapotranspiração

Através da evaporação da água do solo e da transpiração da água das plantas, cerca de 70% das precipitações retornam à atmosfera. O conhecimento da água perdida pela evapotranspiração é fundamental para se conhecer o balanço hídrico da região. Esse fenômeno afeta diretamente as características das bacias hidrográficas, a determinação da capacidade de reservatórios, o abastecimento de comunidades, entre outros.

É mais fácil de perceber a evapotranspiração em ambientes em que os dois processos (evaporação e transpiração) ocorrem simultaneamente. Solos com cobertura vegetal tornam quase impossível diferir o vapor d'água oriundo da evaporação daquele proveniente da transpiração das plantas.

Os diferentes ambientes apresentarão diferentes taxas de evapotranspiração, uma vez que o fenômeno é afetado por diversos fatores, tais como: nível de maturidade da planta, tipo de folhagem, percentual de cobertura vegetal do solo, intensidade da radiação solar, temperatura, intensidade do vento. Como exemplo, a taxa de evapotranspiração de uma floresta será muito maior do que de uma pastagem.

2.1.3 Escoamento Superficial

Caracteriza-se pelo deslocamento da água na superfície e nos cursos naturais de água. Fundamentalmente, sua origem vem das precipitações, e para o engenheiro, constitui a parcela mais importante do ciclo hidrológico, visto que a maior parte dos estudos está vinculada ao escoamento e os problemas oriundos do mesmo.

Quando uma determinada área ou bacia hidrográfica é atingida por uma precipitação, parte da água é interceptada pela vegetação, de onde irá, posteriormente, participar do processo de evapotranspiração. A parcela da precipitação que não é interceptada é aquela que irá atingir o solo. Dentro desta quantia, uma parte irá infiltrar, e o restante irá escoar pela superfície.

Os principais fatores que exercem influência para o escoamento superficial são os fisiográficos, climáticos, e de natureza antrópica.

2.1.3.1 Fatores Fisiográficos

Os fatores fisiográficos mais importantes são a área e forma da bacia hidrográfica, a topografia da bacia, a permeabilidade do solo, e sua capacidade de infiltração.

É óbvio observar a relação da área da bacia, pois corresponde à superfície coletora das precipitações. Maior será a quantidade de água captada, quanto maior for sua extensão. No que diz respeito à forma, bacias hidrográficas mais compactas tendem a concentrar a água em seu curso principal, aumentando riscos de inundações.

Dependendo da capacidade de infiltração do solo, o escoamento se tornará menor. A permeabilidade do solo é um fator que influí diretamente na capacidade de infiltração, ou seja, quanto mais permeável for o solo, maior a quantidade de água precipitada que será absorvida pelo mesmo.

O efeito topográfico nota-se em virtude das declividades da bacia hidrográfica, do traçado e da declividade dos cursos d'água, além da presença de reservatórios e acumuladores. Bacias hidrográficas menos íngremes produzem um escoamento superficial mais lento e menos volumoso, por darem maior tempo para a infiltração. A declividade dos cursos d'água definem a velocidade com que as águas das chuvas atingem as calhas naturais e deixem a bacia.

2.1.3.2 Fatores Climáticos

Os fatores desta natureza que influenciam o escoamento resultam das características de intensidade e duração das precipitações. A umidade no solo também é um fator que influencia o escoamento.

Se a intensidade da precipitação for grande, menor será o tempo necessário para que o solo atinja seu limite de infiltração, fazendo com que todo excesso de água se torne escoamento superficial. Uma precipitação que perdure por muito tempo tem efeito similar, mesmo com uma intensidade menor, pois não fornece capacidade de o solo evaporar água o suficiente para que evite o quantitativo que participará do escoamento superficial.

2.1.3.3 Fatores de Natureza Antrópica

Obras hidráulicas construídas pelo homem podem influenciar na redução do escoamento superficial, ao acumular a precipitação. Barragens, por exemplo, podem retardar a

propagação para jusante de grandes quantias de água, que podem depois ser utilizadas em outros momentos, como nas estiagens.

2.1.4 Infiltração

Segundo Braga (2002), os volumes de água acumulados no interior do solo são responsáveis pela realimentação dos corpos hídricos, principalmente em períodos de pouca precipitação.

A infiltração é responsável pela redução do escoamento superficial, consequentemente, reduzindo as chances de inundação. A impermeabilização de áreas contribui para a ocorrência de enchentes. É um problema principalmente em áreas urbanas, onde a população carente acaba residindo dentro da calha de extravasamento dos cursos hídricos.

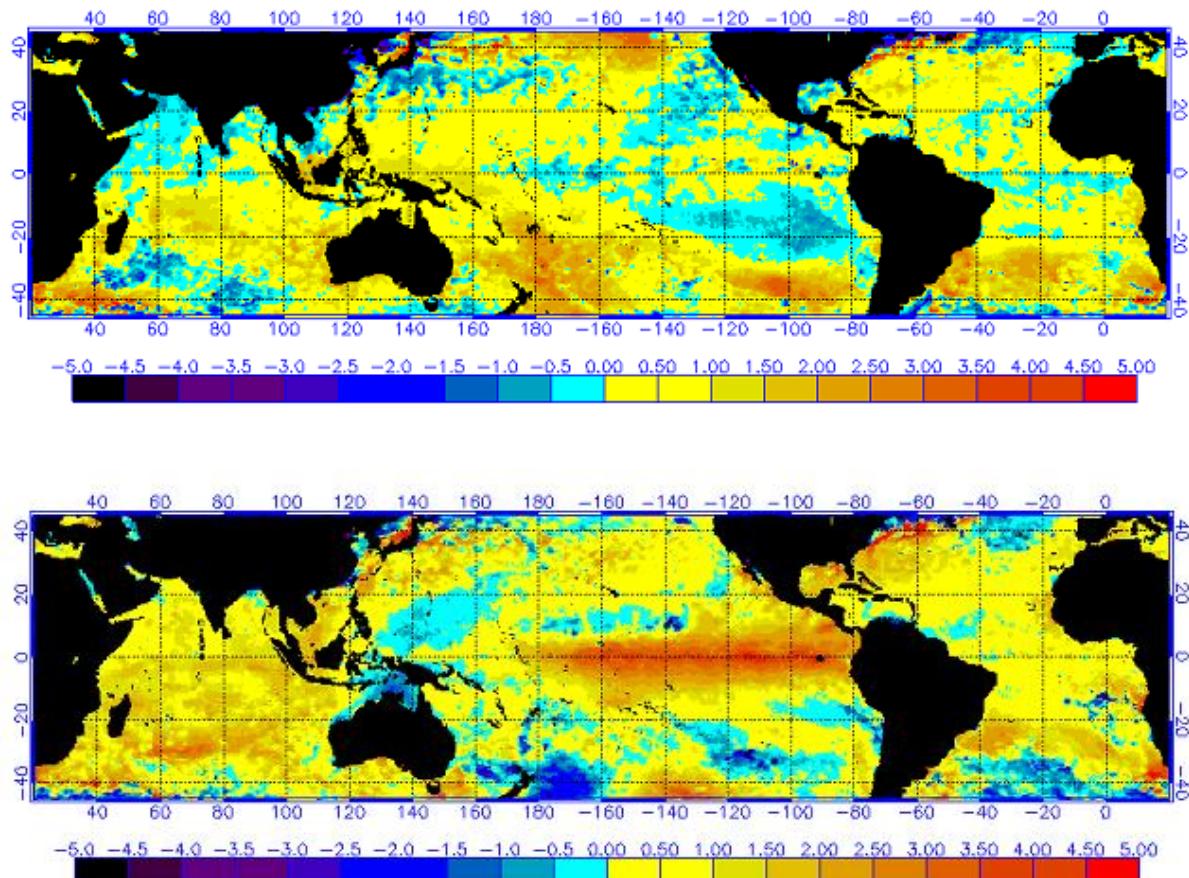
2.2 Eventos Extremos

Os eventos extremos sempre fizeram parte da história da humanidade, decidindo o destino de populações e suas migrações ao longo dos continentes. Apesar disso, é notável que nas últimas décadas, a frequência e intensidade de tais eventos aumentou consideravelmente.

Para que se possa definir e entender os extremos climáticos, é necessário olhar o clima global. Um extremo climático não ocorre isoladamente, tendo conexões com outros lugares, normalmente fazendo parte de um padrão. Segundo Grimm & Silva Dias (1995), “Embora não existam respostas definitivas sobre o que causa determinado padrão de clima global que leva a extremos, existem muitos resultados de pesquisas indicando que há uma conexão entre eles”.

Dentre os fenômenos causadores de eventos extremos, os mais conhecidos são o El Niño e a La Niña. O evento de El Niño ocorre quando há aquecimento das águas superficiais da zona tropical do Oceano Pacífico. Os efeitos mais próximos ao local de origem do fenômeno são as abundantes chuvas na costa oeste da América do Sul. Pode ser visto, na Figura 5, um comparativo entre a variação de temperatura na superfície oceânica sem e com os efeitos do El Niño, respectivamente.

Figura 5 – Variação da temperatura oceânica sem El Niño (acima), e variação da temperatura oceânica com El Niño (abaixo).



Essas variações de temperatura acarretam mudanças climáticas em escala global. Durante o El Niño, as regiões do sul do Brasil, Uruguai, norte da Argentina e região equatorial lesta da África, apresentam chuvas intensas. As regiões do sudeste Asiático, Japão, noroeste e nordeste dos Estados Unidos, sul da Austrália e região Sudeste do Brasil apresentam clima quente. No Nordeste do Brasil, leste da Amazônia e Indonésia, o clima torna-se predominantemente seco.

Contrário ao aquecimento oceânico provocado pelo El Niño, o evento La Niña causa um resfriamento acentuado do Oceano Pacífico, causando também consequências globais. Há um quadro de inversão em relação ao El Niño. Regiões que ficam secas durante o El Niño, tornam-se chuvosas. As regiões quentes recebem ondas frias, e as chuvosas tem uma diminuição significativa na quantidade de chuvas.

Mesmo com esse padrão, os extremos climáticos associados a El Niño e La Niña variam bastante. Ambos eventos podem ser classificados como fortes ou fracos, e nos anos em que são anormalmente fracos, costuma-se chamar de “anos neutros”. De um modo geral, pelos registros históricos, há um intervalo que varia de dois a quatro anos entre um caso de El Niño e um de La Niña.

Muito embora esse padrão (El Niño/La Niña) ser o mais conhecido e estudado, ele não é o único. Alguns são pouco conhecidos.

Para o Brasil, os padrões de maior interesse são os que provocam alterações na temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico tropical e sul. Entre os impactos, há a variabilidade das correntes marítimas no Brasil e nas Malvinas. A corrente marítima brasileira flui ao longo da costa, com direcionamento norte-sul e leva consigo águas quentes. A corrente marítima das Malvinas tem direcionamento sul-norte e transporta água fria. O local de encontro de ambas as correntes oscila, afetando o clima na costa do Brasil.

Regiões de águas quentes e frias próximas ao Nordeste são afetadas, modificando a estação de chuvas na região. Quando, no Equador, há águas quentes ao norte, e frias ao sul, o resultado é de secas na região Nordeste, e o reverso ocasiona chuvas. No caso específico do Nordeste, existe não somente a influência desse evento, como também do El Niño/La Niña, que podem se intensificar ou abrandar. Em outras regiões, um padrão pode acabar por anular o outro.

2.2.1 Previsibilidade de Eventos Extremos

A partir da década de 1980, houve grande avanço na realização das previsões climáticas para poucos dias. Esse processo foi impulsionado principalmente pelas informações meteorológicas obtidas pelos satélites e supercomputadores.

Tais avanços tecnológicos possibilitaram a determinação do tempo em todos os locais do planeta com uma antecedência de quase dez dias. Para as previsões climáticas de meses de antecedência, a base de previsão é similar. O mesmo acontece para simulações de anos.

Para o caso da previsão climática, a abordagem é a de avaliar as condições médias durante um a três meses. As variações de temperatura na superfície oceânica são as condições

avaliadas. Já para projeções climáticas, simula-se os impactos dos gases estufa, alteradores do regime pluviométrico.

Apesar disso, em regiões onde a variabilidade climática diária é muito significativa, as condições médias e, principalmente, os extremos não são bem definidos, fazendo com que as pesquisas continuem sendo um desafio. Assim, as secas consolidam-se vagarosamente e são constatadas quando os impactos já são visíveis. As enchentes são mais abruptas e os impactos são imediatos, mas há ainda dificuldades em prever extremos que ocasionam inundações de extensas áreas. Para ambos os casos, a previsibilidade ainda é baixa.

O monitoramento da ocorrência de extremos e o detalhamento de suas intensidades e variabilidades têm permitido ações de mitigação. A detecção precoce de sinais dos extremos e o acompanhamento dos mesmos baseiam-se num conjunto de inúmeras informações provenientes dos mais diferentes setores, e são assuntos de prioridade nas pesquisas e desenvolvimentos atuais.

Igualmente, a comunicação à sociedade anda passando por intensa evolução. Toda informação acerca de extremos possui uma incerteza associada, e tal incerteza pode ser representada na probabilidade de ocorrência estimada do evento. Um dos maiores problemas provém dos falsos alarmes de ocorrência de extremos, comprometendo a confiabilidade da previsão.

Comunicar a incerteza é essencial para que o risco seja avaliado, e a melhor decisão seja tomada. Melhorar a comunicação do evento e diminuir a incerteza do mesmo é um trabalho abrangente e multidisciplinar, que envolve os geradores de informações e os responsáveis pela difusão das informações.

2.2.2 *Evento 2010*

Dentre outros, os estados de Pernambuco e Alagoas foram fortemente atingidos por chuvas oriundas de sistemas meteorológicos litorâneos. Segundo dados da CPRM, os dois estados tiveram diversos municípios devastados pelas inundações.

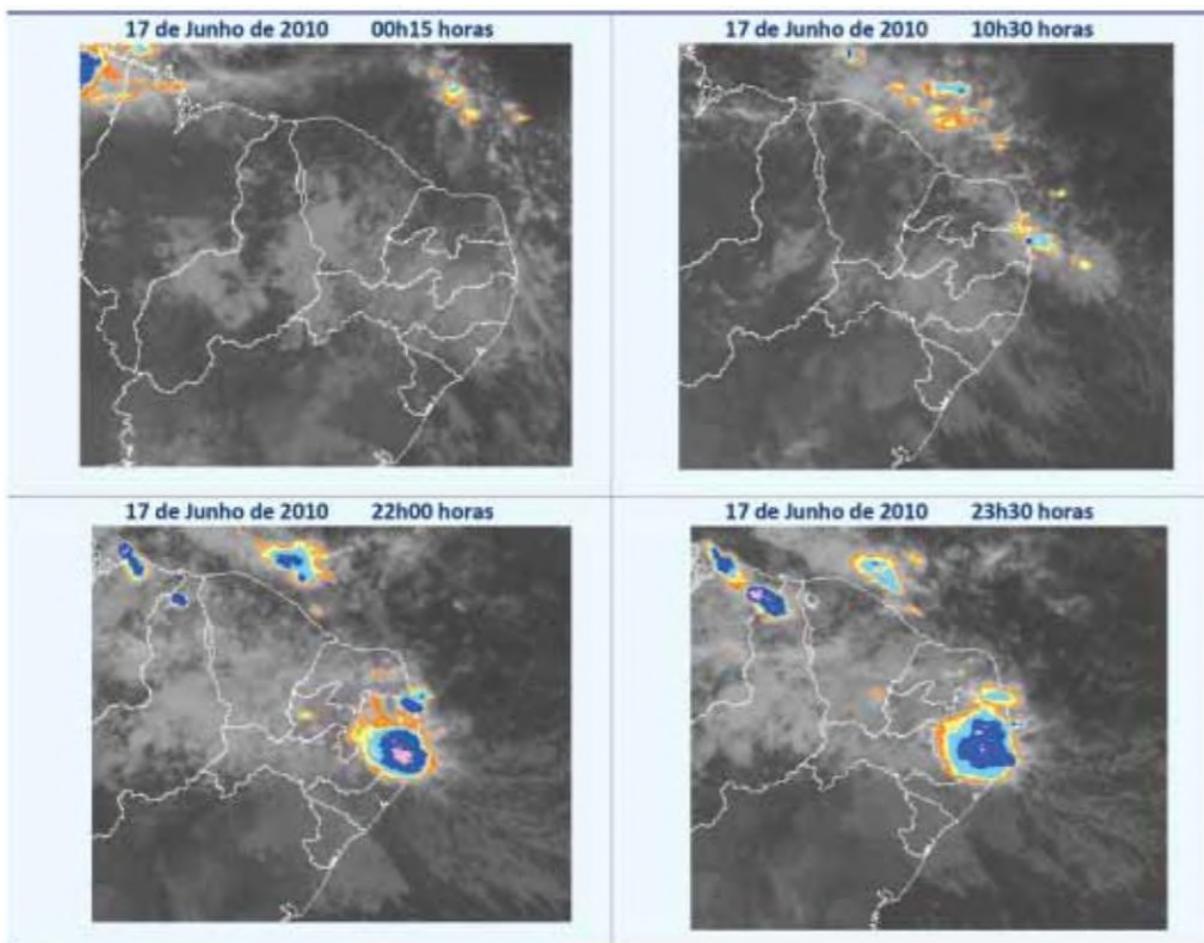
Segundo nota do Laboratório de Meteorologia do Estado de Pernambuco (LAMEPE):

Analizando os dados sobre o evento meteorológico, verificamos que se tratava de uma Onda de Leste, intensificada por um sistema frontal, localizado sobre o Atlântico Sul, o qual fortaleceu esse sistema meteorológico. Além disso, as temperaturas elevadas da água do mar, adjacente à costa de Pernambuco, contribuíram ainda mais para instabilizar a atmosfera.

O evento “Ondas de Leste”, típico do Nordeste brasileiro, se dá pelo agrupamento de nuvens, vindas de leste para oeste, através do Atlântico, até atingirem a costa da região Nordeste. Ocorrem geralmente entre os meses de maio a agosto, e influenciam principalmente as áreas costeiras, costumeiramente não avançando muito para o interior da região.

No ano de 2010, mais precisamente a partir de 18 de junho, chuvas fortes atingiram a região Nordeste. No estado de Pernambuco, 67 municípios foram afetados, tendo 30 decretado situação de emergência e 9 decretaram estado de calamidade pública.

Figura 6 – Imagem realçada das Ondas de Leste de 2010.

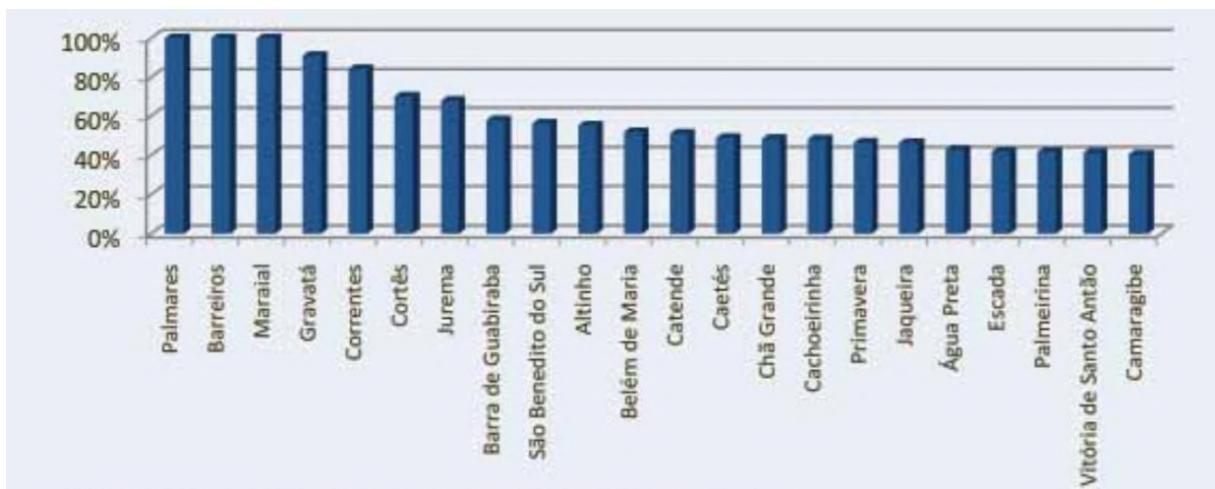


Segundo contagem do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), mais de 60% da população de Pernambuco residia na área atingida pelas inundações. A Defesa Civil divulgou informações de que 15% da população das cidades atingidas foi diretamente afetada.

Dentro da área estudada no presente trabalho, Santana do Mundaú foi o município mais atingido, tanto em número de desabrigados, quanto pelo esforço exigido a defesa civil. A destruição que o evento causou foi quase total. Houve, inclusive, a necessidade de reinstalação da estação fluviométrica, em virtude de a anterior ter sido levada pelas águas.

Contudo, relativamente, os menores municípios foram os atingidos de forma mais grave, chegando a ter a totalidade de sua população diretamente afetada, como ocorreu nos municípios de Palmares, Maraial e Barreiros. Outros nove municípios contabilizaram mais de 50% de sua área devastada, evidenciando o poder destrutivo dos transbordamentos dos rios, bem como da saturação dos solos.

Figura 7 – Municípios que tiveram 40% ou mais da população afetada.



Segundo a Avaliação de Perdas e Danos do Banco Mundial (2012):

Ao longo dos últimos vinte anos, as inundações bruscas foram os eventos extremos que mais desabrigaram, feriram e mataram a população pernambucana. Das 72 mil pessoas desabrigadas como consequência dos desastres registrados entre 1991 e 2010, cerca de 64 mil recorreram aos abrigos públicos depois de uma inundaçāo brusca. Dos quase 22 mil feridos ao longo dos anos, apenas 257 se feriram durante outro tipo de evento. Por outro lado, as secas – o desastre mais frequente no estado – são fenômenos de amplo alcance e, com isso, a população afetada por inundações bruscas desde 1991 corresponde a cerca de 25% das pessoas afetadas por desastres em Pernambuco.

Nesse contexto, o evento de 2010 se destaca em termos de danos humanos. O evento, sozinho, causou 13% do número de pessoas desabrigadas ao longo dos desastres ocorridos nos últimos 20 anos.

As perdas e danos somaram um quantitativo de R\$3,4 bilhões. Os setores sociais concentraram 75% do impacto total, sendo o mais severamente afetado. Foi estimado que mais de 90% dos custos deste setor se afixaram à população carente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos são ferramentas que auxiliam na compreensão e análise dos processos que envolvem a parte terrestre do ciclo hidrológico, ao transformar a precipitação observada de uma área em uma vazão para determinada seção de um curso hídrico.

Pode-se representar um modelo hidrológico de forma matemática, através do fluxo de escoamento da água sobre uma superfície e/ou subsuperfície.

A maioria dos modelos hidrográficos tem como objeto de estudo a bacia hidrográfica, reunindo toda extensão que capta e despeja água sobre um ou mais cursos hídricos que desembocam num exutório comum.

Um modelo hidrológico não tem como premissa reproduzir o real, visto que é impossível retratar a complexidade das variáveis reais dentro de um modelo. Contudo, sua premissa parte de entender o comportamento do sistema analisado, trazendo um resultado que tenha um mínimo de semelhança com o real.

Existem subdivisões para os quais os modelos hidrológicos representam a bacia hidrográfica, adotando uma estrutura para discretização, segundo um dos seguintes critérios:

- **Concentrado:** Toda a bacia é representada através de um valor médio de precipitação, e os processos hidrológicos são representados como variáveis concentradas no espaço. É comumente usado para pequenas bacias;
- **Físico-distribuído:** Utilizam equações de continuidade e dinâmica para os processos físicos que ocorrem na bacia;
- **Empíricos:** Se fazem de equações sem relação com os processos físicos da bacia;
- **Conceituais:** Se fazem de equações de continuidade, associada a uma ou mais equações empíricas;

- **Distribuído por módulos:** É realizada através de formas geométricas, sem relação com a forma da bacia. Os parâmetros não são definidos por cada módulo, mas pela combinação das características de solo e relevo;
- **Distribuído por sub-bacia;** permite a subdivisão da bacia de acordo com a drenagem.

Contudo, a utilização dos modelos hidrológicos se mostra estritamente dependente da disponibilidade de dados, os quais nem sempre estão disponíveis, restringindo seus usos.

Os modelos hidrológicos se mostram essenciais para a predição e quantificação de fenômenos. Logo, podem ser caracterizados como ferramentas que preenchem as lacunas de informações necessárias ao planejamento e gestão de recursos hídricos. Lou (2010) apresenta as principais aplicações da modelagem hidrológica como sendo:

- **Análise de consistência e preenchimento de falhas.** Devido à facilidade de operação e custo, é normal existirem séries pluviométricas maiores que fluviométricas. Através desse modelo, é possível realizar um ajuste da série de vazão, baseado nos dados de precipitação. O modelo também é utilizado para analisar a consistência dos níveis de precipitação, além de permitir verificações dos níveis dos rios e bacias.
- **Previsão de vazão.** Com o conhecimento antecipado da vazão, é possível ter um controle maior sobre eventos de inundações, operação de obras hidráulicas, navegação, entre outras atividades. Esse tipo de estimativa pode ser obtido através do conhecimento de dados de precipitação, na vazão de um posto fluviométrico à montante, ou na combinação de ambos. O modelo de previsão busca utilizar, de forma otimizada, as informações disponíveis, atualizando parâmetros e/ou variáveis.
- **Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento.** Tendo conhecimento da precipitação e das probabilidades de sua ocorrência, pode-se utilizar desse modelo para a estimativa da vazão resultante em cenários de uso e modificações dos recursos hídricos disponíveis, visando o dimensionamento e/ou planejamento de alternativas para uso. Nesses casos, os modelos hidrológicos podem ter algumas limitações, como, por exemplo, a modificação do uso do solo.

- **Efeitos resultantes da modificação do uso do solo.** Um problema para os modelos padrões está na modificação do uso do solo. Para sua solução, é preciso uma metodologia mais sofisticada que as utilizadas nos processos anteriores. Para modificações de uso de solo, os modelos existentes são, em sua maioria, conceituais, com muitas formulações empíricas para representar qualitativa e quantitativamente os parâmetros dos processos físicos da bacia. Ainda assim, os parâmetros englobam várias características, o que dificulta qualquer análise quanto ao resultado da modificação de qualquer característica, como o desmatamento de grandes áreas.

Para o caso específico de análise de vazões, como é o caso do CAWM, um modelo eficaz é o MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável.

3.1.1 MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável

O MODHAC, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hídricas da UFRGS, é um modelo hidrológico do tipo concentrado, mas que pode ser utilizado como modelo distribuído em uma bacia hidrográfica formada por sub-bacias conectadas.

Este modelo simula o processo de precipitação-vazão, utilizando-se ou não de calibragem automática. Nesse modelo, o ciclo hidrológico é processado da seguinte forma:

- A precipitação irá passar por uma correção inicial dos dados, que se faz necessário por falta ou erros nos dados;
- Os dados de precipitação irão alimentar a evapotranspiração potencial (ETP), que poderá ou não ser suprida;
- Caso haja água remanescente dos processos anteriores, começará o processo de alimentação do reservatório superficial, onde a ETP será reavaliada;
- Caso o reservatório superficial extravase, o quantitativo em excesso formará o escoamento superficial;
- A água infiltrada formará um escoamento de base, e em caso de extravasamento, o excedente será somado ao escoamento superficial.

Para que se possa começar a modelagem através do MODHAC, é necessário ter conhecimento da área da bacia; o intervalo dos dados hidrológicos; os valores pluvio e

fluviométricos para esse intervalo. As séries devem ser fornecidas em arquivos rigorosamente estruturados segundo o manual do MODHAC.

3.1.2 HEC-RAS e HEC-HMS

O HEC-RAS é um programa de modelagem hidrológica que trabalha com o fluxo dos rios e outros canais. O nome do programa advém de onde foi desenvolvido, o Centro de Engenharia Hidrológica (Hydrologic Engineering Center), em Davis, California. O Sistema de Análise de Rios (River Analysis System, RAS) é um método de análise de determinação de escoamentos.

A base do sistema procedural do RAS se baseia em equações unidimensionais de energia. A energia do fluxo é perdida através de fricção, contração e expansão. O RAS também pode ser usado para situações de rápidas variações do nível de superfície. Essas situações de variação incluem saltos hidráulicos, hidráulica de pontes, e variação de valores para confluências de rios.

O Sistema de Modelagem Hidrológico (Hydrologic Modeling System) simula o processo de chuva-vazão de bacias hidrográficas dendríticas. Pode ser aplicado para resolver problemas de grandes bacias hidrográficas. Nele é incluso o escoamento e vazão de pequenas áreas urbanas inclusas na bacia. O programa é um sistema de modelagem generalizado capaz de representar muitos tipos de bacias e vazões.

3.1.3 Modelos Hidrológicos de Poucos Parâmetros

A literatura internacional sobre o assunto mostra alguns modelos hidrológicos marcados por sua simplicidade e consagrados pelo uso. Um deles é o Simple Water Balance Model (SWB), desenvolvido pelo US National Weather Service (NWS). Segundo Nasonova (2011) esse modelo é conceitual e inclui dois reservatórios (um de interceptação de precipitação e outro onde atuam a evaporação e o escoamento subsuperficial, a partir do qual se forma o escoamento superficial após a saturação), cinco parâmetros e duas variáveis de estado. Todos os parâmetros são calibrados através de rotina computacional denominada SCE-UA Algorithm. O modelo funciona a partir de dados de precipitação e evapotranspiração e seu escoamento superficial se inicia assim que a taxa de precipitação ultrapassa a taxa de infiltração da água no solo.

Outro modelo bastante utilizado é o GR4J Model, originário da França, desenvolvido no CEMAGREF. Trata-se de um modelo conceitual com quatro parâmetros calibráveis (capacidade máxima do reservatório, coeficiente de troca de águas subterrâneas e a base de tempo do hidrograma unitário) e dois reservatórios iterativos (armazenamento de produção e armazenamento de calha fluvial). Os dados de entrada são precipitações diárias e evapotranspiração potencial. Um algoritmo de otimização baseado na busca do gradiente local é utilizado para realizar a calibração (TRAORE et al, 2014; NASONOV, 2011).

O modelo hidrológico CAWM III – Campus Agreste Watershed Model, utilizado neste trabalho, é uma nova ferramenta voltada para modelagem do fluxo que pode ser enquadrada em categoria de modelos conceituais de poucos parâmetros, como os descritos. Seu desenvolvimento é detalhado na metodologia a seguir.

3.1.3.1 Modelo Conceitual Chuva-Vazão CAWM

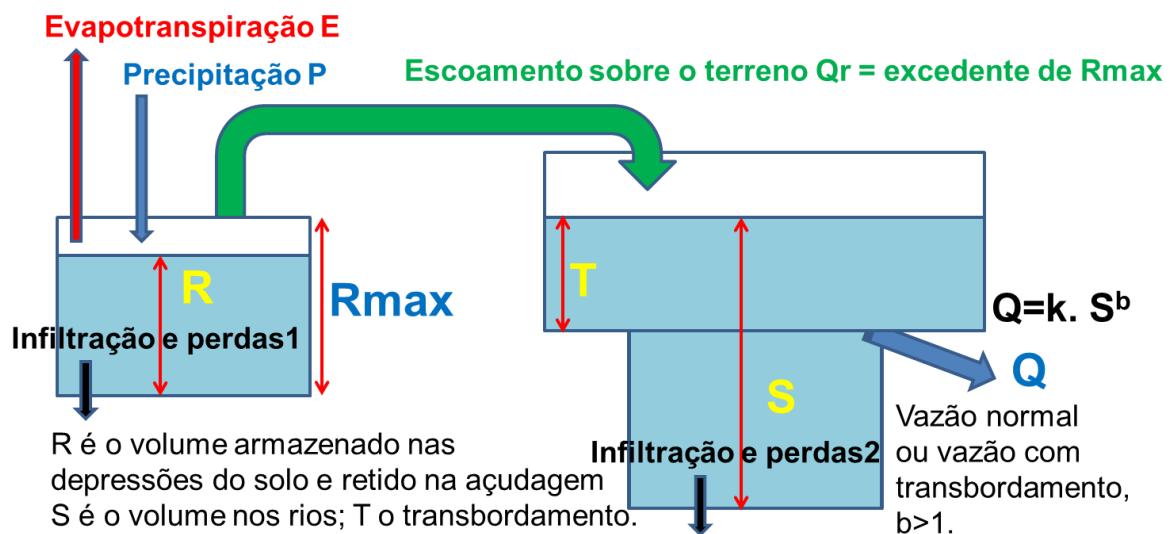
O desenvolvimento do CAWM III – Campus Agreste Watershed Model teve a princípio o objetivo único de simular o escoamento superficial em bacias hidrológicas de regiões semiáridas, tendo em vista suprir a lacuna sobre esse tipo de modelo, aproveitando o potencial de procedimentos mais modernos de entrada e saída de dados e a possibilidade de aproveitamento de informações geradas por técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais como SRTM – Shuttle Radar Topography Mission e o Programa Pernambuco Tridimensional, PE3D.

Uma das premissas que se busca no desenvolvimento do CAWM III é a simplicidade e poucos parâmetros a calibrar, sempre que possível de significado físico. Por enquanto, considera-se a aplicação do modelo para bacias hidrográficas de porte tal que o tempo de concentração não exceda 1 dia, visto que ainda não foram implementadas ferramentas para considerar o retardo do fluxo na bacia. Na primeira versão, o modelo conta com dois reservatórios, um de recepção **R** e outro de água na calha dos rios **S**, admitindo que o volume infiltrado é considerado como perda, alimentando as fissuras do solo cristalino característico da região Nordeste. Esse modelo, com cinco parâmetros, tem sido testado para a bacia do rio Capibaribe e os resultados são promissores.

A segunda versão apresenta algumas diferenças básicas em relação à primeira. A primeira mudança ocorre com a introdução de um reservatório de água no solo (Sub), em

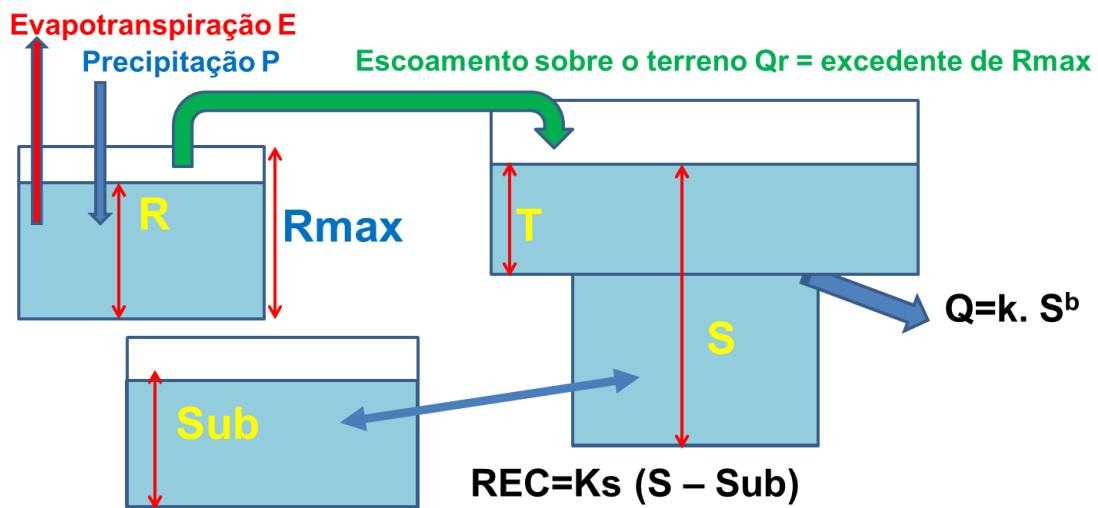
processo permanente de troca de água com o reservatório da calha fluvial, troca essa matematicamente representada por uma relação linear com os volumes de água presentes no reservatório subterrâneo e na calha fluvial em cada instante. As Figuras 8 e 9 representam de forma esquemática o funcionamento do modelo nas duas versões.

Figura 8 – Representação do modelo CAWM I.



Fonte: Notas de aula da disciplina de Recursos Hídricos. Autoria: Prof. José Almir Cirilo.

Figura 9 – Representação do modelo CAWM II.



Fonte: Notas de aula da disciplina de Recursos Hídricos. Autoria: Prof. José Almir Cirilo.

A segunda versão do modelo tem, portanto, quatro parâmetros a calibrar. Como **Rmax** representa a capacidade de retenção de água na superfície da bacia no reservatório **R**, consequência das depressões, reservatórios e cobertura vegetal, uma hipótese é que um modelo digital do terreno com boa precisão auxilie a definição deste parâmetro. O parâmetro **Ks** relaciona-se com a permeabilidade dos solos. Sobre os parâmetros **k** e **b**, procura-se definir sua conceituação 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 de L_T e área de seção equivalente a A_e , tem-se:

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (1)$$

Como nos modelos hidrológicos os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica em Km², a acumulação S é dada por:

$$S = \frac{V_{sup}}{c \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{c \cdot A_b} \quad (2)$$

Sendo $c = 1000$, utilizado para compatibilizar as unidades.

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:

$$A_e = B_e \cdot y \quad R_h \cong y$$

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

A relação entre a vazão (m³/s) e a lâmina escoada (mm) é dada por:

$$Q = \frac{V_e \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde o denominador é o passar de tempo, dado em segundos.

Ao combinar a equação (4) com o último termo da equação (3), tem-se:

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

Explicitando a área equivalente na equação (2) e substituindo na equação (5), chega-se a:

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot S}{L_T} \quad (6)$$

$$\frac{V_e \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot S}{L_T} \right)^{5/3} \frac{I^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (7)$$

$$V_e = K \cdot S^b \quad \text{Sendo } b = 5/3 \quad (8)$$

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} I^{1/2} \quad (9)$$

A relação linear obtida na equação (8) é a utilizada no CAWM em todas as suas versões para representar o escoamento da calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear. Embora a dedução desenvolvida sinalize para expressão que pode permitir o cálculo do parâmetro K e considerar $b = 5/3$, esses parâmetros têm sido calibrados no modelo, visto que são muitas as simplificações realizadas no desenvolvimento matemático.

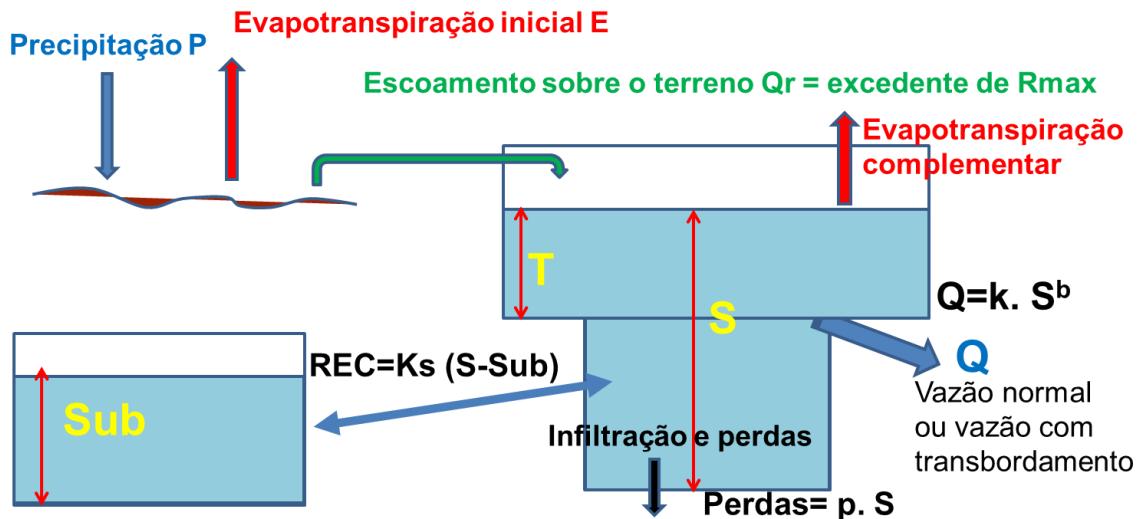
O valor $b = 5/3$ pode ser considerado como estimativa inicial. A expressão para cálculo do parâmetro K está sendo pesquisada como uma forma de regionalizar o parâmetro dentro de uma mesma bacia, por sub-bacias com áreas e extensões de rios fracionadas, bem como avaliar os valores do parâmetro em situações onde o passar de tempo seja alterado.

A versão CAWM III traz novas alterações. A primeira, o balanço chuva-evaporação é feito de imediato, descontando-se da precipitação o valor possível da evapotranspiração. O excedente passa a escoar, ficando a parcela de evapotranspiração não atendida, se houver, para ser retirada do reservatório de superfície S . Portanto, nesta versão não existe reservatório de recepção, sendo as perdas descontadas no reservatório S , proporcionalmente ao volume acumulado nesse reservatório a uma taxa linear p ($PERDAS = p \cdot S^{1.5}$). O expoente 1,5 adotado busca ampliar o efeito das perdas para as vazões mais altas, considerando extravasamentos para as cotas elevadas. Trata-se de relação empírica que ainda carece de melhor avaliação.

A versão continua com quatro parâmetros a calibrar, com p substituindo R_{max} , parâmetro presente na versão II.

A Figura 10 representa o esquema adotado no modelo CAWM III.

Figura 10 – Representação do modelo CAWM III.



Fonte: Notas de aula da disciplina de Recursos Hídricos. Autoria: Prof. José Almir Cirilo.

3.2 Região de Estudo: Bacias Hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio

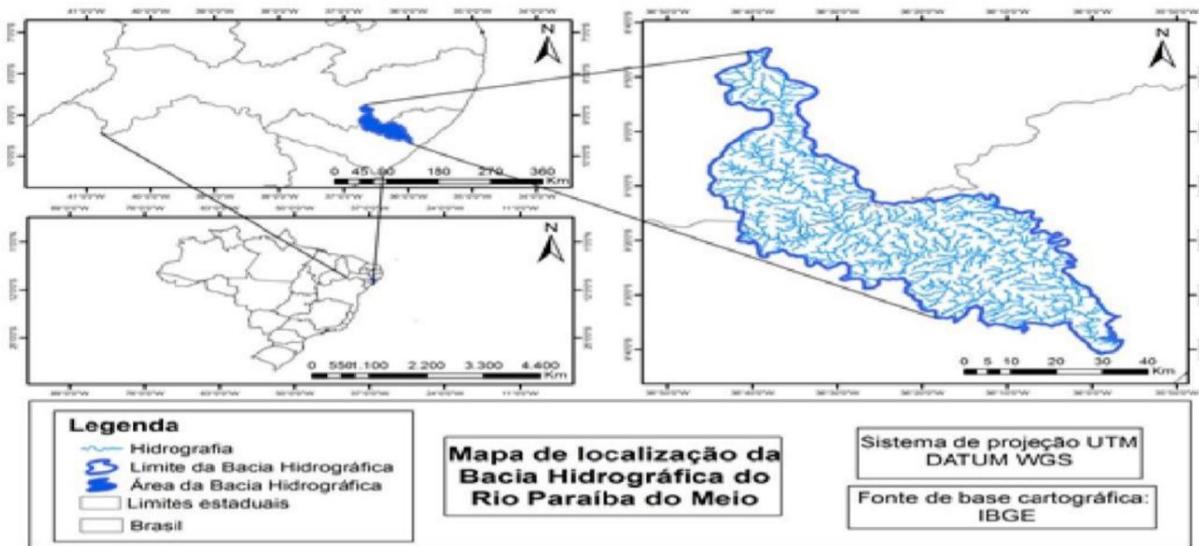
3.2.1 Localização e hidrologia

As bacias hidrográficas dos rios Mundaú e paraíba do Meio possuem uma área total de 7574,87 Km², dispostos nos estados de Pernambuco e Alagoas.

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, também nomeada de GL-1 (Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 1), segue na maior parte de sua extensão o escoamento em sentido NW-SE. Inseridos na sua área de drenagem, estão dezesseis municípios: Bom Conselho, Brejão, Paranatama, Caetés, Terezinha, Garanhuns, Lagoa do Ouro, Saloá, Quebrangulo, Paulo Jacinto, Palmeira dos Índios, Viçosa, Cajueiro, Pilar e Atalaia.

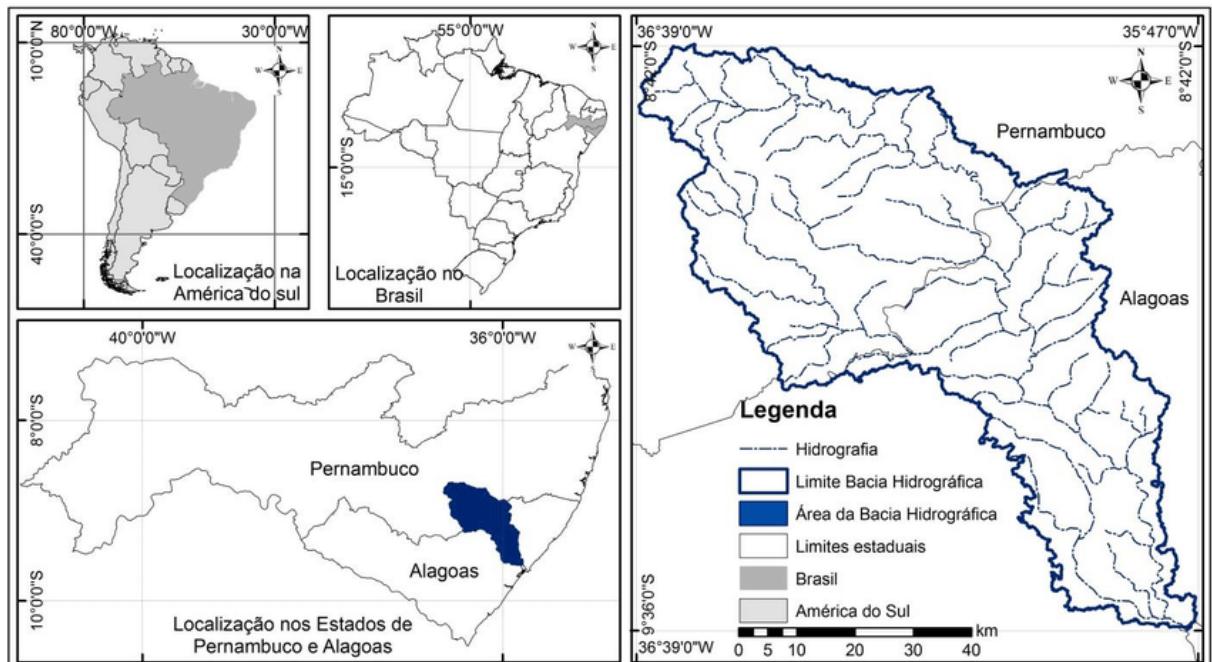
Seu rio mais importante, o Paraíba do Meio, recebe este nome após a confluência do Riacho do Barro com o Riacho Seco.

Figura 11 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.



No que diz respeito à bacia hidrográfica do rio Mundaú, seu sentido de escoamento segue a mesma direção à anteriormente citada, e englobados em sua área de drenagem, encontram-se vinte e um municípios: Angelim, Palmeirina, Correntes, Caetés, Canhotinho, Garanhuns, Lagoa do Ouro, São João, Brejão, Calçado, Capoeiras, Jurema, Lajedo, Jupi, Jucati, Muricí, União dos Palmares, São José da laje, Santana do Mundaú, Satuba e Branquinha.

Figura 12 – Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú.



Dentro da área de drenagem da bacia do rio Mundaú, o rio Canhoto deve ser referenciado, visto que apesar de ser um afluente do rio Mundaú, a confluência de ambos apenas

ocorre em território alagoano. Além disso, a extensão e área de drenagem do rio Canhoto representam uma quantia substancial dentro da extensão da sub-bacia do Alto Mundaú (área da bacia pertencente ao território pernambucano).

3.2.2 Clima

O Agreste dos estados de Pernambuco e Alagoas permanece o ano inteiro sob domínio da massa Equatorial Atlântica, cuja umidade é maior na corrente inferior dos alísios. Durante o inverno, existe invasões de massas polares oriundas do sul do país, que trazem umidade, provocando chuvas abundantes na região.

Para a região, os condicionantes de tempo e clima que podem ser destacados são os sistemas frontais, ondas de leste e vórtices ciclônicos de altos níveis, e o El Niño.

3.2.3 Relevo

A topografia das bacias apresenta variação de cotas desde o nível do mar, até 1030 metros, na bacia do rio Mundaú, no município de Garanhuns-PE. Ao analisar as variações altimétricas, foi dividida seis classes hipsométricas desuniformes ao longo das bacias. As Figuras 13 e 14 detalham as classes hipsométricas nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, respectivamente.

Figura 13 – Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

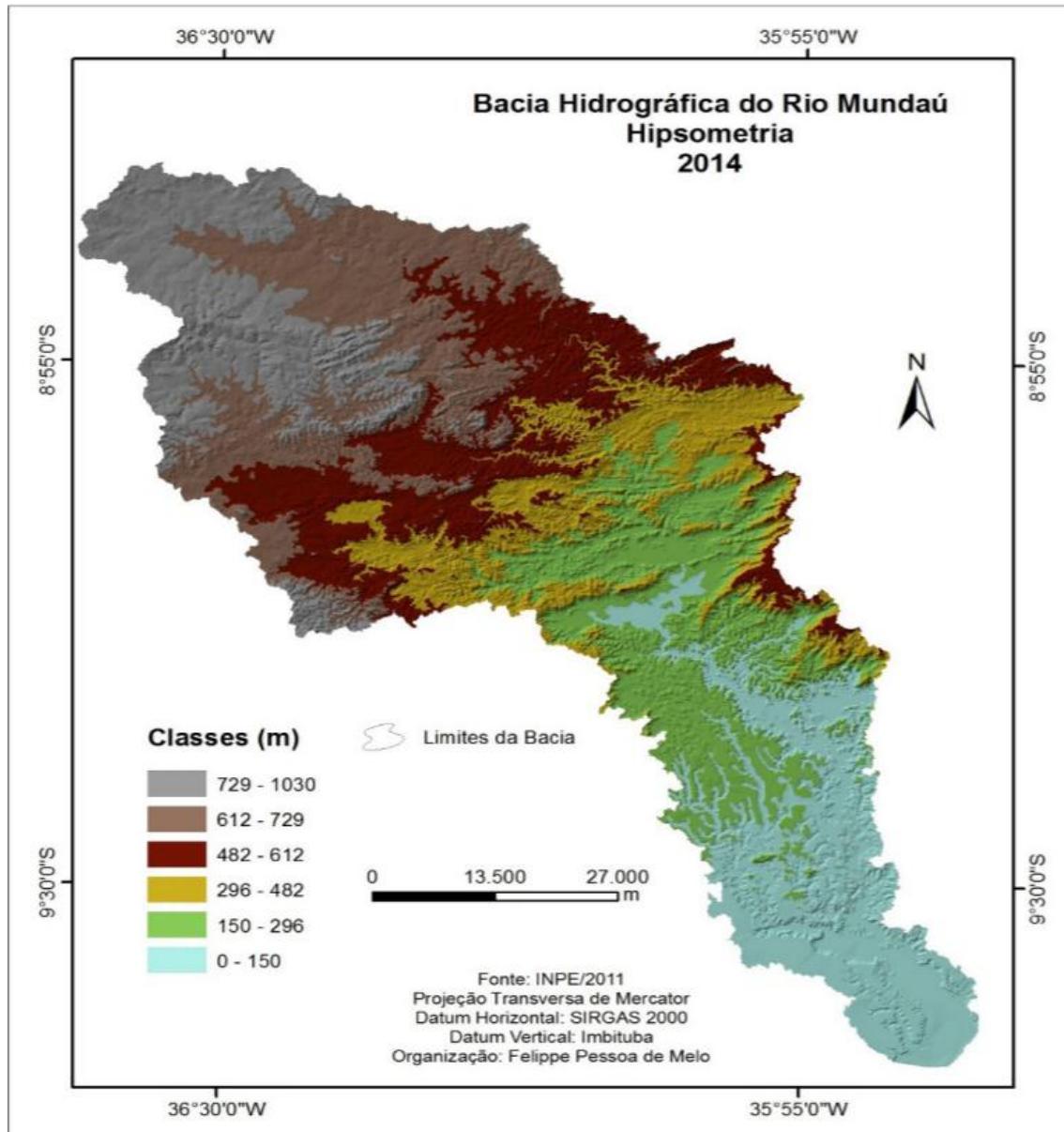
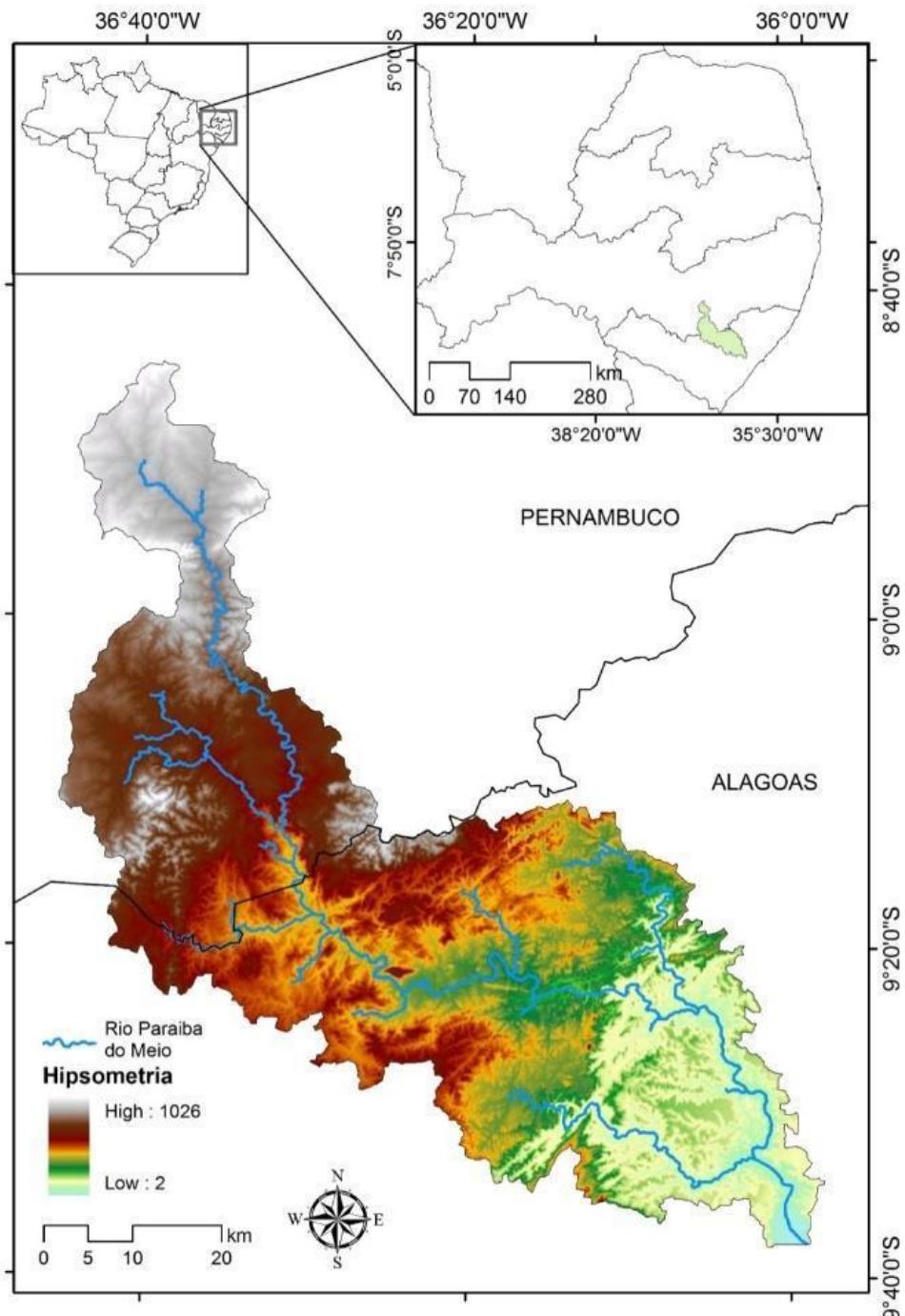
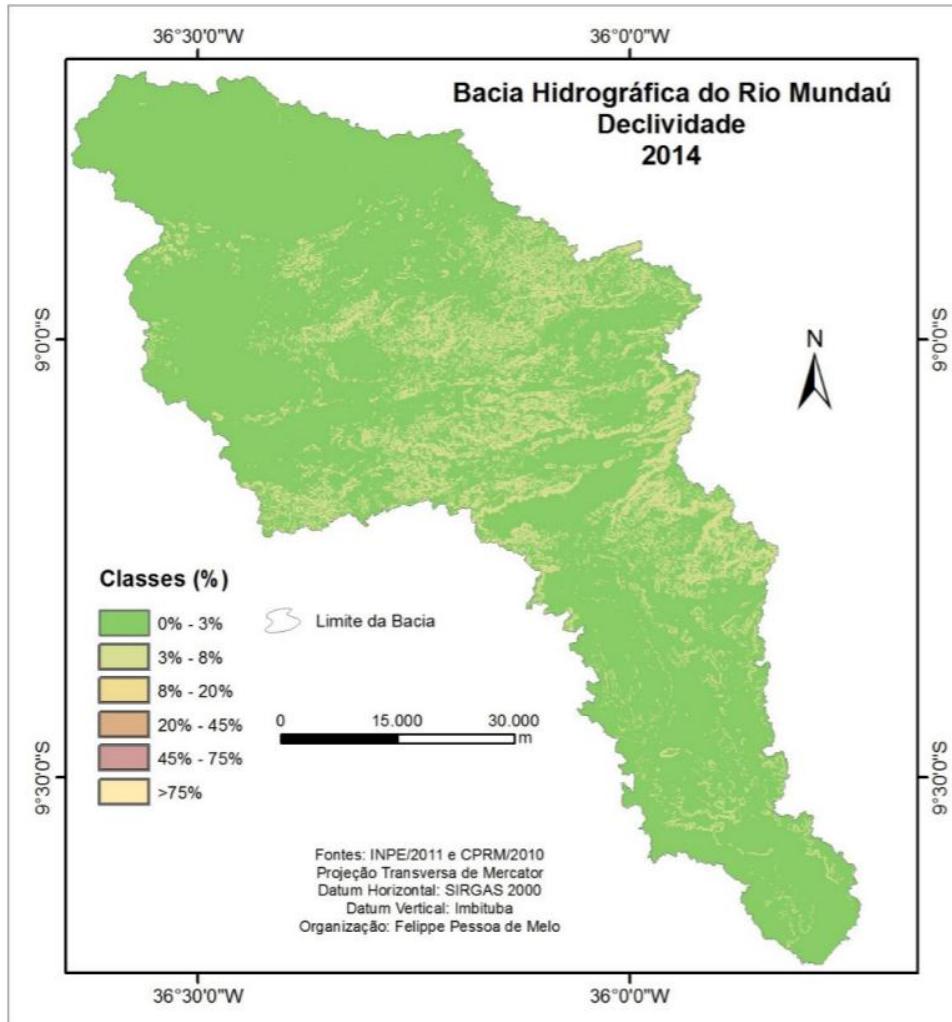


Figura 14 – Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.



Por vez, analisando as classes de declividade, há seis formas de modelado: plano, suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado, montanha e escarpa. A Figura 15 representa o perfil de declividade na bacia do rio Mundaú.

Figura 15 – Perfil de declividade da bacia hidrográfica do rio Mundaú.



3.3 Processamento de Dados Espaciais

Para a delimitação da área estudada, foi utilizado o software QGis.

O software QGis, também conhecido como Quantum Gis, é um software de código-fonte aberto (pode ser alterado e implementado por outros que não os desenvolvedores originais), de sistema de informação geográfica (SIG). Desenvolvido originalmente em 2002, por Gary Sherman, teve sua primeira versão lançada em 2009.

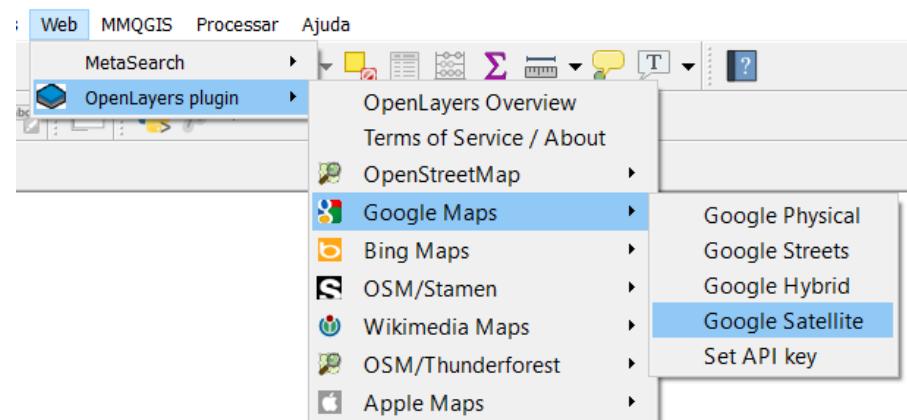
Com a função de similar outros softwares GIS, o QGis fornece ao usuário a opção de criar mapas de múltiplas camadas através da projeção de mapas. Tais mapas podem ser preparados em uma gama de formatos, dependendo do tipo de uso.

3.3.1 Configuração do software, inserção dos dados e definição da área

Primeiramente, ao criar um novo projeto, deve-se selecionar o sistema de coordenadas ao qual o mesmo será atribuído. Em termos gerais, o sistema utilizado para o território brasileiro é o chamado SIRGAS2000 24S. Vale ressaltar, porém, que determinados arquivos podem vir em um sistema diferente, obrigando o projeto a ser definido no sistema de tais arquivos.

Uma vez que o projeto esteja com o devido sistema de coordenadas atrelado devidamente, deve-se abrir a camada de mapas do Google, como indicado na Figura 16.

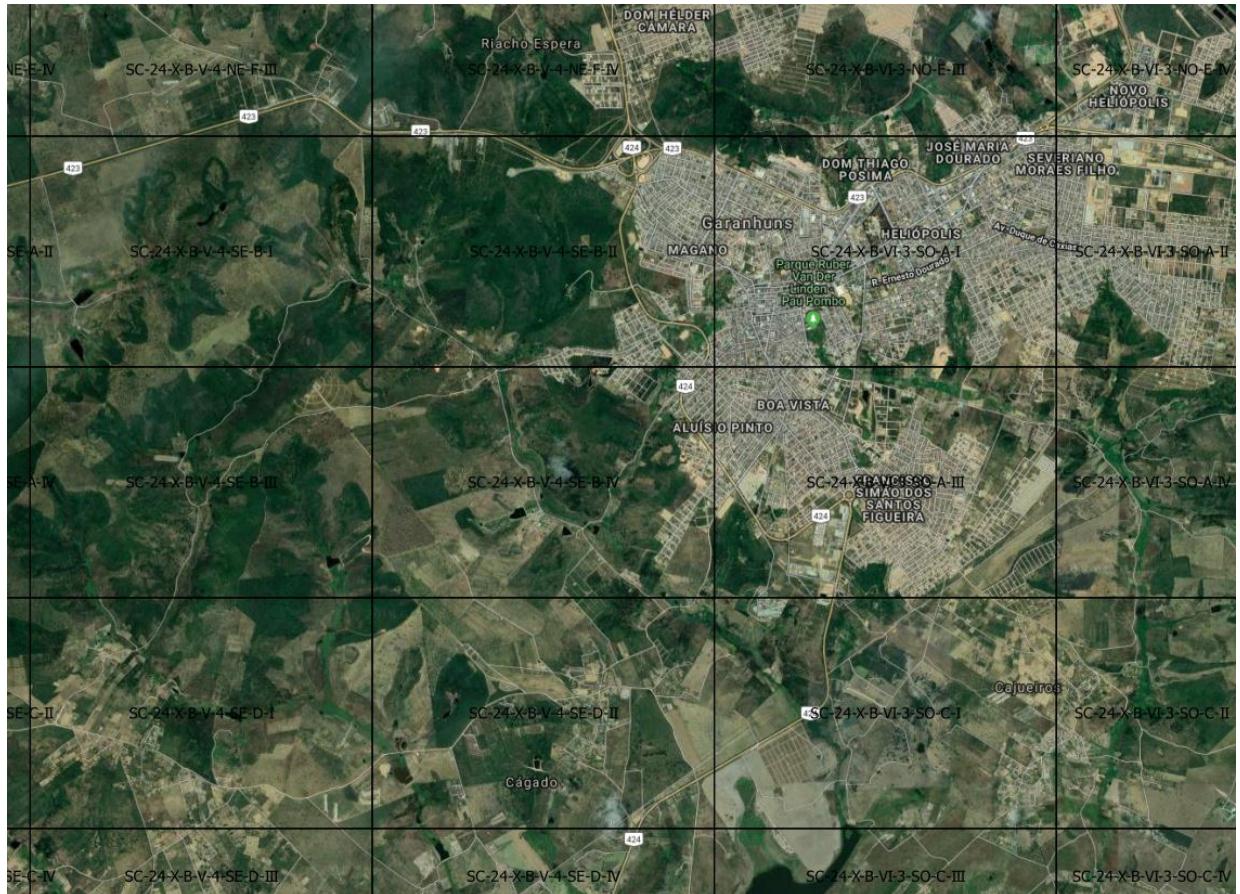
Figura 16 – Comando de inserção da camada de mapas do Google.



As opções *Google Satellite* e *Google Hybrid* são equivalentes, sendo a última apenas mais detalhada, ao oferecer os nomes dos municípios e principais rodovias, facilitando a identificação de locais específicos.

Com a camada de mapas do Google aberta, deve-se abrir a camada de representação das quadrículas. Tais quadrículas representam a área de uma fotografia de perfilamento à laser, necessárias para os processos de geoprocessamento. Uma vez que as quadrículas estejam visíveis no mapa, é preciso localizar quais as quadrículas estão localizadas na área de estudo, para assim, inserir as imagens de perfilamento à laser.

Figura 17 – Área com representação das quadrículas.



Uma vez que as quadrículas necessárias à delimitação da área foram selecionadas, deve-se fazer a inserção do perfilamento laser. Para o presente trabalho, visto as grandes dimensões da área trabalhada, e as limitações do software em trabalhar com uma grande quantidade de imagens de perfilamento em alta resolução, foi utilizado o Pernambuco.DEM, arquivo gerado com a base de dados SRTM da NASA, com resolução mais baixa que, apesar de englobar todo o estado, proporciona o software funcionar com melhor performance. A Figura 18 representa parte do Agreste de Pernambuco gerado com dados do SRTM.

Caso o limite da área de estudo não seja bem definida, é importante definir uma área maior para realizar o recorte no perfilamento. Uma solução prática é selecionar a área a ser recortada em função das curvas de nível imediatamente exteriores à cota máxima no contorno da área estudada.

Figura 18 – Agreste pernambucano com perfilamento laser aplicado. Cidade de Garanhuns destacada.

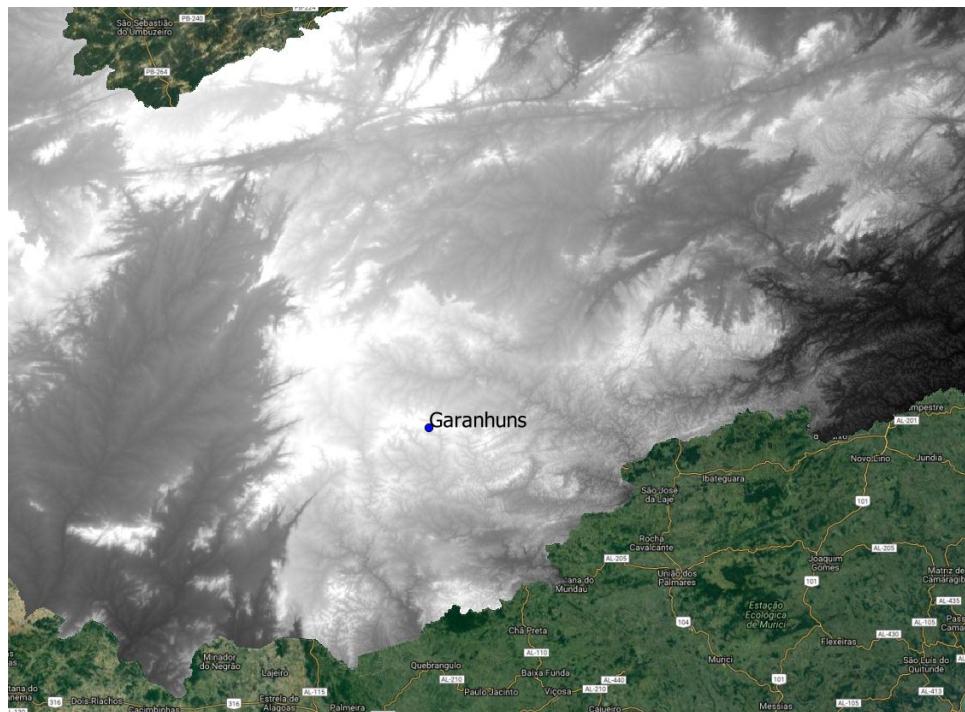
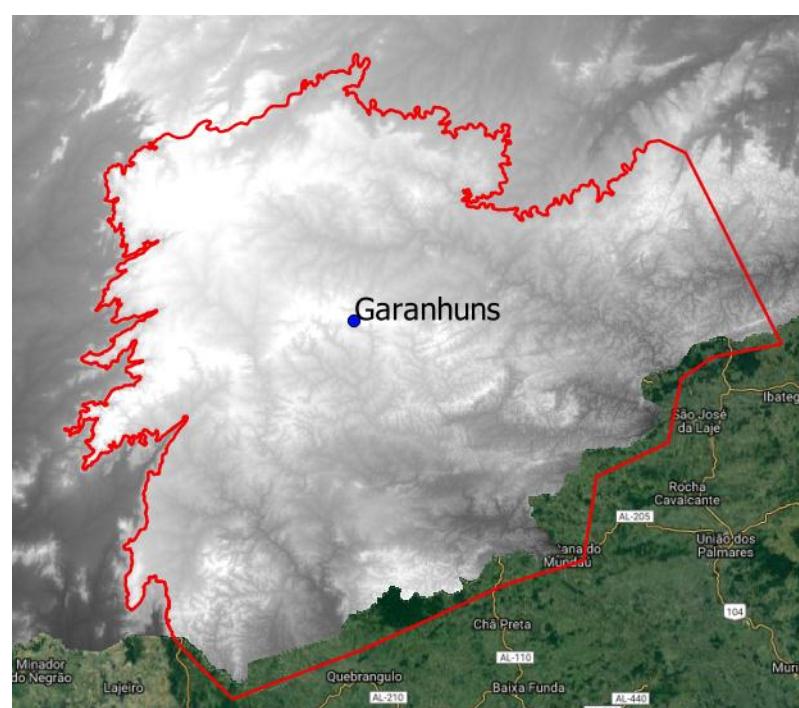


Figura 19 – Marcação de contorno exterior à área de estudo.



3.3.2 Ferramenta de análises hidrológicas TauDEM

O TauDEM (do inglês, Análise de Terreno Usando Modelos de Elevação Digitais) é uma ferramenta para análises hidrológicas baseado no Modelo Digital do Terreno (MDT). Essa ferramenta tem como destaque o desenvolvimento de modelos digitais de elevação hidrologicamente corretos, através da remoção de depressões; o cálculo do fluxo de escoamento e a declividade; a área de contribuição de bacias e sub-bacias hidrográficas; métodos de delimitação das redes de drenagem, baseados em formulários topográficos; delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas.

Ao delimitar uma área que irá abranger todo o objeto de estudo, como exibido na Figura 14, é preciso utilizar-se das ferramentas do TauDEM para divisão das bacias e sub-bacias em função das áreas de influência da rede de drenagem, definindo com precisão suficiente os elementos que serão analisados.

Ressalte-se, porém, que a ferramenta TauDEM não se encontra pré-instalada no software QGis, sendo necessário a sua instalação externa, através do site oficial da ferramenta.

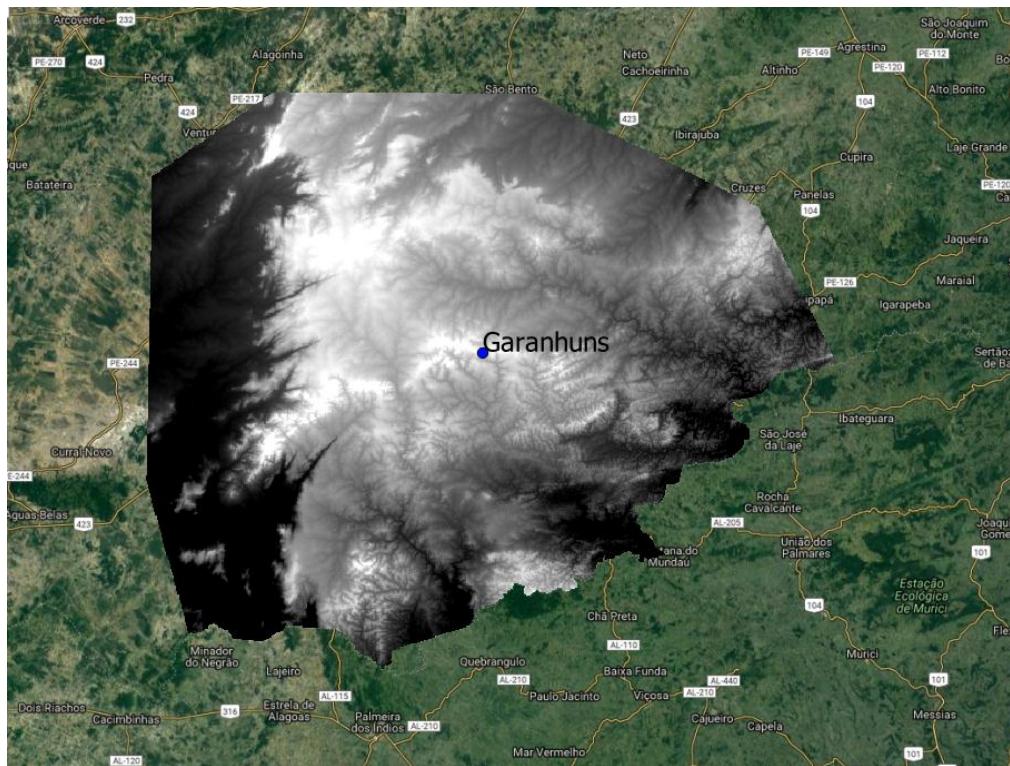
Uma vez que a ferramenta esteja instalada, se faz necessário verificar se a mesma se encontra ativada, abrindo a caixa de ferramentas do software QGis. Caso não se encontre ativada, deve-se seguir os seguintes passos:

- Abrir menu *Processar*, selecionando *Opções*. Irá aparecer uma janela com algumas categorias;
- Selecionar a categoria *Provedores*. Dentre os provedores que irão aparecer, primeiramente, apagar os caminhos para os itens do provedor *Comando GRASS*. É necessária essa desmarcação em virtude de esse provedor ser de uma versão antiga do GRASS, que conflitaria com o GRASS 7, também existente nos provedores;
- Identificar o provedor *TauDEM*, habilitando o item *Ativação*. Dentro do provedor, o segundo item refere ao caminho de ativação do *Microsoft HPC Pack 2012* (automaticamente instalado juntamente ao TauDEM), onde deve-se buscar o diretório *bin* do mesmo através da ferramenta de busca;
- No item *Pasta das ferramentas das linhas de comando do TauDEM*, deve-se selecionar o diretório da pasta *TauDEM5.exe* de onde a ferramenta TauDEM foi instalada, no disco rígido.

Quando os passos supracitados forem executados, a configuração e ativação da ferramenta TauDEM terá ocorrido com êxito, e o mesmo poderá ser usado para delimitação das sub-bacias, conforme será explanado.

Com a delimitação de uma área superior àquela estudada, conforme indica a Figura 14, a primeira ferramenta de análise do TauDEM a ser utilizada é a *Remover Depressão*. Essa ferramenta identifica todos os pontos de baixas elevações, trazendo as mesmas até o nível de fluidez mais baixo em torno da borda. Como são áreas mais baixas, elas geram interferências no fluxo de escoamento, sendo, portanto, removidas nesse processo. Após a execução da ferramenta Remover Depressão, o aspecto do arquivo não sofre alterações drásticas, no caráter visual, conforme pode ser verificado na Figura 20.

Figura 20 – Área de estudo após execução da ferramenta Remover Depressão do TauDEM.



A ferramenta que deve ser utilizada na sequência é a *Direção de Fluxo D8*. Esta ferramenta cria duas grades, sendo que a primeira contém a direção do fluxo de escoamento, através de cálculos de declives. A segunda grade contém o próprio declive. A Direção de Fluxo D8 pode ser utilizada em um arquivo onde a ferramenta Remover Depressão não foi utilizada, mas resultará em áreas com dados inexistentes para direção de fluxo, gerando erros no processo. Na Figura 21 pode-se observar o resultado da execução da ferramenta Direção de Fluxo D8, e a Figura 22 apresenta a grade de declividades.

Figura 21 – Área de estudo após execução da ferramenta Direção de Fluxo D8 do TauDEM.

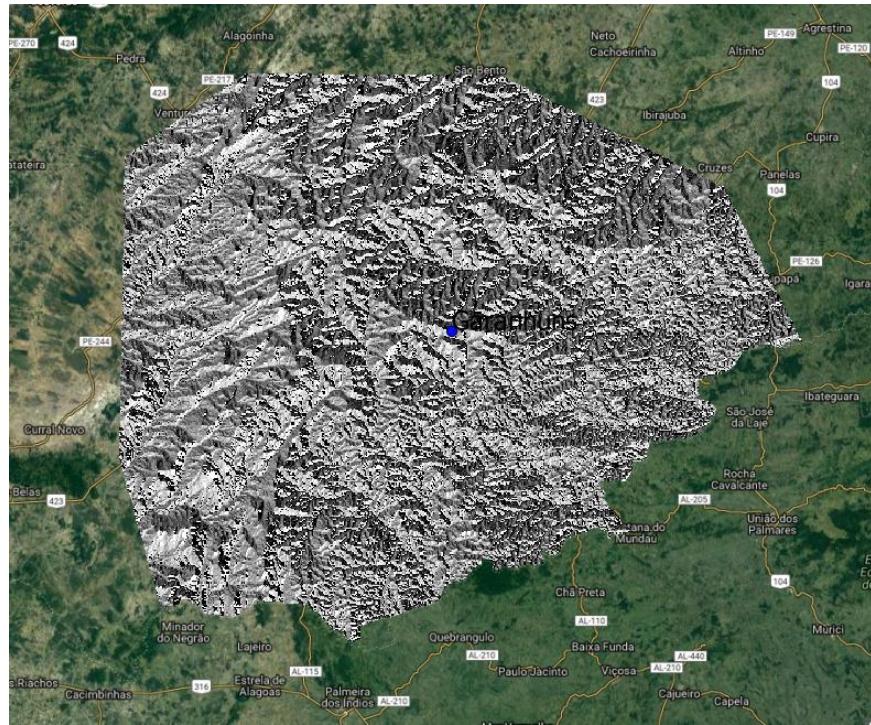
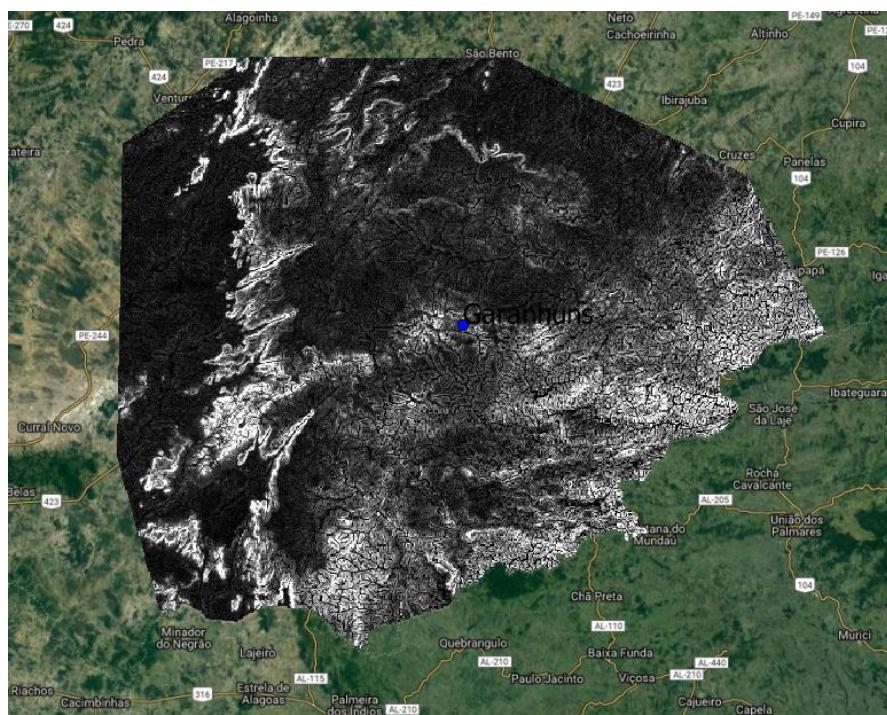


Figura 22 – Grade de declividades da ferramenta Direção de Fluxo D8 do TauDEM.

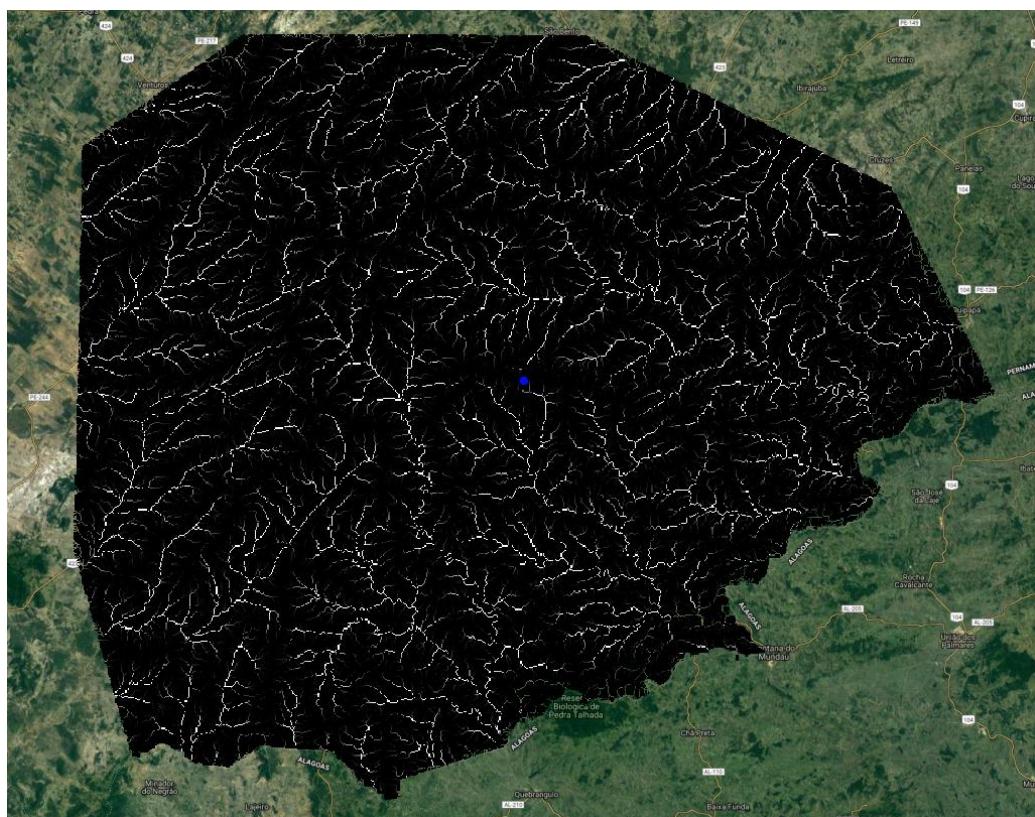


Após a execução das direções de fluxo, deve-se encontrar as áreas de contribuição das bacias e sub-bacias englobadas na área de estudo. A ferramenta responsável por esse

processo é a *Área de Contribuição D8*. A ferramenta utiliza os resultados obtidos na etapa anterior para modelar as áreas de contribuição em função do escoamento.

De modo padrão, a ferramenta verifica se há contaminação na borda, ou seja, a possibilidade de um valor não ter sido englobado no domínio delimitado. Este modelo de análise da ferramenta fora o responsável para delimitação da área de estudo representada na Figura 15 ser maior que aquela delimitada na Figura 14 (De modo a não haver possibilidade de qualquer ponto da área de estudo não ser englobada, o que ocasionaria erros a partir da execução da atual ferramenta). A Figura 23 representa o resultado da execução da ferramenta Áreas de Contribuição D8.

Figura 23 – Área de estudo após execução da ferramenta Áreas de Contribuição D8 do TauDEM.



Após a execução da ferramenta Áreas de Contribuição D8, é necessário demarcar o exutório das bacias e/ou sub-bacias a serem estudadas, do contrário, não será possível prosseguir com as demais ferramentas do TauDEM.

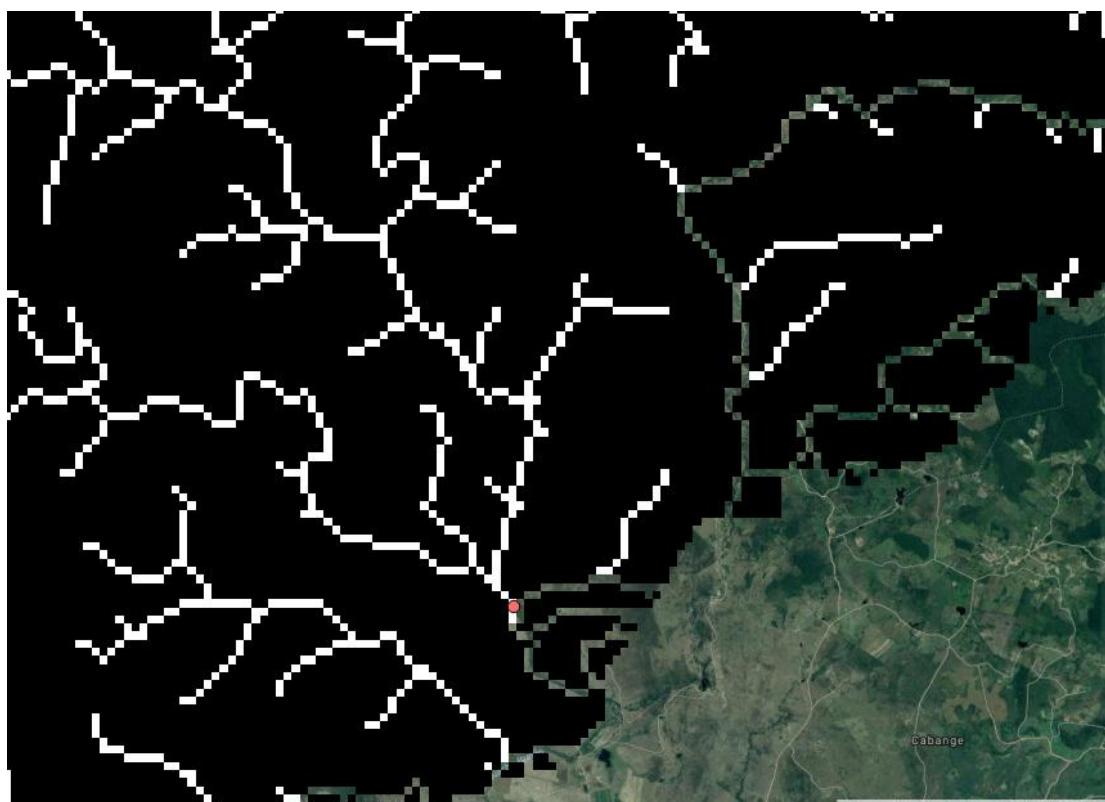
Um detalhe importante referente a esta etapa se diz referente a limitação do ponto do exutório em relação à qualidade e precisão do arquivo do perfilamento laser. Uma imagem de menor qualidade pode gerar falhas de integridade na extensão dos corpos hídricos que geram

as bacias e sub-bacias hidrográficas, fazendo necessário atribuir o exutório em um ponto anterior ao real término da bacia.

Para facilitar a escolha do ponto de exutório, verificando a integridade do corpo hídrico presente no arquivo, pode-se utilizar a ferramenta *Definição de Limiar para Fluxo Canalizado*. Essa ferramenta opera qualquer dado de entrada para uma identificação em valores absolutos (0 ou 1). Ou seja, ele delimita tudo o que for corpo hídrico com o valor 0, e o relevo com valor 1.

Desse modo, onde não houver integridade dos dados, não haverá atribuição de valor, aparecendo falhas na imagem. Na Figura 24 pode-se verificar, após a execução desta ferramenta, a delimitação do exutório para uma bacia hidrográfica (neste caso, a do rio Paraíba do Meio) sendo antes do limite da área delimitada, em função da não integridade dos dados na parcela final do arquivo.

Figura 24 – Falhas por não integridade dos dados no ponto de exutório da bacia do rio Paraíba (ponto em cor).



Com o auxílio da ferramenta Definição de Limiar para Fluxo Canalizado, pode-se realizar a marcação dos exutórios das bacias a serem estudadas. Os pontos de exutório serão

utilizados para demarcação da área de contribuição daquela bacia hidrográfica específica, ao executar novamente a ferramenta Área de Contribuição D8.

O diferencial desta segunda execução da ferramenta previamente citada vem na inserção do ponto de exutório em seu diretório, como fator limitante. Assim, a ferramenta irá associar o exutório como limitante da área que deve processar, resultando na área limítrofe da bacia e/ou sub-bacia desejada. As Figuras 25 e 26 representam as áreas das bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, respectivamente.

Figura 25 – Área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.

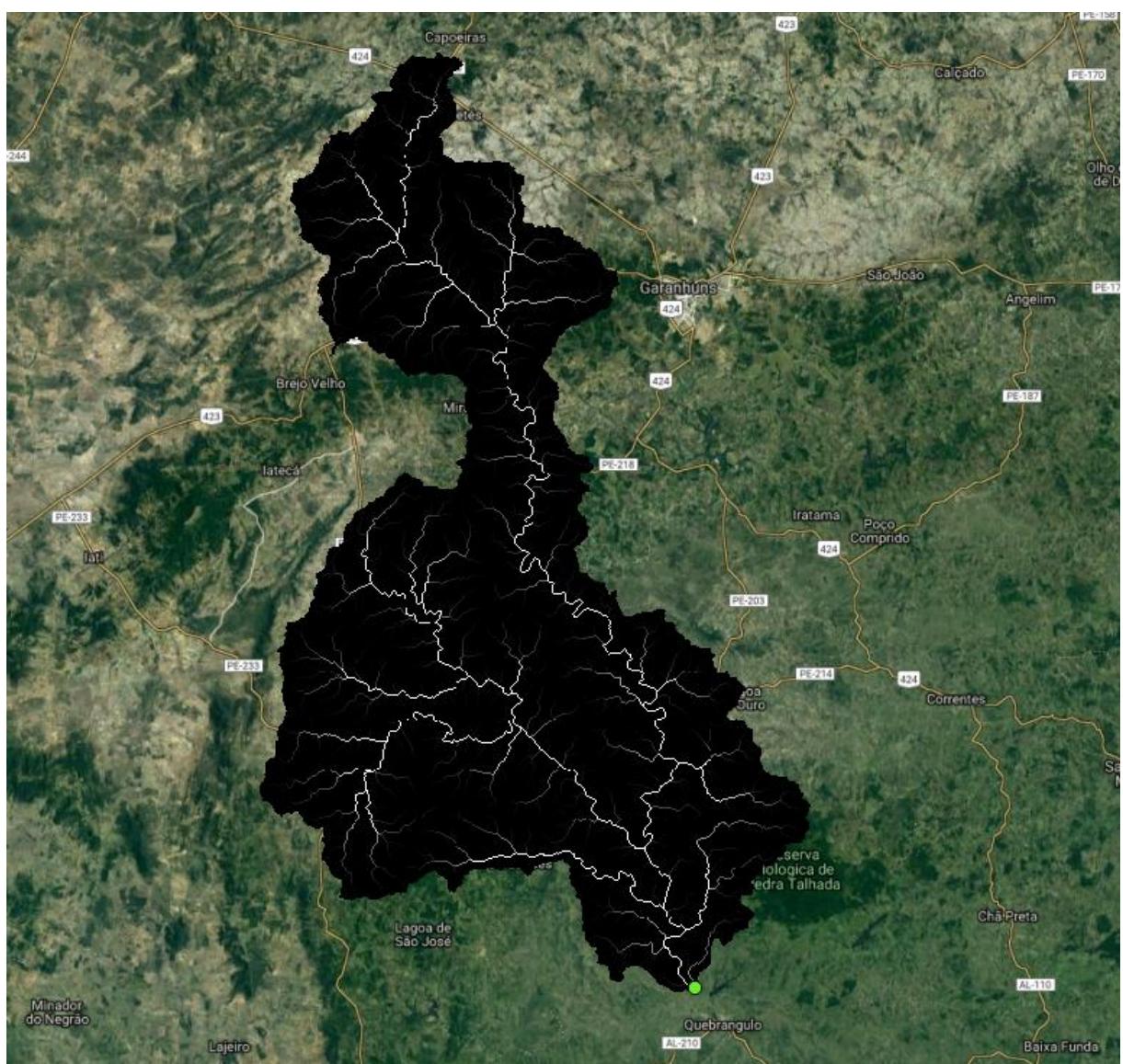
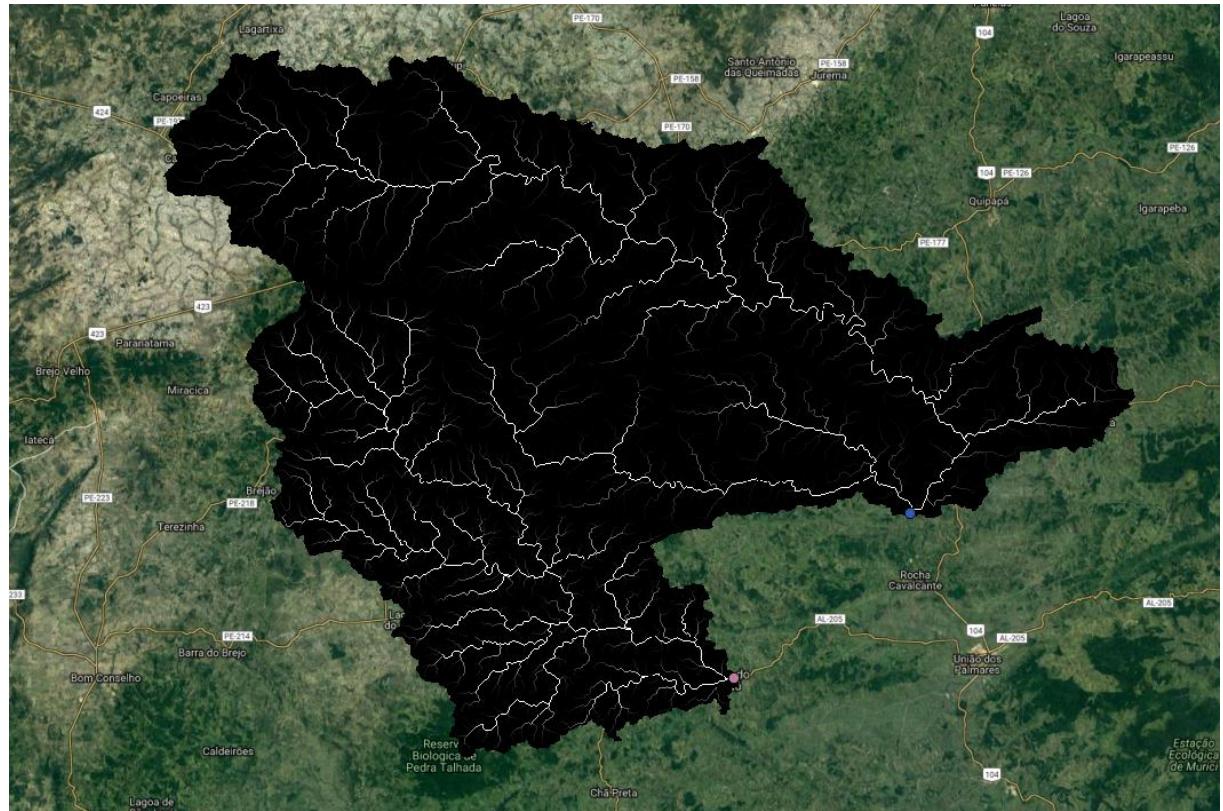


Figura 26 – Área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

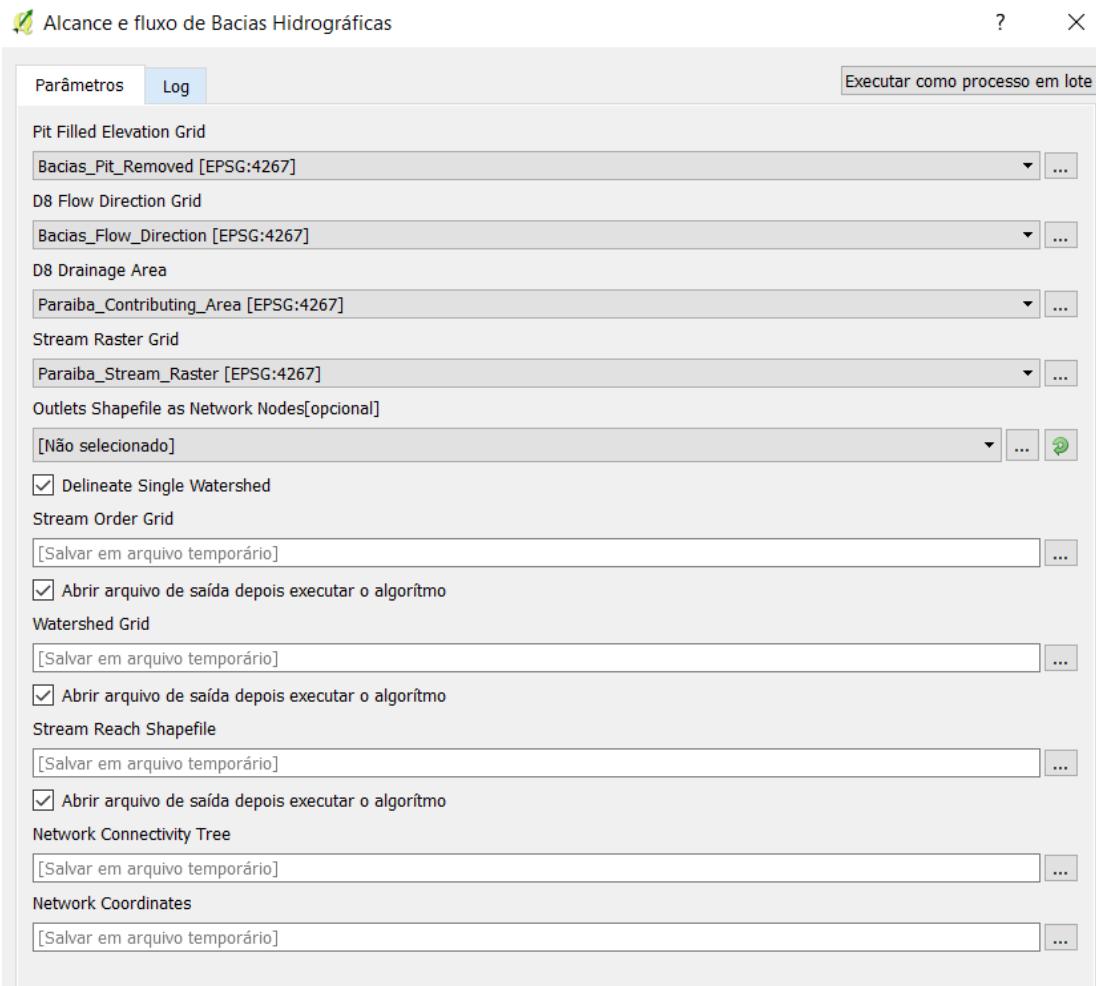


Um detalhe que deve ser observado, em ambos os casos, é a disposição dos corpos hídricos. No caso da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, não houve necessidade de marcação de mais do que um exutório, em função de toda a malha hídrica convergir ao ponto atribuído.

A bacia hidrográfica do rio Mundaú, por outro lado, apresenta uma disposição disforme. É possível identificar dois exutórios na área delimitada, em função dos principais rios que drenam a área. Segundo a Figura 26, são eles: rio Canhoto e rio Mundaú.

Tendo as ferramentas anteriores sido executadas com êxito, a bacia hidrográfica pode, de fato, ser definida. Utilizando-se da ferramenta *Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas*, com os arquivos resultantes da execução das ferramentas anteriores como diretórios de entrada, e definindo os arquivos de saída, tal como indicado na Figura 27.

Figura 27 – Definições para execução da ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM.



A execução da ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas irá gerar a divisão das microbacias existentes na área delimitada, bem como a rede de drenagem da bacia selecionada. As Figuras 28 e 29 representam a divisão das microbacias dentro da sub-bacia do rio Mundaú, bem como rede de drenagem, respectivamente.

Dentro da rede de drenagem, a hierarquia hidrográfica está representada através da espessura atribuída ao trecho do corpo hídrico, sendo a representação mais espessa o rio principal, e à medida que a espessura diminui, se tornam rios de menor ordem hierárquica.

Figura 28 – Microbacias geradas pela ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM para sub-bacia hidrográfica do rio Mundaú.

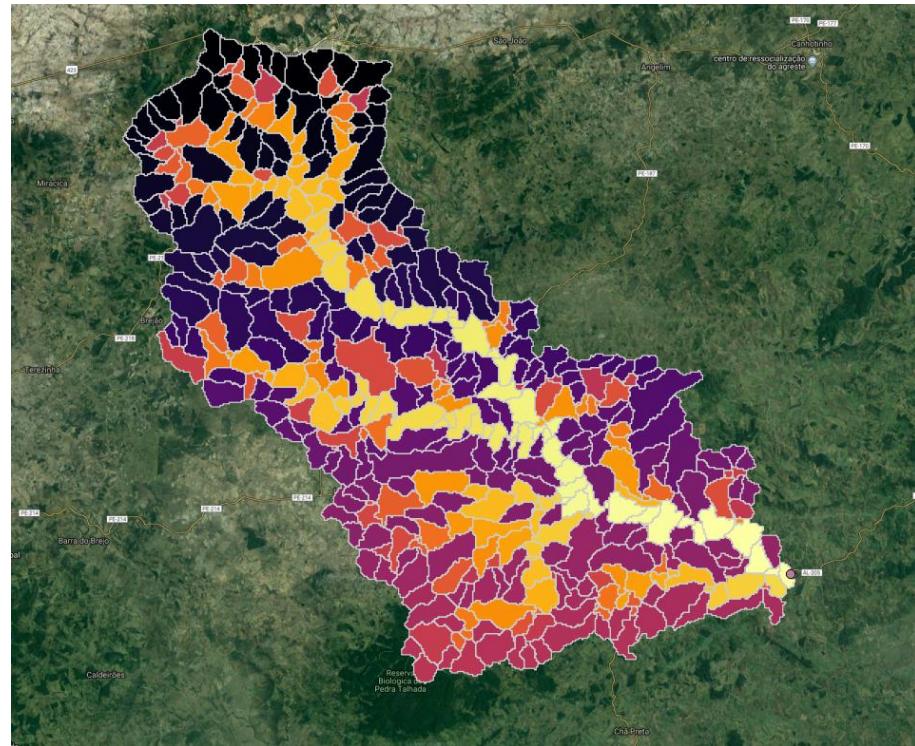
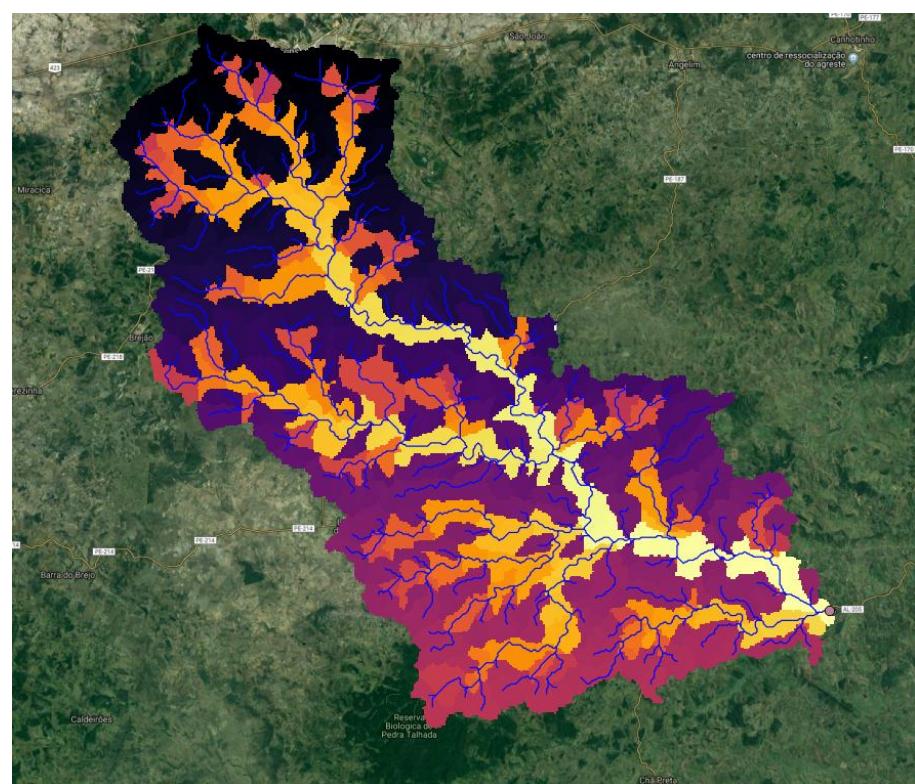


Figura 29 – Rede de drenagem gerada pela ferramenta Alcance e fluxo de Bacias Hidrográficas do TauDEM para sub-bacia hidrográfica do rio Mundaú.



3.3.3 Identificação e determinação do fator de área das Estações Pluviométricas necessárias

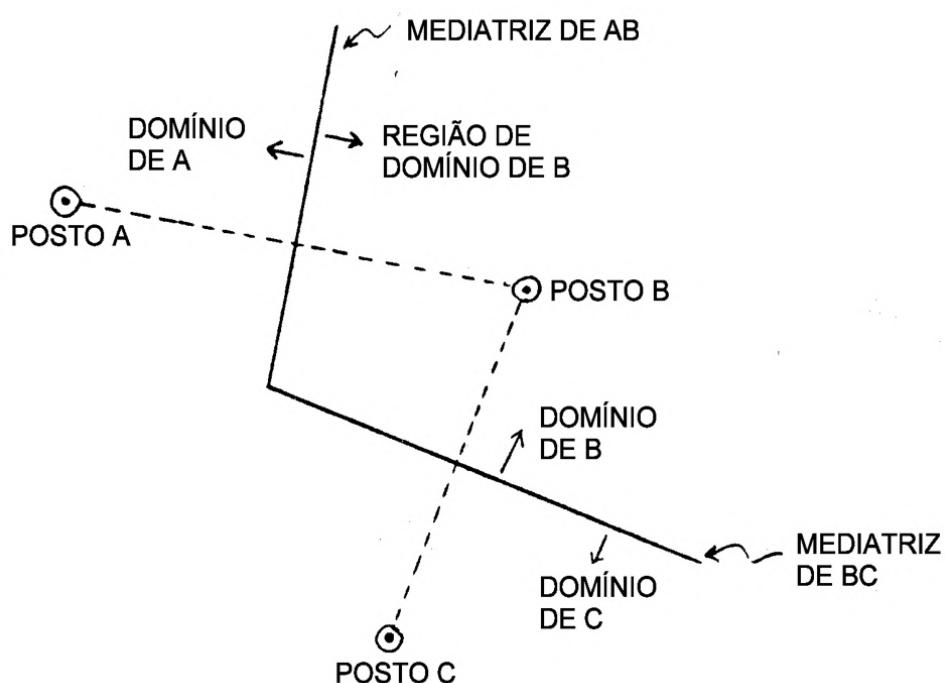
Para determinação da precipitação média de uma área qualquer, se faz necessário ter posse das observações obtidas pelos postos pluviométricos presentes nessa área, bem como àquelas circundantes,

Os três métodos existentes para cálculo de chuva média são: método da Média Aritmética, método de Thiessen, e método das Isoetas. Para o presente trabalho, utilizou-se o método de Thiessen, segundo duas razões principais:

- Os polígonos de Voronoi, necessários para execução do método de Thiessen, possuem código de execução pré-programado dentro do software QGis, facilitando a execução dos mesmos;
- As macros auxiliares do modelo hidrológico CAWM necessitam ser abastecidos com determinadas variáveis oriundas do método de Thiessen.

Os polígonos de Voronoi, utilizados no método de Thiessen são criados através de mediatrizes que cruzam um segmento de reta com origem em um posto pluviométrico e término em outro. A Figura 30 apresenta um esquema simplificado do traçado das mediatrizes.

Figura 30 – Traçado da mediatriz para os polígonos de Voronoi.



Para que o método de Thiessen seja corretamente executado, deve-se ter as coordenadas dos postos pluviométricos inseridas no arquivo resultante do item 3.3.2, onde as bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio foram devidamente alocadas.

É possível, através do site da ANA, conseguir os dados para as estações pluviométricas necessárias. Vale ressaltar que não é suficiente para o software que seja inserido unicamente as coordenadas, visto que a ferramenta *Polígonos de Voronoi* do QGis necessita de uma camada de dados que vão além da localização geográfica das estações. Outro detalhe crucial reside na necessidade de todas as estações estarem em uma mesma camada, para execução da ferramenta.

Com as estações inseridas no arquivo, como mostrado na Figura 31, deve-se utilizar a ferramenta Polígonos de Voronoi (Figura 32), de modo a gerar os polígonos que representam as áreas de influência de cada posto pluviométrico. Uma vez os polígonos feitos, é necessário identificar aquelas que suas áreas de influência estão inclusas na área de estudo, e verificar os dados das séries históricas das mesmas, necessários para o cálculo da chuva média.

Figura 31 – Estações pluviométricas (em vermelho), segundo dados da ANA.

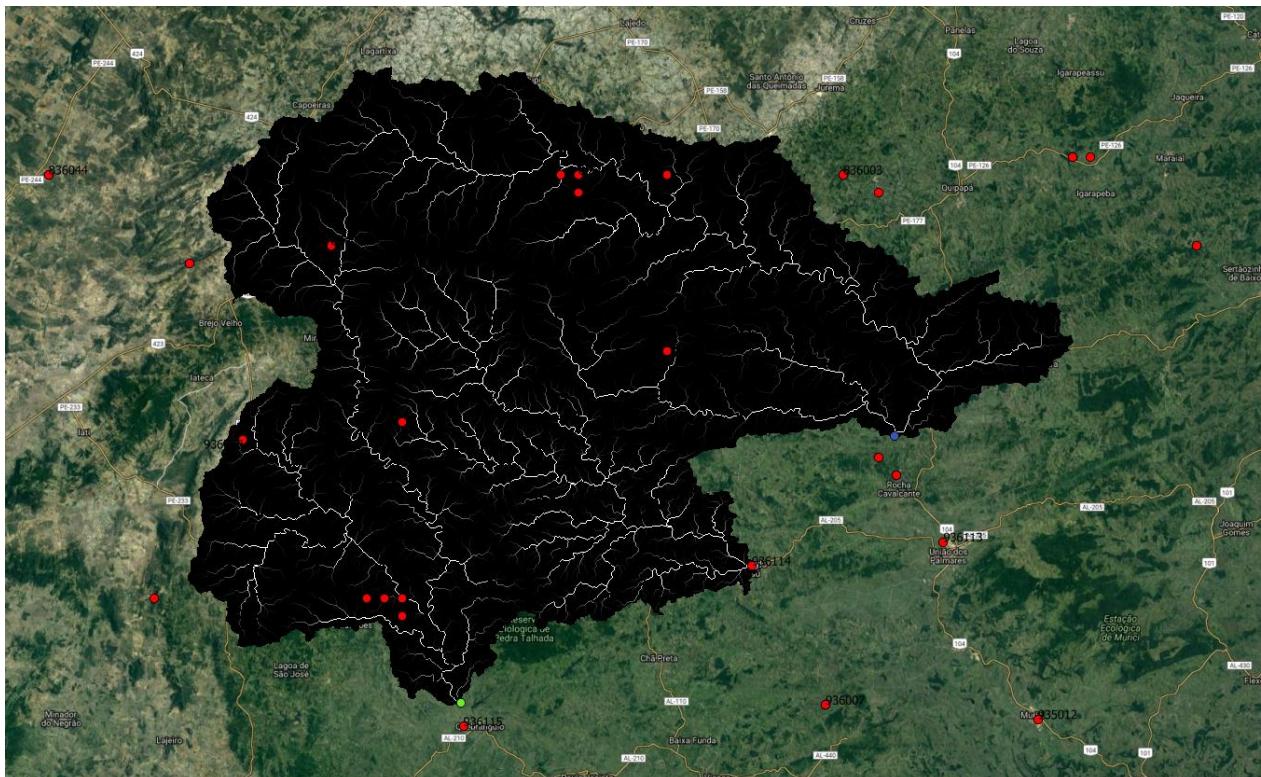
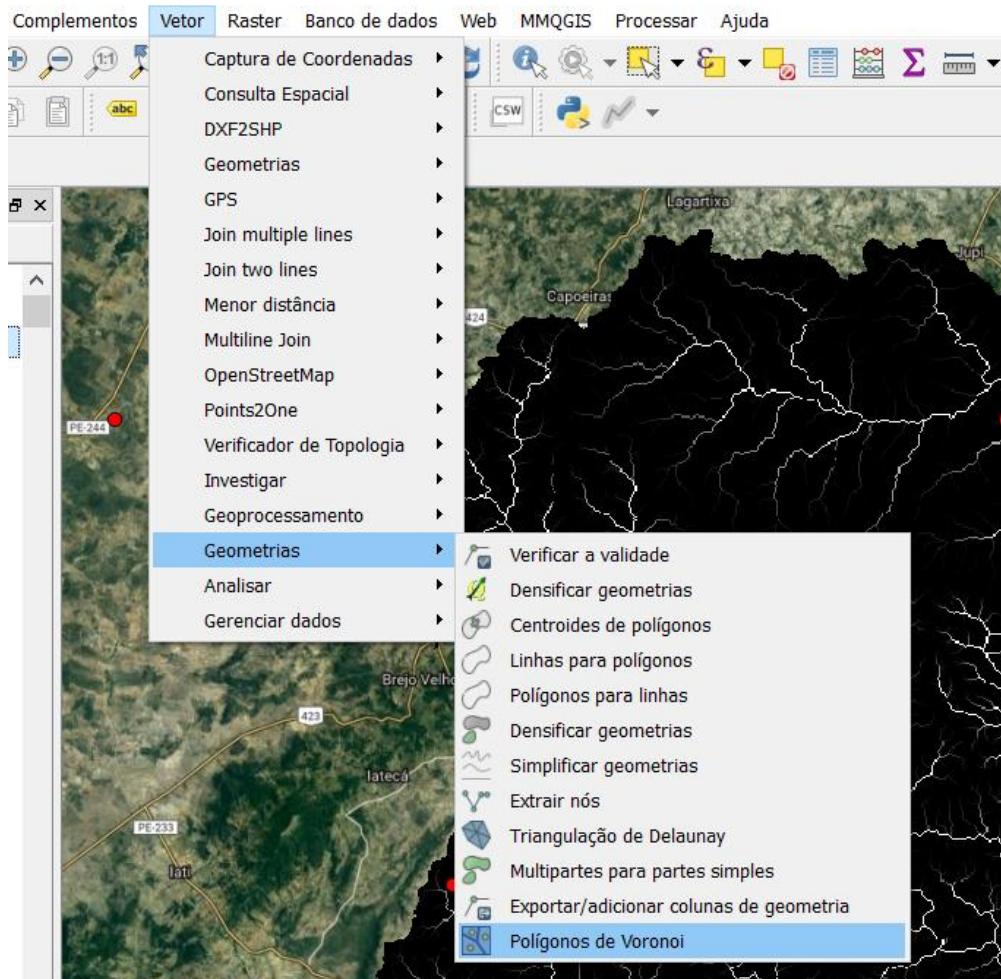


Figura 32 – Comando de execução da ferramenta Polígonos de Voronoi.



No caso de alguma estação não conter dados, deve-se retirar a mesma da camada de estações, e gerar um novo polígono. O processo de exclusão deve ser refeito até que todas as estações que contemplam a área de estudo possuam dados, ou que estejam tão distantes que não trariam uma análise que condiga com a realidade. Para o segundo caso, torna-se impossível realizar o método de Thiessen.

De todas as estações presentes na Figura 31, apenas 8 (oito) delas continham dados, fazendo com que as demais fossem eliminadas da camada, e o polígono de Voronoi fosse realizado em base dessas remanescentes, conforme representado na Figura 33.

Para as estações remanescentes, o resultado da ferramenta Polígonos de Voronoi forneceu o resultado observado na Figura 34.

Figura 33 – Estações pluviométricas remanescentes.

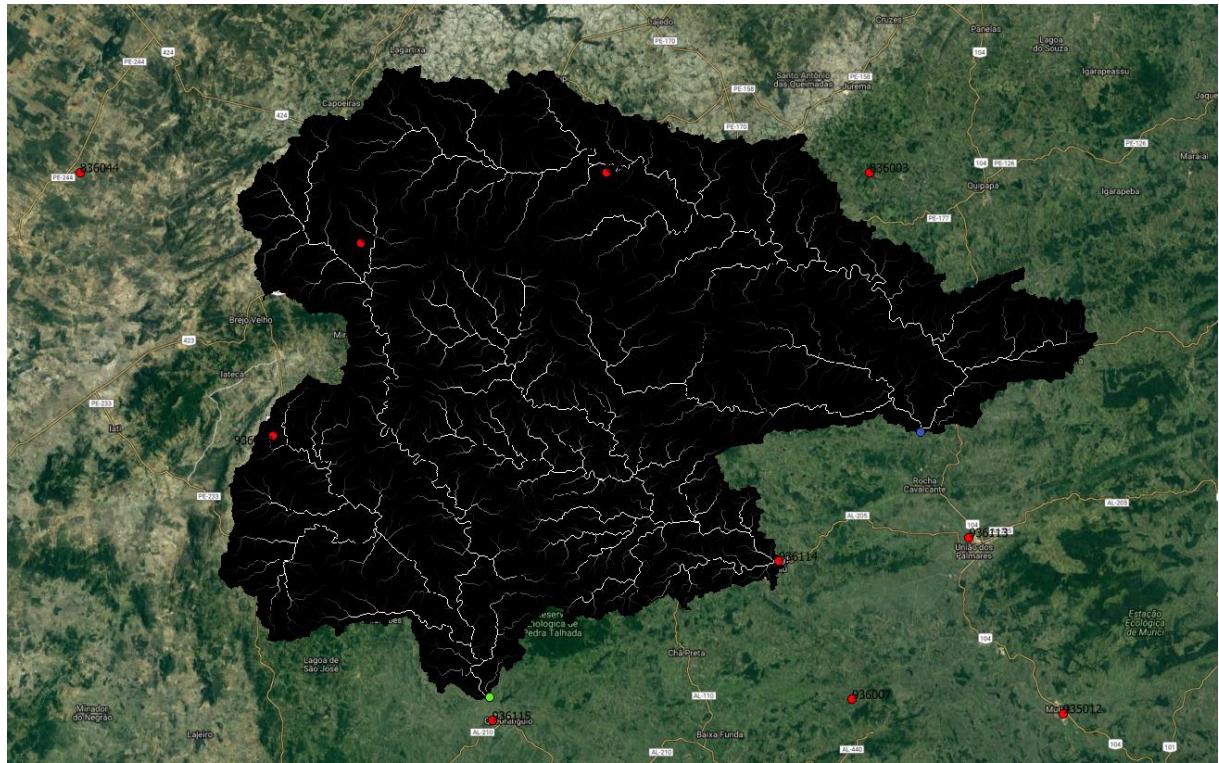
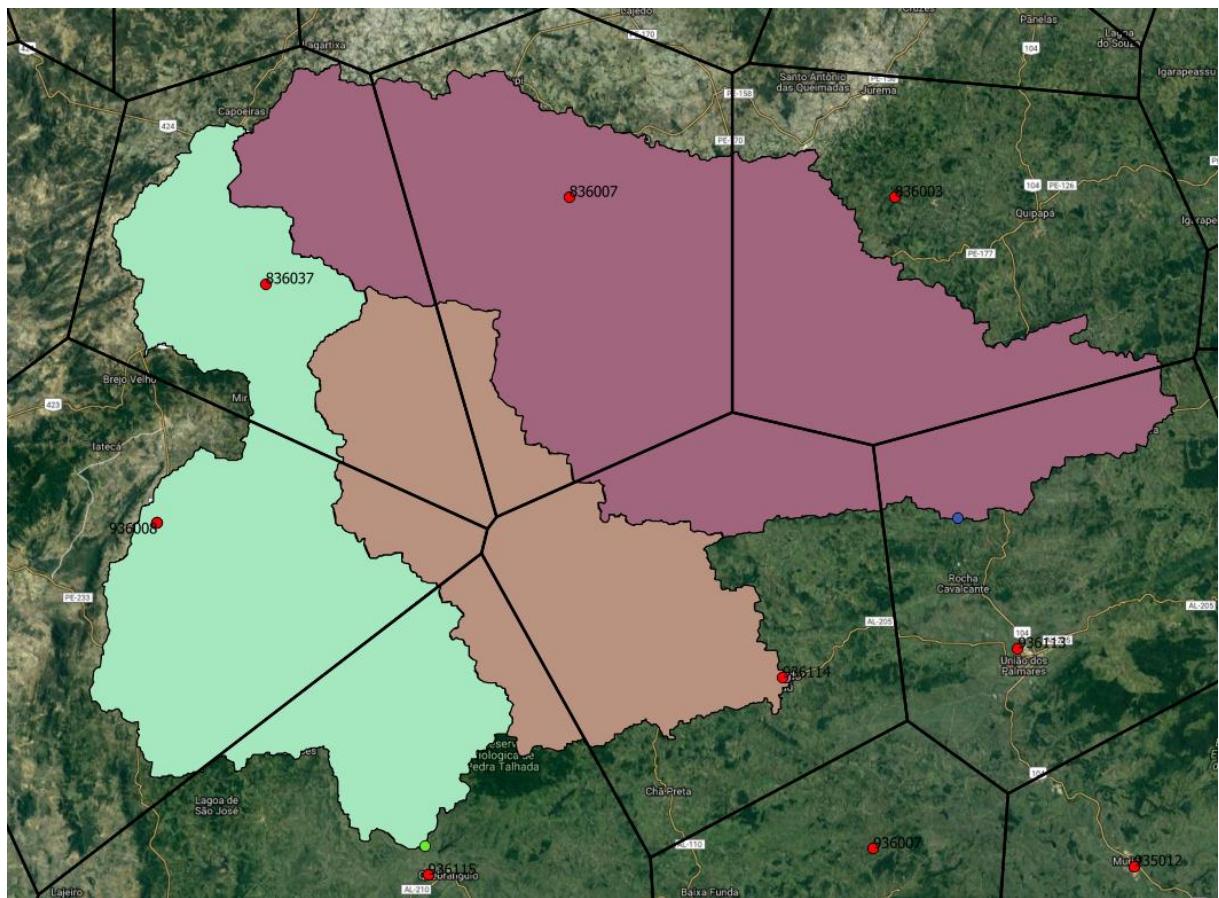


Figura 34 – Polígonos de Voronoi.



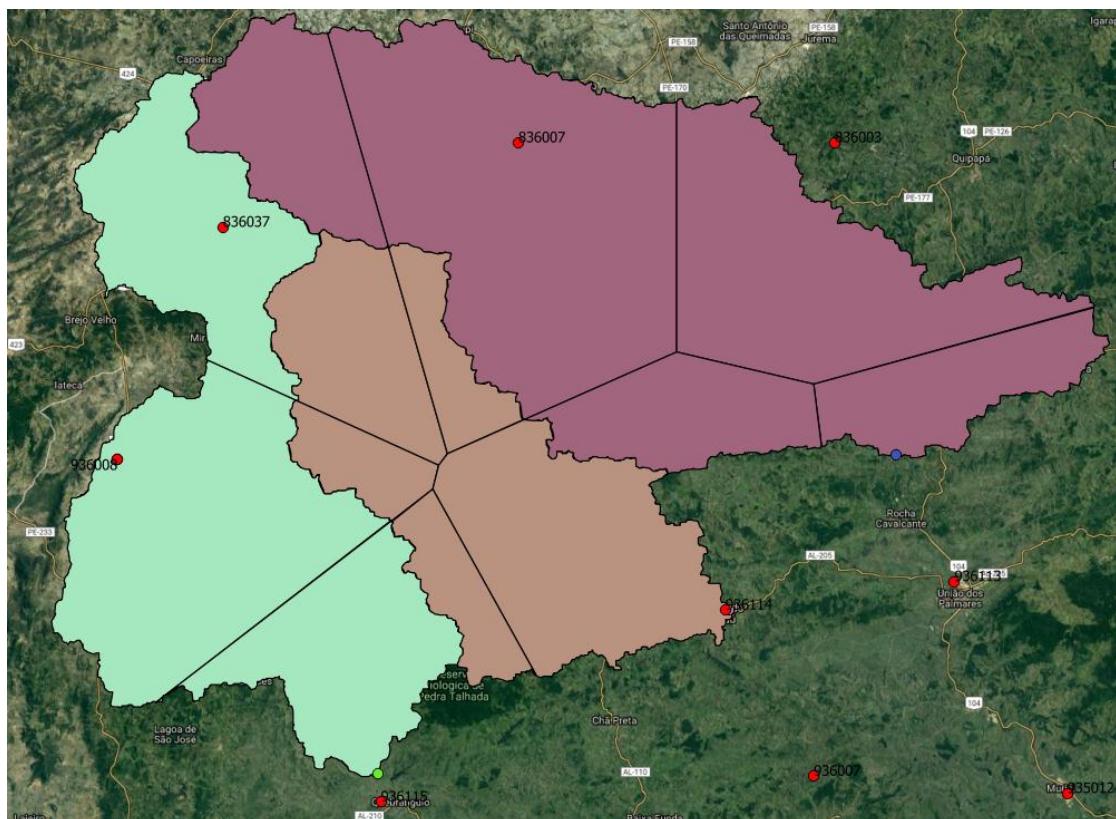
Como observado na Figura 34, das estações pluviométricas remanescentes, 7 (sete) delas possuem área de influência contemplando as bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. As estações estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações pluviométricas utilizadas.

Código	Estação	UF
836003	Altinho	PE
836007	Cachoeirinha	PE
836037	São Bento do Uma	PE
936008	Poço Comprido	PE
936113	União dos Palmares	AL
936114	Santana do Mundaú	AL
936115	Quebrangulo	AL

Para cada sub-bacia representada na Figura 34, deve haver o recorte da sobreposição do polígono de Voronoi, para que possa ser calculado o fator de área dos postos pluviométricos, como representado na Figura 35. O fator de área representa a parcela de superfície da sub-bacia que está na área de influência de um determinado posto, e é uma das variáveis necessárias para as macros auxiliares do CAWM.

Figura 35 – Recorte da sobreposição dos polígonos de Voronoi sobre as sub-bacias.



O fator de área será calculado de modo independente para cada sub-bacia, sendo, portanto, necessário realizar o processo 5 (cinco) vezes, para as bacias hidrográficas estudadas. O processo a ser seguido é definido à seguir:

- Abrir a *Tabela de Atributos* da camada de recorte da sobreposição da sub-bacia e ativar a opção de edição;
- Selecionar opção *Abrir Calculadora de Campo*, escolher criar um novo campo, que será responsável pelo cálculo da área total da sub-bacia. O campo deve ser configurado com tipo para número decimal. Na área da expressão, deve-se escrever “*\$area / 1000000*”, sem aspas. A divisão pelo valor de 1000000 (um milhão) é necessária para converter o resultado do numerador para Km² (quilômetros quadrados);
- Ir até menu *vetor*, selecionar a opção *Analisar*, e a ferramenta *Estatísticas básicas para campos numéricos*. Será gerado um arquivo em formato html (página de internet) com dados relacionados à sub-bacia. Um dos resultados exibidos é o *Soma*. O valor nele representado é a área da bacia, em Km²;
- Abrir novamente a *Tabela de Atributos*, e selecionando *Abrir Calculadora de Campo*, deve-se criar um novo campo, com as mesmas configurações da anteriormente criada. Na expressão, deve-se inserir o nome do campo criado anteriormente, dividindo-o pelo valor mostrado em *Soma*, no passo anterior.

Esse cálculo irá mostrar, como resultado, o fator de área de cada estação, para a sub-bacia a qual for selecionado o processo. O Apêndice A representa o passo-a-passo acima enunciado.

3.3.4 Configuração das Macros Auxiliares do CAWM

As macros do Excel são sub-rotinas com capacidade de executar atividades pré-programadas. Essas atividades podem ser qualquer tipo de trabalho que o Excel tenha capacidade de executar.

Para que o modelo hidrológico CAWM possa ser utilizado e posteriormente calibrado, faz-se necessário, antes, a utilização de algumas macros auxiliares realizadas em arquivos externos. Essas macros necessitam de alguns arquivos específicos, com os dados que irão alimentar a sub-rotina presente no código da macro.

Os arquivos necessários para que as macros auxiliares possam ser executadas são:

- Arquivo em formato .csv com os dados das estações pluviométricas cujas áreas de influência são contempladas na área da sub-bacia, adquiridas no site da ANA;
- Planilha Excel com dados específicos (código da estação, latitude, longitude, área em Km², fator de área) das estações do item anterior.

Para a planilha Excel com os dados específicos, é necessário montá-la manualmente, visto que a área em Km² e o fator de área são obtidos através do método de Thiessen, executado no software QGis. O arquivo deve ser montado tal como ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Representação da disposição dos dados específicos na planilha Excel. Dados pertencentes à bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.

	A	B	C	D	E	F
1	Estacoes P	field_28	field_29	AREA_KM2	F AREA	
2	836037	-8,52	-36,36999999	297,8992	0,2842	
3	936008	-9,02999999	-36,42	495,8438	0,473	
4	936115	-9,320278	-36,491944	254,5654	0,2428	
5						
6						

Deve-se separar os dados em pastas distintas. Uma para as macros, uma segunda para os arquivos .csv oriundos da ANA, e uma terceira, vazia, onde serão armazenados os dados tratados das estações, após utilização das macros.

A primeira macro a ser executada contém duas sub-rotinas. A primeira (intitulada *CSVpXLS*) é utilizada para criar uma cópia dos dados .csv das estações, em formato .xls (formato planilha Excel), sem perder as características do arquivo. A segunda macro (*SalvarMesmoNome*) irá criar um arquivo com os dados tratados (sem duplicidade de dados) na terceira pasta criada anteriormente.

Em sequência, deve-se utilizar a segunda macro, a qual contém três sub-rotinas. A sub-rotina *FazMatriz* irá ler os dados tratados provenientes da macro anterior, compondo uma matriz. A sub-rotina *DeletarSalvar* irá eliminar as colunas da matriz que não são necessárias ao CAWM. Já a sub-rotina *Cabecalho* irá discriminar corretamente cada coluna existente na matriz. A execução desta última sub-rotina terá como resultado um novo arquivo, em formato .xls, que deverá ser salvo.

A terceira macro a ser executada consta com quatro sub-rotinas. Sua primeira sub-rotina, *ZerarValoresAntigos*, deve ser executada para garantir que não haverá nenhum dado remanescente em caso de mais de utilizações prévias da macro. A segunda sub-rotina, *EstacoesAno1*, irá pedir os dados específicos, demonstrados na Figura 30, para inserir dados necessários aos cálculos das duas sub-rotinas seguintes. Após selecionar os dados, a sub-rotina também pedirá um período de tempo, no qual será realizada a análise.

A terceira sub-rotina a ser executada, *FazMedia2*, utilizará os dados do arquivo .xls gerado na macro anterior, para calcular a precipitação média da bacia hidrográfica estudada, em função dos dados no período de tempo selecionado na sub-rotina anterior. A última sub-rotina, *ValoresNegativos3*, tem como função eliminar os dados de entrada negativos, que poderiam gerar erros no valor da precipitação média.

O Apêndice B apresenta os códigos de cada sub-rotina das macros.

Uma vez executadas as macros, deve-se encontrar as estações fluviométricas mais próximas do exutório da bacia hidrográfica, e, em posse do arquivo resultante das macros, e dos dados provenientes da estação fluviométrica, pode-se configurar o CAWM, para posterior calibragem.

3.3.5 Calibragem do Modelo Hidrológico

Após a execução de todas as macros auxiliares, o CAWM estará pronto para ser usado. Nele, há também macros, com função de importar os dados de precipitação e vazão, ajustando-os e comparando a vazão calculada com a observada.

Neste estudo foi utilizada a versão CAWM III, com quatro parâmetros a calibrar. A calibração é feita utilizando as ferramentas de otimização do Solver, presentes no MS Excel. O algoritmo que melhor se ajusta ao processo é o GRG Não Linear, baseado em gradientes. No processo, foi escolhido um ciclo de vazões característico do período úmido, observando-se como indicadores de ajuste os coeficientes de determinação R^2 e o de Nash-Sutcliffe NS, dado por:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

O evento escolhido para calibração foi aquele que melhor ajustou os demais eventos observados. Há que se tomar cuidado nesta análise a respeito das falhas nos históricos de vazão e precipitação e na existência de barragens que influenciam no escoamento, visto que essas ocorrências afetam os dados que estão sendo comparados. O passar de tempo das simulações foi de 1 dia. Os dados de evapotranspiração foram estimados a partir das normais climatológicas publicadas pelo INMET para o posto de Garanhuns, inserido na região de estudo.

4 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Ao se analisar as estações presentes nas áreas de estudo, e conferir a existência de dados das mesmas, pôde-se perceber que apenas a estação de Santana do Mundaú (Código 39700000 da CPRM) continha dados de vazão suficientes para uma análise, com série histórica iniciada em 1993 e em operação no presente. Assim, o modelo foi calibrado com os dados dessa estação.

Tendo em vista a ausência de dados nas estações fluviométricas dos rios Paraíba do Meio e Canhoto, a estação de Santana do Mundaú foi usada para estimativa das vazões dos rios locais das suas estações, considerando-se a proporção de áreas de cada posto. Essa estimativa é razoável, visto que as bacias possuem características físico-climáticas bastante similares.

A avaliação se deu em nível diário. Os resultados foram discutidos perante coeficiente de determinação (r^2 , que pode variar entre -1 e 1) e pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS , que pode variar de infinito negativo até 1). A função-objetivo utilizada buscou maximizar NS e minimizar a diferença entre os valores de vazão calculados e obsefvados (a constante 10^6 destina-se a evitar valores muito baixos).

$$FOBJ = \frac{R2 \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (11)$$

O problema do desencontro do período de dados de chuva x vazão aconteceu também com os dados das estações pluviométricas na sub-bacia do rio Mundaú, onde apenas o posto de Santana do Mundaú apresenta série de dados coincidente com os dados de vazão. Assim, a simulação para essa sub-bacia é feita com dados de uma única estação pluviométrica, o que pode comprometer os resultados. Para as demais sub-bacias, foram usados os registros de chuva nos períodos disponíveis, visto que a série de dados de vazão para estes postos foi estimada para todo o período de 1993-2017 a partir do posto de Santana do Mundaú.

Além disso, foram utilizados como base de comparação os dados oriundos de estudo desenvolvido para a região em estudo (SANTOS, 2013). No caso foram utilizados os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para simular o escoamento na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Para sub-bacia do rio Mundaú, o período de análise se deu entre os anos de 1993 e 2017. Para as sub-bacias dos rios Paraíba do Meio e Canhoto, por conta da disponibilidade mais reduzida de dados existentes nas estações pluviométricas, o período foi de 1997 a 2009.

Em todas as sub-bacias, o período de análise gráfica e dos parâmetros de ajuste foi subdividido por eventos, de modo a contemplar melhor os eventos chuvosos, possibilitando uma observação melhor em relação ao ajuste dos dados calculados e observados. Deve-se detalhar a respeito dos gráficos o eixo das chuvas. Apesar de aparecerem com valores negativos, os valores estão dessa forma para o crescimento do eixo ser direcionado de cima para baixo.

4.1 Bacia Hidrográfica do rio Mundaú

4.1.1 Sub-bacia do rio Mundaú

Para esta sub-bacia em especial, os resultados obtidos são, de fato, comparativos, visto que é a única, dentre as três sub-bacias do presente trabalho, que possui uma estação fluviométrica com dados consistentes para o estudo. Além disso foi possível realizar comparação entre os resultados obtidos utilizando o CAWM III com aqueles provenientes do modelo HEC-HMS.

A representação foi realizada através dos dias corridos de observação. Os curtos períodos, utilizados para demonstrar a qualidade da aproximação, foram destacados com as datas correspondentes aos dias corridos do intervalo.

As Figuras 37 a 47 representam os resultados obtidos após a calibragem do modelo hidrológico. A calibração foi feita para os dias 4430-4560, obtendo-se coeficiente $R^2 = 0,61$ e $NS = 0,75$. Ajustes até melhores ocorreram em alguns eventos de validação, como mostram as figuras. Já na Tabela 2, está representada uma síntese dos valores obtidos para cada período.

Tabela 2 – Síntese dos valores de coeficientes para os períodos destacados.

Período	r^2	NS	Período	r^2	NS
14/07/94 a 13/08/94	0,4183	0,6445	27/05/05 a 16/06/05	0,7824	0,8161
03/06/96 a 23/06/96	0,6619	-7,9241	01/05/08 a 26/05/08	0,6602	0,7563
23/07/96 a 12/08/96	0,6443	0,6868	16/05/09 a 05/06/09	0,2374	0,2082
03/06/98 a 23/07/98	0,6209	-1,6001	23/06/17 a 13/07/17	0,7869	0,6957
08/05/01 a 18/06/01	0,3725	-0,8814	01/09/17 a 21/09/17	0,4196	0,5034
11/06/04 a 01/07/04	0,5082	0,1522			

Figura 37 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 14/07/94 a 13/08/94 ($R^2=0,4183$ e $NS=0,6445$).

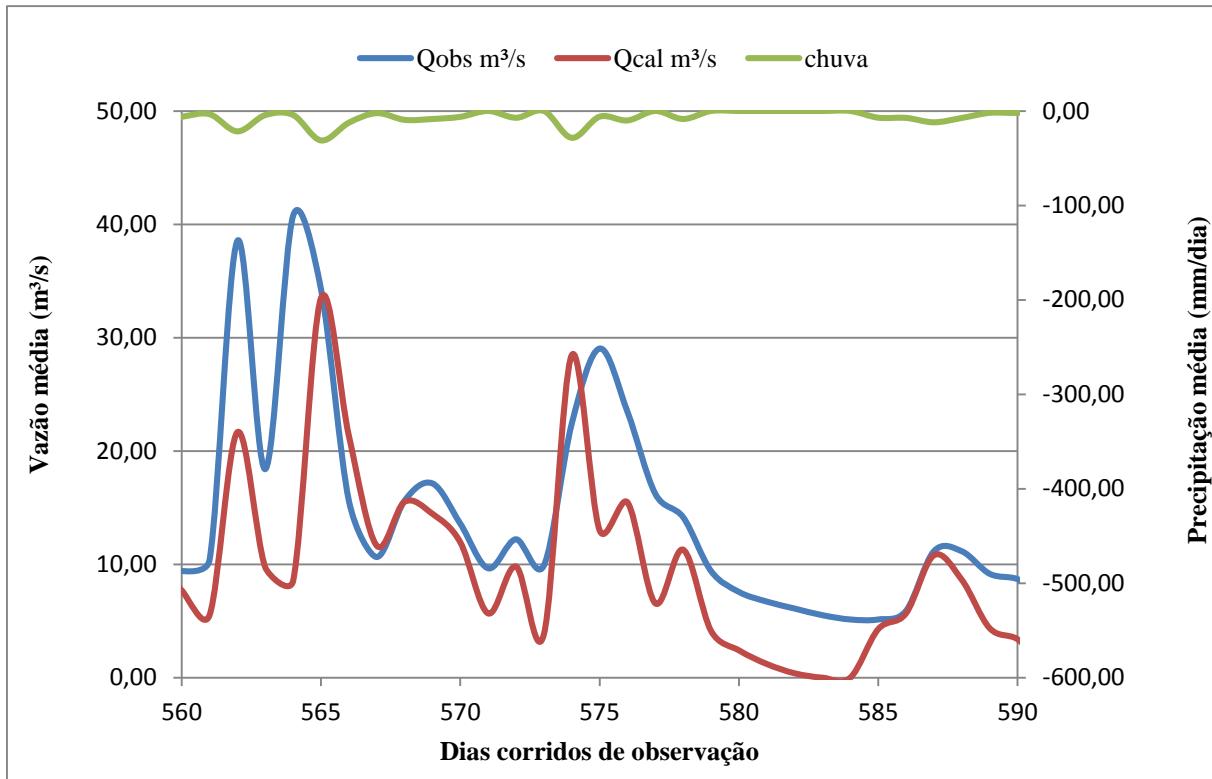


Figura 38 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 03/06/1996 a 23/06/1996 ($R^2 = 0,6619$ e $NS = 7,9241$).

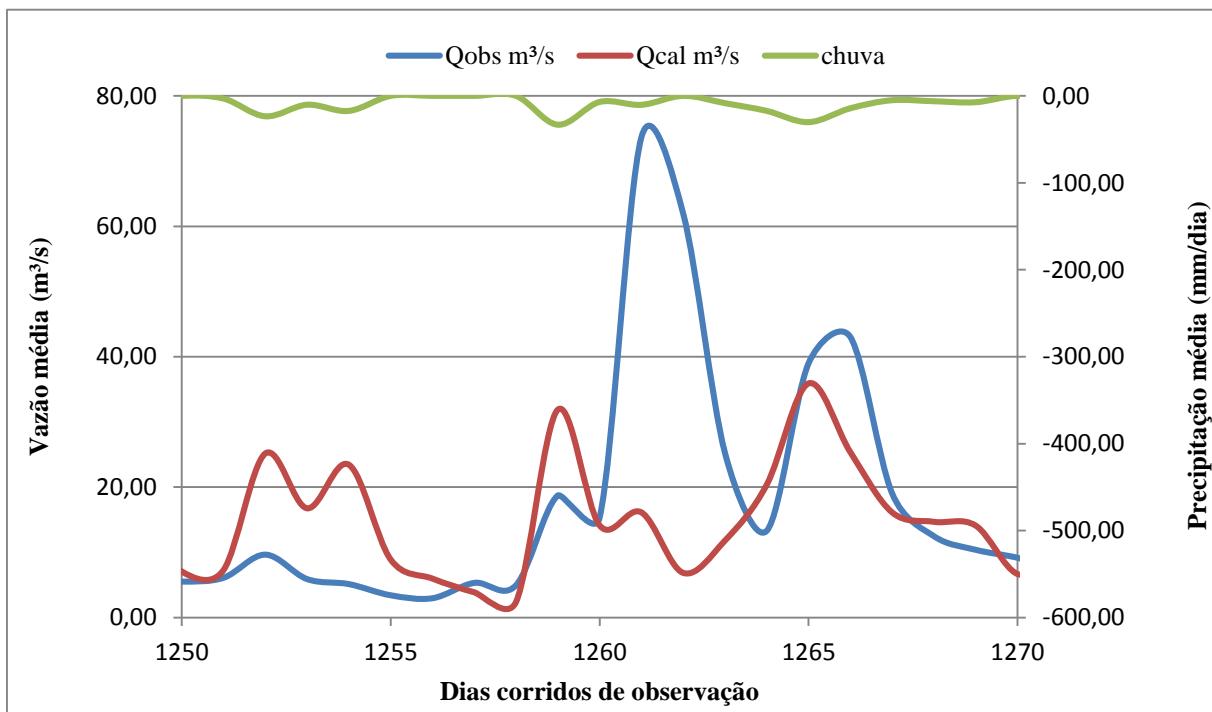


Figura 39 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 23/07/1996 a 12/08/1996 ($R^2=0,6443$ e $NS=0,6868$).

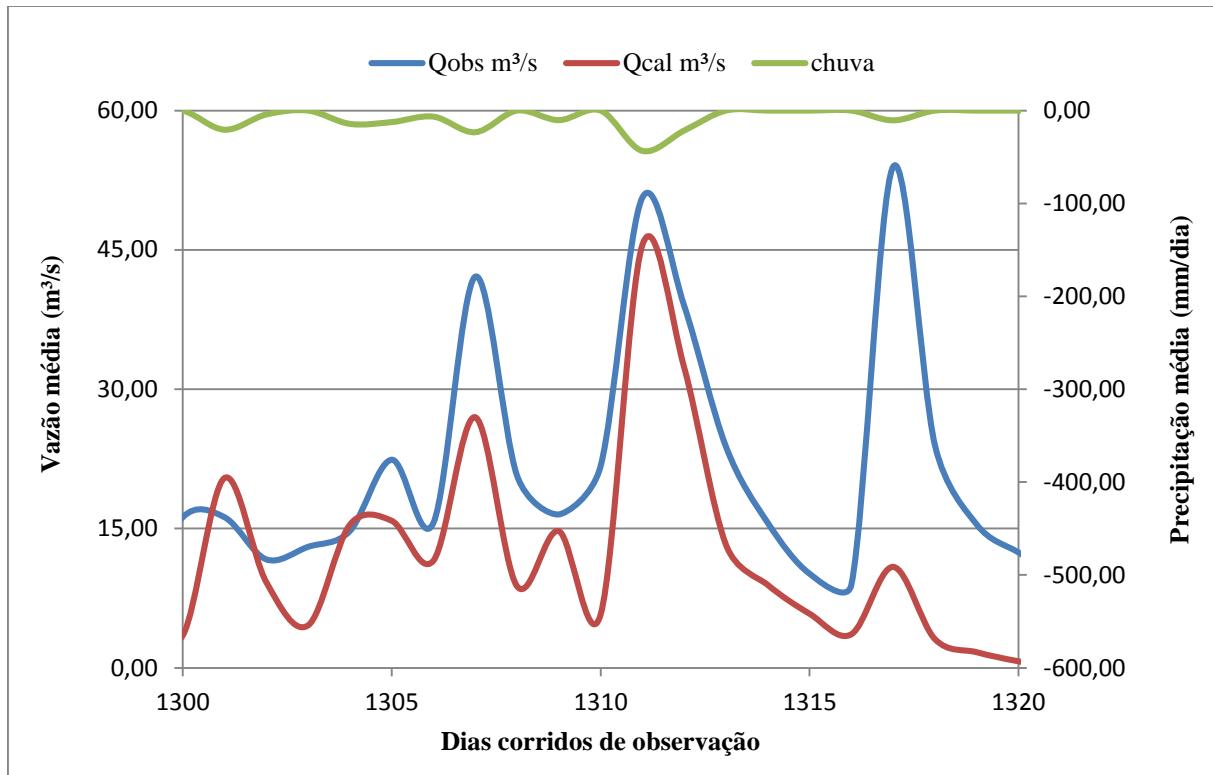


Figura 40 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 03/06/1998 a 23/07/1998 ($R^2=0,6209$ e $NS=-1,6001$).

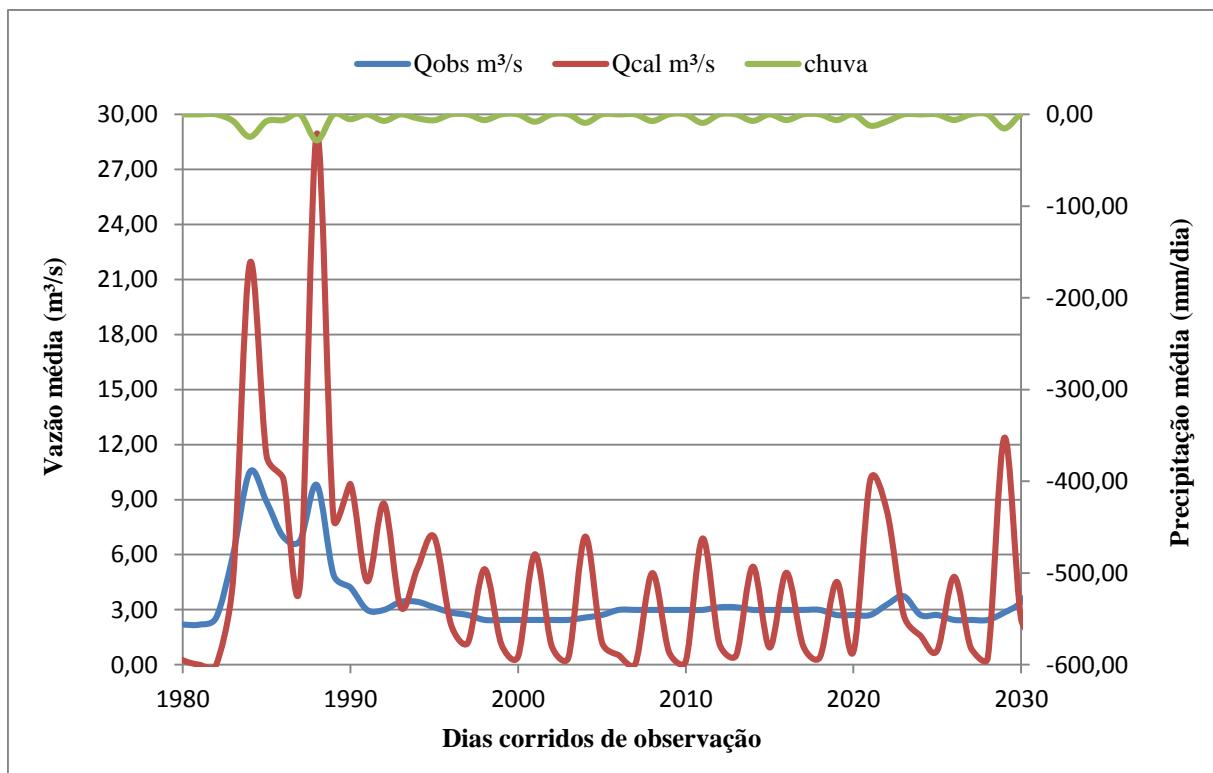


Figura 41 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 08/05/2001 a 18/06/2001 ($R^2= 0,3725$ e $NS= 0,8814$).

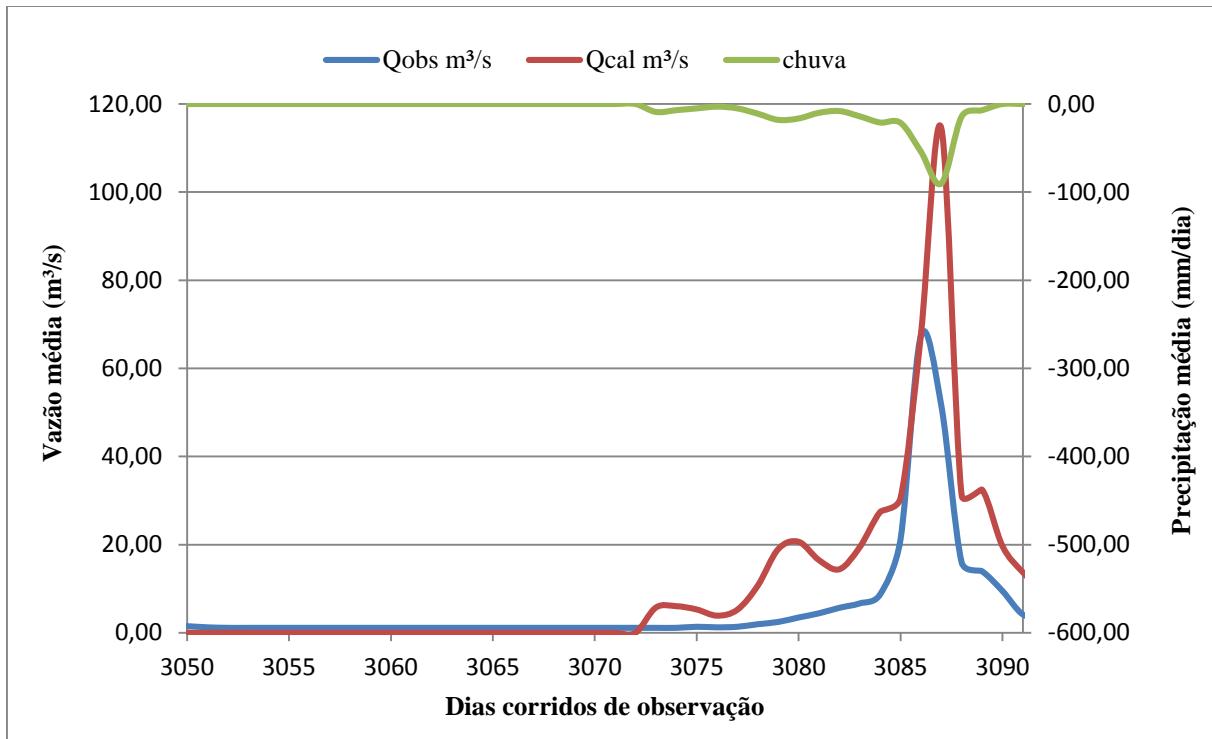


Figura 42 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 11/06/2004 a 01/07/2004 ($R^2= 0,5082$ e $NS= 0,1522$).

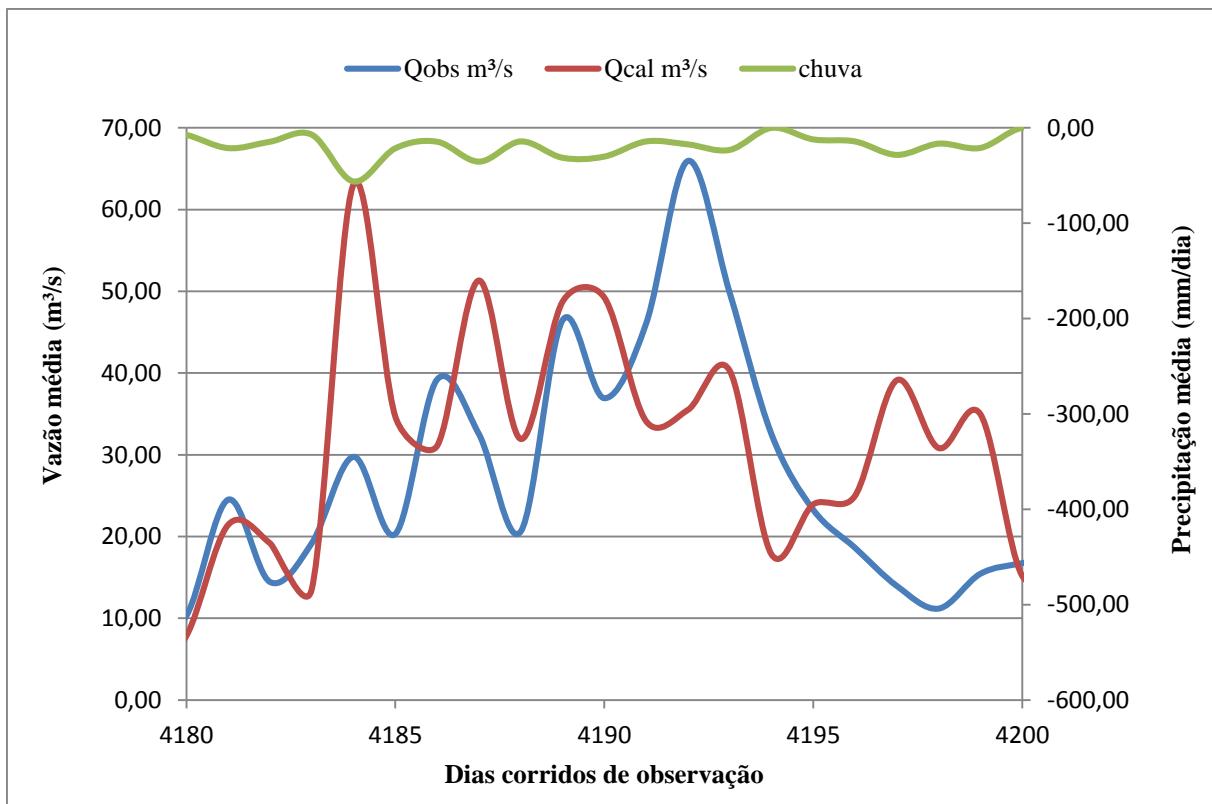


Figura 43 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 27/05/2005 a 16/06/2005 ($R^2= 0,7824$ e $NS=0,8161$).

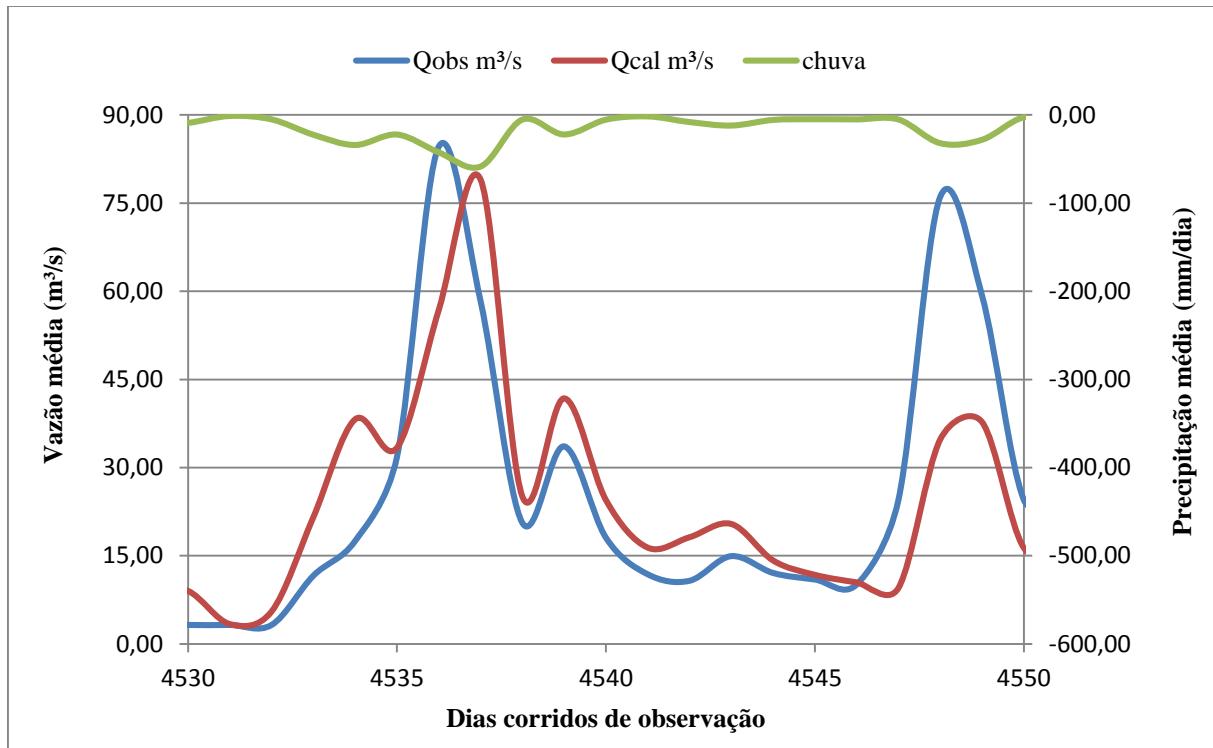


Figura 44 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 01/05/2008 a 26/05/2008 ($R^2= 0,6602$ e $NS=0,7563$).

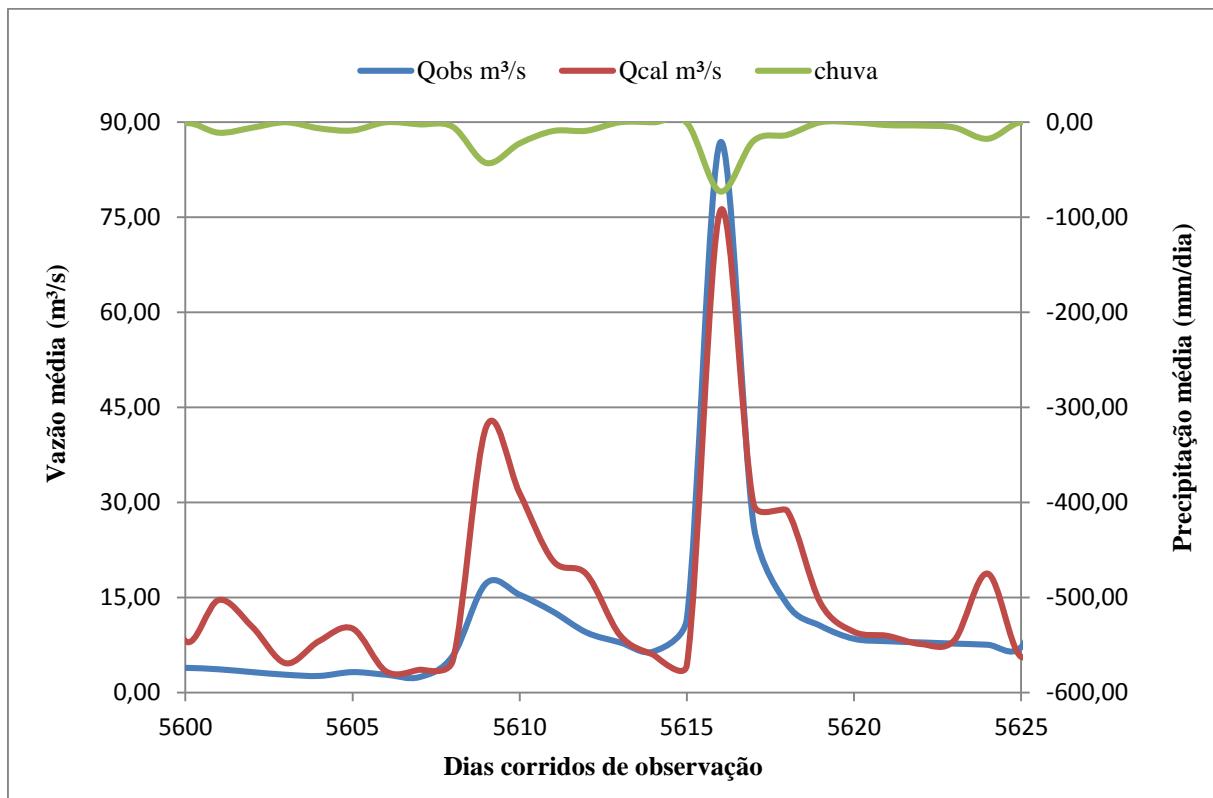


Figura 45 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 16/05/2009 a 05/06/2009 ($R^2= 0,2374$ e $NS=0,2082$).

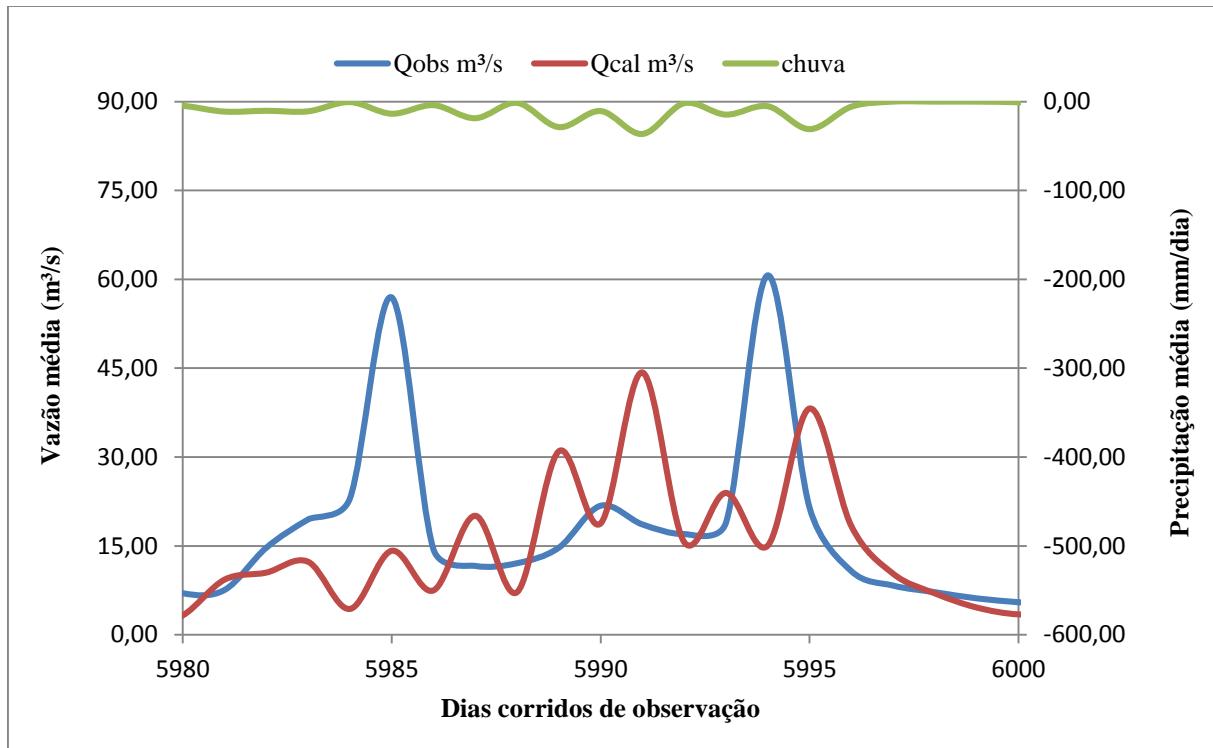


Figura 46 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 23/06/2017 a 13/07/2017 ($R^2= 0,7869$ e $NS=0,6957$).

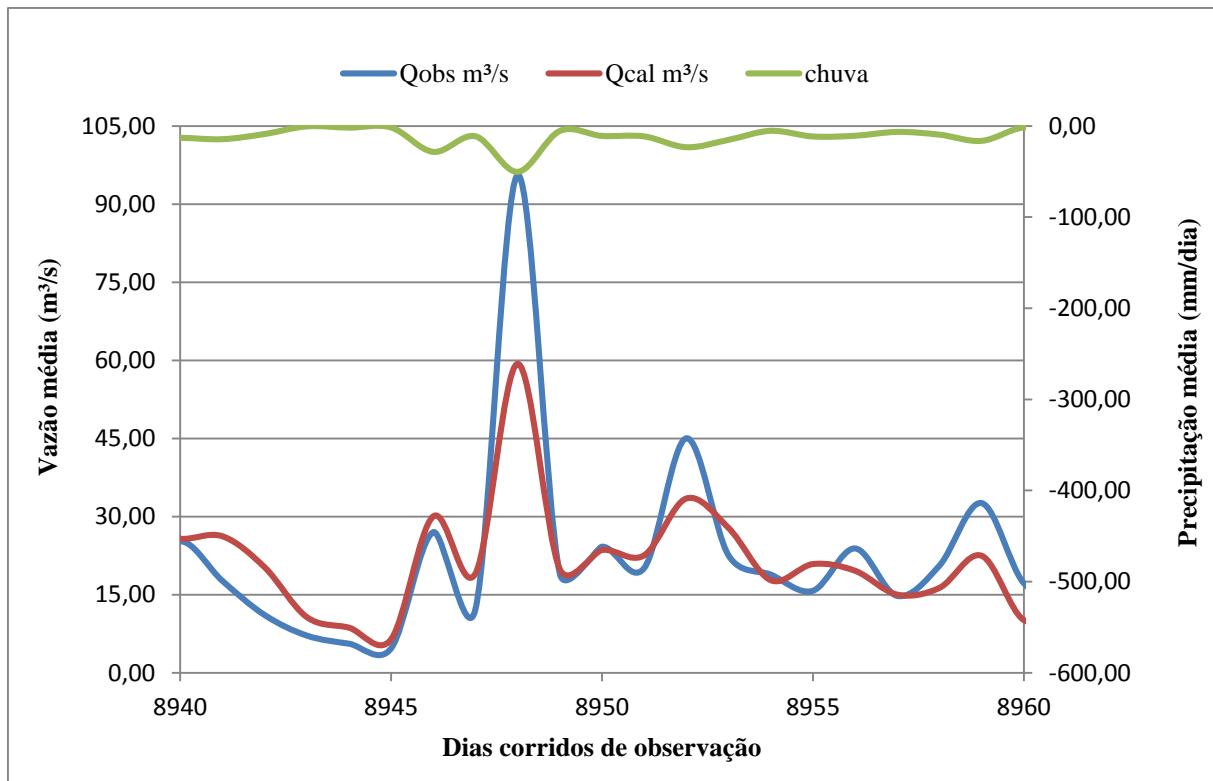
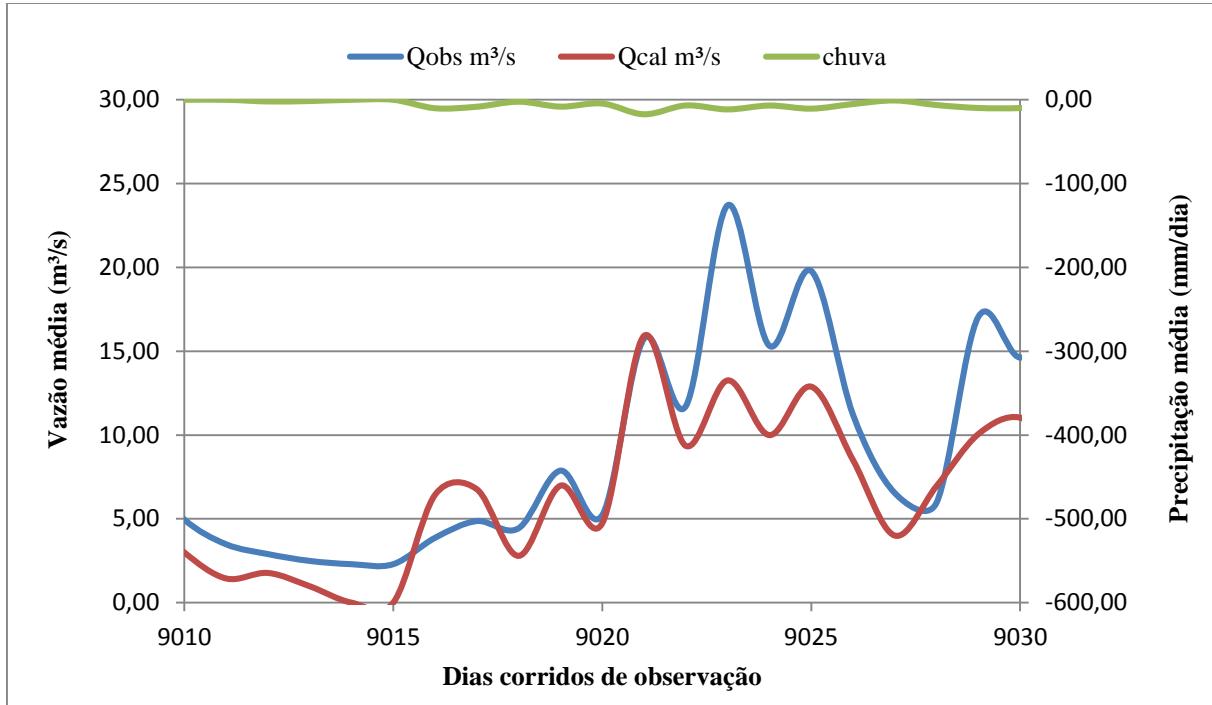


Figura 47 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Período de 01/09/2017 a 21/09/2017 ($R^2= 0,4196$ e $NS=0,5034$).



Os resultados do modelo se mostraram satisfatórios, considerando-se as limitações dos dados. A simulação para o período 03/06/1998 a 23/07/1998 (Figura 40) evidenciou a necessidade de melhor ajuste das vazões baixas, provavelmente por conta da retirada do reservatório de recepção.

De modo a comparar a precisão da calibragem, foram utilizados resultados obtidos no artigo já citado, em dois períodos distintos. O primeiro, entre os dias 30/07/00 e 15/08/00, e o segundo entre os dias 26/05/05 e 12/06/05. Tais comparações podem ser observadas nas Figuras 48 e 49.

Através do resultado visto pelas comparações, é possível notar que a modelagem utilizando o modelo hidrológico CAWM se comportou de modo mais fiel aos dados observados. Contudo, a comparação de apenas dois eventos não pode atestar que um modelo é mais apropriado que outro.

Aproveitando-se do fato de o período de análise se estender de 1993 até 2017, decidiu-se evidenciar o período do evento em junho de 2010, como representado na Figura 50. Decidiu-se evidenciar o evento para que se possa ter noção da rápida variação do nível da água, com vazão mínima do rio até o dia anterior ao início das chuvas, e seu pico de vazão, superando 120 m³/s durante o evento. Como as réguas da estação fluviométrica foram arrastadas pelas águas, os valores para vazão observada estão zerados nesse intervalo.

Figura 48 – Comparação de resultado da modelagem através do modelo CAWM e do modelo HEC-HMS.
Período entre os dias 30/07/00 e 15/08/00.

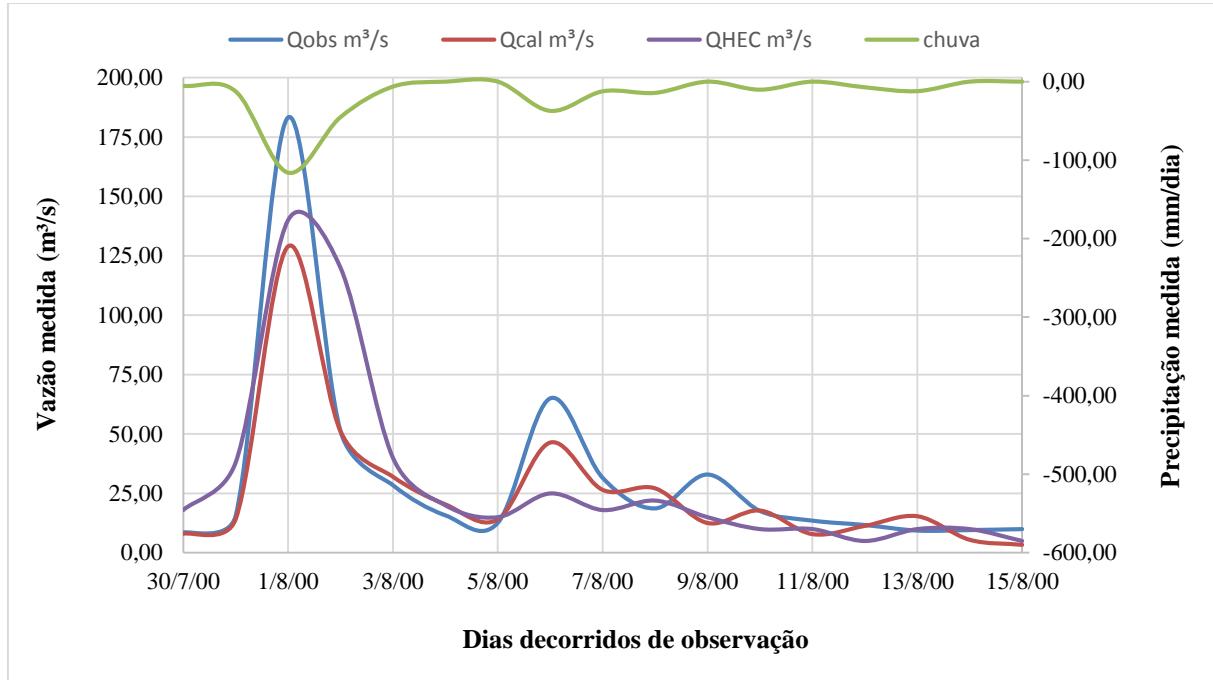


Figura 49 – Comparação de resultado da modelagem através do modelo CAWM e do modelo HEC-HMS.
Período entre os dias 26/05/05 e 12/06/05.

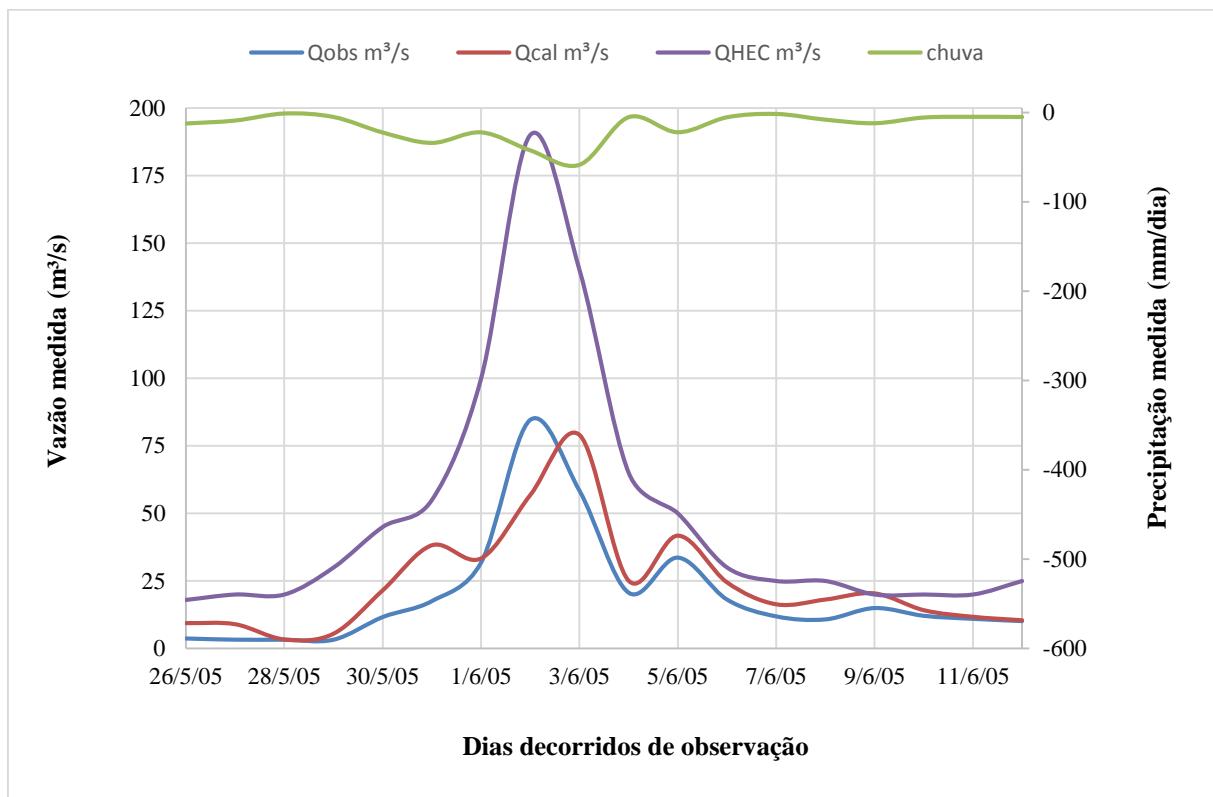
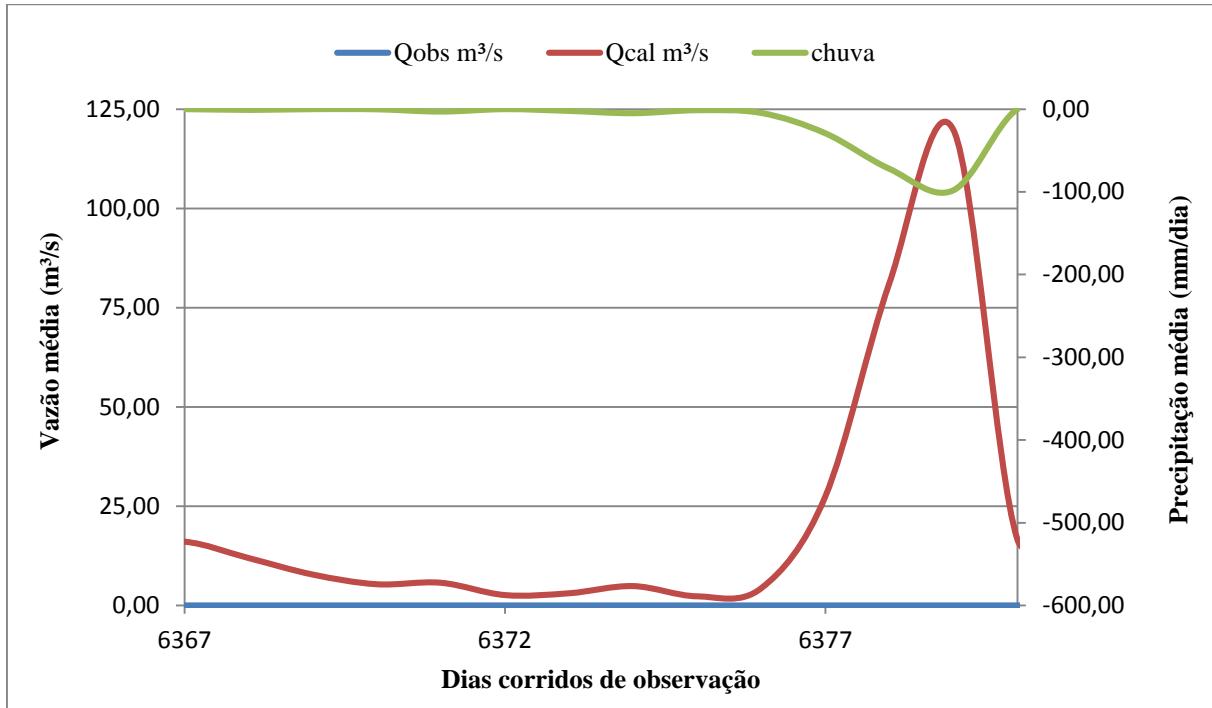


Figura 50 – Modelagem da sub-bacia do rio Mundaú. Evento 2010 (07/06/2010 a 20/06/2010).



4.1.2 Sub-bacia do rio Canhoto

Ressalta-se que, para esta bacia, os dados de vazão observadas são simulações do comportamento de vazão, visto que na sub-bacia não há estações fluviométricas que contenham dados suficientes para uma análise. Assim, a vazão simulada, como foi chamada nos gráficos, vieram de uma relação de proporção em função das áreas, das existentes na estação de Santana do Mundaú, na sub-bacia do Mundaú. As precipitações e, consequentemente, a vazão calculada, porém, são efetivamente ocorridas na bacia.

As Figuras 51 a 57 representam períodos curtos nos quais ocorreram eventos chuvosos significativos. Já na Tabela 3, está representada uma síntese dos valores obtidos para cada período.

Tabela 3 – Síntese dos valores de coeficientes para os períodos destacados.

Período	r ²	NS	Período	r ²	NS
14/07/98 a 13/08/98	0,8793	0,8546	03/06/02 a 23/07/02	0,7986	0,8418
03/06/00 a 23/06/00	0,9676	0,9205	08/05/05 a 20/06/05	0,6634	0,6797
23/07/00 a 12/08/00	0,7665	0,7767	05/08/09 a 14/09/09	0,2865	0,4219
06/09/00 a 01/10/00	0,7496	0,6835			

Figura 51 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 14/07/98 a 13/08/98 ($R^2=0,8793$ e $NS=0,8546$).

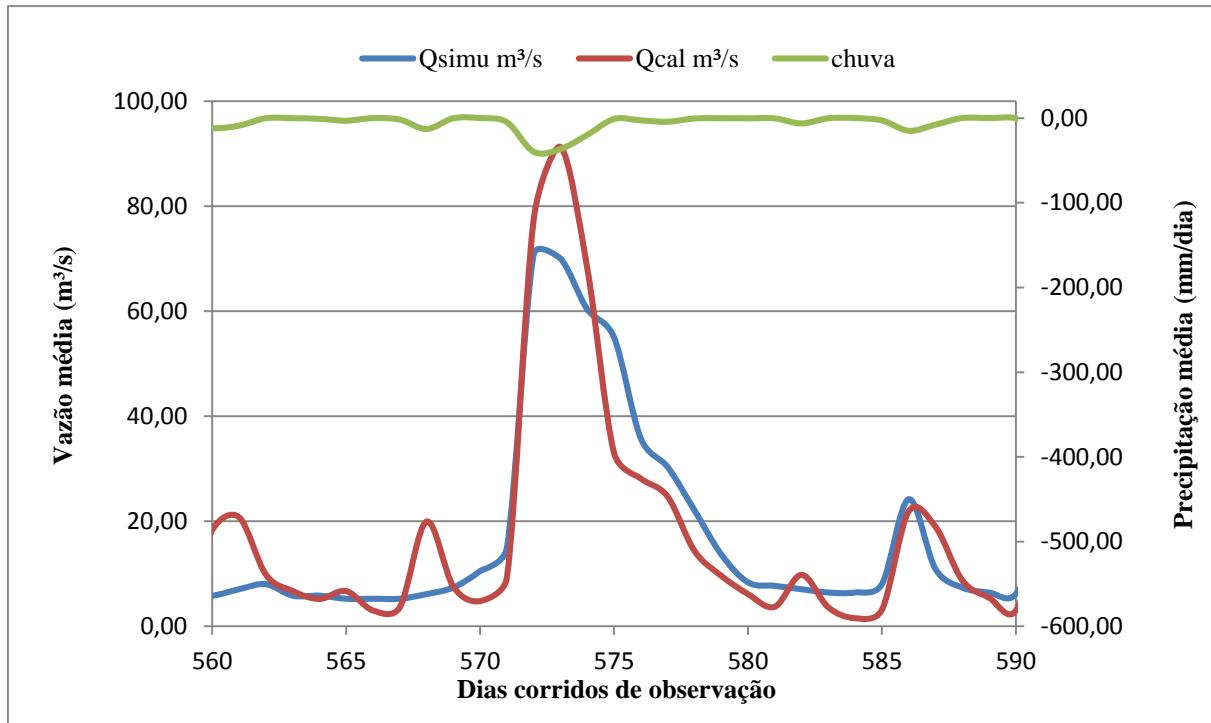


Figura 52 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 03/06/00 a 23/06/00 ($R^2=0,9676$ e $NS=0,9205$).

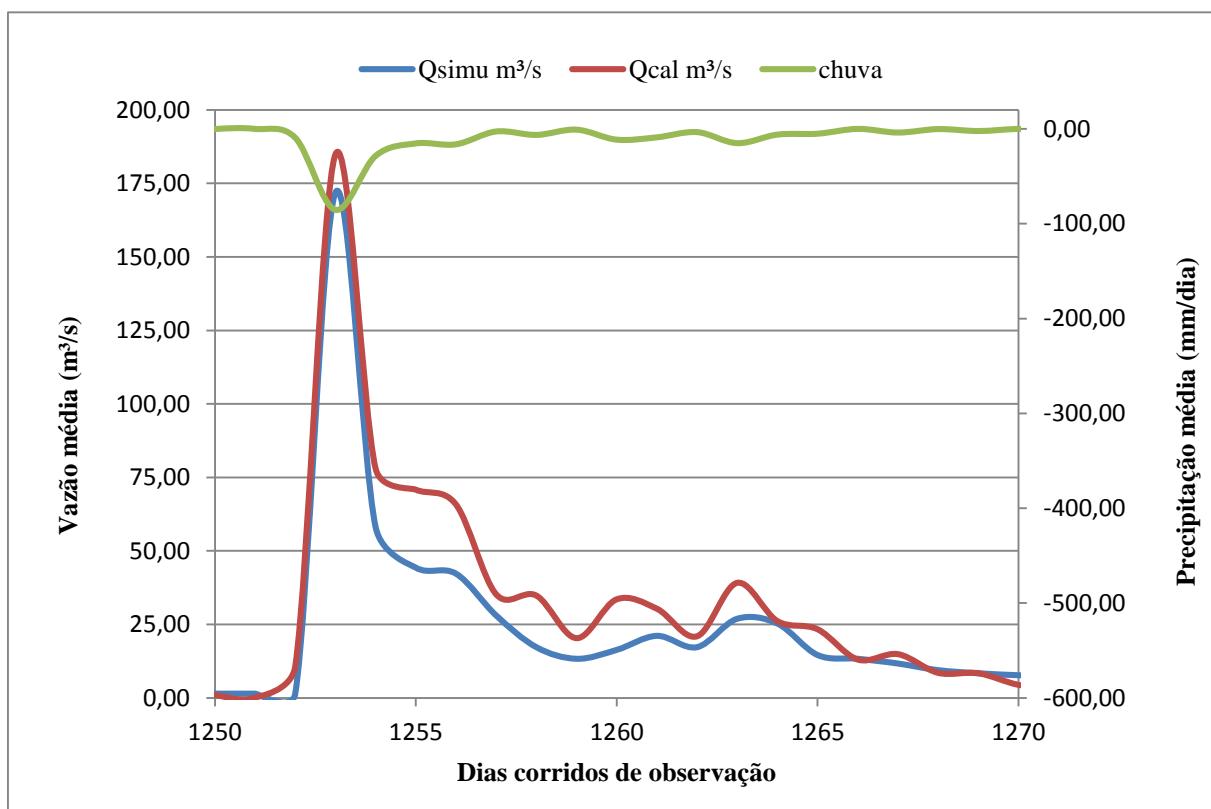


Figura 53 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 23/07/00 a 12/08/00 ($R^2=0,7665$ e $NS=0,7767$).

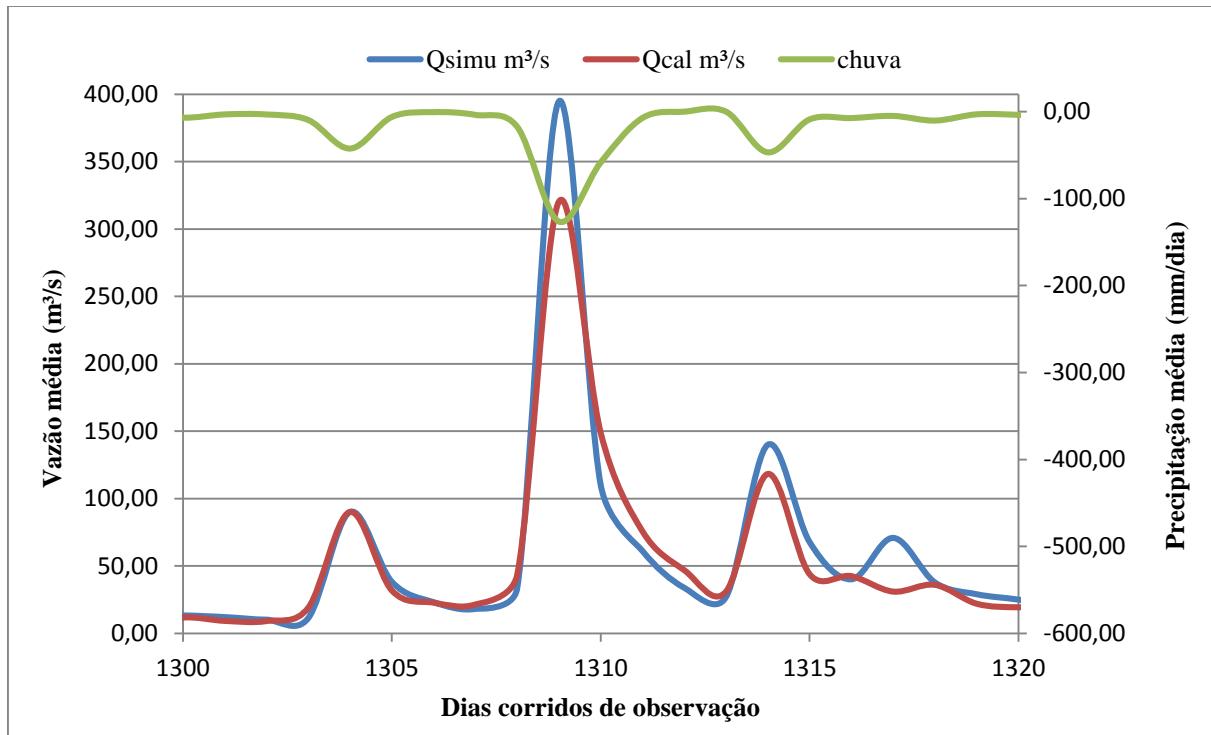


Figura 54 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 06/09/00 a 01/10/00 ($R^2=0,7496$ e $NS=0,6835$).

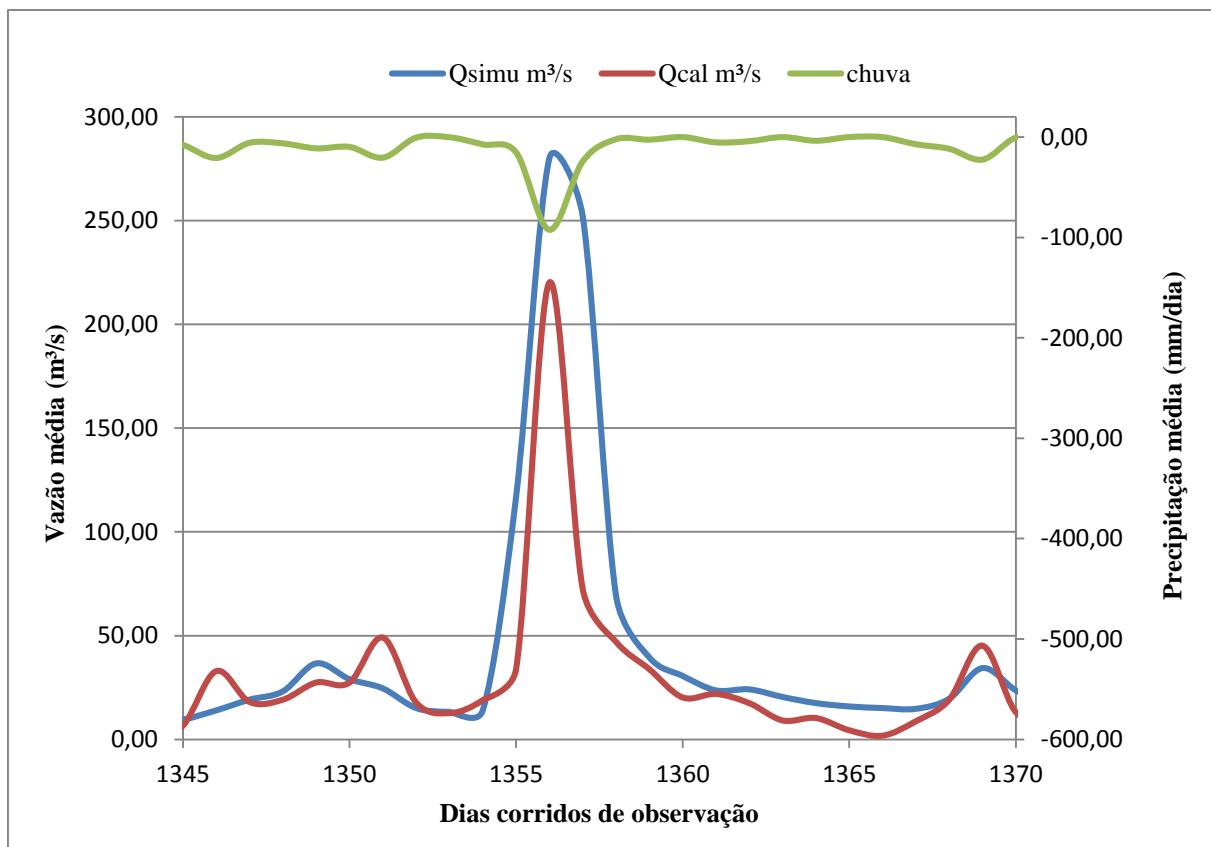


Figura 55 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 03/06/02 a 23/07/02 ($R^2=0,7986$ e $NS=0,8418$).

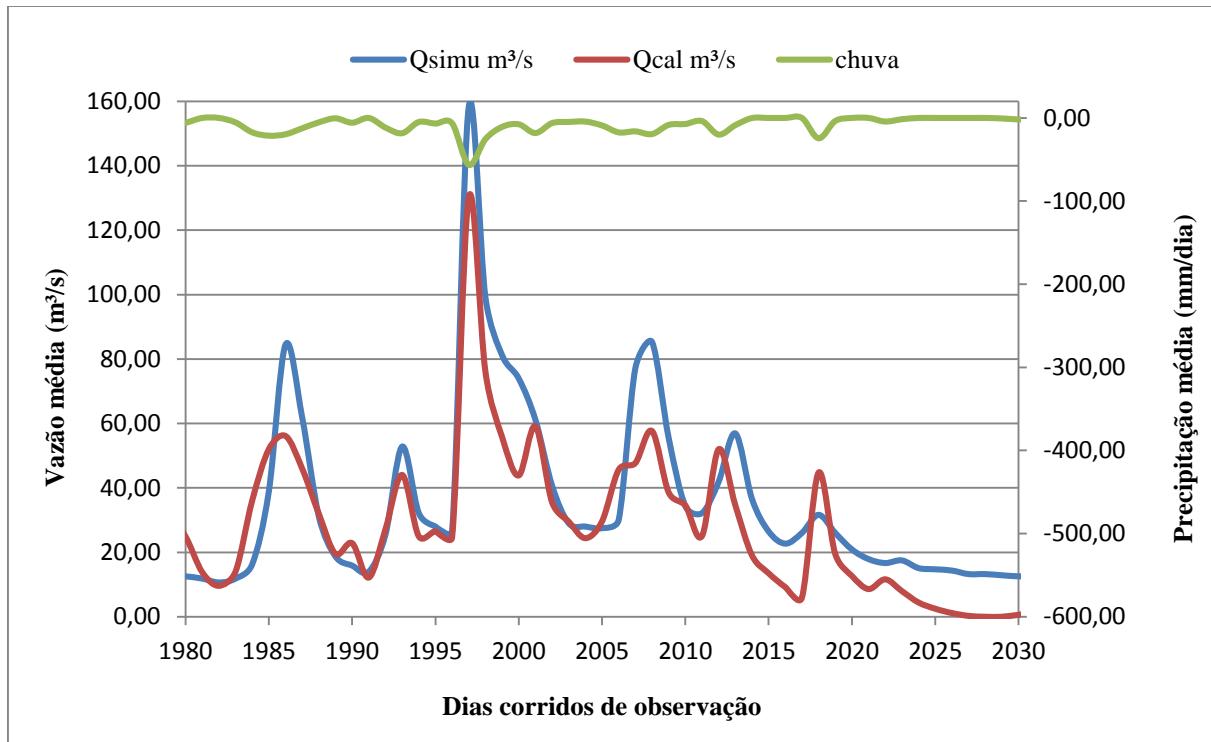


Figura 56 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 08/05/05 a 20/06/05 ($R^2=0,6634$ e $NS=0,6797$).

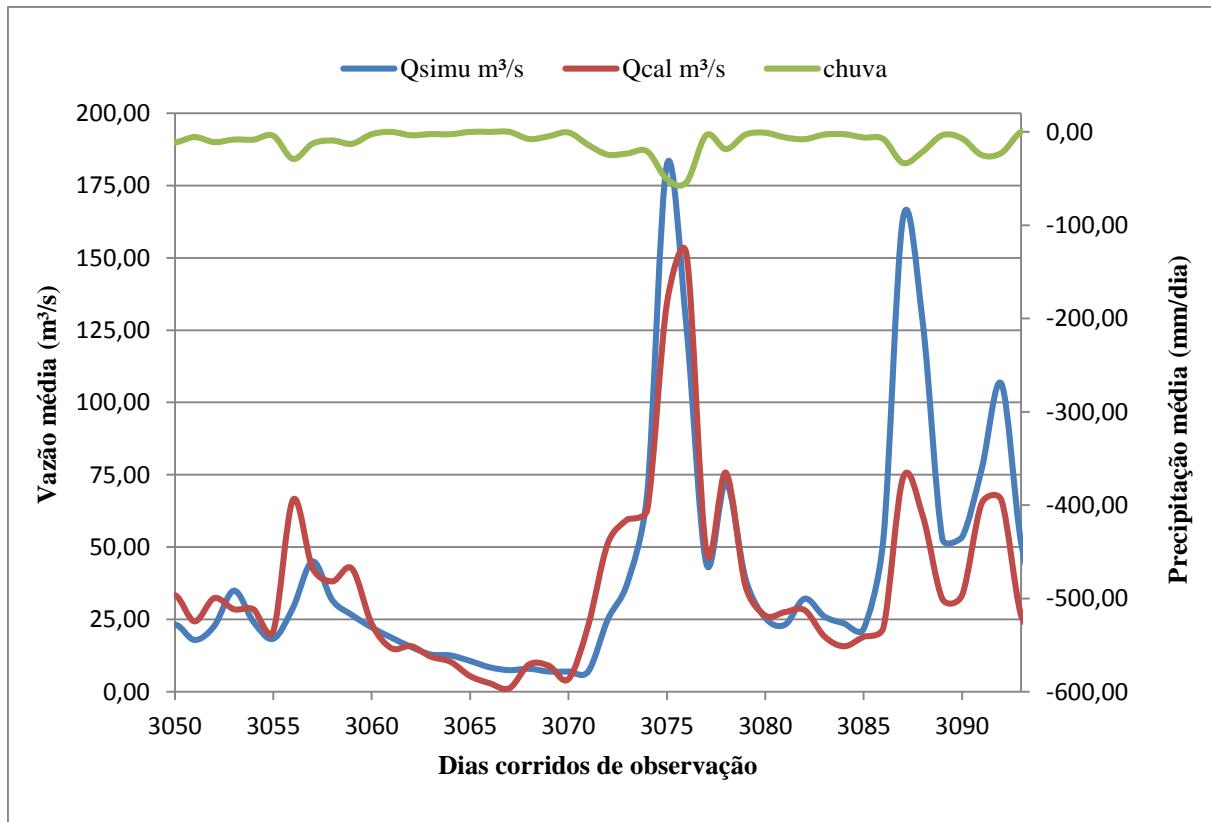
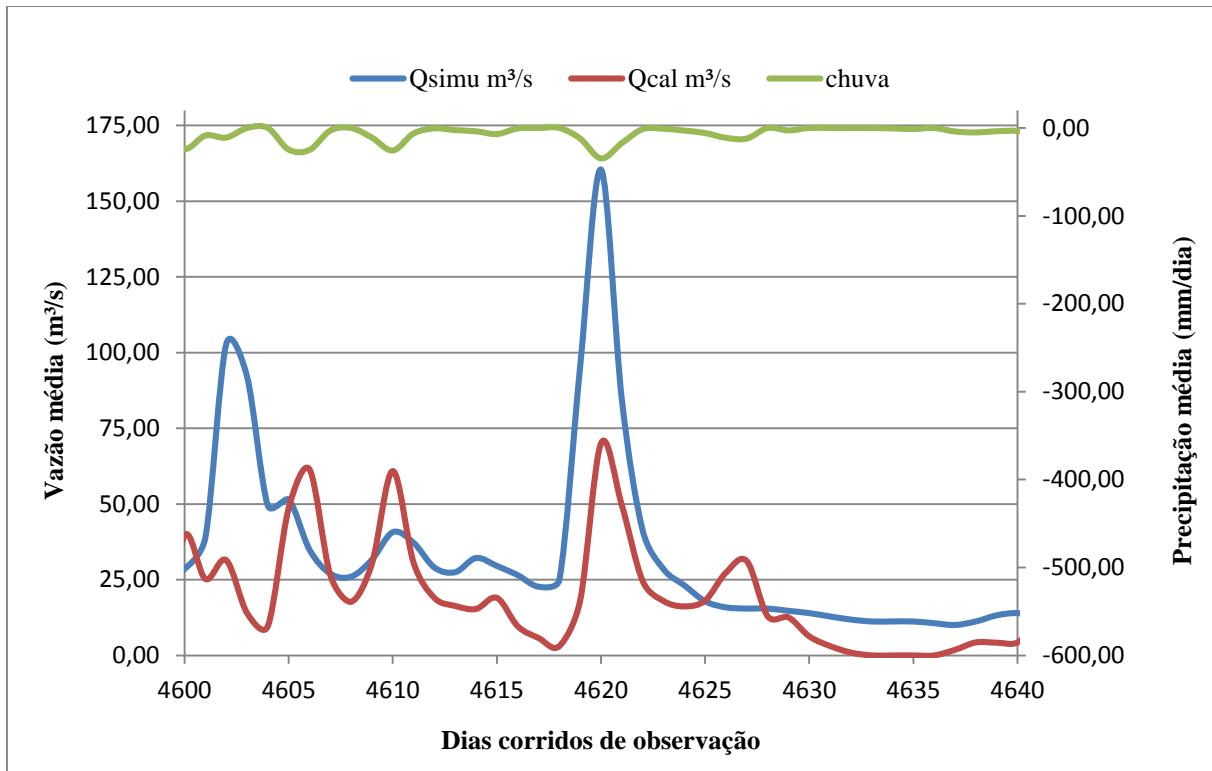


Figura 57 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Canhoto. Período de 05/08/09 a 14/09/09 ($R^2=0,2865$ e $NS=0,4219$).



4.2 Bacia Hidrográfica do Paraíba do Meio

De modo análogo à sub-bacia do rio Canhoto, para a bacia do rio Paraíba do Meio, foi realizada a simulação, também estimando as vazões a partir dos dados do Mundaú, visto a inexistência de dados de vazão confiáveis na bacia do Paraíba do Meio.

Diferentemente da sub-bacia do rio Canhoto, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio conta com uma estação fluviométrica com dados após o ano de 2011. Contudo, esses dados não são confiáveis e se encontram mais a montante na bacia, longe do exutório. As Figuras 58 a 64 representam os resultados obtidos para as simulações de curtos períodos. Já na Tabela 4, está representada uma síntese dos valores obtidos para cada período.

Tabela 4 – Síntese dos valores de coeficientes para os períodos destacados.

Período	r^2	NS	Período	r^2	NS
14/07/98 a 13/08/98	0,8746	0,851	03/06/02 a 23/07/02	0,7883	0,8399
03/06/00 a 23/06/00	0,9629	0,9094	08/05/05 a 20/06/05	0,6481	0,6808
23/07/00 a 12/08/00	0,7302	0,7796	05/08/09 a 14/09/09	0,2962	0,4279
06/09/00 a 01/10/00	0,7521	0,6873			

Figura 58 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 14/07/98 a 13/08/98 ($R^2=0,8746$ e $NS=0,8510$).

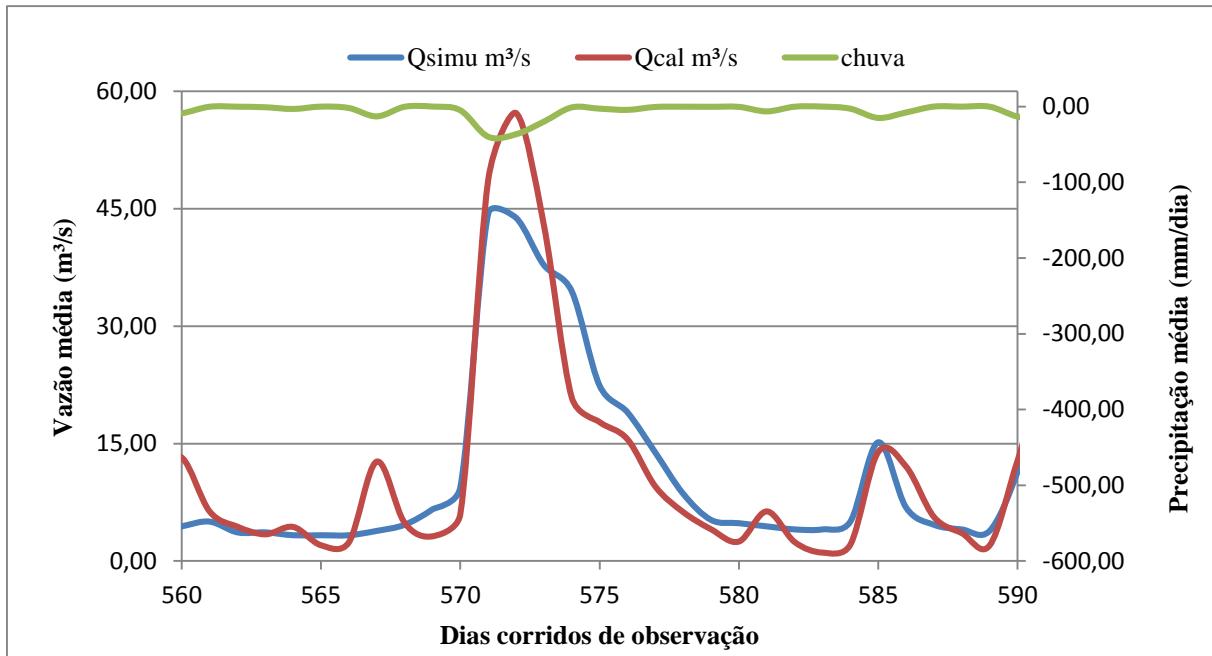


Figura 59 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 03/06/00 a 23/06/00 ($R^2=0,9629$ e $NS=0,9094$).

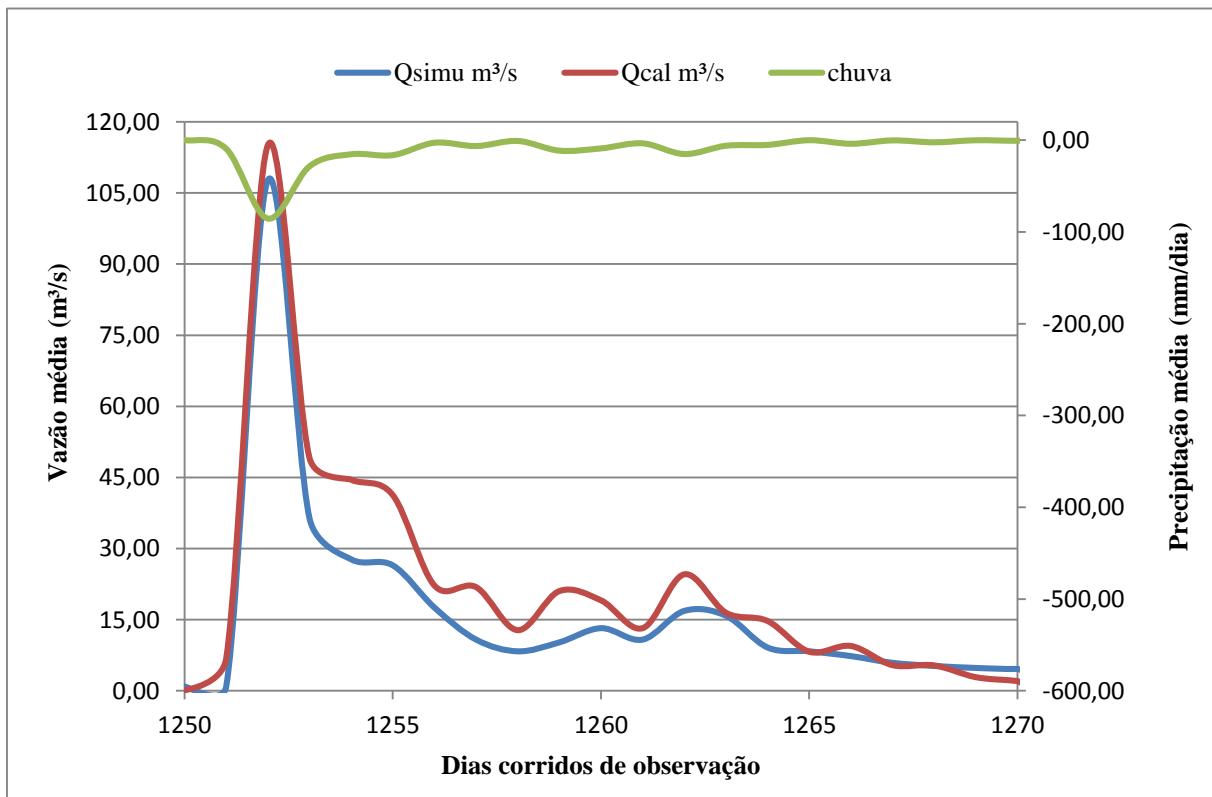


Figura 60 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 23/07/00 a 12/08/00 ($R^2=0,7302$ e $NS=0,7796$).

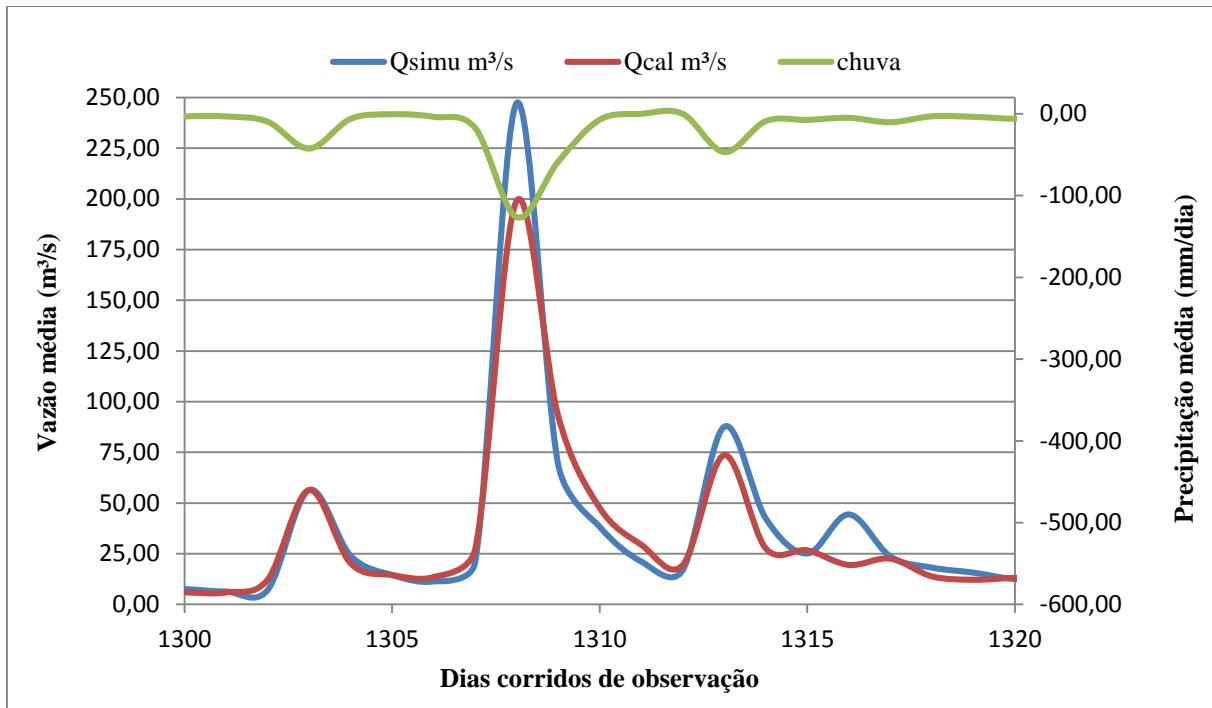


Figura 61 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 06/09/00 a 01/10/00 ($R^2=0,7521$ e $NS=0,6873$).

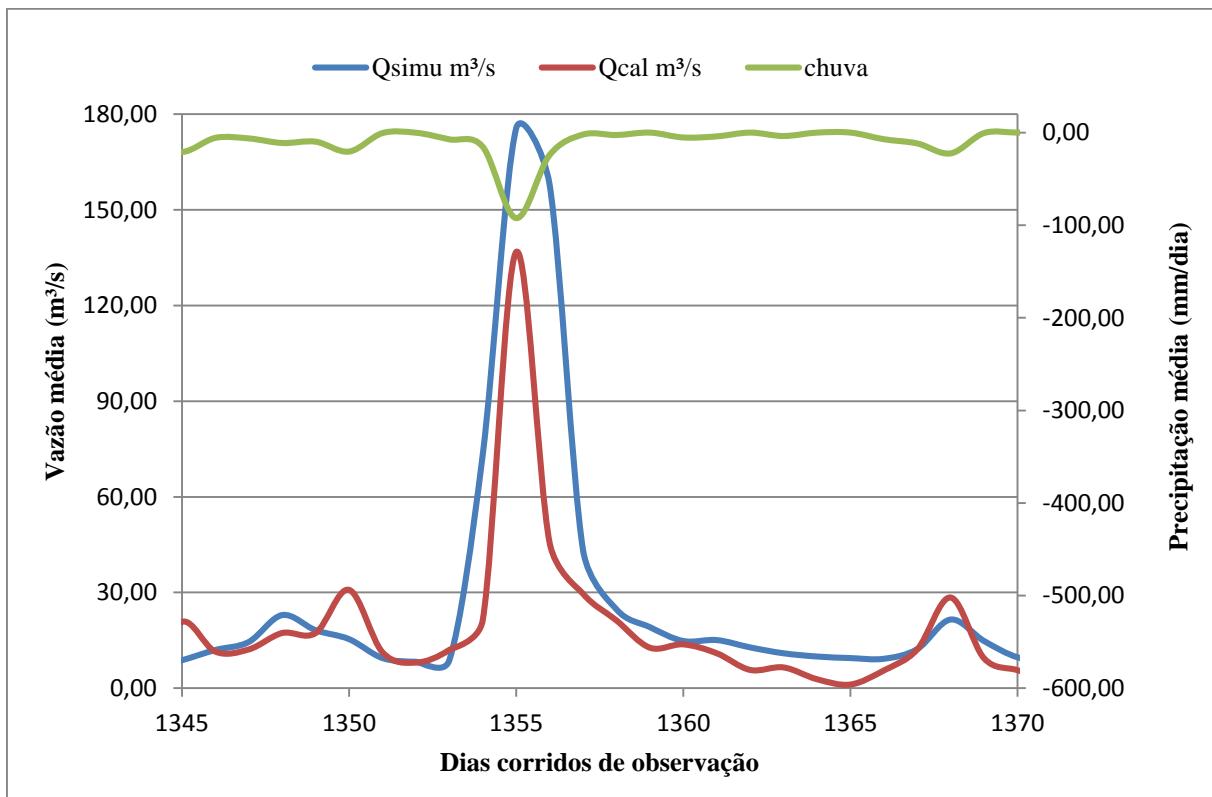


Figura 62 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 03/06/02 a 23/07/02 ($R^2=0,7883$ e $NS=0,8399$).

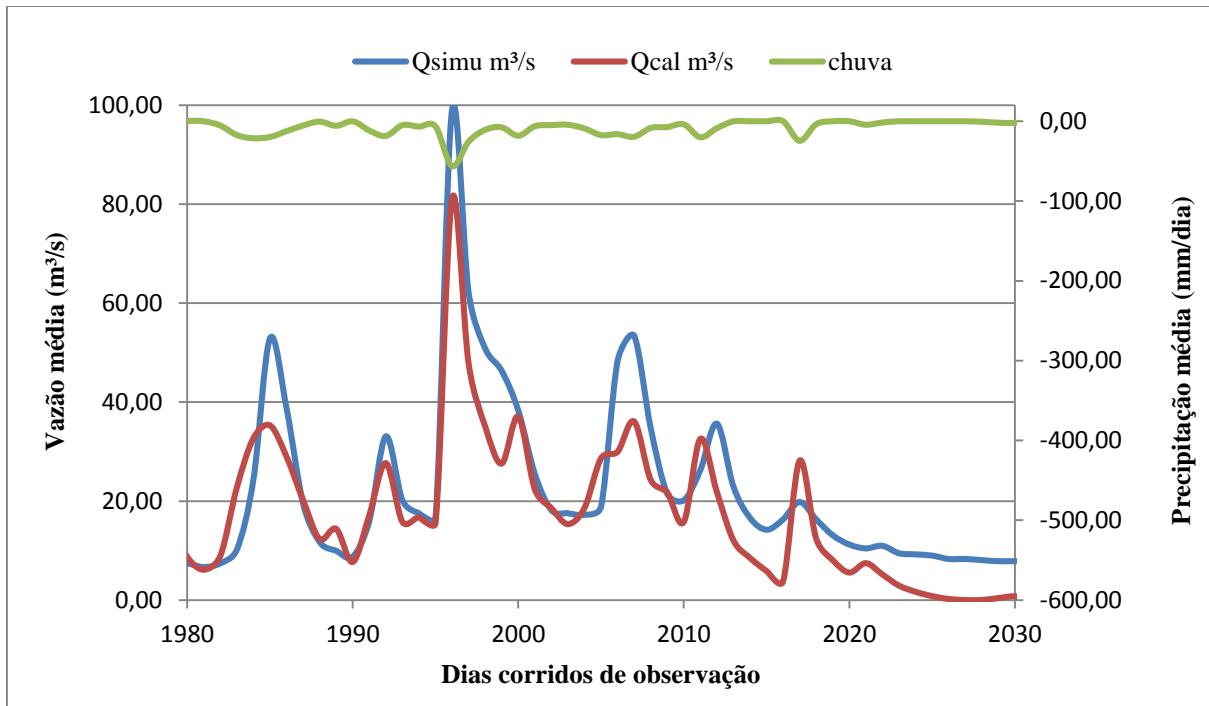


Figura 63 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 08/05/05 a 20/06/05 ($R^2=0,6481$ e $NS=0,6808$).

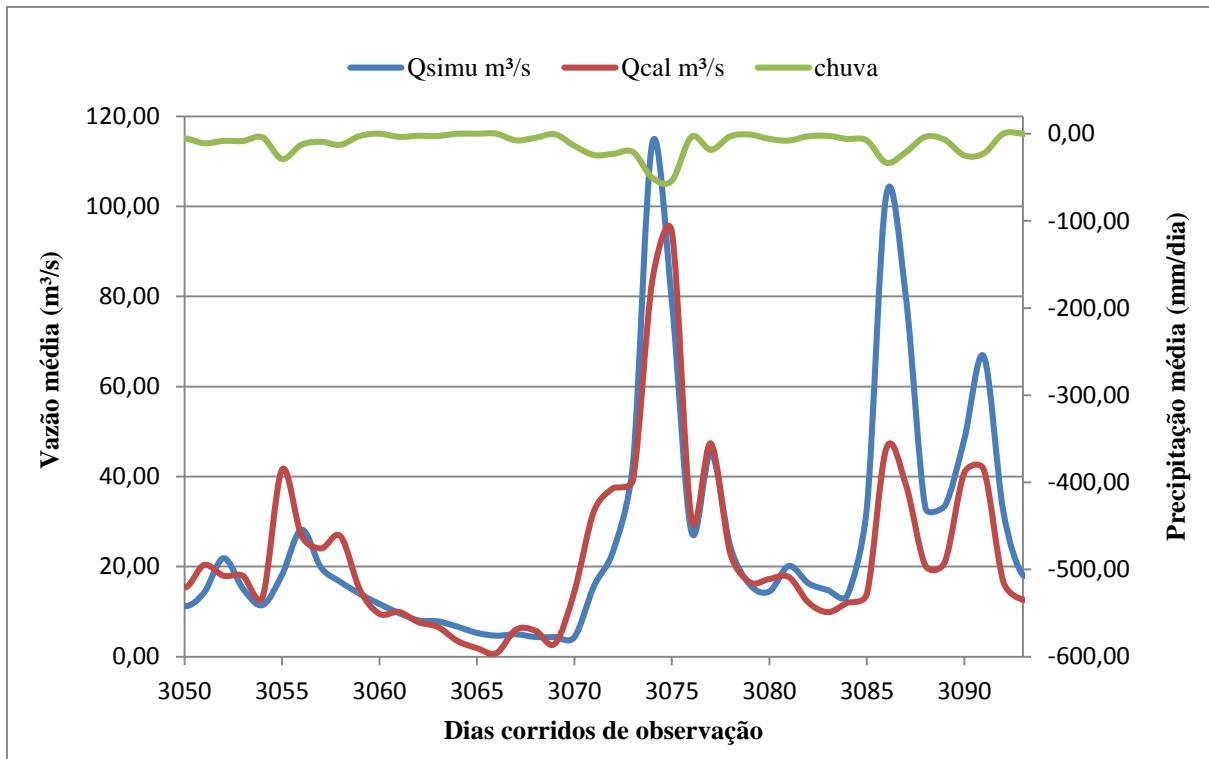
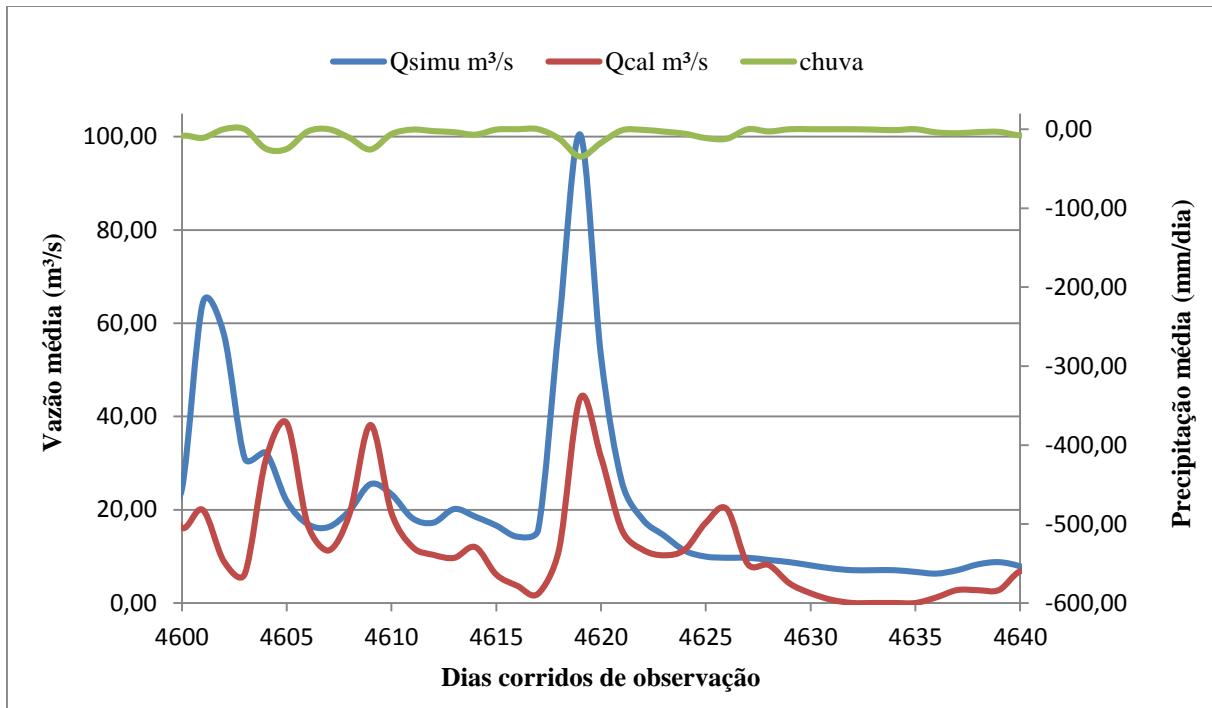


Figura 64 – Simulação de vazão da sub-bacia do rio Paraíba do Meio. Período de 05/08/09 a 14/09/09 ($R^2=0,2962$ e $NS=0,4279$).



5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa faz parte de um trabalho maior para aprimorar o uso do modelo CAWM com aplicação a diversas bacias de Pernambuco com características distintas.

Este trabalho abordou a modelagem de duas bacias hidrográficas, utilizando de software de geoprocessamento, bases de dados espaciais e modelos hidrológicos, para simulação de vazões.

As regiões foco do estudo foram as bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, em suas porções de alto curso.

Os resultados apresentados com a utilização do modelo hidrológico CAWM III foram satisfatórios, apesar da carência de dados de chuva e vazão registrados, o que pode ter sido a causa de alguns eventos com resultados insuficientes.

A altimetria obtida pelos modelos MDT nas áreas de estudo foi de muita importância para delimitação adequada das sub-bacias e cálculos complementares, por meio da ferramenta TauDEM do software QGis.

Como recomendações para futuros estudos, sugere-se realizar o processo de simulação para a parcela alagoana das bacias, visando a utilização prática desta pesquisa em toda extensão dos corpos hídricos englobados e pesquisa junto a órgãos estaduais em busca de dados próprios das sub-bacias dos rios Canhoto e Paraíba do Meio.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. “**Modelos Computacionais no Ensino – Aprendizagem de Física: Um Referencial de Trabalho**”. Instituto de Física - UFRGS. Porto Alegre, 2012.

“**Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco – Junho de 2010**”. Banco Mundial. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Pernambuco. Agosto de 2012.

“**Bacias Hidrográficas. Bacia do Rio Mundaú**”. Apac – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=19> Acesso em: 20.06.2018.

“**Bacias Hidrográficas. Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 1 – GI1**”. Apac – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=27> Acesso em: 20.06.2018.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. “**Hidrologia**”. 2006.

CARRO, Rodrigo. “**O que é e para que servem as MACROS no Excel?**”. Compu Class, 2015. Disponível em: <<https://compuclass.com.br/texto.asp?ID=29>> Acesso em: 20.06.2018.

“**Chuvas**”. Agência Nacional de Águas (ANA). Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/chuvas>> <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=da8c9edf91804682b269e9d631117619>>. Acesso em: 20.06.2018.

DIAS, Maria A. F. da Silva. “**Eventos climáticos extremos**”. Revista USP, Nº 103. São Paulo - SP, 2014.

GOMES, Daniel Dantas Moreira. LIMA, Djenane Regina Maia de. VERÍSSIMO, César Ulisses Vieira. DUARTE, Cynthia Romariz. “**Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú – PE/AL**”. Caderno de Geografia, v.26, número especial 2, 2016.

GOMES, Daniel Dantas Moreira. RAMOS, Renilson Pinto da Silva. DEUS, Rodolfo Alexandre da Silva Gomes de. ALEXANDRE, Fernando da Silva. “**Caracterização fisiográfica de bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio**”. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, I Congresso Nacional de Geografia Física, Instituto de Geociências - Unicamp, 2017.

JÚNIOR, Antenor R. B. “**Elementos de Hidrologia Aplicada**”. Capítulo 6.

LOU, R. F. “**Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**”. 2010, 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

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

NASCIMENTO, João Paulo da Hora. LEITE, Paulo de Tarso Barbosa. SILVA, Priscilla Emanoelle Claudino da. SILVA, Raquel Lourenço da. MONTEIRO, Kleython de Araújo. “**Identificação de anomalias de drenagem no rio Paraíba do Meio (PE/AL) a partir da aplicação do índice de Hack**”. Clio Arqueológica 2016.3, V31N3 pp157-173, 2016.

“**O que é Evapotranspiração?**”. Dicionário Ambiental. ((o))eco, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28768-o-que-e-evapotranspiracao/>> Acesso em: 16.10.2017.

“**QGIS: cálculo da precipitação média pelo método de Thiessen**”. Prof. Marcelo Benigno, 2013. Disponível em: <<http://profmarcello.blogspot.com/2013/07/qgis-caculo-da-precipitacao-media-pelo.html>>. Acesso em: 20.06.2018.

SANTOS, A. R. “**A Água na Natureza e o Ciclo Hidrológico**”. Capítulo 14. Departamento de Geografia/Climatologia – UFES.

SANTOS, KEYLA ALMEIDA DOS. “**Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do rio Mundaú**”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, 2013.

TRAORE, V. B.; SAMBOU, S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. “**Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GNSM on the Koulountou river basin, a tributary of the Gambia river**”. American Journal of Environmental Protection, 3(1): 36-44, 2014.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. “**Modelos Hidrológicos**”. 2^a Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005.

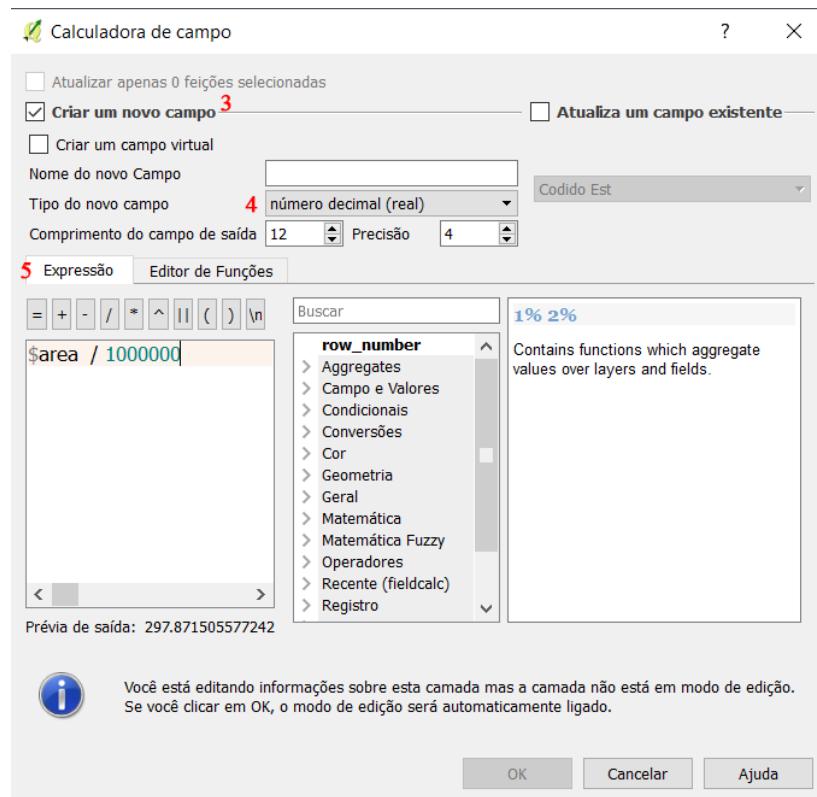
TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. “**Hidrologia: Ciência e aplicação**”. 4^a Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ÁREA

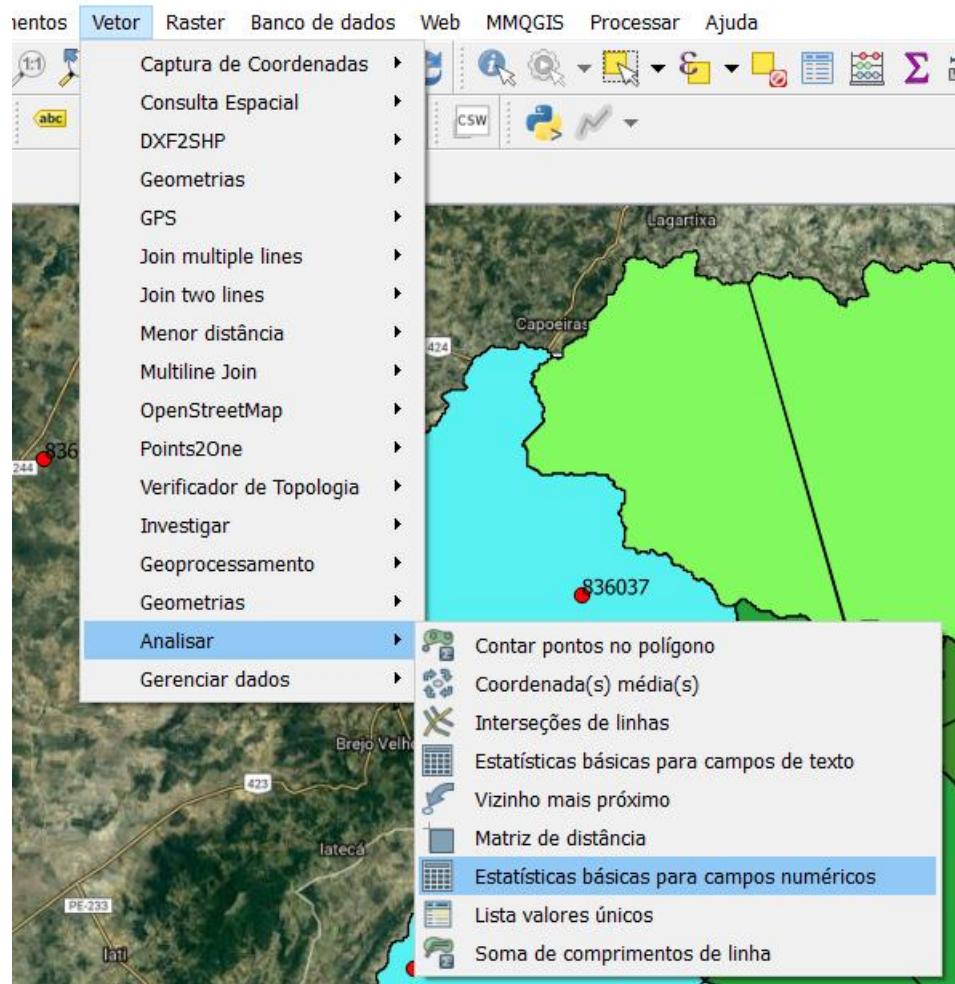
Abrir *Tabela de Atributos* e ativar a opção de edição (1). Selecionar *Abrir Calculadora de Campo* (2).

	Codigo Est	Codigo E_1	Nome da Es	Entidade R	Entidade O	Unidade da	Município	Bacia Hidr	Bacia DENA
1	836037		SÃO BENTO D...	DNOCS	DNOCS	PERNAMBUCO	SÃO BENTO D...	ATLÂNTICO,T...	RIOS CAPIBA...
2	936008		POÇO COMPR...	SUDENE	SUDENE	PERNAMBUCO	CORRENTES	ATLÂNTICO,T...	RIOS CAPIBA...
3	936004		CORRENTES	APAC-PE	APAC-PE	PERNAMBUCO	CORRENTES	ATLÂNTICO,T...	RIOS CAPIBA...

Criar um novo campo (3). O campo deve ser configurado com tipo para número decimal (4). Na área da expressão, escrever “\$area / 1000000”, sem aspas (5).



Ir até menu *Vetor*, selecionar opção *Analisar*, e *Estatísticas básicas para campos numéricos*.



Será gerado um arquivo em formato html (página de internet) com dados relacionados à sub-bacia. Um dos resultados exibidos é o *Soma* (6). O valor nele representado é a área da bacia, em Km².

Paraiba_Estatistica_Area.html
 file:///E:/Polígono%20de%20Voronoi/Paraiba_Estatistica_Area.html

Camada analisada: Paraiba_Voronoi_Clip

Campo analisado: area_km2

Contagem: 3

Valores únicos: 3

Valor mínimo: 297.8715

Valor máximo: 367.5894

Intervalo: 69.7179

Soma: 971.416 6

Valor médio: 323.805333333

Valor da mediana: 305.9551

Desvio padrão: 31.1353980505

Coeficiente de Variação: 0.0961546795106

Minoria (valor de ocorrência mais rara): 297.8715

Maioria (valor mais frequente): 297.8715

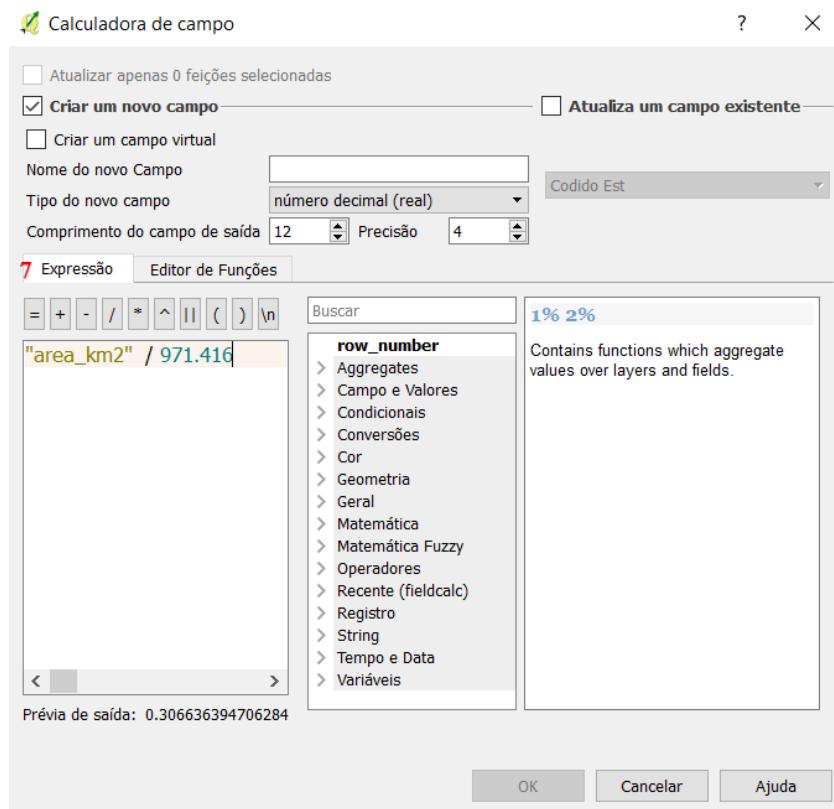
Primeiro quartil: 301.9133

Terceiro quartil: 336.77225

Valores NULL (perdidos): 0

Intervalo interquartil (IQR): 34.85895

Repetir passos de 1 ao 5, alterando a expressão (7).



APÊNDICE B – UTILIZAÇÃO DAS MACROS

Conseguir dados das estações através do site da ANA.

HIDROWEB v1.0.0.19

Séries Históricas de Estações

Pesquisar Estação

Código da Estação	836037
Nome Estação	
Bacia	Todos
Estado	Todos
Responsável (Sigla)	
Operadora (Sigla)	

Consultar **Limpar**

HIDROWEB v1.0.0.19

Estações Convencionais

Selecionar	Código	Nome Estação	Tipo da Estação	Chuva	Nível	Vazão	Clima	Sedimento
<input checked="" type="checkbox"/>	00836037	SÃO BENTO DO UNA	Pluviométrica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mostrando 1-1 de 1 itens

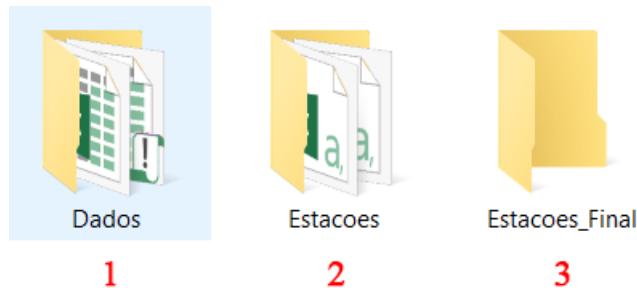
Tipo de Arquivo

- Arquivo Access (.MDB)
- Arquivo Texto (.TXT)
- Arquivo Excel (.CSV)

Gerar Arquivo

Organizar os dados obtidos no polígono de Voronoi em um arquivo específico (apresentado na Figura 30).

Criar pastas distintas onde serão dispostos as Macros (1), os dados das estações (2), e os dados tratados (3).



Código fonte para depuração e execução da primeira sub-rotina da primeira macro, *CSVpXLS*.

```

→ Sub CSVpXLS()
    Dim wb As Workbook
    Dim strFile As String, strDir As String, strOut_Dir As String, myNewFileName As String

    strDir = "E:\CAAWM\CAAWM_Paraiba\Estacoes\" 'location of csv files
    strFile = Dir(strDir & "*.csv")

    Do While strFile <> ""

        Set wb = Workbooks.Open(Filename:=strDir & strFile, Local:=True)

        With wb
            .SaveAs Replace(wb.FullName, ".csv", ".xls"), 56 'UPDATE:
            .Close True
        End With
        Set wb = Nothing
        strFile = Dir

    Loop
End Sub

```

Código fonte para depuração e execução da segunda sub-rotina da primeira macro, *SalvarMesmoNome*.

```

    Sub SalvarMesmoNome()
        'Procedimento para selecionar arquivos
        Dim fDlg As FileDialog
        Dim lArquivo As String
        Dim linha As Integer
        Dim i As Integer
        Dim coluna As Integer
        Dim Name As Single
        Dim wb As Workbook
        Dim strFile As String, strDir As String, strOut_Dir As String, myNewFileName As String

        strDir = "E:\CAAWM\CAAWM_Paraiba\Estacoes\" 
        strFile = Dir(strDir & "*.xls")

        Do While strFile <> ""

            varConteudo = 1
            Set wb = Workbooks.Open(Filename:=strDir & strFile, Local:=True)

            With wb
                .Activate
                Sheets(1).Select
                Columns.Copy
                ThisWorkbook.Activate
                Sheets(1).Activate
                Cells(1, 1).Activate
                ActiveSheet.Paste

                ThisWorkbook.Activate
                Sheets(1).Activate

                ' Contador de linhas
                linha = 14
                Do While varConteudo <> Empty 'continua a verificar se conteudo for diferente de vazio
                    linha = linha + 1 'contador de linha
                    varConteudo = Cells(linha, 1).Value 'grava o valor da celula
                Loop
            End With

            'Preenchendo os valores com -1

            coluna = 14
            linha = linha - 1

            For coluna = 14 To 44
                For i = 14 To linha
                    If Cells(i, coluna) = "" Then
                        Cells(i, coluna) = -1
                    End If
                Next i
            Next coluna

            ' Ordenar os dados originais
            Range(Cells(14, 1), Cells(linha, 75)).Select
            ActiveWorkbook.Worksheets("Plan1").Sort.SortFields.Clear
            ActiveWorkbook.Worksheets("Plan1").Sort.SortFields.Add Key:=Range(Cells(14, 3), Cells(linha, 3))
            , SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
            With ActiveWorkbook.Worksheets("Plan1").Sort
                .SetRange Range(Cells(14, 1), Cells(linha, 75))
                .Header = xlYes
                .MatchCase = False
                .Orientation = xlTopToBottom
                .SortMethod = xlPinYin
                .Apply
            End With

            'Colocando os dados no formato mês-ano
            Columns(3).Select
            Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
            Selection.NumberFormat = "mmm-yyyy"
        End Sub
    
```

```

'Excluindo valores de vazão com duplicidade

For contador = 15 To linha
ajuda = contador + 1
Data1 = Cells(contador, 3).Value
Data2 = Cells(ajuda, 3).Value
j1 = Cells(contador, 2).Value
j2 = Cells(ajuda, 2).Value
If Data1 = Data2 Then
If j1 = 1 And j2 = 2 Then
Rows(contador).Delete
contador = contador - 1
Else
If j1 = 2 And j2 = 1 Then
Rows(contador).Delete
contador = contador - 1
End If
If j1 = 2 And j2 = 2 Then
Rows(ajuda).Delete
contador = contador - 1
End If
If j1 = 1 And j2 = 1 Then
Rows(contador).Delete
contador = contador - 1
End If
End If
End If
Next contador

' Salvando arquivo com mesmo nome da estação

Name = Range("A15").Value
ThisWorkbook.SaveCopyAs "E:\CAAWM\CAAWM_Paraiba\Estacoes_Final\" & Name & ".xls"
.Close

End With
Set wb = Nothing
strFile = Dir

Loop

End Sub

```

Código fonte para depuração e execução da primeira sub-rotina da segunda macro,
FazMatriz.

```

    Sub FazMatriz()
        'Procedimento para selecionar arquivos
        Dim linha As Integer
        Dim i As Integer
        Dim j As Integer
        Dim coluna As Integer

        Dim wb As Workbook
        Dim strFile As String, strDir As String, strOut_Dir As String, myNewFileName As String

        strDir = "C:\Users\carmo\Desktop\Est_Final\
        strFile = Dir(strDir & "*.xls")

        Do While strFile <> ""

            varConteudo = 1
            Set wb = Workbooks.Open(Filename:=strDir & strFile, Local:=True)

            With wb
                .Activate
                Sheets(1).Select

                linha = 13
                Do While varConteudo <> Empty 'continua a verificar se conteudo for diferente de vazio
                    linha = linha + 1 'contador de linha
                    varConteudo = Cells(linha, 1).Value 'grava o valor da celula
                Loop

                Range(Cells(1, 1), Cells(linha, 44)).Select
                Selection.Copy
                ThisWorkbook.Activate
                Sheets(1).Activate

                i = 1
                Do While Not IsEmpty(Cells(i, 1))
                    i = i + 1
                Loop

                Cells(i, 1).Select
                ActiveSheet.Paste
                j = i

                ' Apagar as 13 primeiras linhas
                l = i
                k = l + 13

                Rows(l & ":" & k).Select
                Range("A" & k).Activate
                Selection.Delete Shift:=xlUp

                .Close
            End With
            Set wb = Nothing
            strFile = Dir

        Loop
    End Sub

```

Código fonte para depuração e execução da segunda sub-rotina da segunda macro,
DeletarSalvar.

```

    ↳ Sub DeletarSalvar()
        Columns("D:M").Select
        Selection.Delete Shift:=xlToLeft
        ThisWorkbook.SaveCopyAs "C:\Users\carmo\Desktop\MatrizFinal.xls"
    End Sub

```

Código fonte para depuração e execução da terceira sub-rotina da segunda macro,
Cabecalho.

```

    ↳ Sub cabecalho()
        Workbooks.Open("C:\Users\carmo\Desktop\Est_Final\MatrizFinal.xls").Activate
        Sheets(1).Select
        Rows(1).Insert
        Range("A1").Value = "Estacao"
        Range("B1").Value = "NiveldeConsistencia"
        Range("C1").Value = "Data"
        Range("D1").Value = "Chuva01"
        Range("E1").Value = "Chuva02"
        Range("F1").Value = "Chuva03"
        Range("G1").Value = "Chuva04"
        Range("H1").Value = "Chuva05"
        Range("I1").Value = "Chuva06"
        Range("J1").Value = "Chuva07"
        Range("K1").Value = "Chuva08"
        Range("L1").Value = "Chuva09"
        Range("M1").Value = "Chuva10"
        Range("N1").Value = "Chuva11"
        Range("O1").Value = "Chuva12"
        Range("P1").Value = "Chuva13"
        Range("Q1").Value = "Chuva14"
        Range("R1").Value = "Chuva15"
        Range("S1").Value = "Chuva16"
        Range("T1").Value = "Chuva17"
        Range("U1").Value = "Chuva18"
        Range("V1").Value = "Chuva19"
        Range("W1").Value = "Chuva20"
        Range("X1").Value = "Chuva21"
        Range("Y1").Value = "Chuva22"
        Range("Z1").Value = "Chuva23"
        Range("AA1").Value = "Chuva24"
        Range("AB1").Value = "Chuva25"
        Range("AC1").Value = "Chuva26"
        Range("AD1").Value = "Chuva27"
        Range("AE1").Value = "Chuva28"
        Range("AF1").Value = "Chuva29"
        Range("AG1").Value = "Chuva30"
        Range("AH1").Value = "Chuva31"

        ActiveWorkbook.SaveAs ("C:\Users\carmo\Desktop\Est_Final\MatrizFinal.xls")
    End Sub

```

Código fonte para execução da primeira sub-rotina da terceira macro,
ZerarValoresAntigos.

```
Sub ZeraValoresAntigos()
    Range("D2:AH500").Select
    Selection.ClearContents
End Sub
```

Código fonte para execução da segunda sub-rotina da terceira macro, *EstacoesAno1*.

```
Sub EstacoeseAno1()
    ' COPIANDO OS DADOS DAS ESTAÇÕES E DAS ÁREAS EM KM2
    'Procedimento para selecionar arquivos
    Dim fDlg As FileDialog
    Dim lArquivo As String
    Dim j As Integer, n As Integer, m As Integer, o As Integer, a As Integer, y As Integer
    Dim Name As Single
    varConteudo = 1
    Dim myUnion As Range
    Dim data As Date
    Dim contest As Integer, contador As Integer
    Dim estacao As Long, constante As Double
    Dim ano As String
    Dim i As Long, l As Long
    Dim somal As Double, fatorarea As Double

    'Chama o objeto passando os parâmetros
    Set fDlg = Application.FileDialog(FileDialogType:=msoFileDialogOpen)
    With fDlg
        .AllowMultiSelect = False
        .InitialView = msoFileDialogViewDetails
        .Filters.Add "Texto", "*.xls;*.xlsx", 1
        .InitialFileName = "C:\"
    End With

    'Retorna o arquivo selecionado
    If fDlg.Show = -1 Then
        lArquivo = fDlg.SelectedItems(1)
        MsgBox "O arquivo selecionado está em: " & lArquivo
        Workbooks.Open(lArquivo).Activate
        Sheets(1).Select
        End If

    Set myUnion = Union(Columns(1), Columns(5))
    myUnion.Select
    myUnion.Copy
    ThisWorkbook.Activate
    Sheets(1).Activate
    Range("A1").Select
    Selection.PasteSpecial
```

```

'Excluindo os anos existentes
ThisWorkbookActivate
Sheets(1).Activate
Range(Cells(2, 3), Cells(200, 3)).Select
Selection.ClearContents

' PERGUNTANDO O ANO DE INÍCIO DO CÁLCULO AO USUÁRIO
While anoinicio = ""
    anoinicio = InputBox("Informe o ano inicial para o cálculo da chuva média: ")
Wend

' PERGUNTANDO O ANO DO FINAL DO CÁLCULO AO USUÁRIO
While anofim = ""
    anofim = InputBox("Informe o ano final para o cálculo da chuva média: ")
Wend

'Quantidade de anos
quantanos = anofim - anoinicio + 1
ThisWorkbookActivate

'Contador de células existentes
i = 1
While Cells(i, 3) <> ""
    i = i + 1
Wend
i = i - 1

j = 0
contador = anoinicio

While contador <= anofim
    For n = 1 To 12
        Cells(n + j * 12 + i, 3).Value = DateSerial(contador, n, 1)
    Next n
    j = j + 1
    contador = contador + 1
Wend

'Formatar data
Sheets(1).Select
Range("C1").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.NumberFormat = "mmm-yyyy"

```

Código fonte para depuração e execução da terceira sub-rotina da terceira macro,
FazMedia2.

```
► Sub FazMedia2()
    Dim linha As Integer, contador As Integer, estacao As Long
    Dim meses As Integer, i As Integer, j As Integer, k As Integer, m As Integer
    Dim GCell As Range, soma As Double, valordia As Double, area As Double
    Dim matriz(12, 31) As Single
    Dim vetor()

    'Contando a quantidade de fatores de área
    ThisWorkbookActivate
    Sheets(1).Activate
    t = 1
    While Cells(t, 2).Value <> ""
        t = t + 1
    Wend
    t = t - 2
    ReDim vetor(t - 1)

    'Guardando os dados de fatores de área no vetor
    For s = 0 To t - 1
        vetor(s) = Cells(s + 2, 2).Value
    Next s
    'Contando a quantidade de anos de cálculo
    x = 1
    While Cells(x, 3).Value <> ""
        x = x + 1
    Wend
    x = x - 2
    quantidadedeanos = x / 12
    'Laço geral que se repete a cada ano
    For laco = 1 To quantidadedeanos

        'AQUI COMEÇA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES
        'Substituindo os valores do vetor nas células
        ThisWorkbookActivate
        Sheets(1).Activate
        Var = 1
        While Var <= t
            Cells(Var + 1, 2).Value = vetor(Var - 1)
            Var = Var + 1
        Wend
```

```

linha = 2
'Contador do número estações e áreas
While Cells(linha, 2) <> ""
    linha = linha + 1
Wend
linha = linha - 1

'Variáveis que guardam os valores das datas

Data1 = Cells((laco - 1) * 12 + 2, 3)
Data2 = Cells((laco - 1) * 12 + 3, 3)
Data3 = Cells((laco - 1) * 12 + 4, 3)
Data4 = Cells((laco - 1) * 12 + 5, 3)
Data5 = Cells((laco - 1) * 12 + 6, 3)
Data6 = Cells((laco - 1) * 12 + 7, 3)
Data7 = Cells((laco - 1) * 12 + 8, 3)
Data8 = Cells((laco - 1) * 12 + 9, 3)
Data9 = Cells((laco - 1) * 12 + 10, 3)
Data10 = Cells((laco - 1) * 12 + 11, 3)
Data11 = Cells((laco - 1) * 12 + 12, 3)
Data12 = Cells((laco - 1) * 12 + 13, 3)

contador1 = 2
For contador1 = 2 To linha
ThisWorkbook.Activate
Sheets(1).Activate
'Valores de estação, área e data
estacao = Cells(contador1, 1).Value
area = Cells(contador1, 2).Value
'Abindo o arquivo Matriz final e ativando-o
Workbooks.Open("C:\Users\User\Desktop\Alice_IC\Calibracoes\Toritama\MatrizFinal.xls").Activate
Sheets(1).Activate
pp = 2
'Descobrindo a posição da estação no arquivo Matriz final
While Cells(pp, 1) <> estacao
    pp = pp + 1
Wend

'Laço para ser realizado se o valor da estação for igual ao buscado
If Cells(pp, 1) = estacao Then
    'Se for encontrada a estação, laço para encontrar a data
    q = pp
    While Cells(q, 3).Value <> Data1 And Cells(pp, 1) = estacao
        q = q + 1
        pp = pp + 1
    Wend
    'Laço para descobrir se há todos os valores de data
    If Cells(q, 3).Value = Data1 And Cells(q + 1, 3).Value = Data2 And Cells(q + 2, 3).Value = Data3 And Cells(q + 3, 3).Value = Data4 Then
        'Comando executado caso haja algum valor faltando
        Else
            ThisWorkbook.Activate
            Sheets(1).Activate
            For i = 2 To linha
                soma = 1 - area
                Cells(i, 2) = Cells(i, 2) + (Cells(i, 2) / soma) * area
            Next i
            Cells(contador1, 2) = 0
        End If
    'Comando executado caso a estação não seja encontrada
    Else
        ThisWorkbook.Activate
        Sheets(1).Activate
        For i = 2 To linha
            soma = 1 - area
            Cells(i, 2) = Cells(i, 2) + (Cells(i, 2) / soma) * area
        Next i
        Cells(contador1, 2) = 0
    End If
Next contador1

```

```

'AQUI COMEÇA O CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA
ThisWorkbook.Activate
Sheets(1).Activate
linha = 2
'Contador do número estações e áreas
While Cells(linha, 2) <> ""
    linha = linha + 1
Wend
linha = linha - 1

'Variáveis que guardam os valores das datas
Data1 = Cells((laco - 1) * 12 + 2, 3)
Data2 = Cells((laco - 1) * 12 + 3, 3)
Data3 = Cells((laco - 1) * 12 + 4, 3)
Data4 = Cells((laco - 1) * 12 + 5, 3)
Data5 = Cells((laco - 1) * 12 + 6, 3)
Data6 = Cells((laco - 1) * 12 + 7, 3)
Data7 = Cells((laco - 1) * 12 + 8, 3)
Data8 = Cells((laco - 1) * 12 + 9, 3)
Data9 = Cells((laco - 1) * 12 + 10, 3)
Data10 = Cells((laco - 1) * 12 + 11, 3)
Data11 = Cells((laco - 1) * 12 + 12, 3)
Data12 = Cells((laco - 1) * 12 + 13, 3)

contador = 2
For contador = 2 To linha
    ThisWorkbook.Activate
    Sheets(1).Activate
    'Valores de estação, área e data
    estacao = Cells(contador, 1)
    area = Cells(contador, 2)
    'Abrindo o arquivo Matriz final e ativando-o
    Workbooks.Open("C:\Users\User\Desktop\Alice_IC\Calibracoes\Toritama\MatrizFinal.xls").Activate
    Sheets(1).Activate
    p = 2
    'Descobrindo a posição da estação no arquivo Matriz final
    While Cells(p, 1) <> estacao
        p = p + 1
    Wend

    'Laço para ser realizado se o valor da estação for igual ao buscado
    If Cells(p, 1) = estacao Then
        'Se for encontrada a estação, laço para encontrar a data
        q = p
        While Cells(q, 3).Value <> Data1 And Cells(p, 1) = estacao
            q = q + 1
            p = p + 1
        Wend
        'Laço para descobrir se há todos os valores de data
        If Cells(q, 3).Value = Data1 And Cells(q + 1, 3).Value = Data2 And Cells(q + 2, 3).Value = Data3 And Cells(q + 3, 3).Value = Data4 Then
            'Comando executado caso haja algum valor faltando
            Workbooks.Open("C:\Users\User\Desktop\Alice_IC\Calibracoes\Toritama\MatrizFinal.xls").Activate
            Sheets(1).Activate
            For i = 1 To 12
                For j = 1 To 31
                    matriz(i, j) = Cells(q + i - 1, j + 3).Value
                Next j
            Next i

            ThisWorkbook.Activate
            Sheets(1).Activate
            For k = 1 To 12
                For l = 1 To 31
                    If matriz(k, l) <> -1 Then
                        Cells(k + 1 + (laco - 1) * 12, l + 3) = Cells(k + 1 + (laco - 1) * 12, l + 3) + matriz(k, l) * area
                    End If
                Next l
            Next k

            End If
        End If
    Next contador

    Next laco
End Sub

```

Código fonte para depuração e execução da quarta sub-rotina da terceira macro,
ValoresNegativos3.

```

► Sub ValoresNegativos3()
  Dim linha As Long, contador As Long, estacao As Long
  Dim meses As Long, i As Long, j As Long, k As Long, m As Long, x As Long
  Dim GCell As Range, soma As Double, valordia As Double, area As Double
  Dim matriz(12, 31) As Single
  Dim vetor()

  'Contando a quantidade de anos de cálculo
  ThisWorkbook.Activate
  Sheets(1).Activate
  x = 1
  While Cells(x, 3).Value <> ""
    x = x + 1
  Wend
  x = x - 2
  quantidadedeanos = x / 12
  'Laço geral que se repete a cada ano
  For laco = 1 To quantidadedeanos

    'AQUI COMEÇA O CÁLCULO DA MÉDIA ARITMÉTICA PARA VALORES INEXISTENTES
    ThisWorkbook.Activate
    Sheets(1).Activate
    linha = 2
    'Contador do número estações e áreas
    While Cells(linha, 2) <> ""
      linha = linha + 1
    Wend
    linha = linha - 1

    'Rotina para descobrir quantas estações participam do cálculo da média
    contadorestacoes = 0
    For h = 2 To linha
      If Cells(h, 2) <> 0 Then
        contadorestacoes = contadorestacoes + 1
      End If
    Next h
  
```

```

'Variáveis que guardam os valores das datas
Data1 = Cells((laco - 1) * 12 + 2, 3)
Data2 = Cells((laco - 1) * 12 + 3, 3)
Data3 = Cells((laco - 1) * 12 + 4, 3)
Data4 = Cells((laco - 1) * 12 + 5, 3)
Data5 = Cells((laco - 1) * 12 + 6, 3)
Data6 = Cells((laco - 1) * 12 + 7, 3)
Data7 = Cells((laco - 1) * 12 + 8, 3)
Data8 = Cells((laco - 1) * 12 + 9, 3)
Data9 = Cells((laco - 1) * 12 + 10, 3)
Data10 = Cells((laco - 1) * 12 + 11, 3)
Data11 = Cells((laco - 1) * 12 + 12, 3)
Data12 = Cells((laco - 1) * 12 + 13, 3)

contador = 2
For contador = 2 To linha
ThisWorkbookActivate
Sheets(1).Activate
'Valores de estação, área e data
estacao = Cells(contador, 1)
area = Cells(contador, 2)
'Abrindo o arquivo Matriz final e ativando-o
Workbooks.Open("C:\Users\User\Desktop\Alice_IC\Calibracoes\Toritama\MatrizFinal.xls").Activate
Sheets(1).Activate
p = 2
'Descobrindo a posição da estação no arquivo Matriz final
While Cells(p, 1) <> estacao
p = p + 1
Wend
'Laço para ser realizado se o valor da estação for igual ao buscado
If Cells(p, 1) = estacao Then
'Se for encontrada a estação, laço para encontrar a data
q = p
While Cells(q, 3).Value <> Data1 And Cells(p, 1) = estacao
q = q + 1
p = p + 1
Wend

'Laço para descobrir se há todos os valores de data
If Cells(q, 3).Value = Data1 And Cells(q + 1, 3).Value = Data2 And Cells(q + 2, 3).Value = Data3 And Cells(q + 3, 3).Value = Data4 And Cells(q + 4, 3).Value = Data5 And Cells(q + 5, 3).Value = Data6 And Cells(q + 6, 3).Value = Data7 And Cells(q + 7, 3).Value = Data8 And Cells(q + 8, 3).Value = Data9 And Cells(q + 9, 3).Value = Data10 And Cells(q + 10, 3).Value = Data11 And Cells(q + 11, 3).Value = Data12 Then
'Comando executado caso haja algum valor faltando
For i = 1 To 12
For j = 1 To 31
If Cells(q + i - 1, j + 4 - 1) = -1 Then
matriz(i, j) = matriz(i, j) + 1
Else
matriz(i, j) = matriz(i, j) + 0
End If
Next j
Next i

End If
End If

Next contador

ThisWorkbookActivate
Sheets(1).Activate
For k = 1 To 12
For l = 1 To 31
Cells(k + (laco - 1) * 12 + 1, l + 3) = Cells(k + (laco - 1) * 12 + 1, l + 3) + matriz(k, l) * Cells(k + (laco - 1) * 12 + 1, l + 3) / contadorestacoes
Next l
Next k

Next laco
End Sub

```