

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO**

VICTOR COSTA PONTES

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS HIDROGRAMAS DE SAÍDA DA BACIA DO
RIACHO REGINALDO QUANTO A DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA CHUVA**

Maceió
2019

VICTOR COSTA PONTES

Análise comparativa dos hidrogramas de saída da bacia do Riacho Reginaldo quanto a discretização espacial da chuva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Caramori
Borges de Souza

Maceió

2019

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

P814a Pontes, Victor Costa.
Análise comparativa dos hidrogramas de saída da bacia do Riacho Reginaldo quanto a discretização espacial da chuva / Victor Costa Pontes. – 2019.
75 f. : il. color.

Orientador: Vladimir Caramori Borges de Souza.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 69-75.

1. Modelagem hidrológica. 2. *Storm Water Management Model*. 3. Sensoriamento remoto. 4. Meteorologia por radar. 5. Pluviometria. I. Título.

CDU: 551.508



Folha de Aprovação

VICTOR COSTA PONTES

ANÁLISE COMPARATIVA DOS HIDROGRAMAS DE SAÍDA DA BACIA DO RIACHO REGINALDO QUANTO À DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA CHUVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: 27/02/2019

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza
(Orientador - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Frago Junior
(Examinador interno - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador interno - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof.^a Dr.^a Alexandra Rodrigues Finotti
(Examinadora externa - UFSC)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza pela orientação, apoio e ensinamentos que foram repassados durante todo o período do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Curso que sempre estiveram à disposição e pelas contribuições que tornaram este trabalho possível.

Aos meus pais pelo apoio, companheirismo e por me manterem sempre motivado.

Ao meu irmão Bruno, que mesmo distante, sempre esteve presente e por ser referência na minha vida.

À minha companheira Natália, pelo apoio e compreensão durante todo o período do mestrado.

Às minhas filhas, Vitória e Luiza, por me motivarem, e que apesar de muito pequenas contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CEMADEN por disponibilizar os dados utilizados neste trabalho.

Ao CNPq (processo 425311/2016-3), à FAPEAL (processo 60030.000411/2017) e à FINEP (convênio 01.10.0701.00), pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento do projeto de pesquisa, e à FAPEAL/CAPES (processo 88887.159732/2017-00), pela concessão de bolsa de mestrado.

RESUMO

Os eventos de precipitações são processos aleatórios tanto no espaço quanto no tempo, mas as recorrências de eventos extremos podem ocasionar prejuízos constantes para a população. Para minimizar as consequências das chuvas intensas, os modelos hidrológicos juntamente com dados de rede pluviométrica e de sensoriamento remoto são de grande importância para entender os efeitos e comportamentos da chuva em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, o intuito desse trabalho é avaliar como uma bacia hidrográfica responde a dois níveis de discretização dos eventos chuvosos (concentrado e distribuído por sub bacia) através do *software* SWMM a partir dos dados de radar e da rede pluviométrica aplicados a bacia do Riacho Reginaldo situada na zona urbana da cidade de Maceió-AL. O programa é baseado em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos capazes de simular as respostas da bacia através de parâmetros coletados da mesma e de séries temporais de chuva. Os parâmetros foram determinados através da literatura e da parametrização do modelo, e as séries temporais foram selecionadas através dos veículos de informação da cidade, que noticiarão eventos que tiveram como consequências alagamentos. As séries temporais foram criadas a partir da coleta dos dados das estações pluviométricas e do radar meteorológico (para os dados de radar aplicou-se duas calibrações distintas, a primeira utilizou-se um coeficiente determinado na literatura e a segunda foi empregada o método de ANOBES). Posteriormente, foi aplicado o método dos polígonos de Thiessen e, por fim, foram geradas as séries temporais que alimentaram o *software*. Os resultados foram gerados para dois cenários distintos (chuva concentrada e distribuída por sub bacia) e os parâmetros de avaliação foram a vazão de pico, o tempo de pico, o volume escoado e o volume infiltrado. A partir dos hidrogramas gerados fica claro a necessidade de calibração dos dados do radar. As calibrações utilizadas aproximam os hidrogramas gerados pelos dados do radar aos hidrogramas gerados pelos dados das estações pluviométricas. Todos os eventos analisados apresentam grandes variações nos parâmetros de avaliação e as principais causas dessas divergências são: diferentes valores de CN para as sub bacias e a localização dos núcleos chuvosos dos eventos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, SWMM, sensoriamento remoto, radar meteorológico, estações pluviométricas

ABSTRACT

Precipitation events are random processes in both space and time, but recurrences of extreme events can cause constant damage to the population. To minimize the consequences of heavy rains, hydrological models along with rainfall and remote sensing data are of great importance in understanding the effects and behavior of rainfall in a river basin. Thus, the purpose of this work is to evaluate how a river basin responds to two levels of discretization of rainfall events (concentrated and distributed by sub basin) through the SWMM software from the radar and rainfall data applied to the Reginaldo Creek basin located in the urban area of the city of Maceió-AL. The program is based on hydrological and hydrodynamic models capable of simulating basin responses through parameters collected from it and rainfall time series. The parameters were determined through the literature and parameterization of the model, and the time series were selected through the city's information vehicles, which will report events that had as a consequence flood. The time series were created from the data collection of the rainfall stations and the meteorological radar (for the radar data two different calibrations were applied, the first one was used a coefficient determined in the literature and the second one was used the method of SOAS). Later, the Thiessen polygons method was applied and, finally, the time series that fed the software were generated. The results were generated for two distinct scenarios (concentrated rainfall and distributed by sub basin) and the evaluation parameters were the peak flow, the peak time, the drained volume and the infiltrated volume. From the generated hydrograms the need for calibration of the radar data is clear. The calibrations used approximate the hydrographs generated by the radar data to the hydrographs generated by the rainfall data. All the analyzed events present great variations in the evaluation parameters and the main causes of these divergences are: different CN values for the sub basins and the location of the rainy cores of the events.

Key-word: Hydrological modeling, remote sensing, SWMM, meteorological radar, rain gauges

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento populacional do estado de Alagoas ao longo dos anos.....	18
Figura 2 – Representação do modelo de Reservatório não-linear	20
Figura 3 – Distribuição espacial de evento chuvoso: 1) Pluviômetros e 2) Radar	23
Figura 4 - Exemplo da aplicação do método dos polígonos de Thiessen	25
Figura 5 – Síntese metodológica.....	30
Figura 6 – Localização geográfica da bacia do Riacho do Reginaldo	31
Figura 7 - Topografia da bacia do Riacho Reginaldo	32
Figura 8 – Subdivisão da bacia do Riacho Reginaldo	33
Figura 9 - Localização das estações pluviométricas de Maceió	34
Figura 10 - Polígonos de Thiessen na bacia	35
Figura 11 – Leitura da refletividade realizada pelo radar	37
Figura 12 – Leitura de precipitação em mm.....	37
Figura 13 – Leitura pixelada do radar (1) e pixels que influenciam na bacia (2).....	38
Figura 14 – Desenvolvimento do evento.....	38
Figura 15 – Postos para a calibração do radar	39
Figura 16 - Diagramas unifilares dos cenários estudados.....	40
Figura 17 - Hidrogramas base para parametrização	44
Figura 18 – Tempo de retorno dos eventos	45
Figura 19 - Leituras dos postos para o evento 29/05/2016	47
Figura 20 - Leituras dos postos para o evento 29/05/2016	48
Figura 21 – Polígono de Thiessen (29/05/2016) – Cenários concentrado (1) e distribuído (2).....	49
Figura 22 – Hietograma para o cenário concentrado	50
Figura 23 – Hietogramas para o cenário distribuído.....	51

Figura 24 – Hietogramas para o cenário distribuído.....	52
Figura 25 – Hietogramas para o cenário distribuído.....	53
Figura 26 – Parametrização do modelo.....	54
Figura 27 – a) Hidrogramas dia 29/05/2016 e b) Isoietas - legenda em mm	56
Figura 28 – a) Hidrogramas dia 23/01/2018 e b) Isoietas	57
Figura 29 – a) Hidrogramas dia 22/04/2018; Isoietas: b) Evento completo, c) Primeiras 6h e d) Remanescente	58
Figura 30 – a) Hidrogramas dia 02/07/2018 e b) Isoietas – legenda em mm.....	59
Figura 31 – Comparação entre os parâmetros: a) Vazão de pico, b) Tempo de pico, c) Volume escoado e d) Volume infiltrado.....	60
Figura 32 – Hidrogramas dia 02/02/2019: a) Pluviômetros, b) Dados brutos, c) Calibrados por Cabral et al (2017 e d) Calibrados por ANOBES	62
Figura 33 – Hidrogramas dia 02/02/2019: a) Concentrado e b) Distribuído.....	63
Figura 34 – Hidrogramas dia 26/03/2019: a) Pluviômetros, b) Dados brutos, c) Calibrados por Cabral et al (2017) e d) Calibrados por ANOBES.....	64
Figura 35 – Hietogramas: a) Pluviômetros e b) Dados brutos	65
Figura 36 – Hidrogramas resultantes dia 26/03/2019: a) Concentrado e b) Distribuído	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de α e β (Pfafstetter, 1957).....	24
Tabela 2 - Valores de “a” e “b”	27
Tabela 3 - Estações pluviométricas de Maceió	35
Tabela 4 - Parâmetros determinados por Pedrosa (2008)	41
Tabela 5 – Cotas dos canais.....	43
Tabela 6 – Eventos escolhidos.....	44
Tabela 7 – Característica dos eventos	46
Tabela 8 – Áreas de influência em % para o evento 29/05/2016	49
Tabela 9 –Vazões de pico.....	54
Tabela 10 – Valores calibrados da largura e coeficiente de Manning	55
Tabela 11 – Parâmetros de avaliação	59
Tabela 12 – Parâmetros de avaliação	63
Tabela 13 – Parâmetros de avaliação.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANOBES	Análise Objetiva Estatística
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
FAPEAL	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas
H5	<i>Hierarchical Data Format</i>
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Py-ART	<i>Python ARM Radar Toolkit</i>
SEMARH	Secretaria de Estado e Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SOAS	<i>Statistical Objective Analysis Scheme</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área total da bacia
A _i	Área de influência do posto i na bacia
D	Diâmetro das gotas em mm
d	Altura do volume de água no reservatório
d _s	Fração do reservatório que não escoa
L	Comprimento do rio principal
N	Número de gotas / Número total de pluviômetros
n	Coefficiente de Manning
P	Precipitação Máxima em mm / Precipitação média da bacia
P _a	Precipitação analisada
P _b	Precipitação estimada pelo radar (“background”)
P _o	Precipitação medida pelo pluviômetro (“observação”)
P _c	Precipitação estimada pelo radar no pluviômetro
P _i	Precipitação do posto i
Q	Vazão
S	Declividade
R	Fator de probabilidade / Taxa de precipitação em mm/h
t	Duração em horas
Tr	Tempo de retorno
V	Velocidade terminal das gotas
W	Largura Característica
W _n	Peso a posteriori a ser determinado pela configuração de dados da rede
x _r	Posição do ponto de grade do radar
x _n	Posição do ponto de grade dos pluviômetros
Z	Refletividade em mm ⁶ m ⁻³
α,β	Parâmetros que dependem da duração do evento
ρ	Correlação entre o erro <i>background</i> e dos pluviômetros
ε	Erro observacional normalizado
γ	Constante igual a 0,25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	17
	2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
	2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
	3.1 URBANIZAÇÃO.....	18
	3.2 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	19
	3.2.1 Storm Water Management Model – SWMM	20
	3.3 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA CHUVA.....	22
	3.4 CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA.....	24
	3.5 ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR RADAR.....	25
4	METODOLOGIA.....	30
	4.1 ÁREA DE ESTUDO	30
	4.2 REDE DE MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO NA ÁREA DE ESTUDO	33
	4.3 MODELAGEM.....	39
	4.3.1 Cenários.....	40
	4.3.2 Determinação dos parâmetros do modelo	41
	4.3.3 Hietogramas	44
5	RESULTADOS	54
	5.1 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO	54
	5.2 MODELAGEM.....	55
	5.2.1 Evento analisado 1 - 29/05/2016.....	55
	5.2.2 Evento analisado 2 – 23/01/2018.....	56
	5.2.3 Evento analisado 3 – 22/04/2018.....	57
	5.2.4 Evento analisado 4 – 02/07/2018.....	58
	5.3 SIMULAÇÕES COM DADOS DE RADAR	61
	5.3.1 Evento 1 – 02/02/2019	61
	5.3.2 Evento 2 – 26/03/2019	63
6	CONCLUSÕES.....	67
7	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

As metrópoles são caracterizadas por aumentos constantes das áreas impermeabilizadas devido ao processo de urbanização. O aumento da impermeabilidade do solo diminui a infiltração e aumenta o volume escoado, com possíveis consequências ao meio ambiente e ao meio urbano (Barco et al, 2008).

O aumento do volume escoado não é a única causa preocupante, a impermeabilização também antecipa o tempo de pico, o que agrava ainda mais as consequências de um evento chuvoso. Segundo Rodrigues et al (2015), nos Estados Unidos os prejuízos econômicos relacionados aos eventos extremos podem chegar a um sétimo da economia do país. Com isso, os estudos e os esforços para prevenir e mitigar esses efeitos possibilitam uma redução bilionária para o país.

De acordo com Zandonadi et al (2016), no século passado, existiam apenas alguns trabalhos relacionados às chuvas intensas que foram publicados e que estavam disponíveis. A partir dos anos 2000 essa realidade foi sendo alterada principalmente pelas alterações climáticas que ocorrem no mundo. Ainda segundo ele, as alterações climáticas alteraram significativamente a ocorrência de chuvas intensas e frisa a vulnerabilidade do Brasil quanto a ocorrência desses eventos.

Em alagoas, Silva Júnior (2009) avaliou os efeitos da chuva intensa no processo de urbanização na bacia hidrográfica do Riacho Reginaldo localizada na cidade de Maceió – AL em três anos distintos (1960, 1980 e 2004). Em seus resultados, ele apresenta um aumento da vazão de cerca de 120%. Um dado alarmante para a cidade que sofre constantemente com chuvas intensas. Dessa forma, Holz (2010) mapeou as zonas de risco suscetíveis a alagamentos na bacia do Riacho Reginaldo e conclui que todas as regiões a montante de travessias sobre o curso do rio principal sofrem com problemas frequentes de alagamentos e o problema se agrava nas regiões a jusante, pois além do grande volume de água escoando existe também o carreamento de lixo.

Pedrosa (2008) simulou a bacia do Riacho Reginaldo utilizando o modelo IPHS1 a partir dos cenários de urbanização atual e futuros (levando em consideração as diretrizes do plano

diretor de Maceió e o crescimento desordenado da cidade), para isso ele realizou a parametrização da bacia a partir de dados contidos na literatura e determinados por ele, e conclui que mesmo aplicando as diretrizes do Plano e do Código de Urbanismo não impede a impermeabilização do solo o que gera um aumento, inevitável, do escoamento superficial.

Para minimizar as consequências de eventos extremos, os modelos hidrológicos são amplamente utilizados para entender o efeito da chuva sobre uma bacia hidrográfica. Por outro lado, os modelos (ferramentas simplificadas da realidade) apresentam falhas, incertezas e erros associados. Para reduzir esses fatores, a utilização de dados consistentes, coerentes, atualizados, acréscimos de parâmetros e modelos próprios para cada processo faz com que o modelo retorne resultados mais próximos da realidade.

Os principais modelos hidrológicos são os denominados chuva-vazão, onde o principal objetivo é simular a vazão de uma bacia hidrográfica em uma seção de interesse a partir de um evento com precipitação conhecida, seja ela real ou fictícia (modelo de evento único), ou a partir de vários eventos que ocorrem ao longo do tempo (modelo de evento contínuo). Os modelos de eventos únicos têm como principal objetivo avaliar o escoamento superficial da bacia, enquanto os modelos de eventos contínuos avaliam todas as etapas do ciclo hidrológico, como por exemplo a umidade relativa do solo, evaporação, escoamento subterrâneo, entre outros.

Em ambos os modelos, a principal entrada de dados é a precipitação que possui características próprias de acordo com a localização e a variabilidade espaço-temporal. Segundo Tucci (1998), a chuva possui limitações quanto ao espaço em que ela ocorre, porém, a sua mensuração ocorre pontualmente (através de estações pluviométricas), com poucas unidades de medição e sua distribuição irregular desfavorece a sua aferição.

Para melhorar a representatividade espaço-temporal do monitoramento da precipitação, estão sendo implantados os radares meteorológicos que são baseados em emissões e recepções de micro-ondas, normalmente situadas em regiões altas, que transmitem pulsos de ondas eletromagnéticas em intervalos de tempo regulares, concentrados em um feixe de pequena abertura através de uma antena rotativa, para gerar informações sobre chuvas com resolução espacial média de 1km e temporal de poucos minutos (Hass Miguel, 2018).

A cidade de Maceió – AL, através dos projetos “Pluviômetros Automáticos” e “Radares Meteorológicos”, desenvolvidos pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), recebeu a instalação de 14 estações pluviométricas espalhadas pela cidade e 1 radar meteorológico localizado no campus da Universidade Federal de Alagoas - UFAL. Os projetos têm como objetivo ampliar e complementar a rede de monitoramento pluviométrico no Brasil para subsidiar a pesquisa e emitir alertas de desastres naturais. As estações foram instaladas com o intuito de monitorar os eventos e calibrar o radar meteorológico.

O acesso aos dados é realizado através da ferramenta Mapa Interativo onde o usuário pode fazer o download dos dados de interesse. Infelizmente, por razões operacionais, os dados do radar permanecem disponíveis para download por um curto período de tempo (cerca de 24 h). Após esse período deve-se entrar em contato com o órgão para ter acesso aos dados, o que inviabilizou parte das análises neste trabalho, em função da demora na resposta para acessar os dados indisponíveis na plataforma *on-line*.

Na grande maioria dos estudos são utilizadas chuvas fictícias criadas a partir da curva IDF (intensidade, duração e frequência) que é determinada através de uma análise estatística de uma série de dados de precipitação de uma região.

Neste trabalho, o objetivo é avaliar como o efeito da distribuição espaço-temporal de uma chuva real influencia no hidrograma resultante da bacia hidrográfica do Riacho Reginaldo a partir de dados da rede pluviométrica e de radar e avaliar as incertezas dos modelos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Avaliar o efeito da variabilidade espaço-temporal da precipitação sobre a estimativa de hidrogramas na bacia do Riacho Reginaldo a partir da rede pluviométrica e do radar meteorológico.

2.2 Objetivo Específico

- Modelar a bacia do Riacho Reginaldo para os modelos concentrado e distribuído por sub-bacia;
- Parametrizar o modelo segundo os resultados obtidos por Pedrosa (2008);
- Analisar as incertezas do resultado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Urbanização

Segundo Collotel (2009), a urbanização é o processo migratório do meio rural para o meio urbano. A principal motivação para esse fenômeno são as condições precárias de sobrevivência ou a expectativa de melhoria de vida.

O processo de industrialização, nos países mais desenvolvidos, ocorreu em meados do século XVIII o que impulsionou o êxodo rural. No Brasil, o processo de urbanização aconteceu mais tarde no século XX.

Segundo Silva Júnior (2009), em Alagoas o processo migração se acentuou no final do século XIX e início do Século XX para evitar a seca que ocorre no sertão alagoano. A criação do porto de Jaraguá também foi um incentivo para quem vinha do interior em busca de emprego na capital.

Segundo dados do IBGE (2018), o crescimento populacional em Alagoas nos últimos 50 anos foi de 145% (Figura 1), e grande parte desse aumento ocorreu no meio urbano.

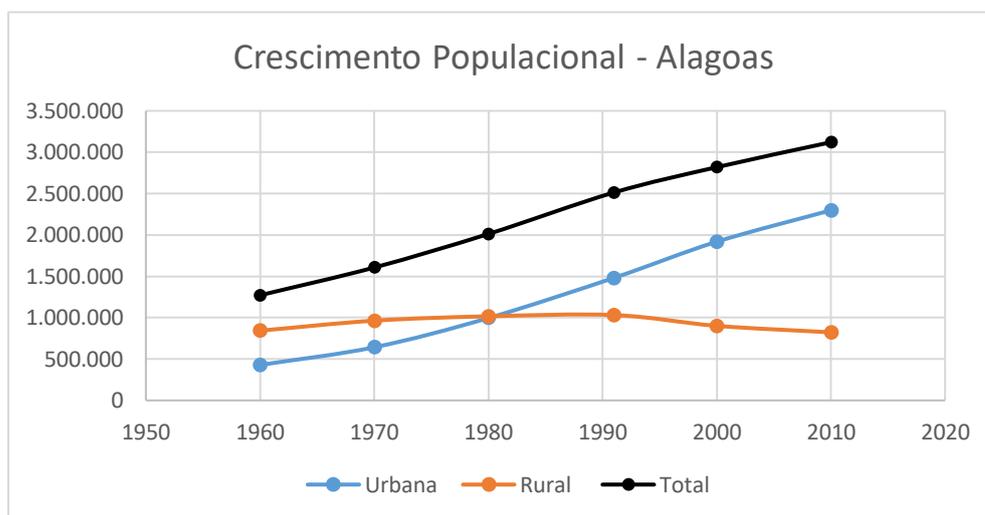


Figura 1 - Crescimento populacional do estado de Alagoas ao longo dos anos

Fonte: IBGE

Segundo Sheldon et al. (2019), o processo de urbanização alterou significativamente a o ciclo hidrológico das bacias hidrográficas. Brown et al. (2009), avaliaram o processo de

urbanização e constatou que a impermeabilização além contribuir para o escoamento, inibe a infiltração, conseqüentemente, a recarga dos recursos hídricos subterrâneos modificando drasticamente o ciclo hidrológico.

As principais conseqüências da alteração no ciclo hidrológico devido à baixa infiltração do solo são: Aumento do escoamento superficial, da velocidade de propagação da vazão e da vazão máxima, redução do tempo de concentração e de pico e do nível do lençol freático (Collotel, 2009).

Segundo Garcia (2005), as transformações do ciclo hidrológico em conjunto com altas taxas de impermeabilidade do solo levam a maiores probabilidades de ocorrência de inundações.

De acordo com Tucci (2005), os principais impactos das inundações para a população urbana são: Perdas materiais e humanas, interrupção das atividades econômicas das áreas afetadas, contaminação da água e contaminação da população por doenças transportadas em meio hídrico.

3.2 Modelos Hidrológicos

Os modelos foram criados com o intuito de representar um objeto ou um sistema de forma simplificada e que resulte em formas de entendê-lo e apresente respostas para diferentes solicitações (Tucci, 1998). Analogamente os modelos hidrológicos são ferramentas para desenvolver o conhecimento sobre uma bacia hidrográfica a partir de informações coletadas sobre a mesma.

Trabalhos como o de Pedrosa (2008) tentam reproduzir como uma bacia hidrográfica reage a diferentes eventos chuvosos. O autor utilizou o modelo IPHS1 empregando, como base, o método SCS para estimar a vazão da bacia do Riacho Reginaldo para o cenário atual e para cenários futuros baseados no Plano Diretor de Maceió - AL.

Shinma (2011) em seu trabalho realiza uma análise sobre os modelos hidrológicos e constata que o modelo SWMM (Storm Water Management Model) possui maior flexibilidade

e abrangência para simular um evento hidrológico em meio urbano comparado a outros modelos como por exemplo o IPHS1.

3.2.1 Storm Water Management Model – SWMM

O modelo que será utilizado neste trabalho é o SWMM, capaz de modelar a bacia de forma concentrada e distribuída. Ele é capaz de estimar a vazão de saída de uma bacia baseado em modelos (hidrológico e hidrodinâmicos) escolhidos pelo usuário e parâmetros que caracterizem a bacia.

As informações apresentadas a seguir foram retiradas dos manuais do usuário do *software* SWMM.

3.2.1.1 O Modelo Hidrológico

Cada superfície determinada pelo usuário é tratada como um reservatório não-linear. O fluxo ocorre através do balanço entre o precipitado, o infiltrado, o evaporado, o armazenado e o escoado.

O programa apresenta cinco modelos de infiltração: Horton, Horton modificado, Green Ampt, Green Ampt modificado e Curve Number (CN).

O modelo de reservatório não-linear está representado na Figura 2 e a equação que rege esse processo é a equação 1.

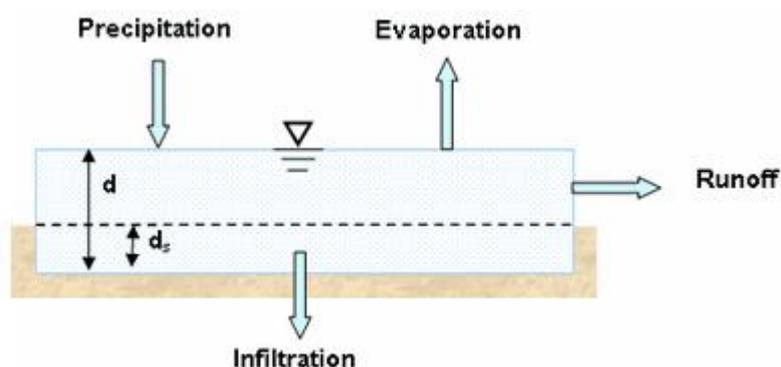


Figura 2 – Representação do modelo de Reservatório não-linear

Fonte: Manual do usuário SWMM

$$Q = W * \frac{1,49}{n} * (d - ds)^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Onde:

- Q – Vazão de saída;
- W – Largura característica da bacia;
- n – Coeficiente de Manning;
- d – Altura do volume de água no reservatório;
- ds – Fração do reservatório que não escoar;
- S – Declividade.

A capacidade de armazenamento da bacia é dada pelo molhamento superficial, formação de lagoas e interceptação. A evaporação pode ser tratada como um valor constante, um conjunto de valores médios mensais, uma série temporal, valores calculados a partir das temperaturas diárias ou valores médios diários. E finalmente a precipitação é um dado que pode ser inserido como uma série temporal de volume, intensidade ou precipitação acumulada.

Para auxiliar na determinação de alguns parâmetros o SWMM apresenta tabelas de valores usuais de materiais comumente encontrado em uma bacia hidrológica seja ela urbana ou rural.

3.2.1.2 Modelos Hidrodinâmicos

O SWMM apresenta três modelos de propagação de escoamento em canais: Fluxo em regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica.

O primeiro modelo apresentado pelo programa é o fluxo em regime uniforme, modelo mais simples, que simplesmente transfere instantaneamente o escoamento que entra para a saída, ou seja, não existe variação de tempo nem variação de volume.

O segundo modelo, mais sofisticado que o primeiro, resolve a equação da continuidade juntamente com uma forma simplificada da equação do momento em cada conduto. Esse modelo consegue representar a variação da área molhada no conduto.

O terceiro modelo, mais refinado e complexo, resolve as equações unidimensionais completas de fluxo de Saint Venant, portanto, teoricamente, deve apresentar resultados mais precisos. Essas equações consistem nas equações da continuidade e do momento para condutos e na equação da continuidade de volume nos nós do canal. Esse modelo permite o armazenamento nos condutos, a representação de ressaltos hidráulicos, das perdas na entrada e saída de condutos, do remanso e do fluxo pressurizado.

3.2.1.3 Calibração

A calibração de um modelo tem como finalidade determinar parâmetros para um melhor ajuste aos valores observados. Existem dois métodos de calibração: Tentativa e erro e automática. O método da tentativa e erro consiste em adotar diferentes conjuntos de parâmetros até encontrar um que represente bem o fenômeno real. Neste método a experiência do usuário reflete na velocidade de convergência dos resultados. A calibração automática consiste em determinar parâmetros através da maximização ou da minimização de uma função objetiva.

O SWMM possui uma ferramenta de calibração automática que permite comparar resultados obtidos em uma simulação com medições realizadas em campo por meio de séries temporais.

3.3 Distribuição Espaço-Temporal da Chuva

As chuvas possuem um comportamento aleatório (Figura 3) tanto no espaço quanto no tempo e são mensuradas através do volume total precipitado e tempo de duração (Tucci, 1995).

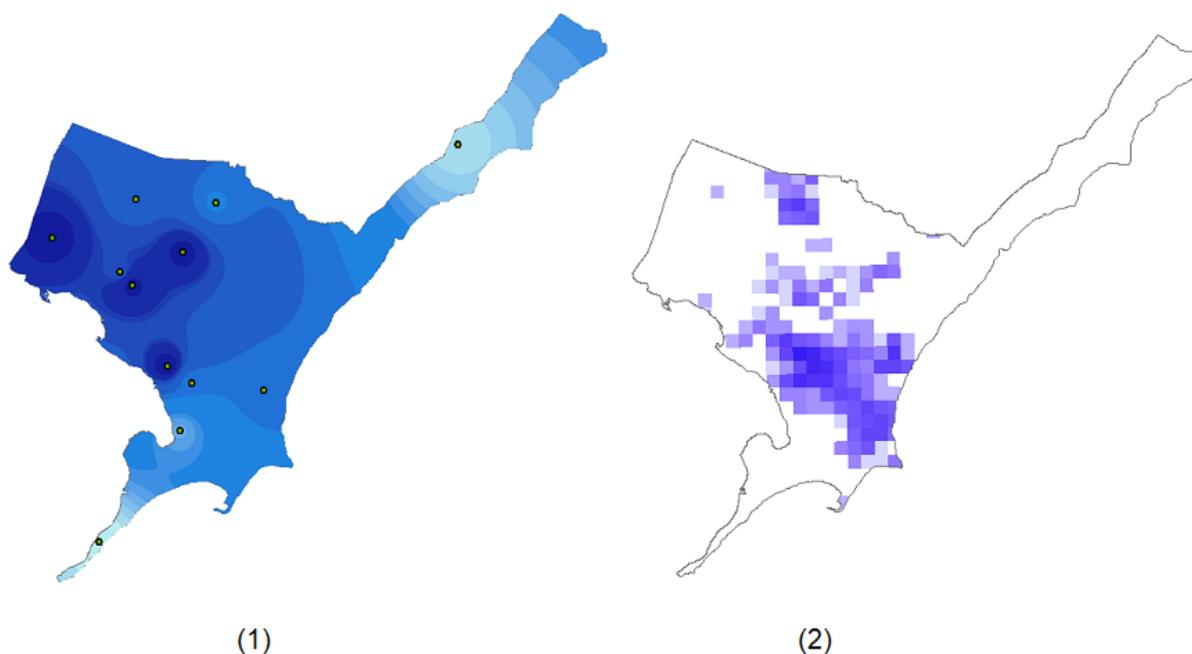


Figura 3 – Distribuição espacial de evento chuvoso: 1) Pluviômetros e 2) Radar

Fonte: Autor

Atualmente, o portal Hidroweb (ANA – Agência Nacional de Águas), o site do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), o site da SEMARH (Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas), INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), entre outros, possuem ferramentas para auxiliar no acesso aos dados dos postos e até mesmo dos dados de radar.

A avaliação dos eventos de chuvas intensas ocorre através da curva IDF que possui grande importância para o desenvolvimento de obras hidráulicas e de drenagem urbana.

A cidade de Maceió possui duas curvas IDF determinadas por Pfafstetter (1957) e Denardin e Freitas (1982). Optou-se pela curva determinada por Pfafstetter (equações 2 e 3), que segundo Pedrosa (2008) é a mais utilizada nos projetos de drenagem na cidade.

$$P = R * [a * t + b * \log(1 + c * t)] \quad 2$$

$$R = Tr^{(\alpha + \frac{\beta}{Tr^\gamma})} \quad 3$$

Onde:

- P – Precipitação máxima em mm;
- t – Duração em horas;
- a,b,c – Constantes para cada posto iguais a 0,5, 29 e 10 respectivamente;
- R – Fator de probabilidade;
- Tr – Tempo de retorno;
- α, β – Parâmetros que dependem da duração do evento;
- γ – Constante igual a 0,25.

Tabela 1 - Valores de α e β (Pfafstetter, 1957)

Duração em min	α	β
5	0,108	0
15	0,122	0,04
30	0,138	0,08
60	0,156	0,2
120	0,166	0,2
240	0,174	0,2
480	0,176	0,2
>840	0,174	0,2

3.4 Cálculo da Precipitação Média

Existem atualmente 5 métodos para a determinação da chuva média de uma bacia, que são: Método da média aritmética, método de Thiessen, método das isoietas, método do inverso do quadrado da distância e Krigagem.

Lee et al (2018) e Barco et al (2008) avaliaram em seus trabalhos a qualidade dos métodos supracitados, e concluem que o método que melhor se aproxima da realidade é o de Thiessen, mas o inverso do quadrado e a Krigagem também apresentaram bons resultados.

Para o desenvolvimento do trabalho optou-se pelo método que apresentou o melhor resultado, ou seja, o método dos polígonos de Thiessen.

O método do polígono de Thiessen consiste no cálculo da área de influência de cada estação pluviométrica, através de traços que cortam perpendicularmente o centro do segmento de reta que ligam os postos. A Figura 4 apresenta a aplicação do método para a bacia em estudos e os postos pluviométricos disponíveis.

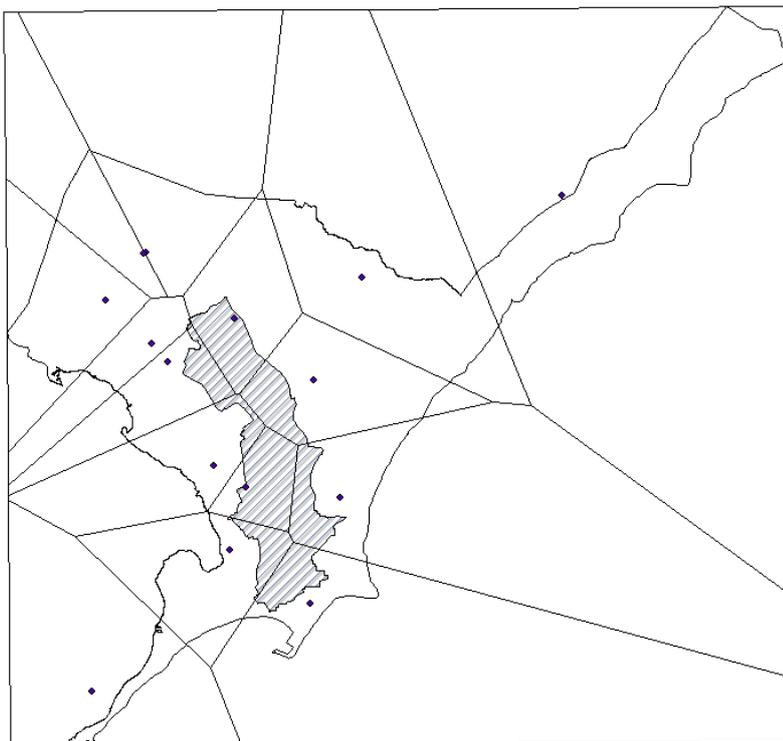


Figura 4 - Exemplo da aplicação do método dos polígonos de Thiessen

Fonte: Autor

Para a determinação da chuva média é realizada uma ponderação entre o precipitado de cada posto e as áreas de influência de cada posto dentro da área da bacia (equação 4).

$$P = \sum [(P_i * A_i) / A] \quad 4$$

Onde:

- P – Precipitação média da Bacia;
- P_i – Precipitação do posto i ;
- A_i – Área de influência do posto i na bacia;
- A – Área total da bacia.

3.5 Estimativa de Precipitação por Radar

Segundo Moreira (2005), sensoriamento remoto é a ciência de obtenção de dados a partir de aparelhos que não estão em contato o objeto de estudo. O principal aparelho referente ao sensoriamento remoto é o radar, abreviação de “**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging”, e refere-se a

técnica de coleta de dados baseado em emissões de ondas eletromagnéticas para detectar a presença de um objeto.

O radar meteorológico permite a mensuração da quantidade, do diâmetro e da distância das gotas de chuva, através da refletividade (espectro de gotas no volume iluminado) das ondas emitidas. De acordo com Marshall e Palmer (1948), um alvo contendo gotas de chuva distribuídas aleatoriamente dentro de um volume iluminado pelo feixe do radar, produz uma refletividade (Z) igual a:

$$Z = \int N(D)D^6 dD = \sum D_i^6 \quad 5$$

Onde:

- Z – Refletividade em mm^6m^{-3} ;
- N – Número de gotas;
- D – Diâmetro das gotas em mm.

A taxa de precipitação por unidade de tempo (R) é gerada a partir da integração do espectro de gotas por unidade de área, por minuto do volume de cada gota, dado por:

$$R = \frac{\pi}{6} \int N(D)D^3V(D)dD \quad 6$$

Onde:

- R – Taxa de precipitação em mm/h;
- V – Velocidade terminal das gotas.

Através do espectro de gotas e de suas velocidades terminais é possível determinar a refletividade e a taxa de precipitação. A relação entre elas é dada por:

$$Z = aR^b \quad 7$$

Onde:

- a e b – Constantes.

Existem dois métodos de determinação dos parâmetros “a” e “b”: o Meteorológico e o estatístico. No método meteorológico tanto a refletividade quanto a taxa de precipitação são coletados diretamente pelo radar através do tamanho das gotas e posteriormente ajustados os valores de “a” e “b”. Por outro lado, o método estatístico é baseado em uma série temporal de espectros de gotas. O grande problema de ambos os métodos é que diferentes espectros de gotas podem gerar a mesma refletividade, mas esse erro é reduzido quando o intervalo de tempo de integração é longo.

Existem inúmeros trabalhos sobre a determinação dos parâmetros “a” e “b”. Tayob (2014) e Moraes (2003), por exemplo, determinaram, através de uma análise estatística, os valores para a cidade de Maceió e Marshall e Palmer (1948) determinaram valores-padrão para regiões sem dados. Os valores encontrados por eles estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de “a” e “b”

Relação Z-R	a	b
Tayob (2014)	123,36	1,27
Moraes (2003)	176,5	1,29
Marshall (1948)	200	1,6

Vale ressaltar que os coeficientes “a” e “b” são variáveis do tipo de chuva, da localização, do volume das gotas, do período em que ocorre a chuva, entre outros. Então, quanto maior a série estudada, para a validação dos coeficientes, melhores serão os resultados.

Segundo Kessinger (2009), após a determinação da precipitação é necessário utilizar uma rede de pluviômetros para calibrar e validar os resultados. A calibração dos dados do radar será realizada através do método de Análise Objetiva Estatística (ANOBES, Statistical Objective Analysis Scheme - SOAS) que considera estatisticamente a influência da distância dos pluviômetros para cada pixel medido pelo radar (Calvetti et al, 2003)

A equação de ANOBES é definida como:

$$P_a(x_r) = P_b(x_r) + \sum_1^n W_n [P_0(x_n) - P_c(x_n)] \quad 8$$

Onde:

- Pa é a precipitação analisada;
- Pb é a precipitação estimada pelo radar (“background”);
- Po é a precipitação medida pelo pluviômetro (“observação”);
- Pc é a precipitação estimada pelo radar no pluviômetro;
- Wn é o peso a posteriori a ser determinado pela configuração de dados da rede;
- N é o número total de pluviômetros;
- xr e xn são as respectivas posições dos pontos de grade do radar e dos pluviômetros.

Para derivar os pesos, é necessário assumir que os erros de observação e a precipitação estimada pelo radar não têm correlação e não tenha viés. A variância esperada do erro da análise é minimizada em relação aos pesos “W” (derivada a partir da equação 8). A expressão normalizada para os pesos é dado por:

$$\sum_1^n W_n(\rho_{ki} + \varepsilon_{ki}^2)] = \rho_{ji} ; \quad p/ 1 \leq k \leq N \quad 9$$

Onde:

- ρ_{ki} – Correlação entre o erro de *background* nos pluviômetros “k” e “i”;
- ε_{ki}^2 - Erro observacional normalizado;
- ρ_{ji} – Correlação entre o erro de *background* no pluviômetro “i” e o ponto de grade “j”.

A equação 9 pode ser normalizada como:

$$\varepsilon_a^2 = 1 - \sum_1^N \rho_{ki} * W_i \quad 10$$

As equações 9 e 10 são normalizados através da matriz de covariância de erro do radar (*background*). Essa matriz é o componente mais importante do esquema ANOBES, a exatidão da análise depende muito desse componente. Não considerar o impacto do erro de segundo plano afetará negativamente os erros de interpolação.

O desenvolvimento completo das equações pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por Pereira Filho et al (1998).

Em Alagoas, Cabral et al (2017) simularam a bacia do Rio São Miguel através do modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) utilizando dados do radar meteorológico (mesmo radar utilizado neste trabalho) e das estações pluviométricas disponíveis. A calibração realizada por ele utilizando o método de ANOBES resultou em um parâmetro constante para todas as leituras do radar.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos e os materiais que foram aplicados em cada etapa do trabalho. Também foram identificados os pontos amostrais selecionados e o porquê da escolha de cada um. Além dos pontos amostrais, são relatados detalhes das análises realizadas.

As etapas para o desenvolvimento deste trabalho estão apresentadas na Figura 5.

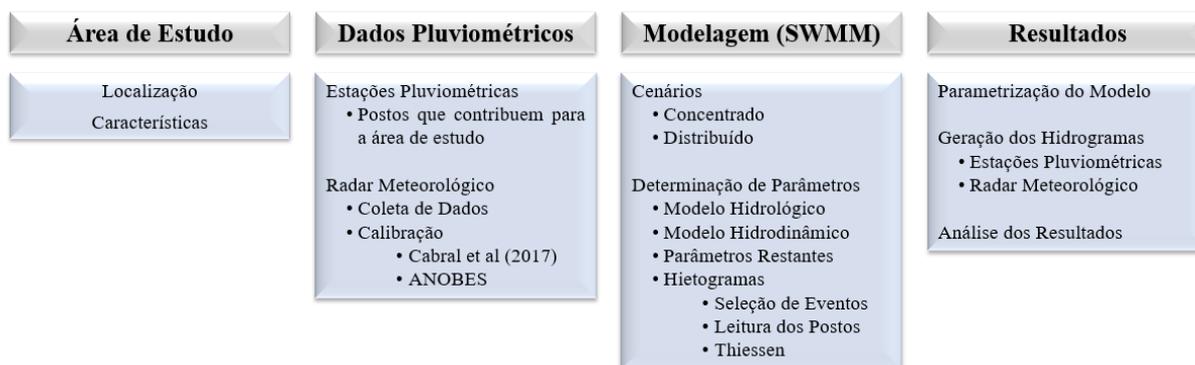


Figura 5 – Síntese metodológica

Fonte: Autor

4.1 Área de Estudo

A Bacia do Riacho do Reginaldo (Figura 6) está totalmente localizada na área urbana do município de Maceió (Pedrosa, 2008), possui suas nascentes nos bairros do Tabuleiro dos Martins, Santa Lúcia e Antares e engloba 17 bairros da cidade (Antares, Barro Duro, Canaã, Centro, Farol, Feitosa, Gruta de Lourdes, Jacintinho, Jaraguá, Jardim Petrópolis, Jatiúca, mangabeiras, Ouro Preto, Pitanguinha, Poço, Santa Lúcia e Serraria).

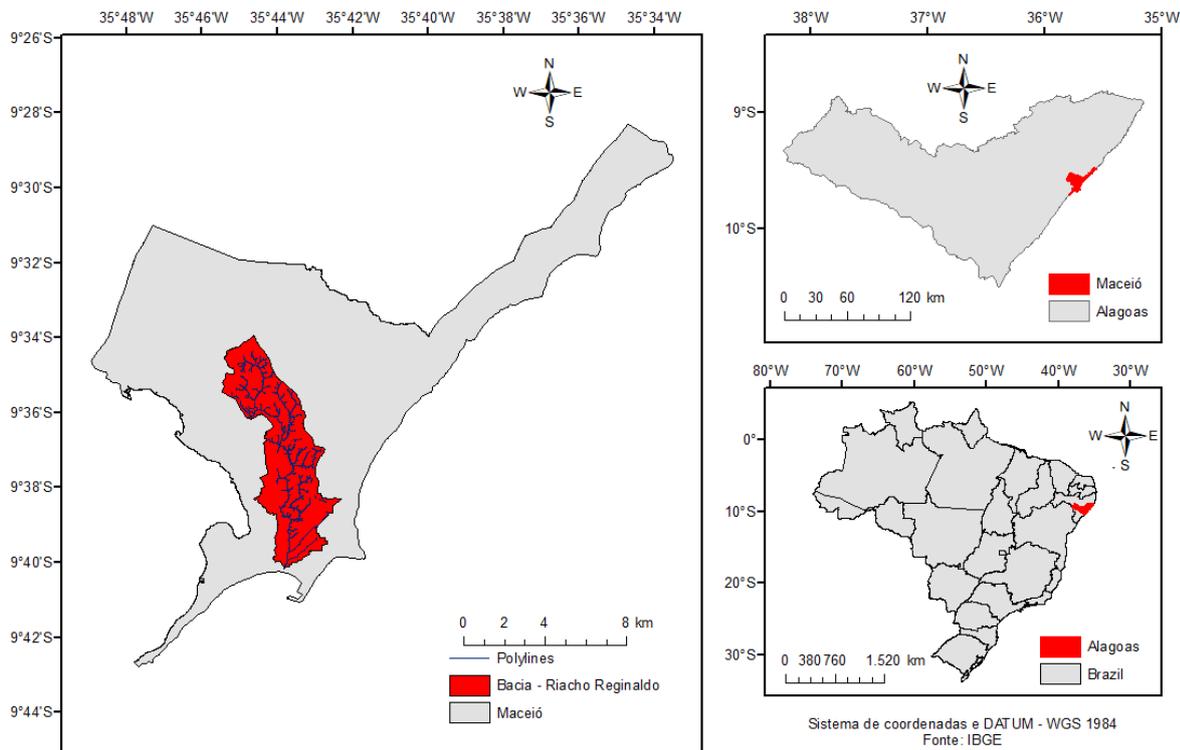


Figura 6 – Localização geográfica da bacia do Riacho do Reginaldo

Fonte: IBGE

Principais características da bacia determinadas por Pedrosa (2008):

- Área total: 26,5 km²;
- Tempo de concentração: 155 min;
- Perímetro da bacia: 34,78km;
- Comprimento do maior curso d'água: 14,8km;
- Declividade média: 0,007m/m do rio principal;
- Cota máxima: 98m;
- Cota mínima: ao nível do mar;
- Forma alongada: Característica física que amortece o pico de vazão;
- Áreas planas de tabuleiro: áreas que se estendem desde o vale até o divisor.
- Áreas íngremes: Apresentando grandes declividades com formação de grotas.

O relevo da bacia é bem definido (Figura 7), possuindo uma região plana em sua parte alta, talvez bem definidos e outra região plana em sua parte baixa.

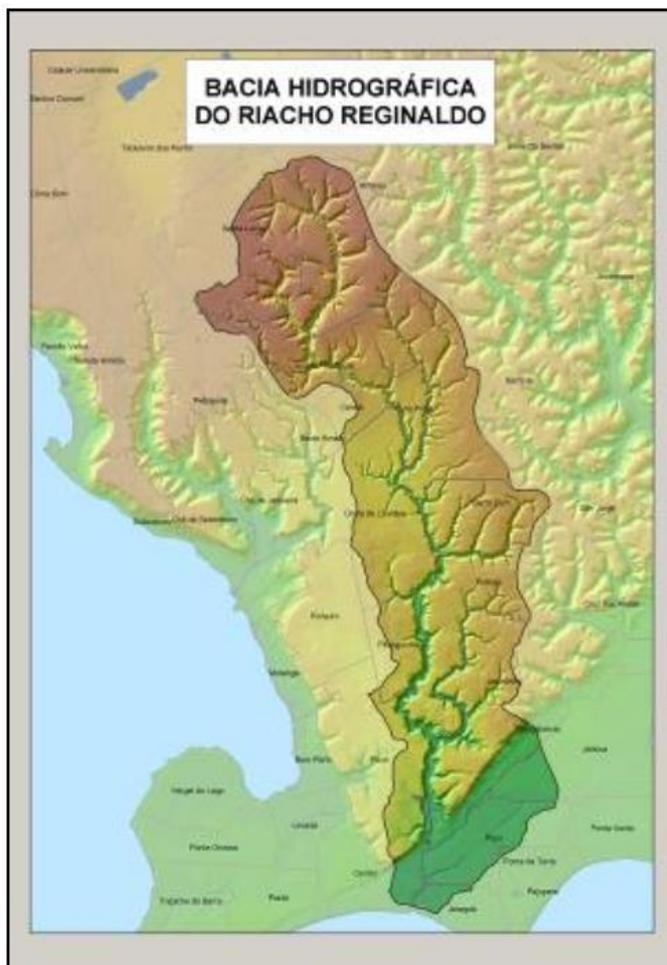


Figura 7 - Topografia da bacia do Riacho Reginaldo

Fonte: Pedrosa (2008)

Pedrosa (2008), através da topografia, do uso e ocupação do solo e de pontos estratégicos para avaliar o escoamento superficial determinou a discretização da bacia em 16 sub bacias, as quais estão apresentadas na Figura 8.

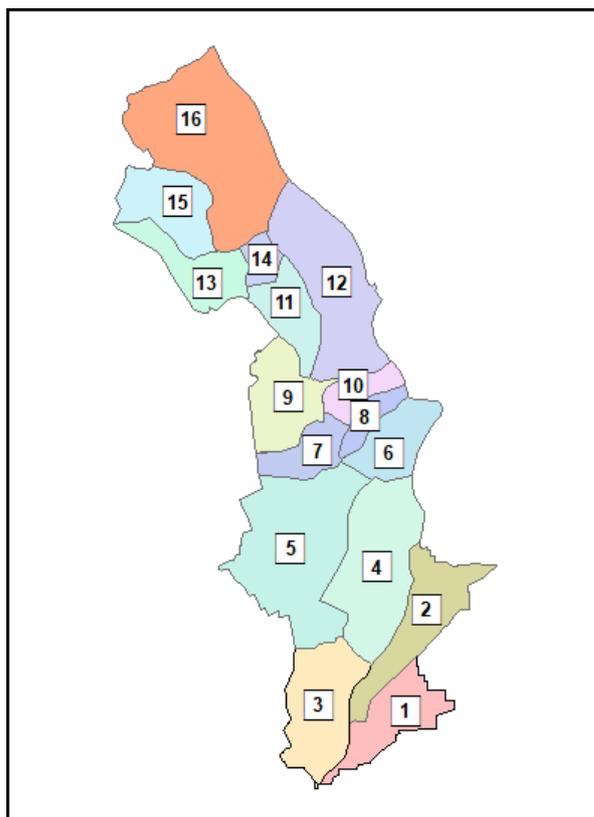


Figura 8 – Subdivisão da bacia do Riacho Reginaldo

Fonte: Pedrosa (2008)

4.2 Rede de Monitoramento Pluviométrico na Área de Estudo

Maceió possui 2 sistemas de medição de chuva, a rede pluviométrica e o radar meteorológico. O primeiro sistema é constituído por 22 estações pluviométricas e suas localizações e seus respectivos órgãos responsáveis estão presentes na Figura 9.

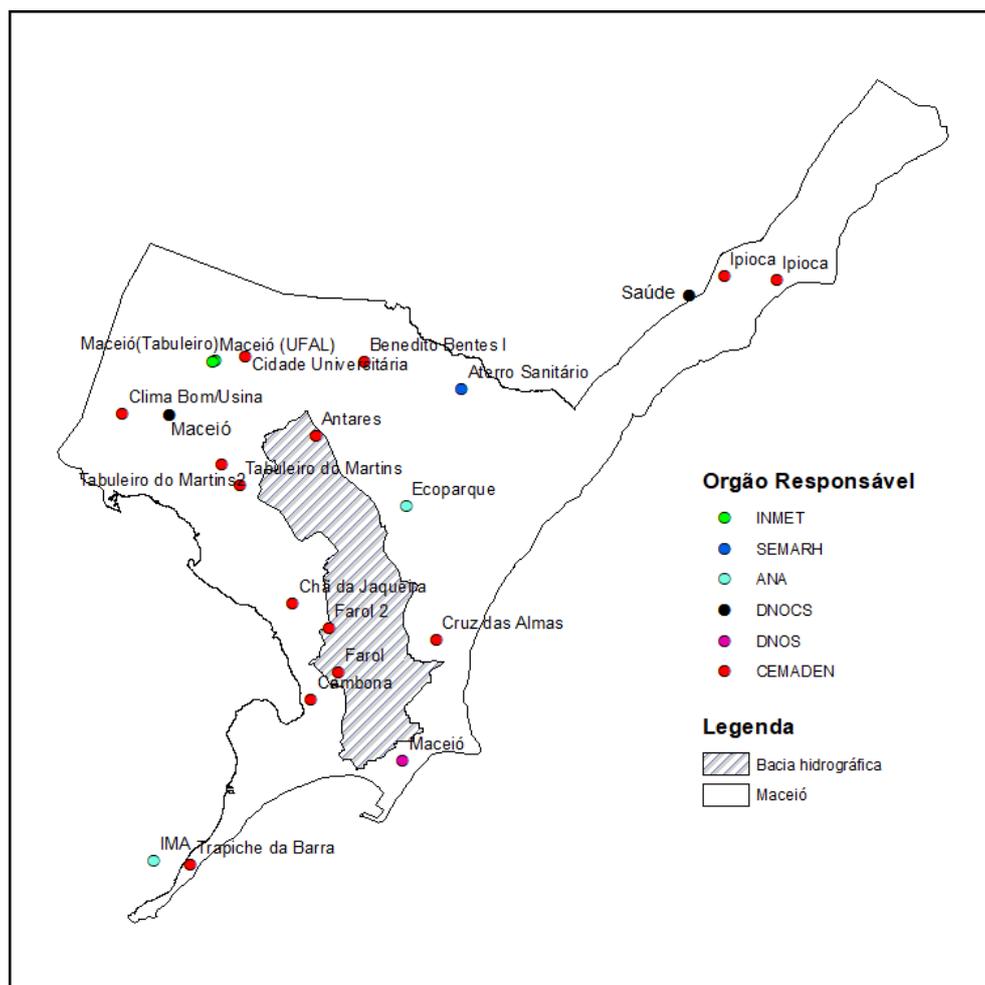


Figura 9 - Localização das estações pluviométricas de Maceió

Fonte: Autor

Para determinar os postos que contribuem para a bacia foi utilizado o método dos polígonos de Thiessen. Os postos que contribuem para a bacia estão presentes na Figura 10.

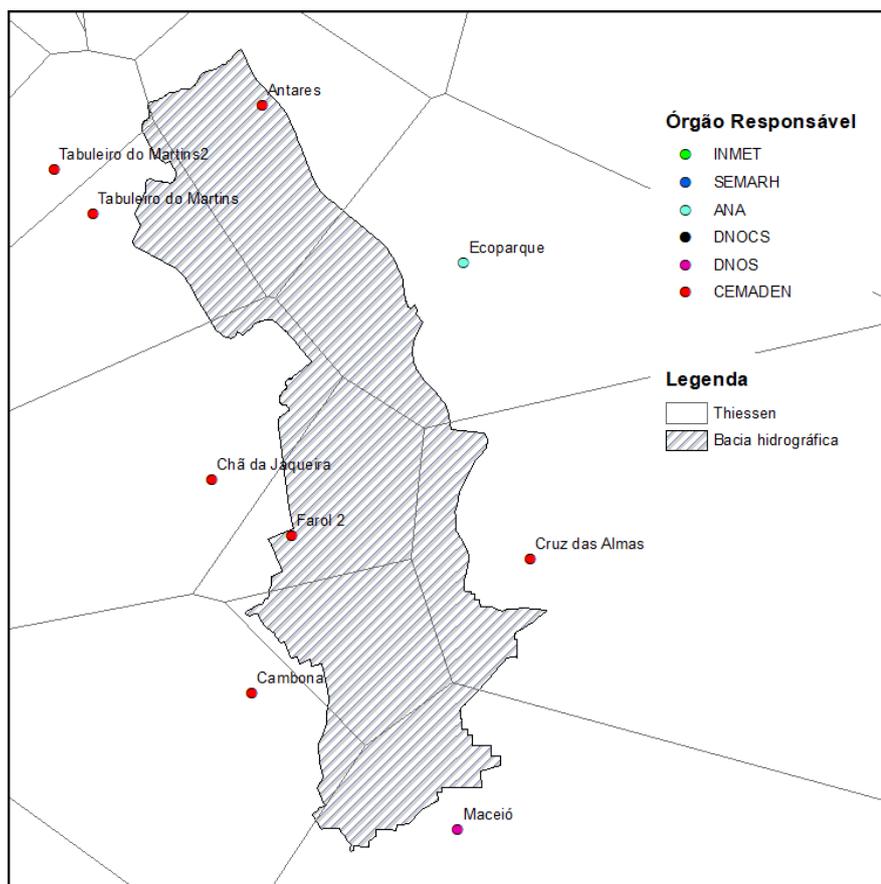


Figura 10 - Polígonos de Thiessen na bacia

Fonte: Autor

A Tabela 3 apresenta todos os postos com suas coordenadas geográficas e em destaque estão os postos que contribuem com a bacia. Os postos em amarelo não possuem dados disponíveis ou possui resolução temporal igual a 1 dia o que não satisfaz aos objetivos do trabalho que necessita de dados com resolução temporal de 10 minutos e os demais estão fora da área de abrangência.

Tabela 3 - Estações pluviométricas de Maceió

Órgão	Posto	Longitude	Latitude
CEMADEN	Antares	-35,741°	-9,573°
	Cambona	-35,748°	-9,621°
	Chã da Jaqueira	-35,761°	-9,55°
	Cruz das Almas	-35,707°	-9,632°
	Farol	-35,735°	-9,641°
	Farol2	-35,738°	-9,629°
	Tabuleiro do Martins	-35,763°	-9,587°

Órgão	Posto	Longitude	Latitude
	Tabuleiro do Martins2	-35,768°	-9,581°
	Benedito Bentes I	-35,727°	-9,552°
	Cidade Universitária	-35,761°	-9,550°
	Clima Bom	-35,797°	-9,567°
	Ipioca	-35,608°	-9,529°
	Ipioca	-35,623°	-9,528°
	Trapiche da Barra	-35,778°	-9,696°
ANA	Ecoparque	-35,715°	-9,594°
	IMA	-35,789°	-9,695°
DNOS	Maceió	-35,716°	-9,667°
DNOCS	Maceió	-35,783°	-9,567°
	Saúde	-35,633°	-9,533°
INMET	Maceió (Tabuleiro)	-35,770°	-9,551°
	Maceió (UFAL)	-35,771°	-9,551°
SEMARH	Aterro Sanitário	-35,699°	-9,560°

O segundo sistema é constituído por um radar meteorológico localizado nas coordenadas 9.55129°S e 35.77068°O, com as seguintes características: banda S, doppler e de dupla polarização, possui resolução espacial (pixel) igual a 673,6x673,6 m (determinada pelo *software* ArcGis através das propriedades do *layer*) e temporal igual a 10 min. De acordo com Rico-Ramirez et al (2015), as melhores resoluções para avaliar um evento chuvoso em uma bacia com área maior que 10 km² são 1x1 km (espacial) e 1 min (temporal).

As informações provenientes do radar estão armazenadas em extensões *.h5 (Figura 11) e *.tiff (Figura 12). Os arquivos na extensão *.h5 são informações lidas pelo radar como refletividade, velocidade radial, largura espectral, refletividade diferencial, entre outros. Por outro lado, as informações em *.tiff são valores de precipitação calculados pela equação 7 utilizando os coeficientes determinados por Marshall e Palmer (1948). O CEMADEN informou que utiliza a biblioteca Py-ART (Python ARM Radar Toolkit) para realizar as leituras dos arquivos, infelizmente essa ferramenta não foi utilizada neste trabalho por falta de tempo hábil. Por fim foi necessário a calibração dos mesmos, que segundo Cabral et al (2017) são superestimados em 60% na média os valores.

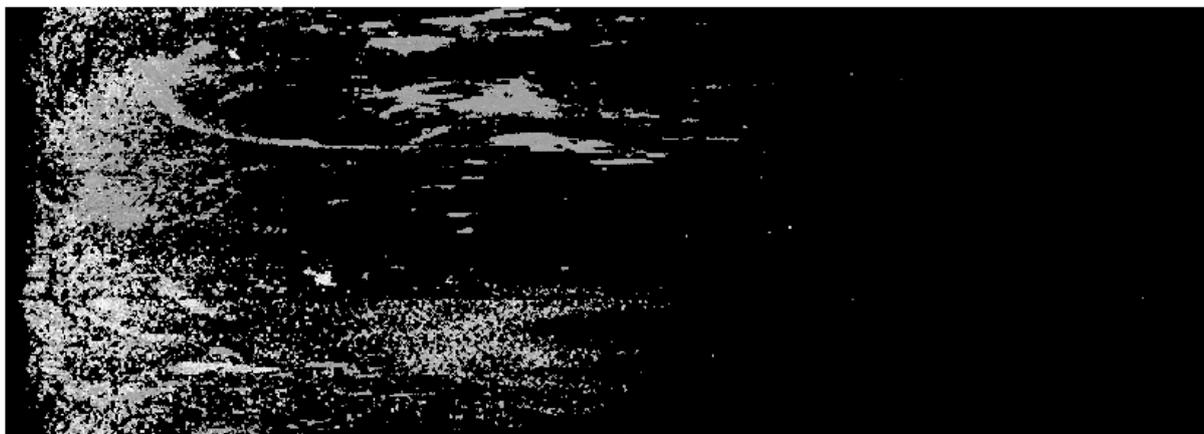


Figura 11 – Leitura da refletividade realizada pelo radar

Fonte: Autor

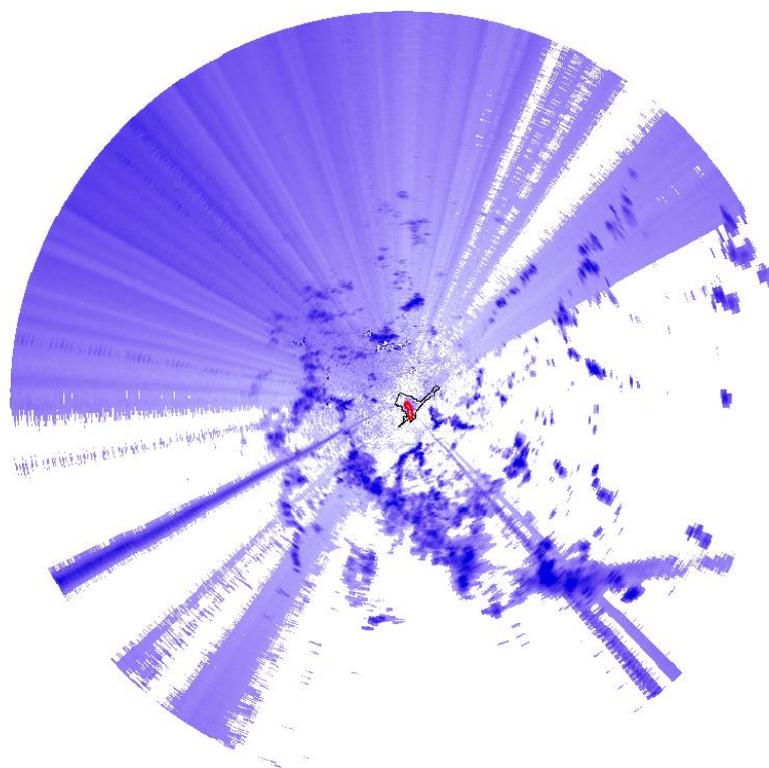


Figura 12 – Leitura de precipitação em mm

Fonte: Autor

A chuva foi determinada, primeiramente, em todos os pixels que influenciam na bacia (Figura 13), com o auxílio do *software* AutoCAD, e através de uma rotina desenvolvida em MATLAB que tem como dados de entradas as informações em *.tiff, aplica o método dos polígonos de Thiessen e, por fim, gera os hietogramas (representação gráfica do volume

precipitado no tempo) de cada sub bacia em arquivos *.txt para posteriormente alimentar o *software*.

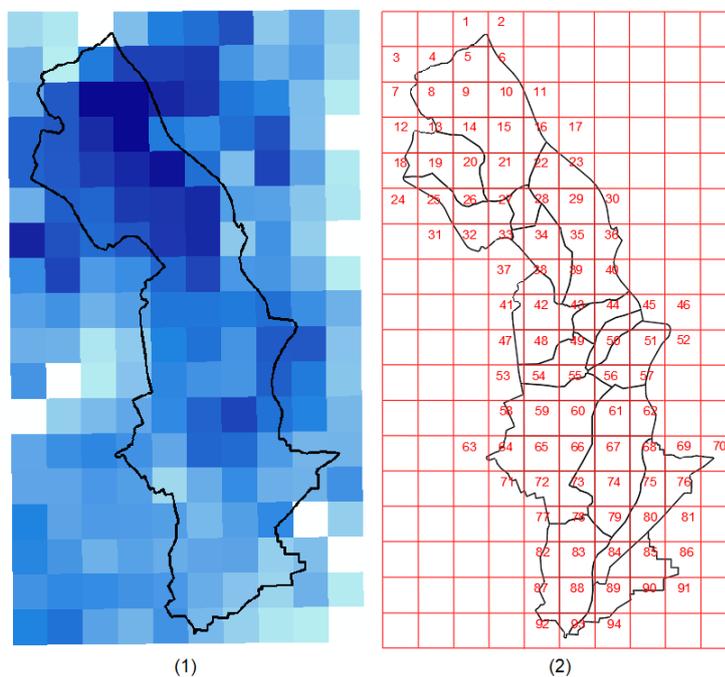


Figura 13 – Leitura pixelada do radar (1) e pixels que influenciam na bacia (2)

Fonte: Autor

O desenvolvimento do evento do dia 02 de fevereiro de 2019 na bacia está presente na Figura 14.

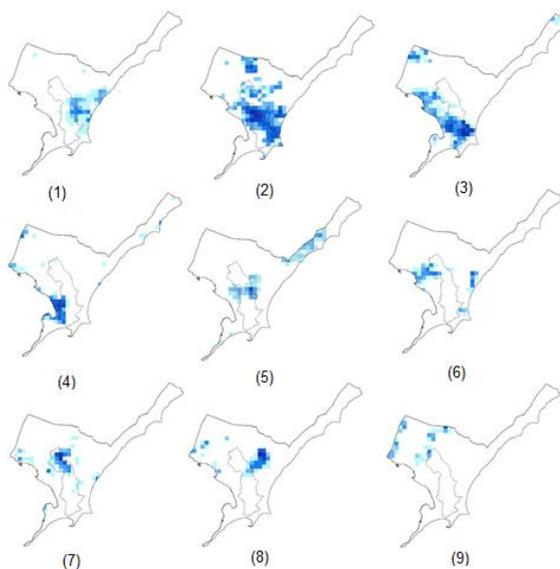


Figura 14 – Desenvolvimento do evento

Fonte: Autor

Para finalizar o tratamento dos dados, foi realizado a calibração através do método de ANOBES (método utilizado para aproximar os dados observados por radar aos dados observados nas estações pluviométricas) que leva em consideração a localização dos centros cada pixel e dos postos. A Figura 15 apresenta postos que serão utilizados na calibração. Os postos como o Ipioca estão distantes suficientemente para não influenciar significativamente na bacia por isso foram desconsiderados na aplicação do método.

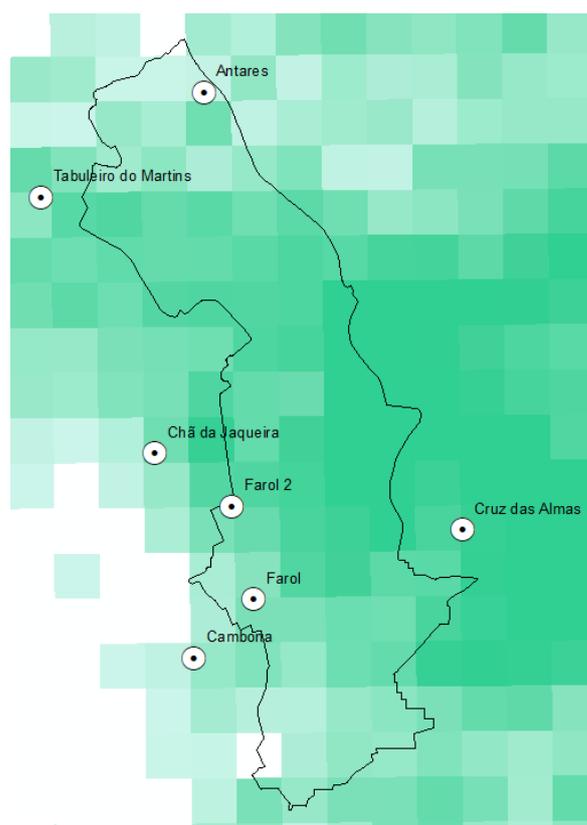


Figura 15 – Postos para a calibração do radar

Fonte: Autor

4.3 Modelagem

O modelo SWMM foi aplicado na bacia do Riacho Reginaldo com o intuito de avaliar através da discretização em sub-bacias apresentada no item 4.1, os diferentes desenvolvimentos dos eventos de precipitação que ocorrem na bacia, através de dois cenários distintos. Para gerar os hidrogramas o SWMM necessita das características da bacia e de parâmetros calibrados para gerar os hidrogramas.

4.3.1 Cenários

Para avaliar o comportamento do nível de discretização da chuva serão utilizados 2 cenários: Chuva concentrada (Figura 16 – 1) e distribuída (Figura 16 – 2). A chuva concentrada é caracterizada por apresentar em toda a superfície a mesma taxa de precipitação, por outro lado a chuva distribuída é caracterizada por apresentar em cada sub-bacia diferentes taxas de precipitação.

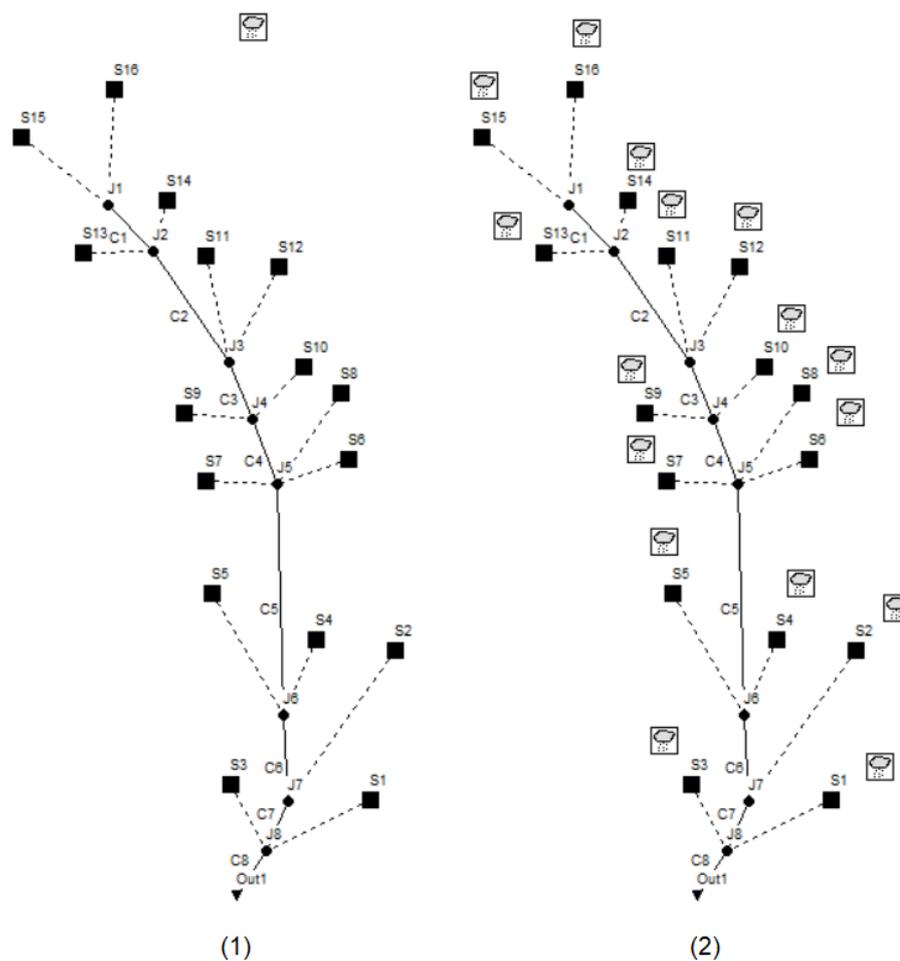


Figura 16 - Diagramas unifilares dos cenários estudados

Fonte: Autor

Os dois cenários serão utilizados tanto para a simulação com os dados de radar quanto para os dados das estações pluviométricas.

4.3.2 Determinação dos parâmetros do modelo

O SWMM utiliza dois modelos para a geração do hidrograma: Hidrológico e hidrodinâmico, para cada modelo o programa necessita de parâmetros distintos.

4.3.2.1 Modelo Hidrológico Chuva-Vazão

Os parâmetros utilizados na modelagem chuva-vazão são:

- Área da bacia (sub-bacias);
- Largura característica;
- Declividade;
- Área impermeável;
- Coeficientes de Manning para as áreas impermeáveis e permeáveis;
- Volume armazenado na bacia;
- Se há fluxo entre as áreas permeáveis e impermeáveis;
- Volume evaporado;
- Se existe fluxo subterrâneo;
- Modelo de infiltração;
- Modelo de propagação de vazão em canais.

A largura característica e os coeficientes de Manning serão parametrizados com os hidrogramas gerados por Pedrosa (2008). O volume armazenado na bacia, o fluxo entre subáreas e o volume evaporado foram considerados zero.

Os métodos de infiltração e propagação de vazão foram escolhidos, respectivamente, o da curva número (CN) (mesmo método utilizado por Pedrosa, 2008) e o da onda cinemática.

Os parâmetros determinados por Pedrosa (2008) são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros das sub-bacias (PEDROSA, 2008)

Sub-Bacia	Área (ha)	Declividade (%)	Impermeável (%)	CN
S1	126,7	0,18	89,5	89,8
S2	172,0	2,41	76,45	91,64

Sub-Bacia	Área (ha)	Declividade (%)	Impermeável (%)	CN
S3	193,2	1,07	76,9	91,93
S4	273,4	1,51	79,31	93,83
S5	363,8	2,13	65,81	94,96
S6	107,6	5,49	40,87	93,93
S7	78,7	2,44	66,18	93,97
S8	43,1	5,40	58,22	93,97
S9	145,3	2,13	75,14	90,75
S10	56,4	1,79	50,78	92,49
S11	100,0	1,03	50,05	90,33
S12	284,3	1,14	39,33	93,05
S13	114,3	1,14	43,63	88,24
S14	36,1	4,03	61,22	86,57
S15	139,4	1,01	20,62	91,02
S16	411,3	0,51	30,92	92,88

4.3.2.2 Propagação de Vazão nos Canais

Os parâmetros necessários para o modelo de onda cinemática são:

- Seção transversal do canal;
- Comprimento;
- Rugosidade;
- Profundidade máxima do canal;
- Cotas a montante e jusante.

A seção transversal e a rugosidade do canal foram consideradas constantes ao longo de toda a bacia. A rugosidade foi determinada como o menor valor de um canal de concreto, ou seja, igual a 0,011. A seção transversal foi escolhida como um canal retangular de largura da base igual a 5 m.

Os parâmetros restantes foram determinados através dos *softwares* Google Earth Pro e do ArcGis. A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros para o modelo hidráulico.

Tabela 5 – Cotas dos canais

Canal	Cota - Montante (m)	Cota - Jusante (m)	Comprimento (m)
C1	84	54	858
C2	54	46	2060
C3	46	45	822
C4	45	39	866
C5	39	28	3829
C6	28	10	830
C7	10	1	890
C8	1	0	901

Os últimos parâmetros (largura característica e coeficiente de Manning) serão determinados através da calibração automática presente no SWMM, que necessita de um ponto inicial. Dessa forma, foi estipulado um valor para o coeficiente de Manning coerente com a área a qual o coeficiente está vinculado (0,014 para a área impermeável e 0,15 para a área permeável). Para a largura característica da bacia foi estipulado o valor calculado a partir da equação 11.

$$W = A/L$$

11

Onde:

- W – Largura característica da bacia;
- A – Área total da bacia;
- L – Comprimento do rio principal.

A calibração é realizada a partir da simulação dos dados previamente determinados e pelos dados observados, neste trabalho serão utilizados os resultados obtidos por Pedrosa (2008) como os dados observados. Pedrosa (2008) em seu trabalho realizou simulações para diferentes chuvas de projeto com tempos de retorno iguais a 2, 10 e 50 anos (Figura 17).

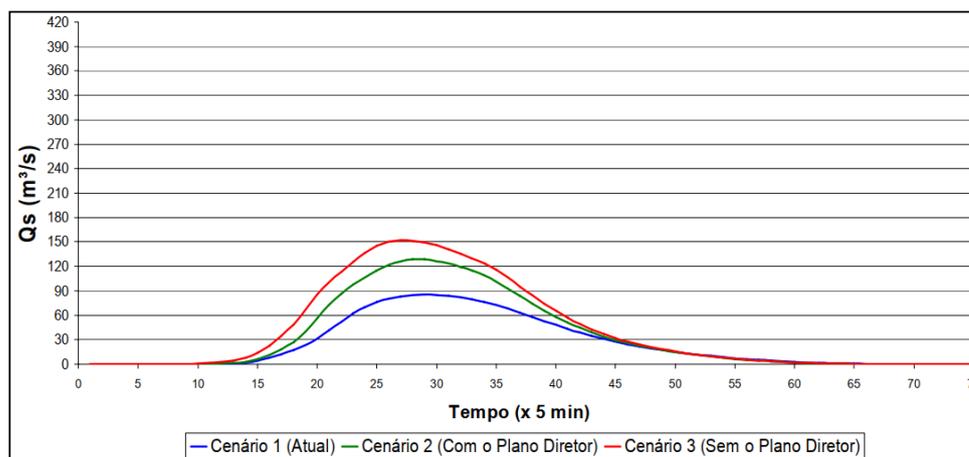


Figura 17 - Hidrogramas base para parametrização

Fonte: Pedrosa (2008)

4.3.3 Hietogramas

Para determinar os hietogramas que foram utilizados no modelo foi necessária a escolha dos eventos, a coleta dos dados, a aplicação do método dos polígonos de Thiessen e a geração dos arquivos no modelo do SWMM.

Serão apresentados os dados referentes a todos os eventos escolhidos e como foram gerados os hietogramas do evento ocorrido no dia 29/05/2019. Para os demais eventos as criações dos hietogramas seguem as mesmas etapas.

4.3.3.1 Eventos

A escolha se baseou nos eventos que ocasionaram alagamentos e para isso foi utilizada as notícias disponíveis nos veículos de informações locais como a GazetaWeb, o Alagoas 24h e o portal G1 (Tabela 6).

Tabela 6 – Eventos escolhidos

Evento	Valor acumulado de precipitação (mm)							
	Tabuleiro do Martins 2	Farol	Tabuleiro do Martins	Farol 2	Cruz das Almas	Antares	Chã da Jaqueira	Cambona
29/05/2016	100.84	28.95	100.98	38.44	21.58	98.4	54	28.4
26/05/2017	180.6	163.04	-	155.25	155.08	183.2	179.6	185.4
28/06/2017	51.33	64.68	-	61.27	48.03	82.2	67.2	67.8
18/08/2017	39.36	27.14	39.78	32.87	17.93	37.4	37.6	-

Evento	Valor acumulado de precipitação (mm)							
	Tabuleiro do Martins 2	Farol	Tabuleiro do Martins	Farol 2	Cruz das Almas	Antares	Chã da Jaqueira	Cambona
23/01/2018	28.15	2.78	23.99	-	8.08	45.6	9	6
22/04/2018	142.19	-	151.72	125.34	128.32	152.6	155.4	90.6
02/07/2018	11.6	-	14.32	26.95	30.3	17	21.2	36.8
17/12/2018	-	11.34	4.32	2.56	11.4	11	1.6	2.16
28/01/2019	-	99.89	63.01	86.97	91.78	54.6	98	125
02/02/2019	-	4.33	6.48	9.45	6.51	2.6	9.4	0
26/03/2019	-	17.52	24.06	19.32	16.93	20.2	16.6	14.8

Os eventos dos dias 17 de dezembro de 2018 (amarelo), 02 de fevereiro de 2019 e 26 de março de 2019 (em verde), apesar de não apresentarem ocorrência de alagamentos, foram escolhidos por possuírem dados de radar disponíveis, mas apenas os eventos em destaque em verde possuem dados na extensão *.tiff.

A partir da equação definida por Pfafstetter (1957), foi calculado o tempo de retorno para cada evento. A Figura 18 apresenta o tempo de retorno dos eventos escolhidos, para isso foram determinados as maiores médias flutuantes das leituras dos postos para cada intervalo de tempo do evento.

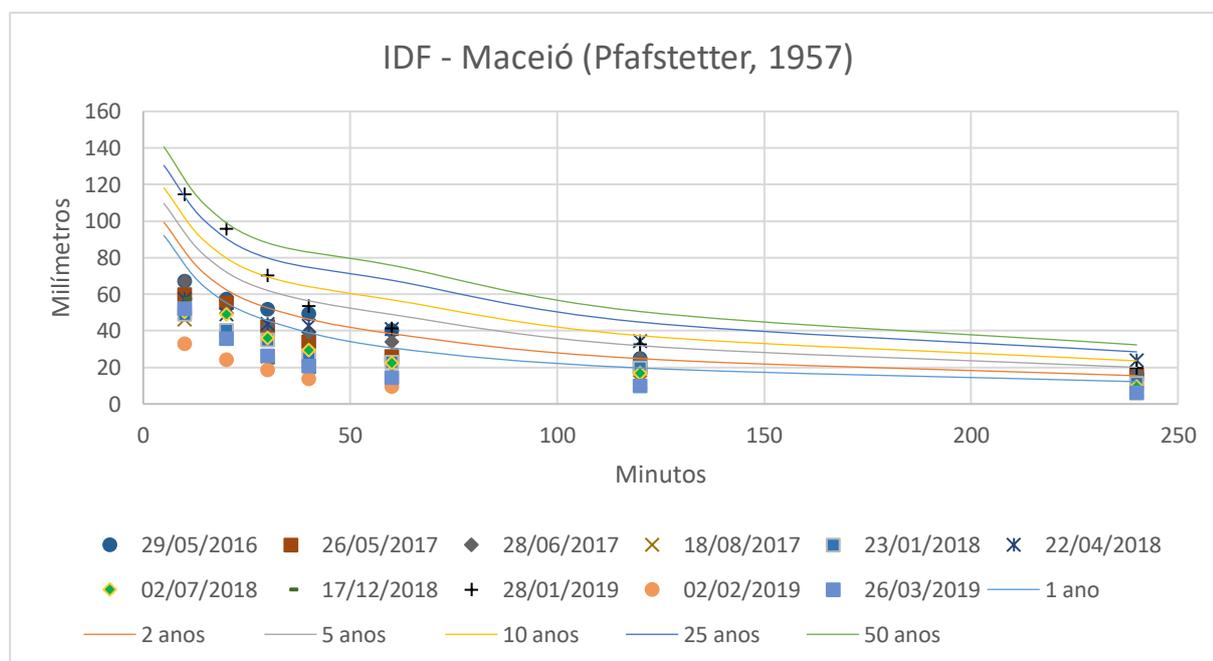


Figura 18 – Tempo de retorno dos eventos

Fonte: Autor

As características dos eventos escolhidos estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Característica dos eventos

Evento	Duração (min)	Precipitação total (mm)	Intensidade média (mm/h)	Tempo de retorno (anos)*	Ocorrência de alagamentos	Dados de Radar
29/05/2016	920	53.92	3.52	2,4	Sim	Não
26/05/2017	1200	169.17	8.46	2,2	Sim	Não
28/06/2017	590	66.55	6.77	2,5	Sim	Não
18/08/2017	440	31.41	4.28	<1	Sim	Não
23/01/2018	270	16.72	3.72	<1	Sim	Não
22/04/2018	690	129.53	11.26	11	Sim	Não
02/07/2018	190	25.29	7.99	<1	Sim	Não
17/12/2018	50	6.18	7.42	<1	Não	Sim
28/01/2019	500	84.07	10.09	5	Sim	Não
02/02/2019	80	5.56	4.17	<1	Não	Sim
26/03/2019	230	18.77	4.90	<1	Não	Sim

* Tempo de retorno referente ao tempo de concentração da bacia

Avaliando o tempo de retorno dos eventos, nota-se como a cidade de Maceió está suscetível a alagamentos (eventos com tempo de retorno abaixo de 1 ano que causaram alagamentos).

4.3.3.2 Thiessen

Para aplicar o método de Thiessen, é necessário primeiramente coletar as leituras efetuadas pelas estações pluviométricas ou pelo radar meteorológico. Para o evento ocorrido no dia 29/05/2016, as leituras dos postos estão presentes nas Figura 19 e Figura 20.

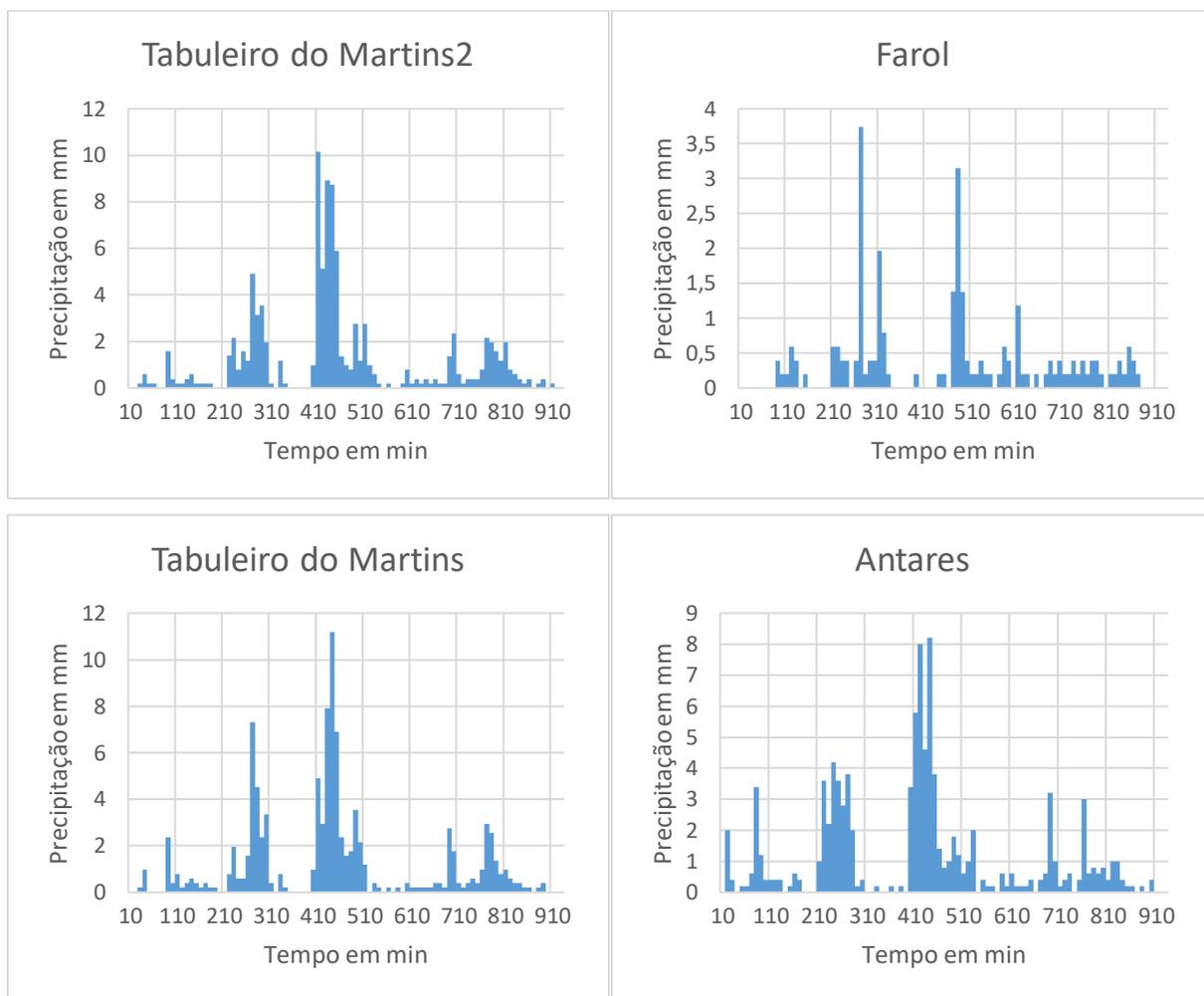


Figura 19 - Leituras dos postos para o evento 29/05/2016

Fonte: Autor

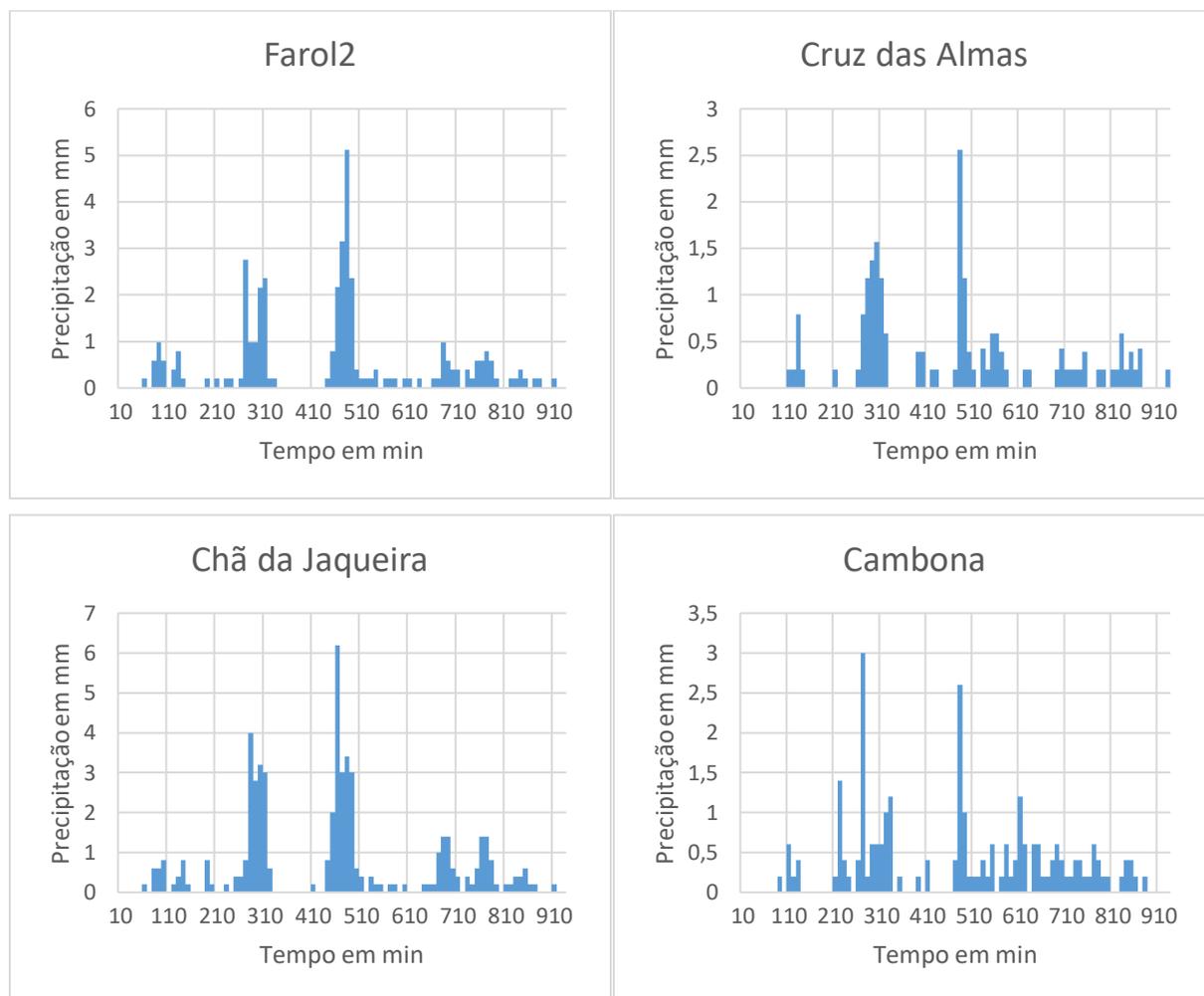


Figura 20 - Leituras dos postos para o evento 29/05/2016

Fonte: Autor

O método foi realizado através do *software* ArcGis que possibilita além da criação dos polígonos, a determinação da área de influência de cada posto, a Figura 21 apresenta o resultado para o evento do dia 29/05/2016 para ambos os cenários.

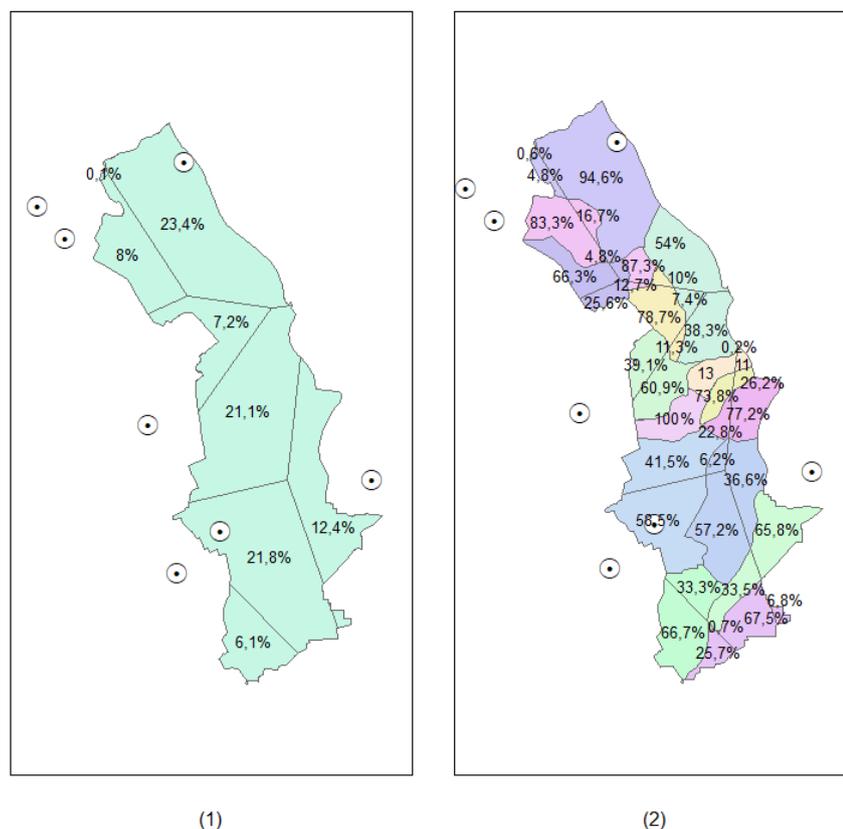


Figura 21 – Polígono de Thiessen (29/05/2016) – Cenários concentrado (1) e distribuído (2)

Fonte: Autor

A Tabela 8 apresenta os valores em porcentagem das áreas de influência para o evento ocorrido no dia 29/05/2016.

Tabela 8 – Áreas de influência em % para o evento 29/05/2016

Bacia	Tabuleiro do Martins2	Farol	Tabuleiro do Martins	Farol2	Cruz das Almas	Antares	Chã da Jaqueira	Cambona
Conc.	0.10	21.80	8.00	21.10	12.40	23.40	7.20	6.10
S1		67.45			6.80			25.75
S2		33.52			65.80			0.68
S3		33.26						66.74
S4		57.20		6.22	36.57			
S5		58.49		41.51				
S6				22.78	77.22			
S7				100				
S8				73.83	26.17			
S9				60.92			39.08	
S10				83.05	16.95			
S11				11.32		9.97	78.71	
S12				38.33	0.18	54.05	7.44	

Bacia	Tabuleiro do Martins2	Farol	Tabuleiro do Martins	Farol2	Cruz das Almas	Antares	Chã da Jaqueira	Cambona
S13			66.26			8.16	25.58	
S14						87.26	12.74	
S15			83.34			16.66		
S16	0.57		4.84			94.59		

A determinação dos hietogramas, para cada evento, inicia-se com as leituras dos postos (Figura 19 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 20) e posteriormente é aplicada a equação 4. As Figura 22 a Figura 25 apresentam os hietogramas utilizados para o evento ocorrido no dia 29/05/2016 tanto para o modelo concentrado quanto para o modelo distribuído.

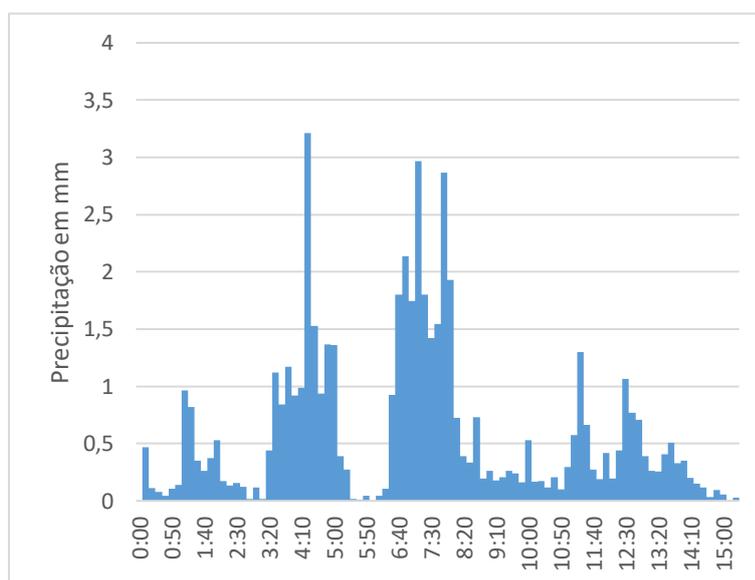


Figura 22 – Hietograma para o cenário concentrado

Fonte: Autor

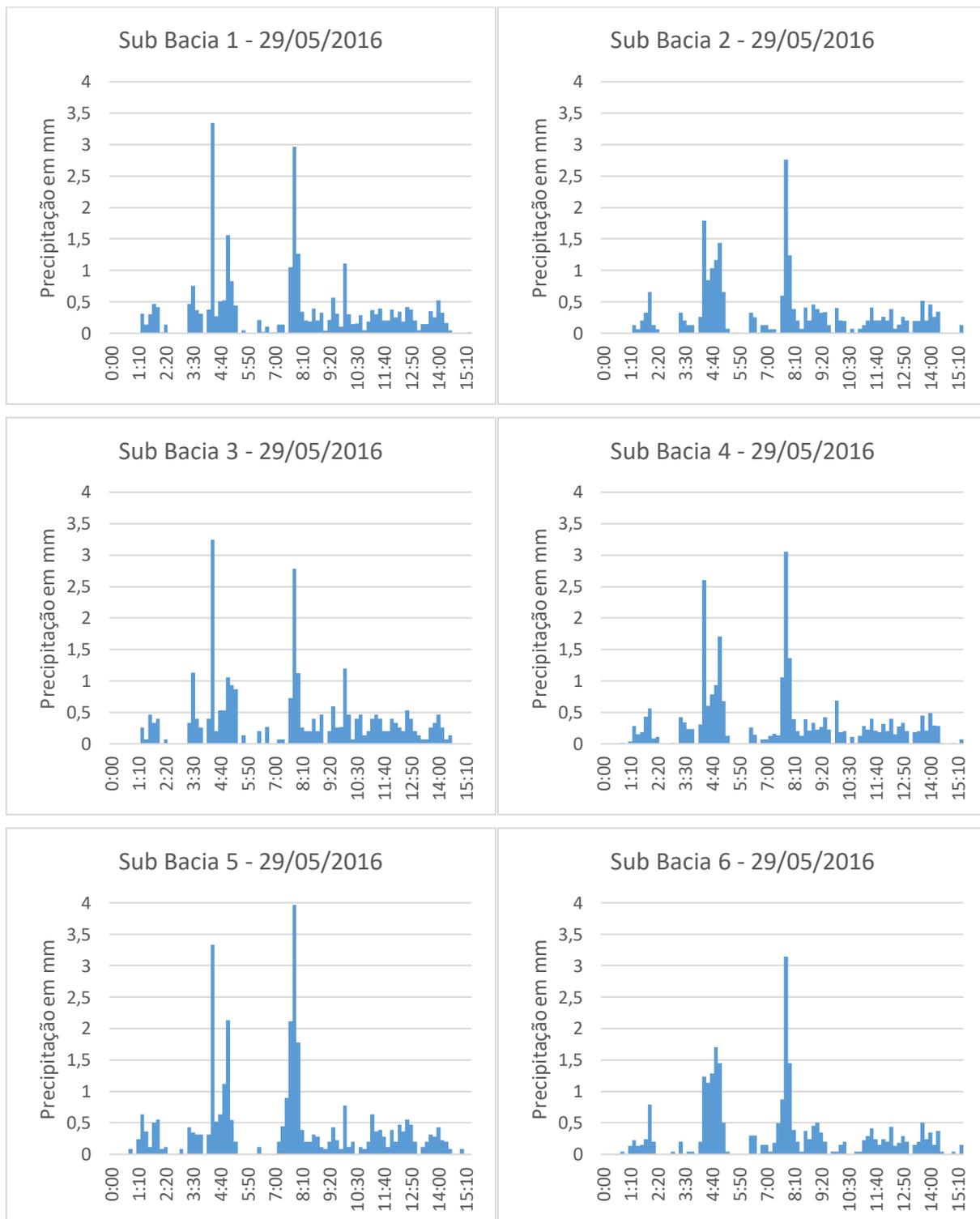


Figura 23 – Hietogramas para o cenário distribuído

Fonte: Autor

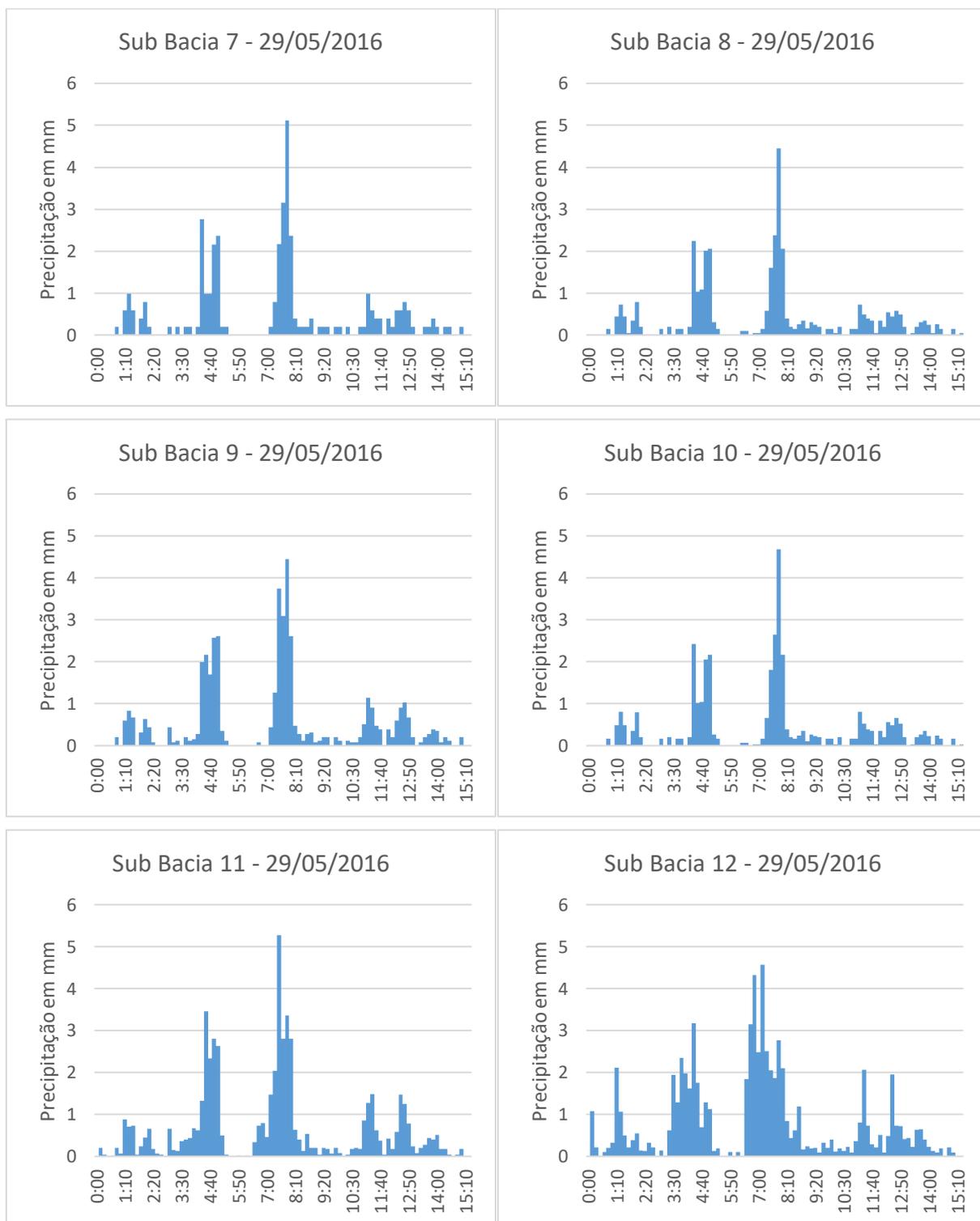


Figura 24 – Hietogramas para o cenário distribuído

Fonte: Autor

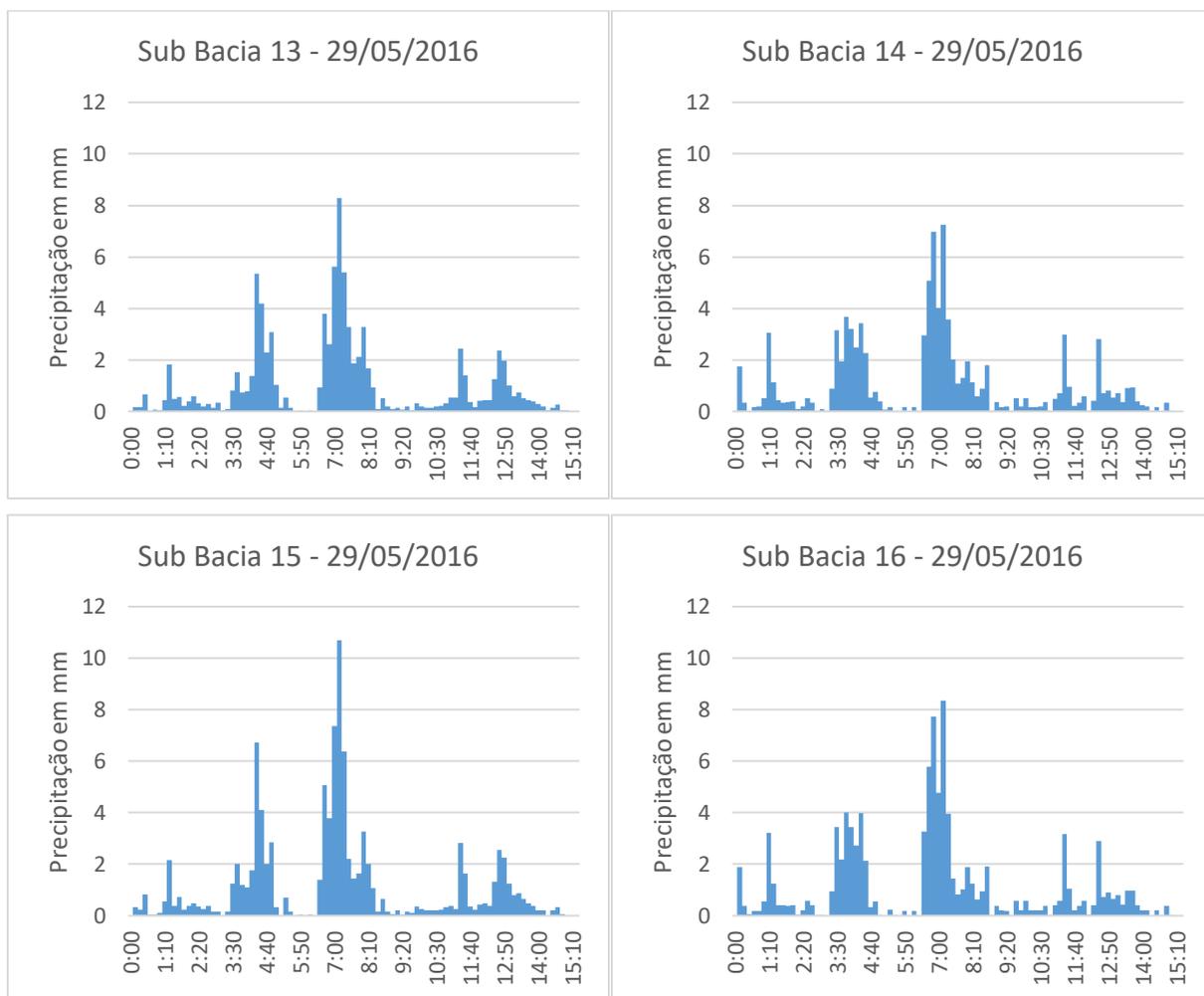


Figura 25 – Hietogramas para o cenário distribuído

Fonte: Autor

Para os demais eventos foram criados os respectivos hietogramas de forma análoga.

5 RESULTADOS

5.1 Parametrização do Modelo

A parametrização foi realizada para ajustar o tempo e a vazão de pico através da largura característica e do coeficiente de Manning. O resultado da parametrização está presente na Figura 26.

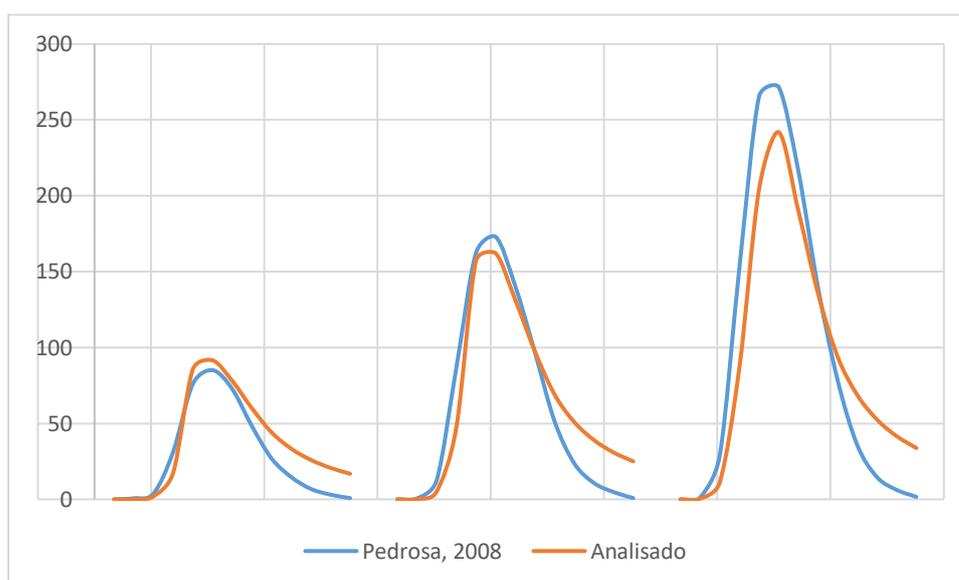


Figura 26 – Parametrização do modelo

Fonte: Autor

Tabela 9 –Vazões de pico

Tempo de retorno	Vazão de pico (m ³ /s)		Diferença
	Pedrosa (2008)	Calculado	
2 Anos	85,02	94,345	-10%
10 Anos	177,87	172,294	+3%
50 Anos	276,92	262,069	+6%

Os resultados da calibração tentam reduzir as diferenças entre os hidrogramas de forma que o somatório dos erros seja mais próximo de zero. Mesmo apresentando diferenças relativamente altas, pode-se justificar pela diferença entre os modelos utilizados (Pedrosa, 2008, utilizou o método SCS), que segundo Souza (2017) a representação de um mesmo evento em modelos hidrológicos diferentes pode apresentar variações de até 100%.

Os valores dos coeficientes de Manning e das larguras características parametrizadas estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores calibrados da largura e coeficiente de Manning

Sub-Bacia	Largura (m)	N-imp	N-perm
1	607,1	0,019	0,132
2	884,3	0,019	0,124
3	623,5	0,019	0,139
4	923,8	0,019	0,117
5	2057,9	0,018	0,072
6	1569,3	0,017	0,09
7	694,0	0,018	0,128
8	644,8	0,017	0,158
9	1390,7	0,018	0,094
10	292,2	0,017	0,181
11	319,7	0,018	0,164
12	754,7	0,017	0,09
13	296,6	0,017	0,155
14	431,3	0,017	0,161
15	351,5	0,018	0,156
16	568,9	0,017	0,134

5.2 Modelagem

A modelagem se deu a partir da aplicação do modelo SWMM para todos os eventos e para uma melhor análise dos hidrogramas foram plotadas as isoietas dos mesmos através da ferramenta de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*) presente no software ArcGis. Para a análise foram utilizados os eventos que ocorreram nos dias 29/05/2016, 23/01/2018, 22/04/2018 e 02/07/2018.

5.2.1 Evento analisado 1 - 29/05/2016

O evento ocorrido no dia 29/05/2016 teve duração de cerca de 920 minutos, a precipitação acumulada média igual à 53,9 mm e a intensidade média igual 3,5 mm/h.

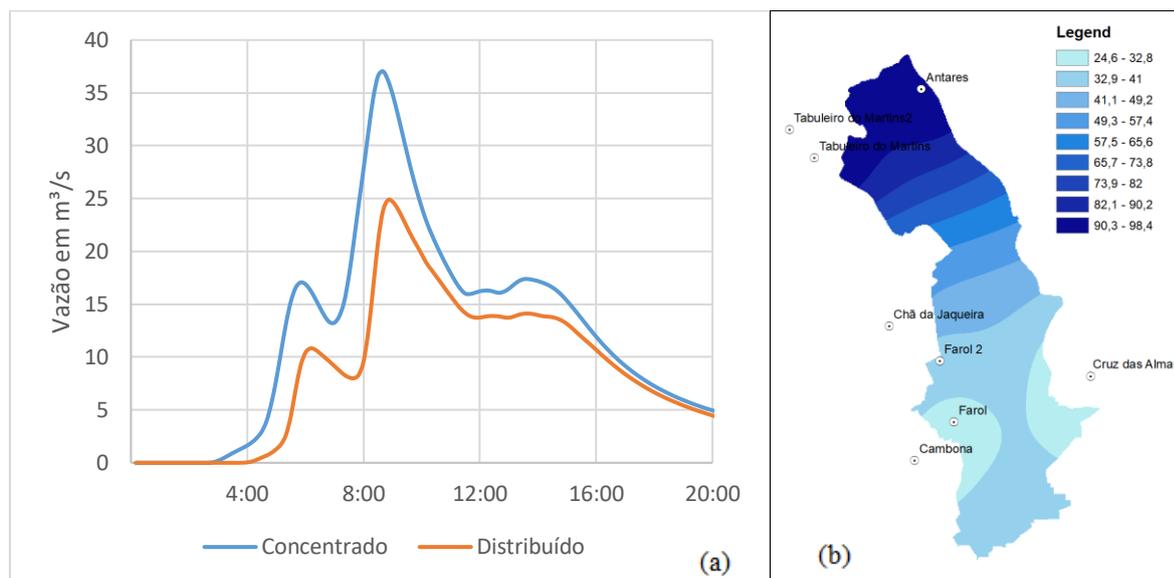


Figura 27 – a) Hidrogramas dia 29/05/2016 e b) Isoietas - legenda em mm

Fonte: Autor

A Figura 27-a apresenta valores significativamente maiores para a vazão de pico e para o volume escoado para o cenário concentrado que é justificado pelas isoietas presentes na Figura 27-b, as quais mostram que o maior volume precipitado está localizado na parte alta da bacia, região com características mais permeáveis, fazendo com que o volume, que seria escoado no modelo concentrado, infiltre no cenário distribuído.

5.2.2 Evento analisado 2 – 23/01/2018

O evento ocorrido no dia 23/01/2018 teve duração de cerca de 270 minutos, a precipitação acumulada média igual à 16,7 mm e a intensidade média igual 3,7 mm/h.

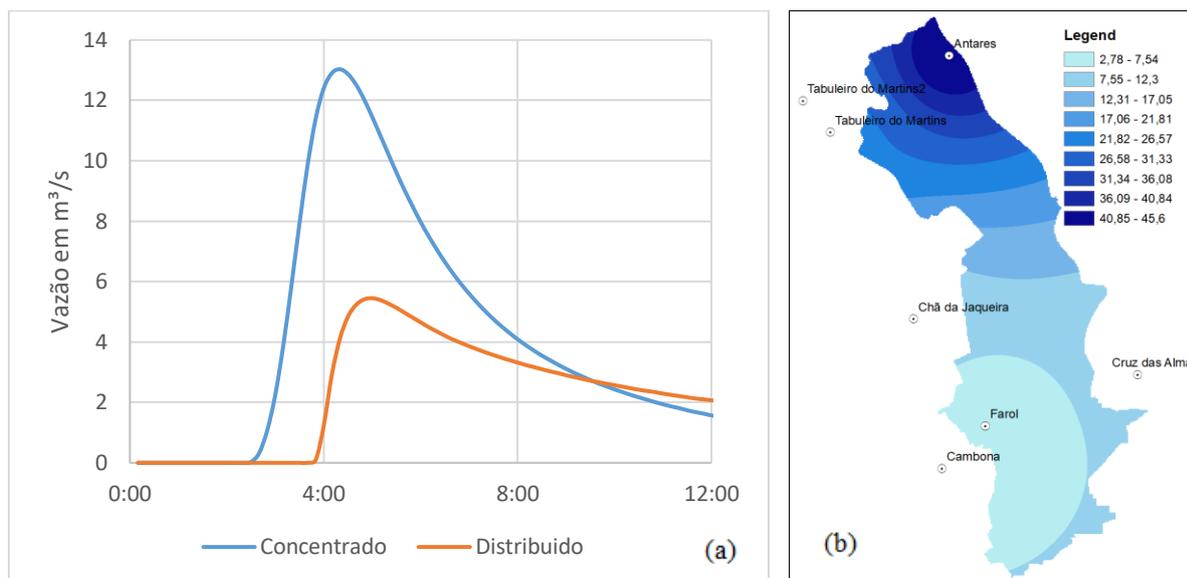


Figura 28 – a) Hidrogramas dia 23/01/2018 e b) Isoietas

Fonte: Autor

Semelhante ao evento ocorrido no dia 29/05/2016, o evento ocorrido no dia 23/01/2018 gerou um hidrograma com valores maiores para a vazão de pico e para o volume escoado no cenário concentrado, neste evento nota-se claramente um retardo do início do hidrograma, causado pelo baixo volume precipitado na parte baixa da bacia, causando também um aumento da vazão na recessão do hidrograma.

5.2.3 Evento analisado 3 – 22/04/2018

O evento ocorrido no dia 22/04/2018 teve duração de cerca de 690 minutos, a precipitação acumulada média igual à 129,5 mm e a intensidade média igual 11,3 mm/h.

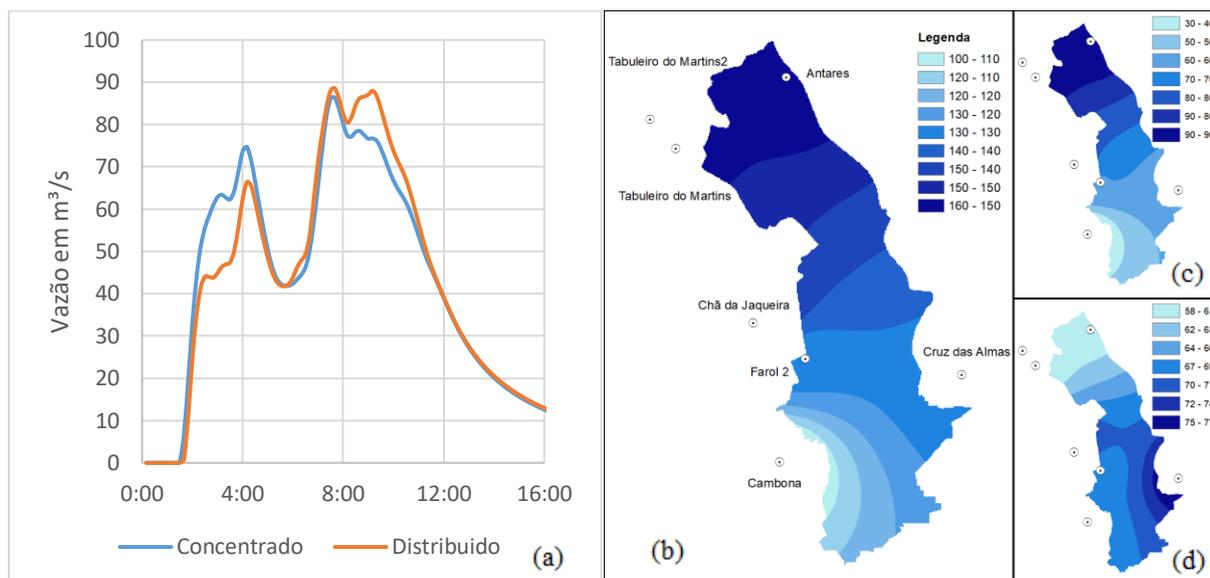


Figura 29 – a) Hidrogramas dia 22/04/2018; Isoietas: b) Evento completo, c) Primeiras 6h e d) Remanescente

Fonte: Autor

O evento ocorrido no dia 22/04/2018 apresentou dois comportamentos, o primeiro ocorreu desde do início do evento até as 6h onde o maior volume precipitado caiu sobre a região alta da bacia (Figura 29-c). O segundo ocorreu a partir das 6h e apresenta o comportamento oposto ao primeiro, onde o maior volume precipitado caiu sobre a região baixa da bacia (Figura 29-d, região mais impermeabilizada), ocasionando a inversão dos hidrogramas.

5.2.4 Evento analisado 4 – 02/07/2018

O evento ocorrido no dia 02/07/2018 teve duração de cerca de 190 minutos, a precipitação acumulada média igual à 25,3 mm e a intensidade média igual 8,0 mm/h.

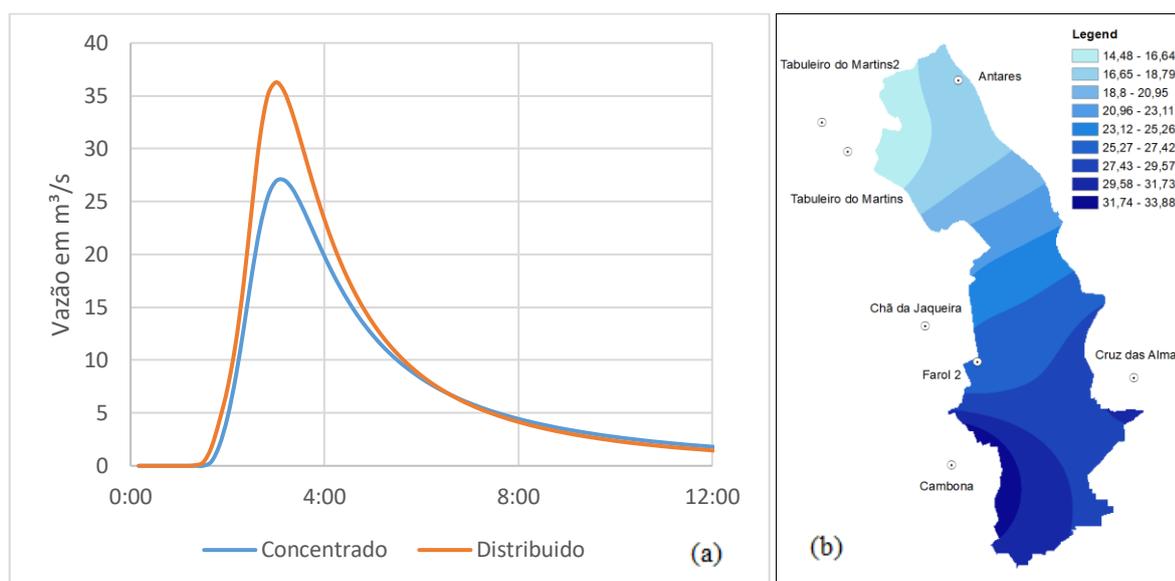


Figura 30 – a) Hidrogramas dia 02/07/2018 e b) Isoietas – legenda em mm

Fonte: Autor

O último evento analisado ocorreu no dia 02/07/2018 e gerou um hidrograma com valores para a vazão de pico e volume escoado maiores para o cenário distribuído, esse fato se justifica através da Figura 30-b onde apresenta um maior volume precipitado sobre a região baixa da bacia.

Avaliando os hidrogramas, são visíveis as variações entre as vazões de pico e o volume escoado. Para avaliar os hidrogramas foram utilizados os seguintes parâmetros: Tempo e vazão de pico, volume escoado e infiltrado, os valores estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de avaliação

Evento	Vazão de pico (m^3/s)		Tempo de pico (min)		Volume escoado (10^3 m^3)		Volume infiltrado (10^3 m^3)	
	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.
29/05/2016	37.09	24.89	517	533	933.857	683.451	492.65	743.06
26/05/2017	100.30	94.05	797	806	3538.447	3416.062	937.11	1,059.50
28/06/2017	64.33	68.20	500	501	1235.109	1217.396	525.54	543.25
18/08/2017	22.95	22.40	410	420	484.562	441.071	346.42	389.91
23/01/2018	13.03	5.45	258	298	215.888	151.955	226.46	290.39
22/04/2018	86.75	88.82	455	456	2744.595	2728.435	682.25	698.41
02/07/2018	27.13	36.28	186	180	363.256	406.245	305.82	262.83
17/12/2018	2.60	1.30	160	184	55.918	34.82	107.58	128.68
28/01/2019	93.74	103.97	401	399	1644.152	1705.81	580.00	518.35
02/02/2019	1.97	2.69	171	148	40.949	55.37	106.15	91.73
26/03/2019	15.33	14.76	195	182	247.687	241.601	248.89	254.98

Para analisar os resultados dos cenários concentrado e distribuído foram plotados os gráficos comparando os parâmetros de todos os eventos (Figura 31).

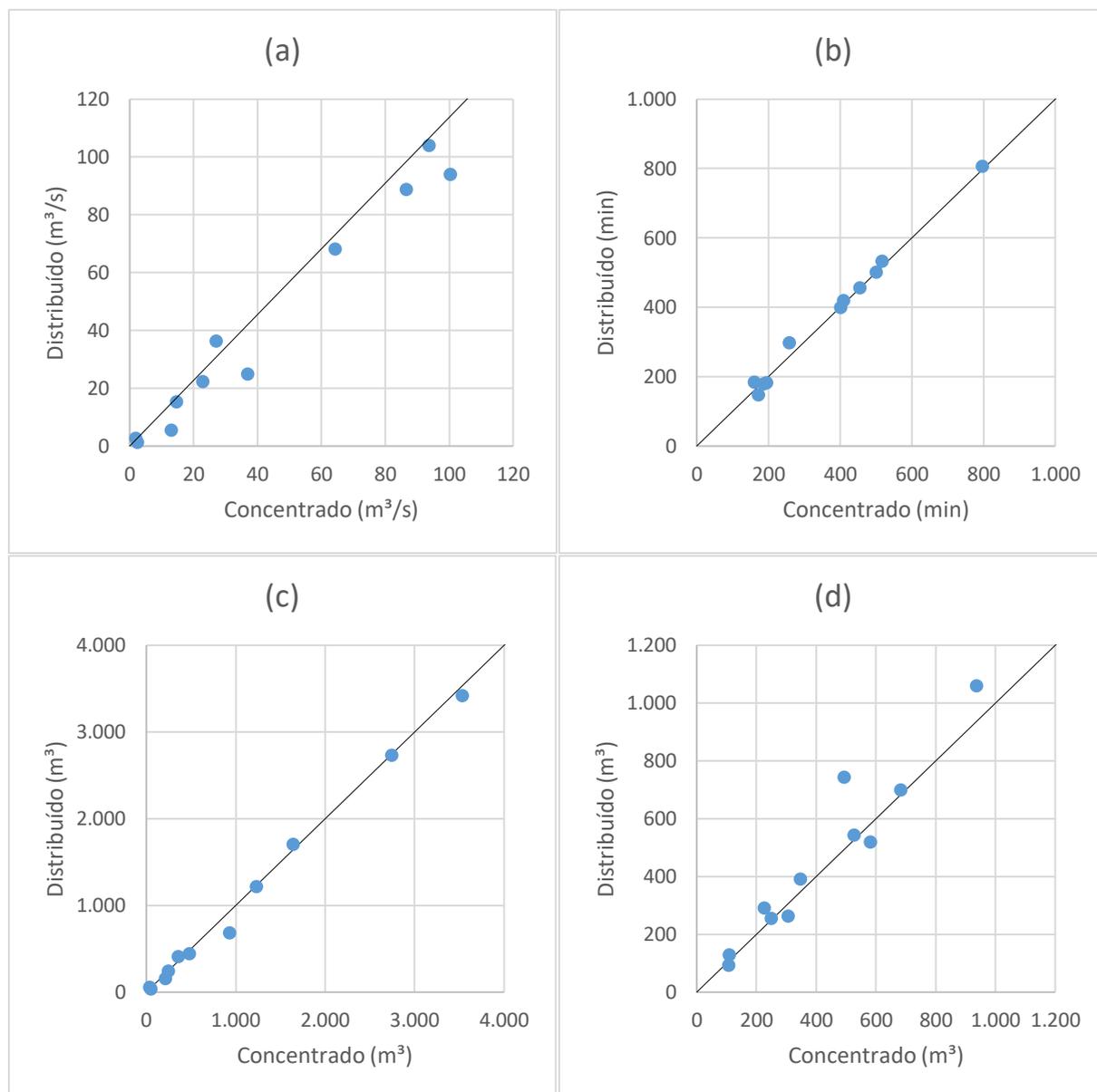


Figura 31 – Comparação entre os parâmetros: a) Vazão de pico, b) Tempo de pico, c) Volume escoado e d) Volume infiltrado

Fonte: Autor

Todos os parâmetros analisados apresentam variações quanto a discretização da chuva, mas todos apresentam boa aderência, exceto o evento ocorrido no dia 29/05/2016 que apresentou um volume precipitado muito maior na parte alta da bacia (Figura 27).

5.3 Simulações com Dados de Radar

Para os dados do radar, foram simulados ambos os cenários utilizando os dados dos pluviômetros, os dados brutos do radar, os dados do radar calibrados pelo coeficiente determinado por Cabral et al (2017) e pelo método de ANOBES.

5.3.1 Evento 1 – 02/02/2019

O evento ocorrido no dia 02/02/2019 teve duração de cerca de 80 minutos, a precipitação acumulada média igual à 5,6 mm e a intensidade média igual 4,2 mm/h. Os hidrogramas resultantes estão na Figura 32.

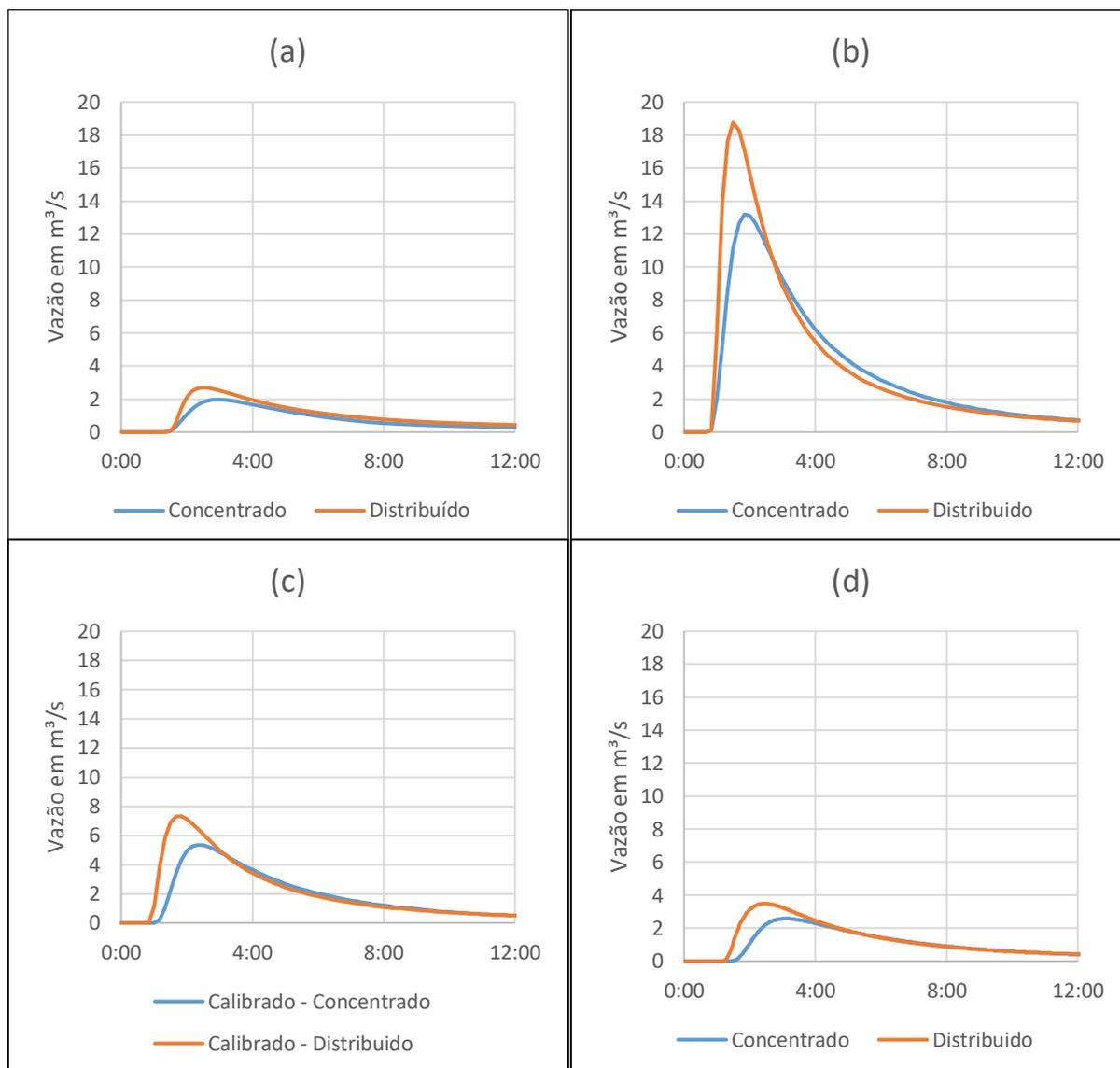


Figura 32 – Hidrogramas dia 02/02/2019: a) Pluviômetros, b) Dados brutos, c) Calibrados por Cabral et al (2017 e d) Calibrados por ANOBES

Fonte: Autor

Semelhante aos resultados obtidos com dados de pluviômetros, os hidrogramas apresentam variações nítidas quanto a vazão de pico. A Figura 33 apresenta os hidrogramas, por cenário, gerados para todos os resultados obtidos com os dados do radar.

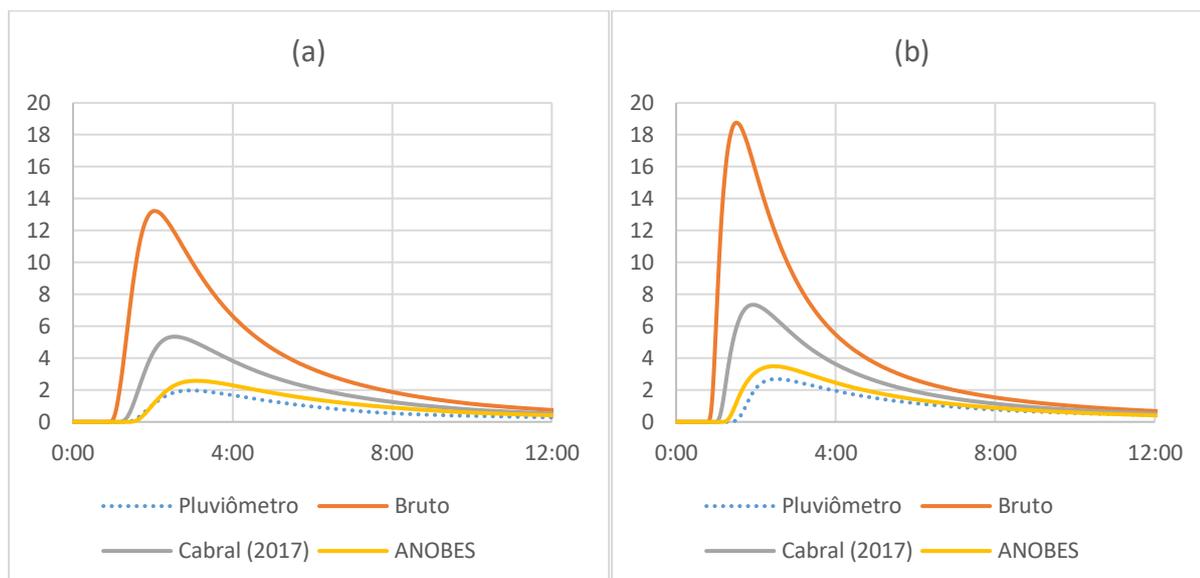


Figura 33 – Hidrogramas dia 02/02/2019: a) Concentrado e b) Distribuído

Fonte: Autor

Analisando a Figura 33, constata-se que os dados brutos necessitam de calibração e as calibrações utilizadas se aproximam do hidrograma obtido pelos dados dos pluviômetros. A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros de avaliação para as simulações com os dados de radar e das estações pluviométricas.

Tabela 12 – Parâmetros de avaliação

Evento	Vazão de pico (m^3/s)		Volume escoado (10^3 m^3)		Tempo de pico (min)		Volume infiltrado (10^3 m^3)	
	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.
Pluviômetros	1.97	2.69	40.949	55.37	171	148	1,385.56	1,371.14
Dados Brutos	13.23	18.76	181.873	201.52	110	90	4,293.69	4,274.04
Cabral et al (2017)	5.35	7.34	93.482	110.259	152	115	1,667.16	1,650.39
ANOBES	2.576	3.489	56.295	67.819	185	147	774.69	763.16

5.3.2 Evento 2 – 26/03/2019

O evento ocorrido no dia 26/03/2019 teve duração de cerca de 230 minutos, a precipitação acumulada média igual à 18,77 mm e a intensidade média igual 4,9 mm/h. Os hidrogramas resultantes estão na Figura 34.

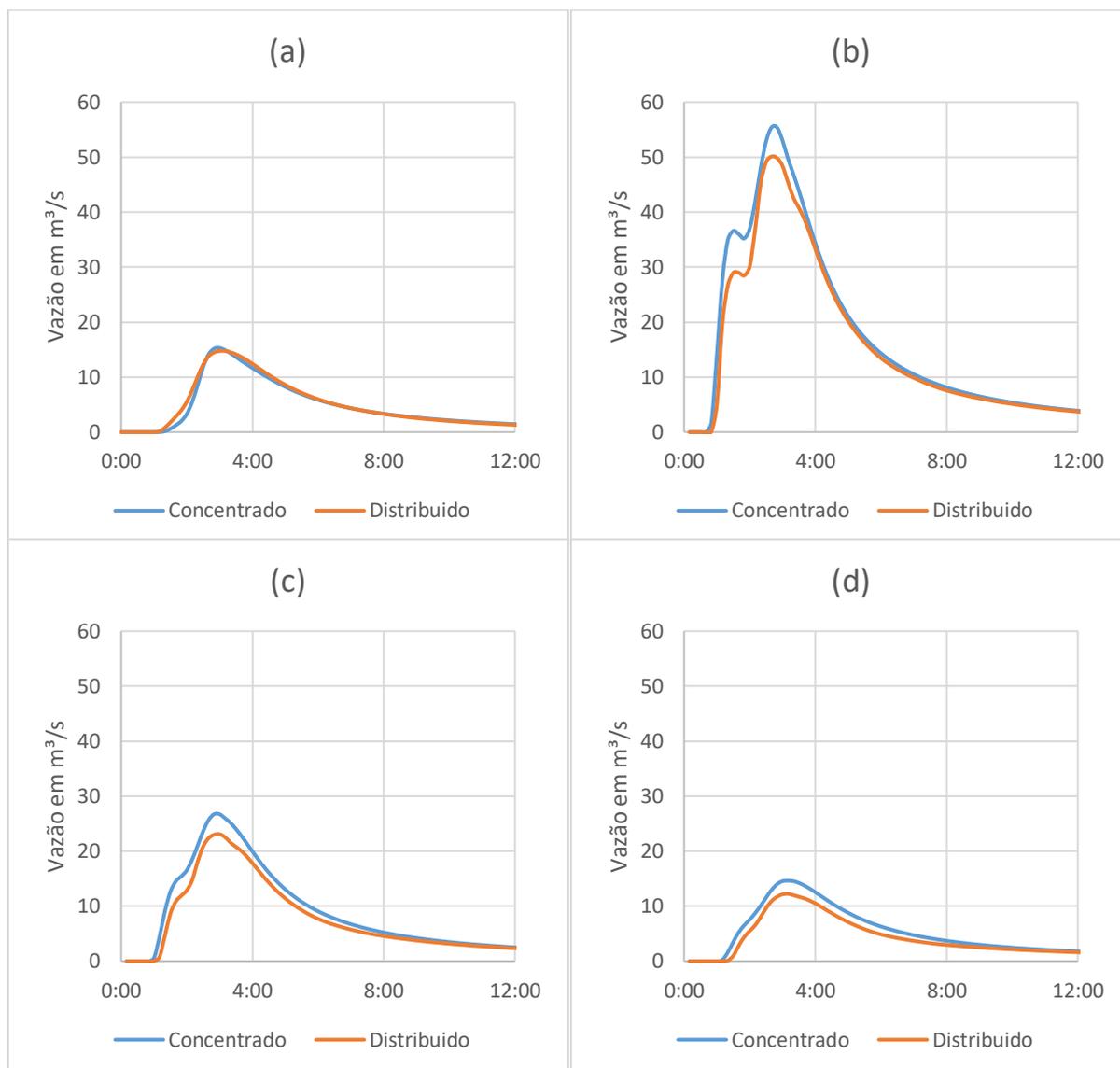


Figura 34 – Hidrogramas dia 26/03/2019: a) Pluviômetros, b) Dados brutos, c) Calibrados por Cabral et al (2017) e d) Calibrados por ANOBES

Fonte: Autor

Neste evento, os hidrogramas gerados pelos dados de radar apresentam formatos diferentes aos gerados pelos dados das estações pluviométricas. Para entender esse efeito foi plotado os hietogramas para entender esse efeito (Figura 35).

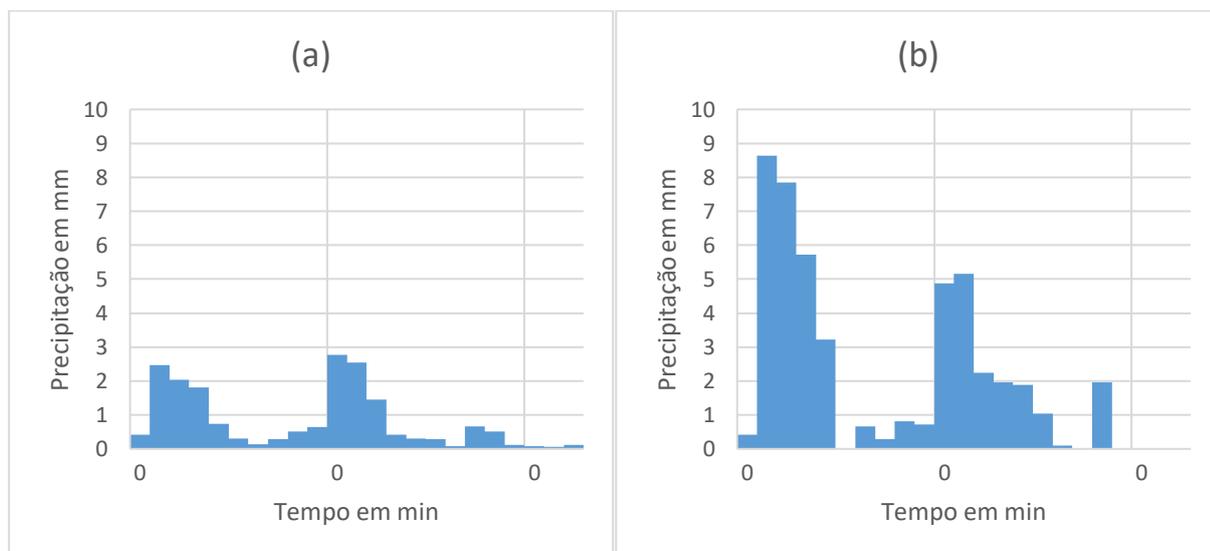


Figura 35 – Hietogramas: a) Pluviômetros e b) Dados brutos

Fonte: Autor

Os hietogramas apresentam as mesmas tendências e a divergência entre os hidrogramas são justificadas pela magnitude das leituras do radar, que ao aplicar os métodos de calibração a intensidade da chuva reduz e a forma tende a se aproximar dos hidrogramas gerados pelos dados das estações pluviométricas.

Semelhante aos resultados obtidos com dados de pluviômetros, os três conjuntos de dados avaliados provenientes do radar, todos apresentam variações visíveis quanto à vazão de pico e ao volume escoado. A Figura 36 apresenta os hidrogramas, por cenário, gerados para todos os resultados obtidos com os dados do radar comparando os cenários analisados.

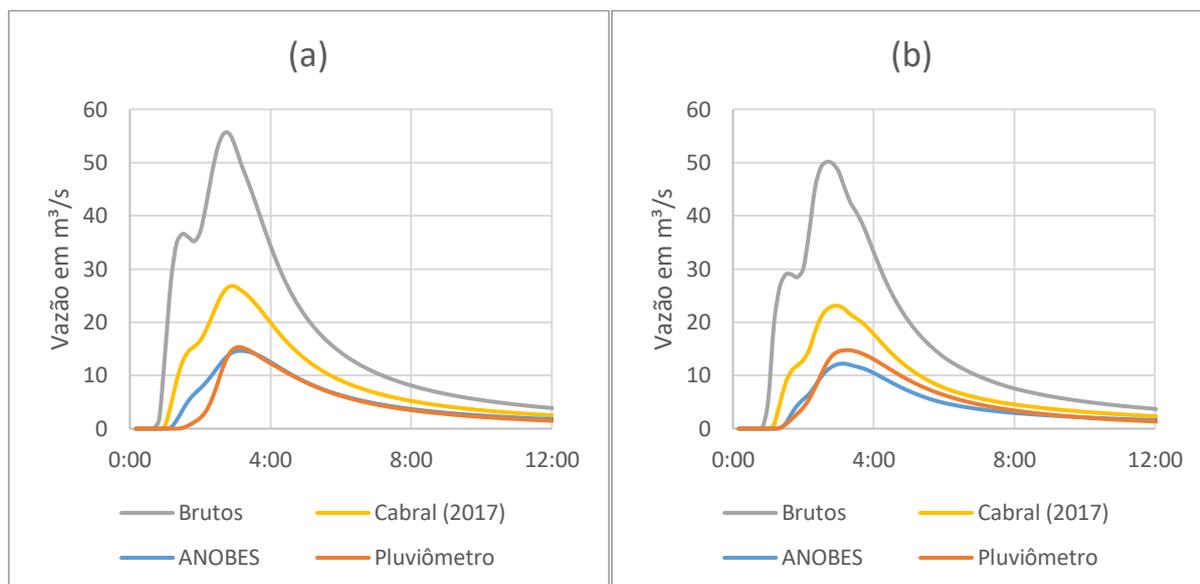


Figura 36 – Hidrogramas resultantes dia 26/03/2019: a) Concentrado e b) Distribuído

Analisando a Figura 36, constata-se, mais uma vez, que os dados brutos necessitam de calibração e as calibrações utilizadas se aproximam do hidrograma obtido pelos dados dos pluviômetros. A Tabela 13 apresenta os resultados dos parâmetros de avaliação obtidos nas simulações para o evento do dia 26/03/2019.

Tabela 13 – Parâmetros de avaliação

Evento 26/03/2019	Vazão de pico (m ³ /s)		Volume escoado (10 ³ m ³)		Tempo de pico (min)		Volume infiltrado (10 ³ m ³)	
	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.	Conc.	Dist.
Pluviômetros	15.33	14.76	247.69	241.60	195	182	248.89	254.98
Dados Brutos	55.78	50.13	863.71	785.29	164	161	394.54	472.96
Cabral et al (2017)	26.85	23.12	462.12	398.96	176	174	292.67	355.83
ANOBS	14.62	12.24	280.61	229.99	188	187	222.59	273.20

6 CONCLUSÕES

Este estudo empregou dois cenários para análise de hidrogramas baseados em diferentes distribuições de precipitação, gerados a partir de um modelo hidrológico chuva-vazão aplicado a bacia do Riacho Reginaldo, a qual está totalmente inserida na zona urbana do município de Maceió – AL. As simulações foram realizadas através de dados do radar meteorológico, da rede pluviométrica e de parâmetros definidos na literatura. Dessa forma, as principais conclusões estão listadas a seguir:

- Os resultados observados pelo radar indicam uma necessidade de calibração dos dados brutos;
- As calibrações utilizadas apresentam uma convergência dos resultados das simulações com dados do radar para as simulações com os dados das estações pluviométricas;
- Os hidrogramas com base nos dados do radar apresentam as mesmas tendências dos hidrogramas gerados a partir dos dados das estações pluviométricas;
- A calibração automática do *software* SWMM apresentou bons resultados considerando estudos presentes na literatura;
- Os hidrogramas, entre os cenários avaliados, apresentam variações em todos os parâmetros avaliados, mas todos apresentaram boa aderência exceto o evento ocorrido no dia 29/05/2016;
- As principais divergências entre os hidrogramas dos modelos concentrado e distribuído são:
 - A ocorrência de núcleos chuvosos distantes do exutório atrasam o hidrograma, pelo tempo de concentração da sub bacia acrescido, principalmente, do tempo de fluxo do escoamento nos canais;
 - Regiões com diferentes níveis de impermeabilização produzindo um maior escoamento superficial ou um maior volume infiltrado;
- Cada evento deve ser estudado individualmente, pois, baseado nos resultados obtidos, os eventos quando tratados como modelos concentrados podem ser subestimados (22/04/2018) ou superestimados (26/05/2017) quanto a vazão de

pico e podem apresentar adiantamento (23/01/2018) ou atraso (02/02/2019) no tempo de pico;

- Avaliando o tempo de retorno dos eventos selecionados, nota-se a vulnerabilidade da cidade a alagamentos quanto a eventos com tempo de retorno menores que 1 ano.

Recomendações para futuros estudos:

- Avaliar o comportamento de bacias urbanas para eventos distribuídos e concentrados e estabelecer uma correlação entre vazões simuladas e mensuradas em campo;
- Avaliar diferentes níveis de distribuição espacial e temporal para eventos em bacias urbanas;
- Avaliar os efeitos dos modelos hidrodinâmicos com dados reais em conjunto com a distribuição espacial e temporal da chuva;
- Calibrar o radar meteorológico pelo método de ANOBES através de uma série temporal extensa.

7 REFERÊNCIAS

ALAGOAS. 2005. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento. Plano Diretor da Região Hidrográfica do Pratagy. 2005

Alagoas 24h. Confira galeria de fotos dos pontos de alagamentos em Maceió. **Alagoas 24h**. Maceió – AL, 24 de maio de 2017. Disponível em <http://www.alagoas24horas.com.br/1062768/confira-galeria-de-fotos-dos-pontos-de-alagamentos-em-maceio/> acessado em 18 de dezembro de 2018.

Alagoas 24h. Confira galeria de fotos dos pontos de alagamentos em Maceió. **Alagoas 24h**. Maceió – AL, 22 de abril de 2018. Disponível em <http://www.alagoas24horas.com.br/1147567/confira-galeria-de-fotos-e-videos-dos-pontos-de-alagamento-em-maceio/> acessado em 18 de dezembro de 2018.

Almeida, L., Serra, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **FAE**. V. 20, N. 1, p. 129-137. Junho de 2017. Disponível em <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113> acesso em 15 de janeiro de 2019.

Barco, J., Wong, K. M., Stenstrom, M. K. Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**. V. 134, N. 4, p. 466-474, April 2008. DOI: 10.1061.

Bom Dia Alagoas. Chuva deixa ruas de Maceió Alagadas. **GazetaWeb**. Maceió – AL, 30 de maio de 2016. Disponível em <https://globoplay.globo.com/v/5057522/> acessado em 18 de dezembro de 2018.

Brown, R.R., Keath, N., Wong, T.H.F. 2009. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. **Water Science and Technology**. V. 59, p. 847-855. doi: 10.2166/wst.2009.029

Cabral, S. L., Sakuragi, J., Angelis, C. F., Silveira, C. S. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetro na bacia hidrográfica do rio São Miguel. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Anais. Brasília – DF. Novembro 2015.

Cabral, S. L., Sakuragi, J., Angelis, C. F., Silveira, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Ambiente e Água**. Taubaté - SP. V. 12, n. 1. Janeiro/Feveiro 2017.

Calvetti, L., Beneti, C., Pereira Filho, A. J. Integração do radar meteorológico doppler do SIMEPAR e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação. **Anais XI SBSR**. Belo Horizonte – MG. P. 1137-1144. Abril 2003.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988). **Applied Hydrology**. Ed. McGraw-Hill. Series in Water Resources Environmental Engineering. ISBN 0-07-010810-2.

Collodel, M. G. **Aplicação do modelo SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalham da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009, Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2009.

Denardin, J.L., Freitas, P.L. Características Fundamentais da Chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília – DF. V.17, n.10, p.1409-1416, 1982.

ESRI 2018. ArcGIS Desktop: Release 10.5. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. 2018.

G1 AL. Chuva forte deixa ruas e avenidas de Maceió alagadas. **G1 Alagoas**. Maceió – AL, 30 de junho de 2017. Disponível em <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuva-forte-provoca-alagamentos-em-diversos-bairros-de-maceio.ghtml> acessado em 18 de dezembro de 2018.

G1 AL. Chuva forte provoca alagamentos em diversos bairros de Maceió. **G1 Alagoas**. Maceió – AL, 23 de janeiro de 2018. Disponível em <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuva-forte-provoca-alagamentos-em-diversos-bairros-de-maceio.ghtml> acessado em 18 de dezembro de 2018.

G1 AL. Choveu em abril 30% do esperado para quatro meses em Maceió, diz Defesa Civil. **G1 Alagoas**. Maceió – AL, 23 de abril de 2018. Disponível em <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/choveu-em-abril-30-do-esperado-para-quatro-meses-em-maceio-diz-defesa-civil.ghtml> acessado em 18 de dezembro de 2018.

G1 AL. Chuva provoca alagamentos em vários pontos em Maceió. **G1 Alagoas**. Maceió – AL, 02 de julho de 2018. Disponível em <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuva-provoca-alagamentos-em-varios-pontos-em-maceio.ghtml> acessado em 18 de dezembro de 2018.

G1 AL. Chuva forte provoca alagamentos e queda de energia em bairros de Maceió. **G1 Alagoas**. Maceió – AL, 28 de janeiro de 2019. Disponível em <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2019/01/28/chuva-forte-provoca-alagamentos-e-queda-de-energia-em-bairros-de-maceio.ghtml> acessado em 31 de janeiro de 2019.

GARCIA, J. I. B. 2005. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS.

Hass Miguel, B. **Uso de dados de radar meteorológico em modelo hidrológico SCS-CN para estimativa de escoamento superficial**. 2018. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 2018.

Holz, J. **Levantamento e mapeamento do índice de risco de alagamento DA bacia do Riacho Reginaldo**. 2010, Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censos demográficos 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em 13 de dezembro de 2018.

Kessinger, C. Selected Topics in Radar Meteorology and Theory. **National Center of Atmospheric Research**. Boulder, Colorado. February 2009.

Lee, J., Kim, S., Jun, H. A Study of the Influence of the Spatial Distribution of Rain Gauge Networks on Areal Average Rainfall Calculation. **Water**. V. 10, N. 11. 2018. <https://doi.org/10.3390/w10111635>.

Li, C., Liu, M., Hu, Y., Shi, T., Qu, X., Walter, M. T. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. **Science of The Total Environment**. V. 643, p. 301-311, December 2018. ISSN: 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.211>.

Lima, G., Boldrin, R. S., Mendiondo, E. M., Mauad, F. F., Ohnuma Junior, A. A. Análise de Incertezas de Observações Hidrológicas e sua Influência na Modelagem de Pequenas Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 12, n. 1, p. 107-116. Janeiro/março de 2007.

MACEIÓ. 2005. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento. Plano Diretor do Município de Maceió, Maceió. 2005.

MACEIÓ. 2006. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento. Código de Urbanismo e edificações. Maceió. 2006

Manual do Usuário U.S. E.P.A. SWMM. United States Environmental Protection Agency. V. 5.1.012. Março 2017.

Manual do Usuário U.S. E.P.A. SWMM. United States Environmental Protection Agency. V. 5.0.022. Abril 2011.

Mapa Interativo. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>.

Marshall, J. S; Palmer, W. MCK. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**. 5, p. 165-166, 1948.

Moraes, M. C. S. **Distribuição de gotas de chuva e a relação Z-R para radar na costa leste do nordeste do Brasil**. 2003. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2003.

Moreira, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2005.

Naghetini, M., Pinto, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte – MG. CPRM, 552p, 2007. ISBN: 978-85-7499-023-1

Pedrosa, H. F. S. **Avaliação do impacto da aplicação das diretrizes do plano diretor de Maceió sobre o escoamento superficial. Estudo de caso: Bacia do Riacho Reginaldo**. 2008.

Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2008.

Pereira Filho, A. J.; Crawford, K. C.; Hartzell, C. Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. **Weather and Forecasting**, v. 13, n 4, p. 1016-1028, 1998.

Pfaffstetter, O. **Chuvas Intensas no Brasil**, 2ª edição, Rio de Janeiro - RJ, DNOS, 419p, 1957.

Rico-Ramirez, M. A., Liguori, S., Schellart, A. N. A. Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modeling. **Journal of Hydrology**. V. 528, p. 17-28. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.057>

Rodrigues, M. T., Rodrigues, B. T., Malheiros, J. M., Amorim, R. F. C., da Silva Jr. The atmospheric model mm5 in the simulation of precipitation in the basins of the urban area Maceió and the alagona forest zone. **Geografia em Atos**. V. 1, N. 15. 2015. ISSN: 1984-1647.

Shinma, T. A. **Avaliação de incertezas na calibração automática do modelo SWMM**. Tese (Doutorado em engenharia hidráulica e saneamento) – Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2015

Shledon, F., Leigh, C., Neilan, W., Newham, M., Polson, C., Hadwen, W. Urbanization: Hydrology, Water Quality, and Influences on Ecosystem Health. **Approaches to Water Sensitive Urban Design**. p. 229-248. 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00011-3>.

Silva Júnior, R. I. **Evolução da urbanização e seu efeito no escoamento superficial na bacia do Riacho Reginaldo, Maceió – AL**. 2009, Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2009.

Silva, F. D. S. **Análise Objetiva da Precipitação Estimada com radar e medida por uma rede telemétrica**. 2006. Dissertação (mestrado em meteorologia). Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2006.

Souza, T. C. T. **Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos HEC-HMs e SWMM – estudo de caso para o núcleo urbano e região periurbana de Muniz Freire**. 2017.

Dissertação (mestrado em desenvolvimento sustentável). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2017.

Tayob, L. J. D. **Determinação da relação entre a intensidade da chuva e refletividade radar no litoral do estado de Alagoas usando disdrômetro a laser**. 2014. Dissertação (mestrado em meteorologia). Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2014.

Teodoro, P. E., Neivock, M. P., Marques, J. R. F., Flores, A. M. F., Rodrigues, C. C. B. Influência de diferentes coeficientes de desagregação na determinação de equações IDF para Aquidauana/MS. **REEC**. V. 9, N. 2, p.1-9. 2014. ISSN: 2179-0612. D.O.I: 10.5216/reec.v9i2.28701.

Tsuji, T. M. **Monitoramento e modelagem das águas de drenagem pluvial no núcleo urbano da bacia do Ribeirão Riacho Fundo, Brasília – DF**. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia ambiental e recursos hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2018.

Tucci, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Editora UFRGS, Porto Alegre - RS, 1995.

Tucci, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Editora da UFRGS/ABRH, 1ª ed. da coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 1998.

Tucci, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas: Saneamento para todos**. Programa de modernização do setor saneamento – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Brasília, 2005.

Veldkamp, T. I. E., Zhao, F., Ward, P. J., Moel, H., Aerts, J. C. J. H., Muller Schmied, H., Portmann, F. T., Masaki, Y., Pokhrel, Y., Liu, X., Satoh, Y., Gerten, D., Gosling S. N., Zaherpour, J., Wada, Y. Human impact parameterizations in global hydrological models improve estimates of monthly discharges and hydrological extremes: a multi-model validation study. **Environmental Research Letters**. V. 13, n. 5. 2018. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab96f/meta>. Acesso em 03 de janeiro de 2019.

VILLANUEVA, A. ALLASIA D.; NEVES M.; TASSI R.; BERNHARDT S.; Iphs1 Manual de Fundamentos. Porto Alegre: UFRGS. 2004.

Zandonadi, L., Acquaotta, F., Fratianni, S., Zavattini, J. A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**. V. 123, N. 3-4, p. 741-756. February 2016. DOI 10.1007/s00704-015-1391-4